

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



TEMA:

**SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE PLASMA FRÍO PARA EL PRETRATAMIENTO
DEL GAS SF₆ EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS SUMERGIBLES.**

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

AUTOR (A):

Luis David Andrango Cevallos

DIRECTOR (A):

Ing. Julio Esteban Guerra Masson MSc.

Ibarra-Ecuador, 2025



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:	100464440-5		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Andrango Cevallos Luis David		
DIRECCIÓN:	Imbabura, Ibarra, Alpachaca, Zumba y Colibrí 11-60		
EMAIL:	ldandrangoc@utn.edu.ec / andrangoluis20@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0993378438

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Simulación de un sistema de plasma frío para el pretratamiento del gas SF ₆ en subestaciones eléctricas sumergibles.
AUTOR (ES):	Andrango Cevallos Luis David
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	17/06/2025
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero(a) Eléctrico(a)
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc. Ing. Julio Esteban Guerra Masson MSc.



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



2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) 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 (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 17 días del mes de junio de 2025

EL AUTOR:

(Firma).....

Luis David Andrango Cevallos

C.I: 1004644405



CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, Julio Esteban Guerra Masson en calidad de director del señor estudiante Andrango Cevallos Luis David certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: “Simulación de un sistema de plasma frío para el pretratamiento del gas SF₆ en subestaciones eléctricas sumergibles”.

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

Ing. Julio Esteban Guerra Masson MSc.
DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



DEDICATORIAS

A Dios y a la Virgen María, por guiarme y no dejarme desamparado durante todo este trayecto.

Dedico este trabajo a mis padres, Luis e Isabel, y a mi hermana Emily, quienes me acompañaron a lo largo de este trayecto, brindándome su apoyo incondicional, su sabiduría, sus consejos y dándome ánimos siempre que lo necesité.

A mi abuelita Fanny, abuelito Manuel, abuelito Luis, tía Gloria, tío Bolívar y tío Oswaldo, quienes, desde donde estén, estoy seguro me ayudaron y acompañaron a lo largo de este camino.



AGRADECIMIENTOS

Primero a Dios y a la Virgen María, por la salud y la vida, por esta presente en las adversidades y ayudarme a superar cada uno de estas.

Agradezco de todo corazón a mis padres, Luis e Isabel, y a mi hermana Emily, por su tiempo, dedicación, esfuerzo, paciencia, comprensión y ayuda sin ustedes no habría podido llegar hasta este punto.

Al Ing. Julio Guerra, director de mi trabajo, y al Ing. Jhonny Barzola, asesor de mi trabajo, por su guía, conocimientos y aportes que me ayudaron a concluir este trabajo de grado.

A mi familia por ser un apoyo incondicional en todo momento.

A Leidy, por ser mi apoyo incondicional en los bueno y malos momentos.

A mis amigos Alexis, Dennis, Francisco, David, Anthony, por estar presentes.



INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I	14
1.1. Problema de investigación.	14
1.1.1. Problemática a investigar	14
1.1.2. Formulación de la pregunta de investigación.....	14
1.2. Objetivos.....	15
1.2.1. Objetivo general	15
1.2.2. Objetivos específicos.....	15
1.3. Alcance y delimitación	15
1.4. Justificación	16
CAPÍTULO II.....	17
MARCO TEÓRICO	17
2.1. Antecedentes	17
2.2. El Gas hexafluoruro de azufre (SF6)	20
2.2.1. Características y propiedades del gas hexafluoruro de azufre (SF6)	20
2.2.2. El SF6 en la Industria, usos y aplicaciones	22
2.2.3. El SF6 en el sector eléctrico	22
2.2.4. Pureza y calidad del gas SF6.....	24
2.2.5. Contaminación del gas SF6.....	25
2.3. Subestaciones eléctricas sumergibles	26
2.3.1. Características de una Subestación:	27
2.3.2. Descripción de una subestación eléctrica sumergible	27
2.3.3. Niveles de voltaje en una subestación eléctrica sumergible	29
2.3.4. Módulos de interruptores	30
2.3.5. Módulos de seccionadores.	31
2.3.6. Seccionadores de puesta a tierra.....	32
2.3.7. Transformadores.....	33
2.3.8. Módulos para conexión	34
2.4 El gas SF6 dentro de las subestaciones eléctricas sumergibles	36
2.5 Sistemas de plasma frío	37
2.5.1 Generación de plasma frío.....	37



2.5.2. Parámetros de operación de un sistema de plasma frío.....	38
2.5.3 Componentes de un sistema de plasma frío	39
2.6 Aplicaciones del plasma frío.....	40
2.6.1. Efectos del plasma frío sobre el gas SF6.....	40
CAPÍTULO III	42
MATERIALES Y MÉTODOS.....	42
3.1. Metodología	42
3.2. Software	45
3.2.1. COMSOL Multiphysics:	45
3.2.2 Módulo de electroestática.....	45
3.2.3. Potencial eléctrico	46
3.2.4. Campo eléctrico.....	46
3.2.3. Módulo de plasma	46
3.2.4. Modelamiento del sistema de plasma dentro del software.....	47
3.3. Fundamentos matemáticos en la modelación del sistema de plasma frío.....	49
3.3.1. Ecuaciones matemáticas de los módulos dentro del software	49
3.3.2. Electroestática	49
3.3.3. Plasma	50
3.4. Definición de los materiales dentro software	52
3.5. Propiedades del gas SF6 en condiciones estándar	53
3.6 Propiedades de los contaminantes a aplicarse en el gas SF6.....	53
3.4.1 Vapor de Agua (Humedad)	53
3.4.2 Partículas de polvo (Contaminantes Sólidos)	54
3.4.3 Aceite	55
CAPITULO IV	57
RESULTADOS Y ANÁLISIS	57
4.1 Comportamiento eléctrico predeterminado del gas SF6.....	57
4.1.1 Potencial eléctrico	57
4.1.2 Campo eléctrico.....	58
4.2 Comportamiento eléctrico del gas SF6 contaminado con vapor de agua	59
4.2.1 Potencial eléctrico	59



4.2.2 Campo eléctrico.....	60
4.3 Comportamiento eléctrico del gas SF6 contaminado por partículas de polvo.....	61
4.3.1 Potencial eléctrico	62
4.3.2 Campo eléctrico.....	63
4.4 Comportamiento eléctrico del gas SF6 contaminado con aceite	64
4.4.1 Potencial eléctrico	65
4.4.2 Campo eléctrico.....	66
4.5 Pretratamiento del gas SF6 mediante el sistema de plasma frío	67
4.6 Comportamiento eléctrico del gas SF6 pretratado con plasma frío (vapor de agua)..	68
4.6.1 Potencial eléctrico	68
4.6.2 Campo eléctrico.....	69
4.7 Comportamiento eléctrico del gas SF6 pretratado con plasma frío (partículas de polvo)	70
4.7.1 Potencial eléctrico	71
4.7.2 Campo eléctrico.....	72
4.8 Comportamiento eléctrico del gas SF6 pretratado con plasma frío (aceite).....	73
4.8.1 Potencial eléctrico	74
4.8.2 Campo eléctrico.....	75
4.9 Análisis del comportamiento eléctrico del gas SF6: predeterminado, contaminado y pretratado	76
Conclusiones.....	78
Recomendación	79
Referencias bibliográficas.	80
ANEXOS	84



INDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Estructura de la molécula del gas SF₆. 20

Fig. 2. Porcentaje del uso del gas SF₆ en el sector eléctrico. 24

Fig.4. Módulos de interruptores: (a) Interruptor (b) Ubicación del componente 30

Fig.5. Partes y posiciones de los interruptores: (a) Interruptor en posición Cerrado (b) Apertura: Contacto principal abierto (c) Apertura: Contacto de arco abierto (d) Interruptor en posición Abierto [41]. 31

Fig. 6. Módulos de seccionadores: a) Seccionador (b) Ubicación del componente 32

Fig.7. Seccionadores: a) De puesta a tierra, b) Ubicación del componente 33

Fig. 9. Transformadores de: (a) De corriente, (b) De voltaje, (c) Ubicación de los componentes [42]. 34

Fig. 10. Módulos de conexión: a) Conexión para cable, (b) Esquema de conexión. 35

Fig. 11. Módulo de: a) Conexión para transformador b) Esquema de conexión. 36

Fig. 12. Módulo de: a) Conexión SF₆ / Aire b) Esquema de conexión. 36

Fig. 15. Metodología empleada en el trabajo 43

Fig. 14. Potencial eléctrico predeterminado del gas SF₆. 58

Fig. 15. Campo eléctrico predeterminado del gas SF₆. 59

Fig. 16. Potencial eléctrico del gas SF₆ contaminado con vapor de agua. 60

Fig. 17. Campo eléctrico del gas SF₆ contaminado con vapor de agua. 61

Fig. 18. Potencial eléctrico del gas SF₆ contaminado con partículas de polvo. 63

Fig. 19. Campo eléctrico del gas SF₆ contaminado con partículas de polvo. 64

Fig. 20. Potencial eléctrico del gas SF₆ contaminado con aceite. 66

Fig. 21. Campo eléctrico del gas SF₆ contaminado con aceite. 67

Fig. 22. Potencial eléctrico del gas SF₆ pretratado, contaminado con vapor de agua. 69

Fig. 23. Campo eléctrico del gas SF₆ pretratado, contaminado con vapor de agua. 70

Fig. 24. Potencial eléctrico del gas SF₆ pretratado, contaminado con partículas de polvo.. 72

Fig. 25. Campo eléctrico del gas SF₆ pretratado, contaminado con partículas de polvo. 73

Fig. 26. Potencial eléctrico del gas SF₆ pretratado, contaminado con aceite. 74

Fig. 27. Campo eléctrico del gas SF₆ pretratado, contaminado con aceite. 75



INDICE DE TABLAS

TABLA 1. Características y propiedades del SF6..... 21

TABLA 2. Usos y Aplicaciones del SF6 en la Industria..... 22

TABLA 3. Principales contaminantes del gas..... 26

TABLA 4. Niveles de voltaje en subestaciones eléctricas sumergibles [39, 40]. 30

TABLA 6. Parámetros de operación de un sistema de plasma frio [46, 47]. 39

TABLA 6. Parámetros de configuración del sistema de plasma frio en la simulación. 48

TABLA 7. Propiedades predeterminadas del gas SF6 en el software..... 53

TABLA 8. Propiedades del vapor de agua en el software..... 54

TABLA 9. Propiedades de las partículas de polvo en el software. 55

TABLA 10. Propiedades del aceite en el software..... 56

TABLA 11. Análisis del comportamiento eléctrico del gas SF6. 76



RESUMEN

En el presente trabajo se analiza el efecto de un sistema de plasma frío como método de pretratamiento del gas hexafluoruro de azufre (SF_6) contaminado, el cual fue empleado para restaurar las propiedades dieléctricas del gas para su uso en subestaciones eléctricas sumergibles. La simulación se enfocó en tres contaminantes a los que el SF_6 es más vulnerable durante su transporte y almacenamiento: vapor de agua, partículas de polvo y aceite, analizando el comportamiento eléctrico del gas antes y después del pretratamiento. En la metodología se emplea simulaciones en el software computacional seleccionado, en el cual se utilizaron los módulos de Electrostática y Plasma.

Durante el trabajo fueron modeladas una serie de simulaciones en el cual el dominio donde se ubicó el SF_6 es contaminado agregando dominios con los materiales contaminantes seleccionados y luego sometido a un sistema de plasma frío, donde se analizaron los cambios en el potencial eléctrico y el campo eléctrico. Las simulaciones se desarrollan en condiciones temporales, permitiendo observar el efecto del plasma de parcial disminución o reducción del material contaminante en los dominios donde fueron ubicados.

Los resultados mostraron que el plasma frío actúa significativamente a la mejora de las condiciones dieléctricas del SF_6 . La densidad del vapor de agua es reducida, el aceite es reducido a una menor concentración, y las partículas sólidas presentan una mediana modificación superficial en su concentración. Una vez pretratado el gas se observó una disminución del campo eléctrico y superficie eléctrica, similares a las mostradas por el gas predeterminado. Los resultados demostraron que el pretratamiento con plasma frío es una elección válida para reducir contaminantes del gas SF_6 garantizando su utilidad como medio aislante dentro de las subestaciones eléctricas sumergibles.

Palabras clave: plasma frío, hexafluoruro de azufre (SF_6), pretratamiento, contaminantes, propiedades dieléctricas.



ABSTRACT

In the present study examines the effect of a cold plasma system as a pre-treatment method for contaminated sulfur hexafluoride (SF_6), aiming to restore its dielectric properties for use in submerged electrical substations. The simulation focused on three key contaminants to which SF_6 is particularly vulnerable during transportation and storage: water vapor, dust particles, and oil. The electrical behavior of the gas was analyzed both before and after undergoing the pre-treatment process. The methodology was based on simulations conducted using the selected computational software, specifically employing the Electrostatics and Plasma modules.

A series of simulations were developed in which the domain containing the SF_6 was intentionally contaminated by introducing regions with the selected pollutants. The contaminated domain was then subjected to a cold plasma system, and changes in the electric potential and electric field were evaluated. These simulations were performed under time-dependent conditions, allowing for the observation of the plasma's effect in partially reducing or neutralizing the presence of contaminants in the affected regions.

The results demonstrated that cold plasma significantly contributes to improving the dielectric conditions of SF_6 . The density of water vapor was notably reduced, the concentration of oil decreased, and solid particles exhibited a moderate surface modification in their concentration. After pre-treatment, a reduction in both the electric field and electric surface potential was observed, reaching levels similar to those of uncontaminated SF_6 . These findings confirm that cold plasma pre-treatment is a valid and effective approach to mitigating contaminants in SF_6 , thereby ensuring its reliability as an insulating medium in submerged electrical substations.

Keywords: cold plasma, sulfur hexafluoride (SF_6), pre-treatment, contaminants, dielectric properties.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Tema.

Simulación de un sistema de plasma frío para el pretratamiento del gas SF₆ en subestaciones eléctricas sumergibles.

El problema.

1.1. Problema de investigación.

1.1.1. Problemática a investigar

El gas SF₆ es ampliamente utilizado como gas aislante en subestaciones eléctricas sumergibles, donde requiere una alta confiabilidad en la separación y aislamiento de circuitos eléctricos para prevenir descargas eléctricas no deseadas y garantizar la seguridad de las operaciones. Bajo ese contexto, este gas es conocido por ser inodoro, incoloro, no inflamable y no tóxico, lo que convierte en una elección ideal para aplicaciones donde se necesitan propiedades dieléctricas excepcionales. Por estas características el SF₆ resulta el principal fluido utilizado en los equipos dentro de estas subestaciones.

El problema radica en que el gas SF₆ puede verse afectado por la contaminación debido a diversas razones, como su uso, transporte, manejo inadecuado y posibles fugas en los equipos de contención. Esta contaminación puede comprometer el desempeño como aislante eléctrico, lo que podría resultar en fallas en los equipos, interrupciones eléctricas, además de generar compuestos tóxicos y corrosivos que representan riesgos para la salud humana y el medio ambiente. Resultando en costos significativos de mantenimiento y recuperación. Esta situación se agrava en las subestaciones eléctricas sumergible, donde las condiciones para llevar a cabo las labores son limitadas y peligrosas para el personal.

1.1.2. Formulación de la pregunta de investigación

¿Cómo puede el gas SF₆ preservar sus propiedades dieléctricas para ser utilizado en una subestación eléctrica sumergible mediante el pretratamiento en un sistema de plasma frío?



1.2. Objetivos.

1.2.1. *Objetivo general*

Simular un sistema de plasma frío, para el pretratamiento del gas SF₆ para su uso en subestaciones eléctricas sumergibles, mediante el uso de software computacional.

1.2.2. *Objetivos específicos*

- Describir las propiedades dieléctricas del gas SF₆ dentro de las subestaciones eléctricas sumergibles, considerando la capacidad de aislamiento y resistencia a la formación de arcos eléctricos.
- Modelar el sistema de plasma frío para el pretratamiento del gas SF₆.
- Simular el sistema de plasma frío para el pretratamiento del gas SF₆.

1.3. Alcance y delimitación

El proyecto tiene como objetivo realizar la simulación de un sistema de plasma frío, el cual será empleado para pretratar el gas, hexafluoruro de azufre (SF₆) antes de ser utilizado en subestaciones eléctricas sumergibles. Inicialmente se realizará una investigación bibliográfica en revistas científicas, artículos científicos, libros, tesis y otros documentos que permitan realizar un análisis de las propiedades y usos que recibe el gas SF₆ dentro de subestaciones eléctricas sumergibles. Posterior a ello, se realizará un modelo matemático utilizando el método de elementos finitos para proceder al modelamiento del dispositivo de plasma frío.

Finalmente, para validar los modelos se realizará una simulación en el software computacional COMSOL Multiphysics, en el que se analizarán las características del gas (incolore e inodoro, no inflamable, alta densidad, propiedades dieléctricas, composición química y baja toxicidad), juntos con sus contaminantes (humedad, contaminantes sólidos y aceites) y como afectan en su comportamiento dentro de las subestaciones eléctricas sumergibles.



1.4. Justificación

La adopción del gas SF₆ en subestaciones eléctricas sumergibles se debe a la eficaz capacidad de aislamiento eléctrico en subestaciones eléctricas. No obstante, el uso del gas presenta desafíos sobre el manejo, gestión, preocupaciones de seguridad y mantenimiento, dado que es un gas que depende en mayor medida de sus propiedades dieléctricas para asegurar su correcta operatividad en distintos entornos, añadiendo que también es un potente gas de efecto invernadero sujeto a regulaciones ambientales más estrictas, con posibles consecuencias adversas para la salud humana y el medio ambiente en caso de liberación accidental.

En ese sentido, el desarrollo de un sistema de plasma frío para el pretratamiento del gas SF₆ surge como una solución para abordar estos desafíos, permitiendo gestionar de manera segura y sostenible el uso de este gas, ofrece varios beneficios como la eliminación o disminución de contaminantes, reduciendo la probabilidad de formación de fallas eléctricas y contar con una mejora general sobre la seguridad operativa del sistema.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

En las últimas décadas, el Sector Eléctrico Ecuatoriano ha experimentado un notable crecimiento en la producción de electricidad, aumentando de 1258 GWh en 2004 a 273186 GWh en 2018 datos considerados por el Balance Energético Nacional en el primer semestre del 2019 [1]. Este incremento resalta la creciente importancia de la energía eléctrica en el país subrayando el papel que juega en el servicio público, donde se sujeta a las regulaciones ambientales establecidas en la Ley Orgánica de Energía Eléctrica [2].

El hexafluoruro de azufre (SF_6) ha desempeñado un papel esencial en el ámbito eléctrico por más de cuarenta años, principalmente por su alta eficacia como aislante y su capacidad para interrumpir arcos eléctricos. Este gas se utiliza en equipos de alta potencia como transformadores, interruptores y subestaciones encapsuladas tipo GIS (Gas Insulated Substation) [3]. No obstante, en tiempos recientes, la comunidad científica ha manifestado inquietudes crecientes respecto al SF_6 debido a sus posibles efectos negativos sobre el clima global. Se trata de un gas con una permanencia en la atmósfera estimada en 3200 años y con un potencial de calentamiento global que supera en 22,800 veces al del dióxido de carbono (CO_2) [4]. Es importante destacar que el uso de SF_6 es predominante en las tecnologías aplicadas a subestaciones eléctricas sumergibles. Además de este tipo de instalaciones, también se emplea en sectores industriales diversos, como centros hospitalarios, edificios, centros de datos y sistemas de distribución eléctrica. Actualmente, existen más de 30 millones de interruptores de media tensión que operan con SF_6 en todo el mundo [5].

En el ámbito internacional, las subestaciones eléctricas sumergibles tienen una presencia significativa en países con alta densidad energética y escasez de espacio en zonas urbanas. Naciones como Japón, Alemania, Estados Unidos, China y varios países del continente europeo presentan una concentración considerable de estas infraestructuras, impulsadas por el nivel tecnológico avanzado y la demanda de sistemas eléctricos complejos [6].



En América Latina se han llevado a cabo análisis técnico-económicos sobre el uso de tecnología GIS que emplea hexafluoruro de azufre (SF_6) en el diseño de estaciones de 60 kV. Estos estudios han evaluado parámetros eléctricos habituales como la corriente de cortocircuito, la corriente nominal y la corriente en barras, así como factores relacionados con el espacio requerido, las dimensiones del equipo, el mantenimiento, y los costos asociados a la adquisición e instalación. Con base en estos elementos, se buscaron alternativas que optimicen el rendimiento de los sistemas. Entre las ventajas destacadas de las subestaciones GIS se encuentran la necesidad de menor superficie para su implementación, un impacto visual limitado, facilidad y rapidez en el montaje, requerimientos mínimos de mantenimiento, alta seguridad operativa, eficiencia y confiabilidad, una vida útil prolongada, adaptabilidad, y conformidad con las regulaciones medioambientales [7].

En el contexto ecuatoriano, la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A. (CENTROSUR) hace uso del SF_6 en ciertos equipos de seccionamiento instalados en subestaciones. Sin embargo, hasta el momento, el Ministerio del Ambiente del Ecuador no ha establecido normas específicas para la gestión integral de este gas en el sector eléctrico, ni existen manuales técnicos o modelos estructurados que orienten su tratamiento [8].

La supervisión del SF_6 es esencial en todos los casos donde se emplea, en especial cuando actúa como medio aislante en instalaciones GIS. En estas aplicaciones, el SF_6 cumple funciones tanto de aislamiento como de enfriamiento en transformadores de potencia, además de servir como agente extintor de arcos en interruptores de media y alta tensión. Usualmente, el gas se encuentra confinado en sistemas herméticos altamente seguros, donde las fugas son prácticamente inexistentes. El monitoreo de este gas comienza con la medición de su densidad, es decir, la cantidad de moléculas presentes en un volumen determinado, lo cual es clave para asegurar sus propiedades dieléctricas [9]. Este parámetro se controla mediante densímetros equipados con contactos eléctricos que permiten detectar niveles inadecuados de presión dentro del sistema. Es importante tener presente que esta presión es crítica para garantizar el comportamiento eléctrico adecuado de los dispositivos. Cabe señalar que no se



refiere a la presión relativa del compartimiento, sino que se adapta al propósito específico del equipo en el que se utiliza el compuesto [9, 10].

Investigaciones previas [11], han demostrado que, para garantizar la seguridad del personal, el correcto funcionamiento de los equipos, la reducción de costos en mantenimiento, la calidad en la prestación del servicio y el cumplimiento de los compromisos ambientales, es indispensable conservar la pureza del gas dentro de los parámetros definidos. La presencia de impurezas en la composición del SF₆ puede comprometer sus propiedades dieléctricas. Si bien este gas es inerte en condiciones normales, cuando alcanza temperaturas superiores a los 150 °C puede experimentar reacciones químicas con diversos compuestos.

En estos escenarios, pequeñas cantidades de materiales metálicos pueden volatilizarse y reaccionar con los átomos de flúor, generando residuos en forma de polvo blanco. Estos productos no representan un riesgo funcional, ya que mantienen buenas propiedades dieléctricas y no afectan el rendimiento de los sistemas. El problema surge cuando hay presencia de humedad u oxígeno en el interior del compartimiento, lo cual puede dar lugar a la formación de fluoruros extremadamente agresivos, corrosivos y tóxicos [11, 12]. Como elemento central en el diseño de subestaciones eléctricas sumergibles [13], el SF₆ destaca por su notable capacidad de aislamiento eléctrico y por ofrecer una excelente resistencia a los arcos.

Estas cualidades permiten construir equipos más compactos, con menor consumo de materiales, lo que mejora tanto la seguridad como la vida útil de los sistemas. Cuando se opera bajo presiones elevadas, este gas presenta una rigidez dieléctrica que supera en 2.5 veces a la del aire. En aplicaciones típicas, el SF₆ se utiliza a presiones que oscilan entre tres y cinco veces la atmosférica, lo que incrementa su rigidez dieléctrica hasta alcanzar valores diez veces superiores a los del aire, gracias a su naturaleza altamente electronegativa. Esta característica le permite capturar electrones libres, formando iones negativos de baja movilidad. Las subestaciones encapsuladas tipo GIS se implementan principalmente en zonas donde las limitaciones de espacio son críticas, y además presentan la ventaja de requerir un mantenimiento mínimo. La tecnología basada en SF₆ ha sido utilizada de forma



exitosa durante más de cuatro décadas, demostrando un rendimiento fiable y sostenible en múltiples aplicaciones [14].

2.2. El Gas hexafluoruro de azufre (SF_6)

El hexafluoruro de azufre (SF_6) es un compuesto inorgánico cuya fórmula molecular es SF_6 . En condiciones estándar de presión y temperatura, este gas presenta propiedades que lo hacen especialmente adecuado como aislante eléctrico. Entre sus características más destacadas se encuentra su densidad, ya que es aproximadamente cinco veces más pesado que el aire. Se trata de una molécula no polar e hipervalente, con una solubilidad bastante baja en agua, tal como se muestra en la Fig.1 [15, 16].

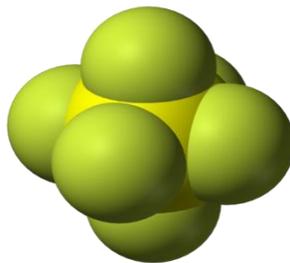


Fig. 1. Estructura de la molécula del gas SF_6 .

2.2.1. Características y propiedades del gas hexafluoruro de azufre (SF_6)

El hexafluoruro de azufre (SF_6) está constituido por una molécula compuesta de un átomo de azufre central unido a seis átomos de flúor, configurando una estructura octaédrica en la que cada vértice está ocupado por un átomo de flúor. Esta disposición representa la valencia máxima del azufre, y su elevada estabilidad química se debe a la formación de seis enlaces covalentes. Las propiedades fundamentales de esta molécula se resumen en la TABLA 1.

El SF_6 es compatible con la mayoría de los materiales aislantes y conductores comúnmente empleados en los sistemas eléctricos, sin generar productos como carbón, polímeros u otros residuos conductores durante procesos de arco. Además, se comporta como una sustancia químicamente estable. Para facilitar su transporte, suele comprimirse y almacenarse en forma de gas licuado. A nivel del mar, presenta una densidad de 6.13 g/L [15-17].



Cuando se encuentra en condiciones normales de presión y temperatura (22.77 atm y 20 °C), el SF₆ presenta las siguientes características: inodoro, incoloro, no tóxico, muy estable, no inflamable. Estas cualidades, sumadas a sus destacadas propiedades dieléctricas, hacen del SF₆ un agente extintor sumamente eficaz, ampliamente utilizado en sistemas eléctricos, aunque también tiene aplicaciones en otros sectores industriales. Debido a su naturaleza fuertemente electronegativa, actúa como excelente aislante eléctrico: sus moléculas capturan electrones libres y forman iones negativos de baja movilidad, lo cual resulta muy eficaz para prevenir las avalanchas electrónicas que pueden provocar fallas en dispositivos eléctricos, especialmente en subestaciones sumergibles [17].

Físicas	Químicas	Termodinámicas	Eléctricas
Estado físico: líquido y Peso gaseoso.	Peso molecular 146.05 g/mol.	Temperatura critica 45.55 °C.	Alta afinidad o electrónica electronegatividad.
Densidad de vapor	Gas estable e inerte en condiciones normales	Presión critica 37.59 bares.	Alta frecuencia dieléctrica y potencia 7.5 - 10 veces mayor que equipos en aire.
Gas estable e inerte Presión crítica 37.59 veces mayor a la del aire) 6,16 Kg/m ³ a 20°C y presión ambiente.	Disociación y recombinación de las moléculas de SF ₆ a altas temperaturas.	Punto triple -50.8 °C y 2.26 bares	Constante dieléctrica 1.002 a 25°C.
Gas incoloro, inodoro, las moléculas de no inflamable, no corrosivo y no tóxico en estado puro.	Formación de subproductos por efectos del arco eléctrico y reacciones con el aire y vapor de agua.	Conductividad térmica 3,36x10 ⁻⁵ Cal/(s)(cm)(°C) (30°C), Capacidad de calor molar 97.23 J/mol°K.	Alta resistencia dieléctrica ante el efecto de la descomposición SF ₆

TABLA 1. Características y propiedades del SF₆.



2.2.2. El SF₆ en la Industria, usos y aplicaciones

A partir de su descubrimiento en el siglo XX, el SF₆ ha sido producido de forma Industrial y aplicado en diferentes áreas, tal como se presenta en la tabla, en base a información de varias fuentes bibliográficas, estos usos son detallados en la TABLA 2.

Área	Uso y aplicaciones	Fuente bibliográfica
Eléctrica	Medio aislante, medio de extinción del arco eléctrico.	([18],[19])
Metalurgia	Desgasificación del aluminio, purificación y fusión del magnesio.	([20],[21])
Electrónica	Proceso de plasma en la manufactura de semiconductores.	([22],[23])
Ambiental	Trazador de estudios ambientales.	([24])
Medicina	Detección de problemas de salud.	([25],[26], [27])

TABLA 2. Usos y Aplicaciones del SF₆ en la Industria.

2.2.3. El SF₆ en el sector eléctrico

El uso del hexafluoruro de azufre (SF₆) en la industria eléctrica se remonta a 1937, cuando la empresa General Electric inició investigaciones orientadas a evaluar su aplicación industrial. Fue en ese contexto que se propuso su utilización en la fabricación de equipos eléctricos, destacando su superior rigidez dieléctrica en comparación con el aire. Tres décadas más tarde, en 1967, se introdujeron en el mercado los primeros interruptores diseñados específicamente para operar con SF₆, destinados a sistemas de media y alta tensión.



Estos equipos comenzaron a reemplazar gradualmente a los interruptores tradicionales que empleaban aire comprimido [28]. No obstante, el empleo de SF₆ en equipos eléctricos de potencia no está exento de inconvenientes.

Bajo condiciones de esfuerzo eléctrico, tales como la aparición de chispas, el arqueo o el efecto corona, y en presencia de contaminantes como la humedad o el aire, este gas puede descomponerse parcialmente. Como resultado, se generan subproductos que presentan características tóxicas y corrosivas, los cuales representan un riesgo potencial para la salud de los técnicos que realizan tareas de mantenimiento. En la siguiente sección se detallarán las causas y condiciones que favorecen la descomposición del SF₆ durante su operación normal en sistemas eléctricos de potencia [29-31].

- Usos del gas SF₆ en el sector eléctrico

Desde inicios de la década de 1960, el hexafluoruro de azufre (SF₆) ha sido empleado exitosamente en el ámbito eléctrico, particularmente en sistemas de transmisión de alta tensión (AT) y distribución de media tensión (MT). Entre los equipos que comúnmente utilizan este gas se incluyen subestaciones encapsuladas, unidades principales de anillo, disyuntores automáticos, transformadores y cables. Aunque existen otros gases con propiedades comparables, como el helio (He), nitrógeno (N₂), dióxido de carbono (CO₂) y clorofluorocarbonos (CFC), ninguno logra combinar de forma simultánea una alta capacidad de aislamiento con un buen desempeño en la conmutación eléctrica. Además, muchos de estos compuestos presentan inconvenientes relacionados con su estabilidad a largo plazo, toxicidad o elevados costos de producción [32].

En respuesta a los requerimientos del sector eléctrico, la industria ha mantenido el uso del SF₆ durante más de cuatro décadas, principalmente por sus sobresalientes propiedades como aislante [3]. Este gas también facilita la supresión del arco eléctrico, lo cual ha permitido diseñar sistemas más compactos para la apertura y cierre de contactos eléctricos [33].

A nivel global, es común encontrar el SF₆ en subestaciones eléctricas, especialmente en equipos de potencia como interruptores, transformadores y subestaciones tipo GIS [34]. El empleo de este gas no solo permite operar a tensiones más elevadas y manejar eficazmente



la apertura y cierre de circuitos, sino que también favorece la miniaturización de los sistemas [35]. Esta característica ha sido clave en la evolución tecnológica de los equipos, permitiendo reemplazar el aceite y el aire en funciones tanto de aislamiento como de extinción de arco eléctrico [3]. Actualmente, se estima que alrededor del 80 % del SF₆ producido en el mundo es destinado a la industria de la energía eléctrica, lo cual se refleja en el resumen porcentual que se muestra en la Fig. 2.

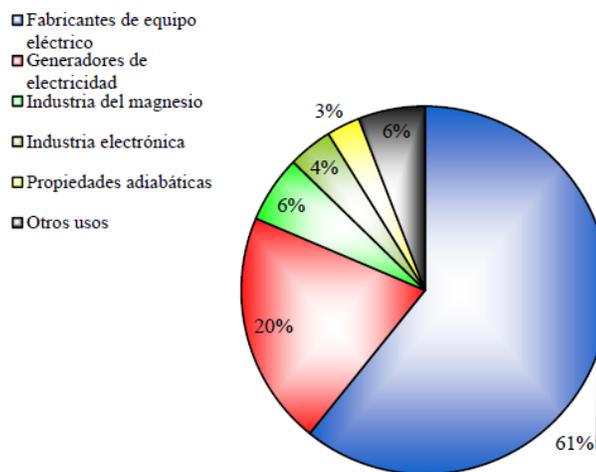


Fig. 2. Porcentaje del uso del gas SF₆ en el sector eléctrico.

2.2.4. Pureza y calidad del gas SF₆

Para garantizar un desempeño óptimo y confiable del hexafluoruro de azufre (SF₆), es fundamental mantener elevados niveles de pureza del gas. La presencia de contaminantes como partículas de humedad o productos de corrosión en los equipos puede afectar de manera significativa sus propiedades dieléctricas. Estas impurezas no solo reducen la capacidad de aislamiento eléctrico del gas, sino que también comprometen su efectividad en otras aplicaciones previamente mencionadas, como la extinción de arcos eléctricos o la estabilidad térmica y química dentro de dispositivos encapsulados [36].



2.2.5. Contaminación del gas SF₆

El hexafluoruro de azufre (SF₆) se caracteriza por ser un gas inerte, altamente estable a nivel químico y con excelentes propiedades dieléctricas, lo cual lo posiciona como uno de los aislantes más eficaces para aplicaciones en equipos utilizados en subestaciones eléctricas sumergibles. No obstante, la eficacia de estas propiedades está directamente relacionada con la pureza del gas. Durante las etapas de transporte, almacenamiento o manipulación, existe el riesgo de incorporación de impurezas que pueden alterar sus características eléctricas y químicas [36].

Entre los principales contaminantes que pueden afectar la integridad del SF₆ se encuentran los detallados en la TABLA 3, los cuales pueden introducirse a través de cilindros deteriorados, conexiones y válvulas contaminadas, residuos en los sistemas de llenado, o por contacto con ambientes no controlados durante su uso [36, 37]. De acuerdo con [38], la presencia de cualquiera de estos compuestos en el gas puro es suficiente para considerarlo contaminado, lo que genera variaciones en su comportamiento dieléctrico y, por tanto, afecta su rendimiento dentro de las subestaciones eléctricas sumergibles.

Tipo de Contaminante	Ejemplos de Sustancias	Efectos esperados del comportamiento del gas
Humedad	Vapor de agua (H ₂ O)	Disminuye la rigidez dieléctrica del gas
Aire / Gases atmosféricos	N ₂ , O ₂ , CO ₂	Reduce la pureza del SF ₆ , afecta el aislamiento
Productos de descomposición	SO ₂ , SOF ₂ , HF, SOF ₄ , SF ₄ , SO ₂ F ₂	Resultado de descargas internas, corrosivos y conductivos
Compuestos metálicos	CuF ₂ , WO ₃ , AlF ₃	Proviene de la reacción del SF ₆ con materiales internos
Partículas sólidas	Carbón, cobre, polvo metálico	Actúan como puntos de ionización o descarga parcial



Lubricantes / Aceites	Derivados de mantenimiento o fugas	Pueden formar películas conductoras y bajar la rigidez
-----------------------	------------------------------------	--

TABLA 3. Principales contaminantes del gas SF₆ [34, 36, 38, 39].

- Porcentajes de contaminantes en el gas SF₆

La contaminación en el gas no ocurre de manera uniforme, y esta dependerá de dos factores los cuales son: el tipo de contaminante y el porcentaje del contaminante que se encuentra presente.

Por un lado, algunos contaminantes como los presentados en la TABLA 3, tienden a estar presentes en concentraciones bajas debido a su propia naturaleza física (como los vapores o trazas de humedad) lo cual daría como resultado una afectación localizada y leve que puede no comprometer significativamente la estabilidad de composición del gas, o por los mecanismos por los cuales ingresan al sistema. Otros pueden estar en mayor proporción si provienen de procesos mecánicos o fallas técnicas (como derrames de aceite o acumulación de partículas) estos contaminantes tendrán una cobertura mayor del dominio por parte del contaminante representando un porcentaje más alto, asociado a una alteración más profunda y generalizada de las propiedades dieléctricas del gas. Además del porcentaje que tendrá el contaminante, la forma y tamaño con que se representan estos contaminantes al interior del gas están directamente relacionados con su composición y características físicas [40]. Por ejemplo, sustancias con gran capacidad de dispersión o que se encuentran en estado gaseoso tienden a ocupar zonas pequeñas y distribuidas. En cambio, materiales más densos, viscosos o sólidos pueden concentrarse en regiones más grandes o compactas.

2.3. Subestaciones eléctricas sumergibles

De acuerdo a [32], una subestación eléctrica sumergible es una instalación especializada de tipo compacto, concebida para ejecutar funciones de transformación, distribución y protección dentro de un sistema eléctrico, cuya localización se encuentra total o parcialmente por debajo del nivel del terreno, o bien en sectores expuestos a riesgos de inundación.



A diferencia de las subestaciones tradicionales, su característica distintiva radica en la utilización de equipos completamente sellados y encapsulados, lo que garantiza un funcionamiento seguro, continuo y con alta confiabilidad operativa. Estas subestaciones son comúnmente implementadas en áreas urbanas con alta densidad poblacional, regiones costeras, zonas industriales estratégicas o emplazamientos donde las limitaciones de espacio, normativas medioambientales o requisitos estéticos impiden el desarrollo de instalaciones aéreas convencionales.

Para asegurar su operatividad eficiente en condiciones de espacio restringido, los elementos clave del sistema como transformadores, interruptores automáticos, seccionadores y unidades de conexión se integran en módulos compactos sellados con gas SF₆. Este gas actúa simultáneamente como medio de aislamiento dieléctrico y como agente extintor del arco eléctrico durante las maniobras de conmutación. [32, 41].

2.3.1. Características de una Subestación:

- a) Simplicidad en el sistema, al cual se conectará la subestación construyendo un nodo
- b) El mantenimiento se debe realizar fácilmente; sin interrupción del servicio, o peligro para el personal de operación.
- c) Se debe tener disponibilidad de arreglos alternativos; en el caso de salidas de servicio, o fallas en algunos equipos.
- d) El arreglo del equipo, no debe limitar la expansión, y/o aumento, en el crecimiento de la carga, hasta un valor determinado.
- e) Debido a que, de hecho, cada parte del equipo, constituye un punto débil; de manera que, en los casos necesarios se debe considerar la posibilidad de usar equipo adicional para cubrir posibles contingencias.
- f) La instalación debe ser lo más económica posible.

2.3.2. Descripción de una subestación eléctrica sumergible

Las subestaciones GIS contienen sus componentes bajo tensión aislados con gas hexafluoruro de azufre (SF₆), en lugar de emplear aire como medio aislante, como sucede en



las subestaciones AIS (Aisladas en Aire). Cada elemento de alta tensión, incluidas las barras principales o colectoras, se encuentra encerrado individualmente en una carcasa metálica, la cual se mantiene presurizada con gas SF₆ a una presión superior a la atmosférica. Esto permite que cada equipo constituya un módulo independiente, que posteriormente puede ser acoplado tanto mecánica como eléctricamente con otros, creando diferentes configuraciones posibles. Los módulos de equipos y los conjuntos de barras principales o colectoras se enlazan mediante bridas atornilladas y selladas.

Entre estos módulos, se utilizan aisladores cónicos de resina, los cuales, además de sostener las barras conductoras, actúan como barreras herméticas al gas SF₆. Esto impide la contaminación del gas en situaciones de apertura de interruptores ante fallas, y al mismo tiempo bloquea la propagación de dichas fallas al resto de la subestación.

Las carcasas metálicas suelen fabricarse en aluminio, material ampliamente usado, o en acero. El aluminio, además de aligerar el peso total de la subestación, presenta una buena resistencia frente a la contaminación ambiental y la degradación del gas SF₆ ocasionada por arcos eléctricos. Gracias a esto, las envolventes de aluminio no requieren protección interna adicional, lo que también minimiza el riesgo de formación de partículas no deseadas [32]. Para absorber dilataciones térmicas y ajustar tolerancias de montaje, se incorporan entre módulos especialmente en las prolongaciones de las juntas de dilatación tipo fuelle, las cuales permiten dichos desplazamientos sin comprometer la estanqueidad del gas. Los conductores internos de alta tensión presentes en cada módulo son barras de sección circular fabricadas en cobre o aluminio. Estas se acoplan mediante contactos de presión, garantizando continuidad eléctrica, compensando dilataciones térmicas y posibles desalineaciones angulares, con el fin de no transmitir tensiones a los aisladores que las soportan.

Todas las carcasas metálicas de los diferentes módulos están conectadas a tierra por ambos extremos, debiendo verificarse su continuidad eléctrica en toda la subestación. Cuando fluye corriente a través de la barra conductora, se induce una tensión en la carcasa metálica, fenómeno similar al que ocurre en un transformador de corriente [32, 41].



2.3.3. Niveles de voltaje en una subestación eléctrica sumergible

Las subestaciones eléctricas sumergibles funcionan bajo diversos niveles de voltaje, en función del rol que desempeñan dentro del sistema eléctrico. Aunque estas instalaciones están diseñadas para operar en condiciones particulares, como espacios limitados y módulos diferenciados, los niveles de tensión no se determinan al azar; responden a los requerimientos operativos de cada módulo, según la etapa del sistema eléctrico en la que se integran (transmisión, distribución o alimentación local).

Los niveles de voltaje que se pueden encontrar en una subestación sumergible abarcan desde baja tensión (empleada para la conexión final con los usuarios) hasta media tensión, que constituye el intervalo más habitual en este tipo de infraestructura, e incluso, en ciertos escenarios, alta tensión si se necesita enlazar con redes primarias. Estos valores están reflejados en la TABLA 4.

La selección de un voltaje determinado depende del tipo de demanda energética, la localización de la subestación y su vinculación con otros elementos del sistema eléctrico. En el caso particular de las subestaciones sumergibles, los niveles de tensión más frecuentes se sitúan entre los 12 kV y 36 kV, especialmente en etapas de distribución primaria, donde el gas SF₆ se emplea tanto en los módulos de protección como en los transformadores de la instalación.

Nivel de Tensión	Rango Común	Equipos Internos Asociados	Uso dentro de la subestación
Alta Tensión	36 kV – 72.5 kV	Interruptores y seccionadores.	Entrada de energía desde una red principal
Media Tensión	7.2 kV – 36 kV	Transformadores, módulos de interruptores, puesta a tierra, de conexión	Distribución interna y conexión entre módulos



Baja Tensión	120 V – 600 V	Salidas de transformadores.	Salida final hacia consumidores residenciales, comerciales, etc
--------------	---------------	-----------------------------	---

TABLA 4. Niveles de voltaje en subestaciones eléctricas sumergibles [42, 43].

2.3.4. Módulos de interruptores

Los interruptores empleados en las subestaciones actuales operan bajo el mismo principio que los utilizados en las AIS: la autocompresión. Cuando ocurre un cortocircuito, el gas SF₆, que actúa como medio de interrupción, se sobrecalienta debido a la interacción con la energía generada por el arco eléctrico. Como resultado, la presión dentro del cilindro de contacto se incrementa, combinándose con la presión de separación proporcionada por el propio mecanismo de accionamiento.

Esto implica que no es necesario que el sistema de accionamiento proporcione por sí solo toda la energía requerida para alcanzar una presión suficiente que extinga el arco eléctrico. En consecuencia, los mecanismos de accionamiento modernos se caracterizan por su simplicidad y están basados en la acumulación de energía a través de resortes [32].

Gracias a las últimas tecnologías de producción es posible usar carcasas muy compactas. La inclusión de los resortes de apertura y cierre dentro del mecanismo operativo permite conseguir una estructura compacta y robusta. En consecuencia, se ha reducido el número de componentes móviles, el interruptor y su ubicación están representados en la Fig. 4.

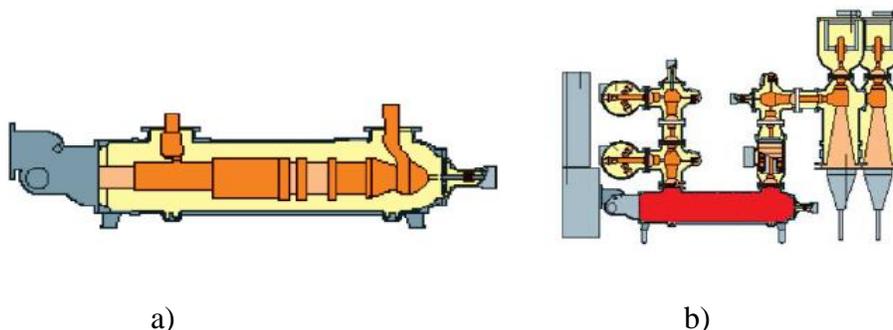


Fig.4. Módulos de interruptores: (a) Interruptor (b) Ubicación del componente [44].



Cuando se generan corrientes de cortocircuito elevadas, como se observa en la Fig. 5, se representan las partes y posiciones de los interruptores ante una falla. El gas ubicado entre los contactos de arco (1) y (7) se recalienta debido a la energía liberada por el mismo y es impulsado con gran presión hacia el cilindro de caldeo (11).

Al reducirse la corriente hasta alcanzar un valor nulo, el gas regresa desde el cilindro de caldeo (11) por medio de la tobera (9), logrando la extinción del arco. La válvula (3) del cilindro de contacto (10) impide la entrada de gas a alta presión en dicho cilindro. Por esta razón, no es necesario que el sistema de accionamiento proporcione toda la energía requerida para suprimir el arco eléctrico.

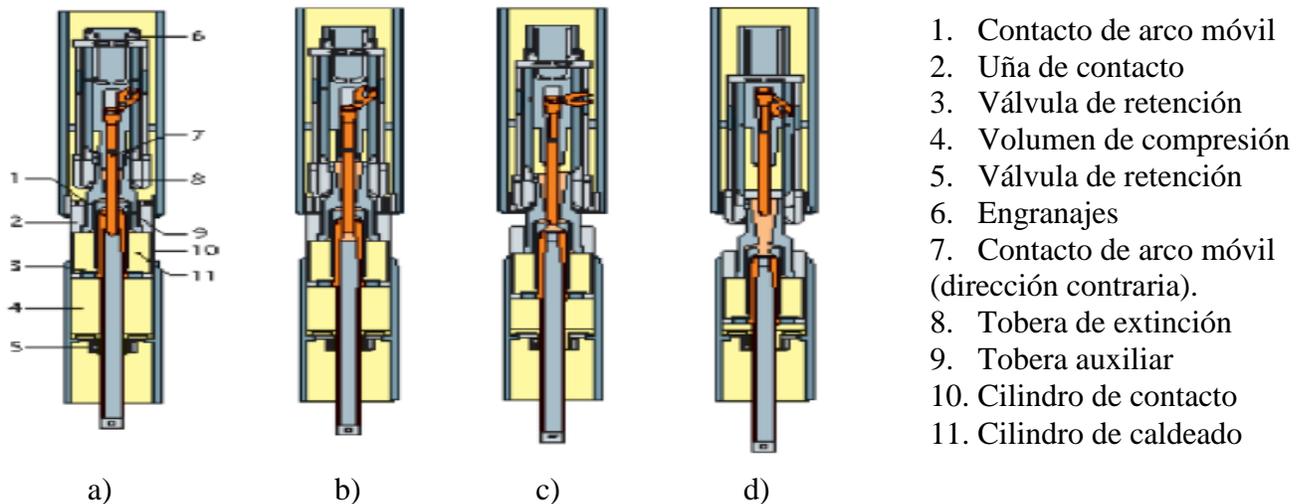


Fig.5. Partes y posiciones de los interruptores: (a) Interruptor en posición Cerrado (b) Apertura: Contacto principal abierto (c) Apertura: Contacto de arco abierto (d) Interruptor en posición Abierto [44].

2.3.5. Módulos de seccionadores.

Los seccionadores presentan distintas configuraciones constructivas, y ciertos fabricantes integran en un solo equipo de tres posiciones tanto la función del seccionador como la de la cuchilla de puesta a tierra. En este tipo de diseño, el contacto móvil puede adoptar tres posiciones distintas: (a) conecta con el contacto fijo, (b) establece conexión entre la barra



conductora y el contra contacto de la cuchilla de puesta a tierra, y (c) una posición intermedia en la que ni el seccionador ni la cuchilla se encuentran cerrados.

Este tipo de configuración permite un enclavamiento mutuo entre ambas funciones. Según el diseño de la subestación, las carcasas de estos módulos pueden tener distintas formas y las conexiones hacia los módulos adyacentes pueden variar. Se pueden colocar hasta dos dispositivos de puesta a tierra simultáneamente. Los módulos pueden ser herméticos al gas y compartimentados, con monitoreo de gas independiente para cada uno, o bien compartiendo dicho monitoreo con módulos contiguos.

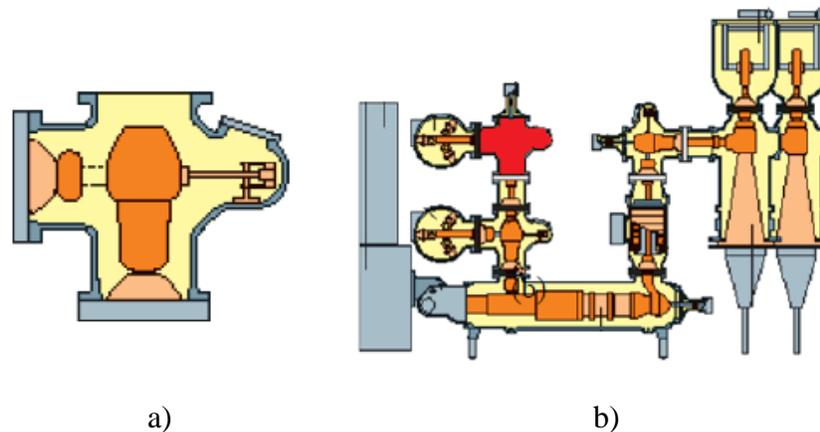


Fig. 6. Módulos de seccionadores: a) Seccionador (b) Ubicación del componente [13].

2.3.6. Seccionadores de puesta a tierra.

Según [45], los seccionadores de puesta a tierra (por ejemplo, los de seguridad o los de las barras colectoras) se usan para conectar a tierra y cortocircuitar circuitos. La variante a prueba de cierre (de alta velocidad) se usa frecuentemente en el lado de salida para asegurar la ausencia de tensión y así reducir los riesgos para la subestación, por ejemplo, cuando la parte opuesta aún no ha sido desconectada.

En la variante aislada, se utilizan para efectuar funciones de medición y prueba de relés de protección. En algunas GIS se emplean seccionadores de puesta a tierra tipo espárrago. Estos se utilizan preferentemente en combinación con seccionadores de barras y líneas, pero también pueden suministrarse en envoltura propia como módulos separados. En el



seccionador de puesta a tierra tipo espárrago, el espárrago a potencial de tierra se introduce en el contra contacto. Si el interruptor de tierra es a prueba de cierre, entonces va equipado con accionamiento por acumulación de energía en resorte. El resorte puede recargarse con ayuda de un motor o bien anualmente en caso de emergencia. En la Fig. 7 se representa a los seccionadores y su ubicación.

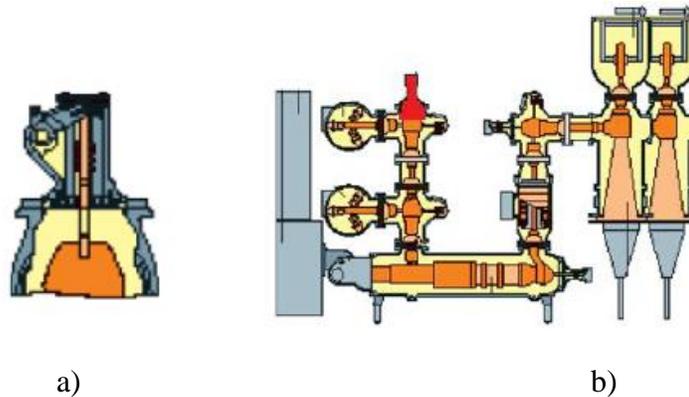


Fig.7. Seccionadores: a) De puesta a tierra, b) Ubicación del componente [13].

2.3.7. Transformadores

- Módulo de transformador de corriente

Se emplean transformadores de corriente monofásicos del tipo inductivo. La ubicación habitual del transformador de corriente es en el extremo de salida del interruptor de potencia, aunque también puede instalarse en otros puntos de la bahía o dentro de la subestación. El conductor de alta tensión funciona como el devanado primario. Los núcleos que contienen los devanados secundarios están diseñados de acuerdo con los requisitos de clase de exactitud y características operativas.

La relación de transformación es modificable mediante conexiones en el lado secundario de los transformadores de corriente, las cuales pasan a través de una placa con aislador pasante herméticamente sellado al gas, conectándose finalmente a una caja de bornes. El aislamiento primario está constituido por el gas SF₆ presurizado en el módulo. En la Fig. 9, el transformador está identificado con la letra “a”



- Módulo de transformador de voltaje

El transformador se representa en la figura 9 con el literal “b”. Cada transformador de tensión inductivo monofásico está alojado en su propia envolvente, constituyendo así un módulo hermético al gas. Constan esencialmente de un arrollamiento primario, uno o varios arrollamientos secundarios (sobre un soporte), un núcleo de hierro.

El gas presurizado dentro de la envolvente forma junto a la película aislante, el aislamiento contra la alta tensión. La conexión de alta tensión con la subestación se establece a través del conductor primario, soportado por un aislador pasante hermético al gas. Las conexiones secundarias se conducen por una placa con aislador pasante hermético al gas, hasta la caja de bornes. La ubicación de ambos transformadores está representada en la Fig. 9, con el literal “c”.

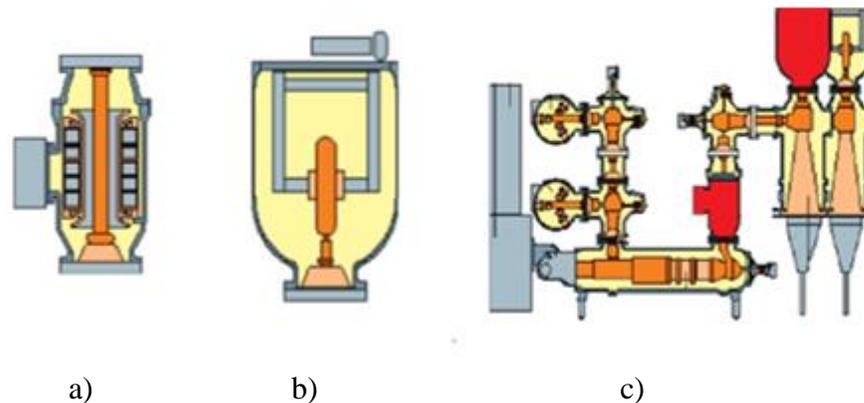


Fig. 9. Transformadores de: (a) De corriente, (b) De voltaje, (c) Ubicación de los componentes [13].

2.3.8. Módulos para conexión

Los módulos de conexión sirven para conectar las bahías de la subestación con líneas aéreas, transformadores o bobinas de reactancia y/o cables. Esos módulos constituyen así el elemento de transición del aislamiento por gas SF₆ en el interior de la envolvente a otros medios aislantes.



- Módulo de conexión para cable

Este módulo permite enlazar la subestación blindada y aislada por gas con un cable de alta tensión. Es posible conectar todos los tipos habituales de cables de alta tensión. La abertura de inspección sirve también como brida para conectar un sistema de prueba de alta tensión para el cable. La conexión primaria entre la copa terminal de cable y la subestación puede abrirse para fines de pruebas con alta tensión, la conexión y esquema de conexión de este módulo están representadas en la Fig. 10.

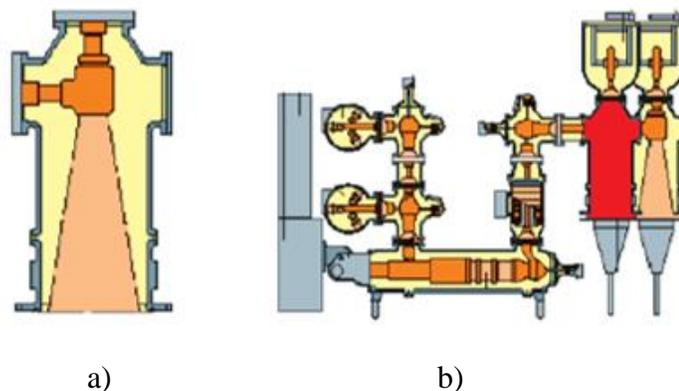


Fig. 10. Módulos de conexión: a) Conexión para cable, (b) Esquema de conexión [13].

- Módulo de conexión para transformador

El módulo de conexión de transformador permite establecer directamente la transición del aislamiento por gas a los aisladores pasantes de transformadores o bobinas aislados por aceite. A tal efecto, el aislador pasante del transformador debe ser hermético al aceite, gas y resistente a la presión. Movimientos condicionados por la temperatura, así como asentamientos no uniformes de los fundamentos de la subestación y el transformador son absorbidos por juntas de expansión. En la Fig. 11, se representa el esquema y la conexión de un transformador.

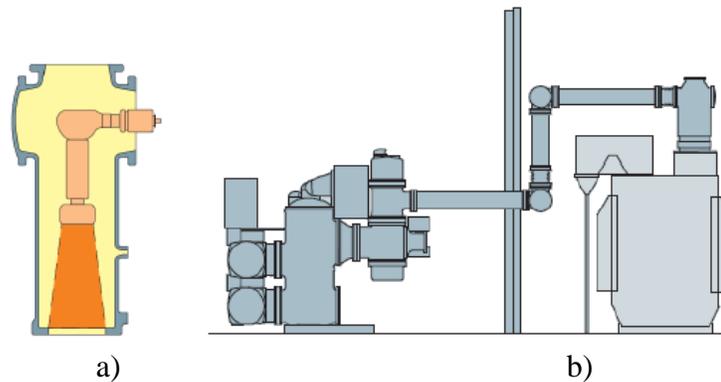


Fig. 11. Módulo de: a) Conexión para transformador b) Esquema de conexión [13].

- Módulo de conexión SF₆ / aire (bushing).

El módulo de conexión SF₆ / aire permite conectar la subestación aislada por gas a componentes aislados por aire o a líneas aéreas. Este módulo combina un módulo en ángulo y una boquilla SF₆ / aire. La longitud, la forma y la distancia de fugas de la boquilla SF₆ / aire se define de acuerdo a la coordinación de aislamiento, la distancia mínima y el grado de polución, este módulo son presentados en la Fig. 12.

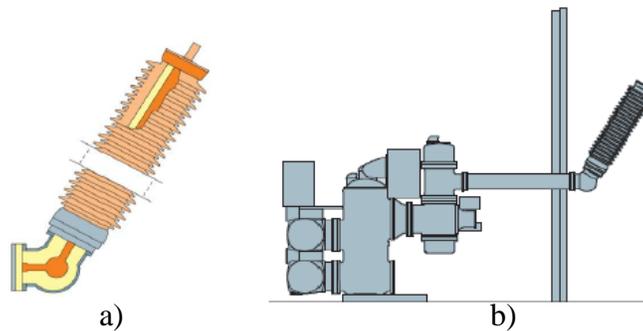


Fig. 12. Módulo de: a) Conexión SF₆ / Aire b) Esquema de conexión [13].

2.4 El gas SF₆ dentro de las subestaciones eléctricas sumergibles

El SF₆ al ser utilizado en los equipos eléctricos de potencia también presenta la desventaja de la descomposición parcial cuando se somete a esfuerzos eléctricos (chispas, arcos, efecto corona, entre otros), en presencia de contaminantes (como aire y humedad), lo que origina subproductos altamente tóxicos y corrosivos, los cuales pueden afectar la salud del operario durante labores cotidianas de mantenimiento.



Asimismo, estos subproductos no tienen las mismas características dieléctricas y térmicas del SF₆, con lo cual disminuye la capacidad de aislamiento y extinción de arco, lo cual puede provocar una falla catastrófica del interruptor (una explosión) provocando que el gas SF₆, así como los subproductos tóxicos, se liberen al medio ambiente, incrementando de esta manera los riesgos del calentamiento global. Asimismo, dicha falla, también origina problemas en la red de transmisión y distribución de la energía eléctrica, provocando, en un momento dado, apagones, tanto en comunidades pequeñas como en ciudades.

2.5 Sistemas de plasma frío

El plasma, considerado como el cuarto estado de la materia, es una fase en la que un gas se encuentra parcialmente ionizado, conformado por electrones libres, iones positivos, especies neutras, radicales libres y radiación electromagnética. Dependiendo de la relación entre la temperatura de los electrones y la de las especies neutras, el plasma puede clasificarse en térmico o no térmico (plasma frío).

En el caso del plasma frío, se caracteriza por presentar una temperatura de electrones considerablemente superior a la del resto de las especies, lo que permite procesos de activación química sin necesidad de calentar todo el sistema [46].

Un sistema de plasma frío es entonces un dispositivo diseñado para generar este tipo de plasma bajo condiciones controladas. Su funcionamiento permite realizar procesos de modificación química, desinfección, descomposición molecular y tratamiento de superficies en un entorno donde la temperatura global del gas se mantiene cercana a la ambiental, lo cual representa una ventaja significativa en comparación con los métodos térmicos tradicionales. Esta tecnología resulta de particular interés en aplicaciones donde se requiere evitar daños térmicos en los materiales tratados o en gases sensibles, como es el caso del hexafluoruro de azufre (SF₆), utilizado ampliamente como gas aislante en sistemas eléctricos de alta tensión.

2.5.1 Generación de plasma frío

La generación del plasma frío se logra mediante la aplicación de un campo eléctrico de alto voltaje y/o alta frecuencia sobre un gas que generalmente es dieléctrico. Este campo eléctrico acelera a los electrones libres presentes en el gas, los cuales, al colisionar con las moléculas



neutras, provocan su ionización, excitación o disociación, dando lugar a una cascada de reacciones que sustenta la fase de plasma [47].

Existen varias configuraciones tecnológicas para la generación de plasma frío, entre las usadas se encuentran:

- Descarga de Barrera Dieléctrica (DBD): se utilizan dos electrodos, uno de ellos recubierto por un material dieléctrico, generando múltiples microdescargas distribuidas espacialmente que permiten mantener un plasma estable sin elevación excesiva de temperatura. Esta configuración es altamente utilizada para tratamiento de gases y superficies.
- Descarga de Corona: se genera mediante electrodos de geometría aguda que concentran el campo eléctrico en una región reducida. Aunque su densidad de plasma es baja, es adecuada para tratamientos superficiales y generación de especies activas en pequeñas cantidades.
- Plasma de Radiofrecuencia (RF) y Microondas: estas configuraciones emplean campos electromagnéticos de alta frecuencia (13.56 MHz o más), los cuales permiten la generación de plasmas más homogéneos y con alta densidad electrónica, ideales para aplicaciones en vacío o baja presión.

Los parámetros usados en la simulación para el sistema de plasma están presentados en la TABLA 6, la selección del método de generación dependerá del tipo de gas a tratar, las condiciones de operación requeridas y los objetivos del proceso [46, 47].

2.5.2. Parámetros de operación de un sistema de plasma frío

Parámetro	Rango típico	Descripción
Frecuencia	50 Hz – varios GHz	Determina el tipo de excitación del plasma. Frecuencias bajas (50/60 Hz) son comunes en sistemas simples; frecuencias de RF (13.56 MHz) o microondas se usan en aplicaciones más avanzadas para generar plasmas más densos y estables.



Voltaje aplicado	1 – 30 kV	Influye directamente en la energía de los electrones acelerados. Voltajes más altos favorecen una mayor ionización y producción de especies reactivas.
Presión	0.1 mbar – 1 atm	El plasma puede operar desde vacío hasta presión atmosférica. La operación a presión atmosférica es preferida en aplicaciones industriales por su simplicidad.
Temperatura del gas	300 – 500 K	A diferencia del plasma térmico, el plasma frío mantiene una temperatura cercana a la ambiental, lo que lo hace ideal para tratar materiales o gases sensibles al calor.
Composición del gas	Ar, He, O ₂ , N ₂ , SF ₆ y mezclas específicas	Afecta las reacciones que ocurren dentro del plasma. Gases nobles son comunes por su facilidad de ionización, pero para fines específicos como el tratamiento de gases dieléctricos como el SF ₆ , se emplean directamente mezclas industriales.

TABLA 6. Parámetros de operación de un sistema de plasma frío [47, 48].

2.5.3 Componentes de un sistema de plasma frío

Con la información obtenida de [49], decimos que los sistemas de plasma frío pueden variar en sus componentes según la aplicación, pero en términos generales incluyen los siguientes componentes:

- Fuente de alimentación: proporciona el voltaje necesario para iniciar y sostener la descarga. Su control determina la intensidad del plasma y la densidad de especies reactivas.
- Electrodo: metálicos o revestidos, permiten aplicar el campo eléctrico al gas. Su geometría y longitud influye directamente en el área distribución del plasma.
- Material dieléctrico: utilizado en sistemas DBD para limitar la corriente de descarga y evitar arcos eléctricos, asegurando una operación más segura y estable.
- Cámara de tratamiento: contenedor donde se produce el plasma, diseñado para resistir condiciones de alta energía y permitir la entrada y salida de gases.
- Sistema de inyección y control de gas: permite el flujo controlado de gases base (como O₂, SF₆, N₂) que se usan para enriquecer el plasma.



- Sistema de control y monitoreo: sensores y unidades electrónicas que están seleccionados para monitorear la presión, voltaje, temperatura, y permiten un control preciso de los parámetros del proceso.

2.6 Aplicaciones del plasma frío

El desarrollo del plasma frío ha permitido su aplicación en varios sectores industriales, médicos y ambientales debido a su versatilidad y capacidad de inducir reacciones químicas sin requerir temperaturas elevadas [50].

Las aplicaciones más relevantes incluyen:

- Tratamiento ambiental: se utiliza para la descomposición de contaminantes gaseosos como óxidos de nitrógeno, dióxidos de azufre, compuestos orgánicos volátiles, y gases industriales como el SF₆ contaminado. Gracias a la generación de radicales reactivos, el plasma frío permite oxidar, reducir o descomponer estas moléculas nocivas.
- Medicina y bioseguridad: el plasma frío se emplea en la esterilización de instrumentos, tratamiento de superficies biomédicas, y más recientemente en la desinfección de heridas crónicas y el tratamiento de tejidos sin causar daño térmico.
- Industria electrónica: se utiliza ampliamente en procesos de limpieza de obleas, grabado de microcircuitos, y activación superficial de materiales semiconductores en la fabricación de chips.
- Modificación de materiales: mediante el plasma frío es posible modificar propiedades superficiales de plásticos, metales o textiles para mejorar su adhesión o resistencia química, sin alterar la estructura interna del material.

2.6.1. Efectos del plasma frío sobre el gas SF₆

El gas hexafluoruro de azufre es un compuesto inorgánico con una alta capacidad dieléctrica y estabilidad química, por lo que se emplea como gas aislante en subestaciones eléctricas. Sin embargo, bajo condiciones externas como mala manipulación y fugas o averías en sus



equipos de contención, puede descomponerse viéndose alterado por agentes externos que cambian y alteran sus propiedades dieléctricas [40].

El uso del plasma frío en el tratamiento del SF₆ contaminado permite una solución no térmica para eliminar estos subproductos sin afectar significativamente la molécula base del gas.

Entre los efectos observados se destacan:

- Reducción de subproductos tóxicos y corrosivos, especialmente HF y SOF₂.
- Descomposición parcial de contaminantes orgánicos, como aceites y residuos industriales presentes en el sistema.
- Conservación de la integridad del SF₆ base, permitiendo su reutilización.
- Mejora de las propiedades dieléctricas del gas tratado, al disminuir la presencia de impurezas que afectan la rigidez dieléctrica.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo se describen los materiales y métodos empleados para analizar los parámetros fundamentales del sistema de plasma frío y del gas SF₆, junto con los contaminantes asociados documentados en la literatura. El objetivo principal fue desarrollar un modelo conceptual y matemático que representara el comportamiento del sistema propuesto. Durante este proceso, se consideraron variables puntuales como la dimensión de espacio donde se va a desarrollar el sistema. En conjunto con la temperatura, densidad, potencial eléctrico, temperatura del plasma, composición del gas y composición de los contaminantes.

Para el modelado y simulación del sistema, se utilizaron herramientas computacionales, específicamente el software COMSOL Multiphysics y sus módulos de electrostática y plasma, los cuales fueron ubicados en un espacio bidimensional (2D) de acuerdo a la selección de dimensión que ofrece el propio software. Previo a la simulación, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de los modelos generados, con el fin de identificar y corregir posibles errores. Posteriormente, se evaluó el sistema bajo diferentes condiciones operativas, buscando optimizar su desempeño en el pretratamiento del gas SF₆. Finalmente, se realizaron análisis detallados de los resultados obtenidos, acompañados de una descripción precisa de las condiciones experimentales y computacionales utilizadas, para garantizar la reproducibilidad de los procedimientos en futuras investigaciones.

3.1. Metodología

A partir de la revisión de la literatura referenciada en este trabajo de investigación, se recopiló información clave sobre el gas SF₆ y el plasma frío incluyendo sus aplicaciones, importancia, composición química, para el caso del gas se tuvo presente la información del impacto en subestaciones eléctricas sumergibles. La metodología propuesta se enmarca dentro de un enfoque cuantitativo, aunque limitado exclusivamente al análisis mediante simulaciones computacionales. Estas simulaciones, realizadas mediante la herramienta de software



COMSOL Multiphysics, tuvieron como objetivo evaluar y modelar el comportamiento del gas SF₆ y su interacción con sistemas de pretratamiento y entornos eléctricos controlados. Los datos y modelos empleados se sustentan en información obtenida de fuentes de investigación confiables, tales como artículos científicos, documentos académicos e investigaciones previas a este trabajo.

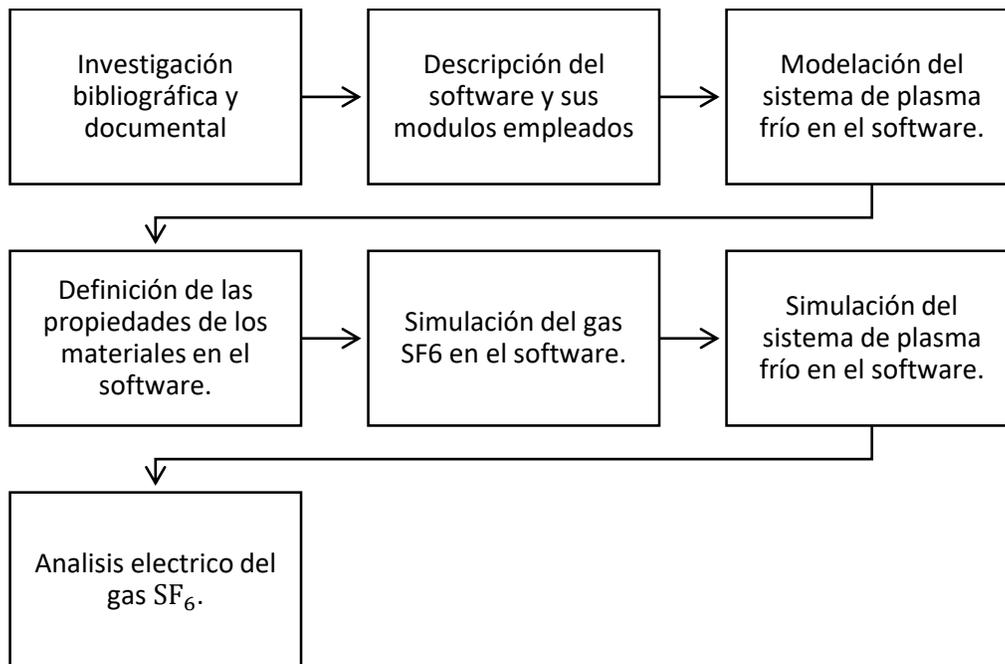


Fig. 15. Metodología empleada en el trabajo.

En la Figura 15, se presentan las distintas secciones del diagrama de bloques que describen las actividades desarrolladas a lo largo del trabajo de grado. Se comenzó por una revisión bibliográfica y documental, mediante la cual se investigó el estado actual del arte en torno al hexafluoruro de azufre SF₆ y su aplicación como gas aislante en subestaciones eléctricas sumergibles.

Esta revisión permitió identificar sus principales características y propiedades, aplicaciones en el sector eléctrico, así como los materiales con los cuales puede contaminarse. Paralelamente, se investigó el funcionamiento de los sistemas de plasma frío, identificando



sus parámetros operativos, componentes, tipos de generación, aplicaciones y efectos que tendría en el gas SF₆. En la descripción del software se dio a conocer que es un software de modelado multifísico que permite acoplar distintos dominios físicos, junto con el módulo de electrostática, el cual fue utilizado en la simulación para observar y analizar el comportamiento eléctrico del gas SF₆, en estado puro, contaminado y pretratado, a su vez el módulo de plasma será empleado para generar un sistema plasma de tipo frío que será empleado posteriormente observar la interacción que tendrá con los contaminantes que estarán presentes en el gas.

A continuación, efectuamos el diseño conceptual que tendrá el sistema de plasma frío que fue utilizado en el trabajo el cual se modeló como una descarga de barrera dieléctrica (DBD), debido a su bajo consumo energético y su alta eficiencia en la descomposición de contaminantes a temperatura ambiente, esto con la descripción del módulo de plasma incluido en el software y las amplias opciones de configuración con la que este módulo cuenta, en conjunto tendremos los fundamentos matemáticos de cada uno de los módulos los cuales solucionarán problemas internos una vez iniciada la simulación y dependerán de la función que cada uno de estos desempeñe de acuerdo al módulo al que esté relacionado.

Tras ello se efectuó la definición de las propiedades dentro del software tanto del gas SF₆ de forma predeterminada junto a las propiedades de los contaminantes, estos contaminantes fueron seleccionados por ser a los que el gas se encuentra más vulnerable al momento una posible manipulación y transporte en base a la información obtenida en el capítulo anterior. En la simulación del gas se observó el comportamiento eléctrico que tendrá dentro de la simulación, tanto de la forma predeterminada del gas es decir sin ningún tipo de contaminantes, así como el comportamiento eléctrico que el gas tendrá una vez este contaminado con uno de los contaminantes que ya había sido descrito y seleccionado previamente, de forma inmediata y una vez que se halla evidenciado que el gas se vio afectado por los contaminantes la simulación del gas será pretratado por medio del sistema de plasma frío modelado en el trabajo, la simulación del pretratamiento con el sistema de plasma frío se realizara para los tres contaminantes a los que se vio afectado el gas, de modo



que se podrá observar y analizar el comportamiento eléctrico del gas una vez haya sido pretratado, finalmente se analizó el comportamiento eléctrico del gas SF₆, de manera predeterminada, luego con los contaminantes a los que fue expuesto y finalmente cuando fue pretratado por el sistema de plasma frío modelado evidenciando cómo se comportaría el gas en un entorno de operación como el de una subestación eléctrica sumergible.

3.2. Software

3.2.1. COMSOL Multiphysics:

COMSOL Multiphysics es un paquete de modelización para la simulación de cualquier proceso físico que se pueda describir mediante ecuaciones en derivadas parciales (ecuaciones diferenciales parciales o PDEs). Está provisto de la última tecnología y algoritmos de solución que pueden manejar problemas complejos de forma rápida y precisa, mientras que su intuitiva estructura está diseñada para proporcionar facilidad de uso y flexibilidad. Con COMSOL Multiphysics se puede modelar prácticamente cualquier fenómeno a través de plantillas de modelado predefinidas. Mediante las funcionalidades de modelado basado en ecuaciones es posible modificar estas plantillas para obtener aplicaciones específicas [51].

3.2.2 Módulo de electrostática

El módulo de Electroestática en COMSOL permite simular distintos materiales dieléctricos y analizar su comportamiento bajo diversas condiciones, tales como perturbaciones, valores iniciales o valores nulos del campo eléctrico, fusión de materiales y diferentes ubicaciones de terminales. Este módulo calcula cómo se distribuyen el potencial eléctrico (V) y el campo eléctrico (V/m) dentro del dominio de la simulación, proporcionando una representación visual y numérica que resulta fundamental para observar el comportamiento del gas SF₆, tanto en su estado puro como cuando está alterado por contaminantes. Este análisis permitirá verificar si el gas mantiene su capacidad aislante en distintas condiciones. El módulo es especialmente útil para evaluar si el gas puede seguir cumpliendo su función como aislante eléctrico o si, al contaminarse, pierde su capacidad para evitar descargas eléctricas.

Para la simulación el valor inicial será de 13,200 V, el cual es el valor promedio de operación en los equipos de las subestaciones.



3.2.3. Potencial eléctrico

El potencial eléctrico es un resultado que calcula el software expresado de manera visual y cuantitativa, que determina la distribución de energía eléctrica en el dominio de la simulación. Su función en la simulación fue establecer una base para derivar otra magnitud eléctrica, como lo es el campo eléctrico, y detectar posibles variaciones energéticas internas. En términos prácticos, al resolver el potencial eléctrico, COMSOL identifica cómo se comporta el entorno eléctrico del gas, permitiendo observar si hay zonas que podrían sufrir de perturbaciones. Es un punto de partida clave para evaluar si el gas sigue comportándose como un material dieléctrico estable o si ha sido afectado.

3.2.4. Campo eléctrico

El campo eléctrico se calcula a partir del potencial eléctrico y tiene la función de mostrar la intensidad y distribución del voltaje dentro del gas. En la simulación, actúa como un indicador visual y cuantitativo de cómo se distribuye el voltaje en el dominio de la simulación. Sirve para identificar si el gas está siendo atravesado por contaminantes que puedan alterar su comportamiento dieléctrico. En esencia, el campo eléctrico permite analizar si el gas presenta zonas activas de perturbación eléctrica, lo cual puede estar asociado a la presencia de contaminantes y afectarían a sus propiedades como aislante.

3.2.3. Módulo de plasma

El módulo de Plasma de COMSOL permite simular descargas eléctricas en gases, modelando la formación y comportamiento de sistemas de plasmas. Este módulo se utilizará para estudiar el comportamiento dieléctrico del gas SF₆ contaminado después del pretratamiento, permitiendo analizar como el plasma interactúa con impurezas como humedad, partículas de polvo y aceites. El módulo permite definir parámetros como temperatura, presión del gas, fuente del campo eléctrico y las condiciones de dominio que ayudaron a evaluar si el gas pretratado puede recuperar sus propiedades dieléctricas originales.

El plasma frío se genera aplicando un campo eléctrico a un gas, lo que acelera electrones libres y produce una cadena de ionizaciones por colisiones. A diferencia del plasma caliente, en el plasma frío solo los electrones alcanzan altas energías, mientras que el gas permanece



a baja temperatura. Esto permite tratar el SF₆ sin degradar su estructura, descomponiendo únicamente los contaminantes presentes mediante procesos físico-químicos activados por el plasma [52].

3.2.4. Modelamiento del sistema de plasma dentro del software

Para modelar el pretratamiento del gas SF₆ mediante plasma frío en COMSOL, se definió una geometría rectangular de 0.1 x 0.05 m, que representa la cámara de tratamiento. Este dominio proporcionara suficiente espacio para simular la interacción entre el campo eléctrico, el gas y los contaminantes en una escala representativa.

El tipo de plasma se configuro como uno de tipo frío, ideal para gases como el SF₆ que no generan reacciones negativas dominantes. Se seleccionó una presión de 6,654,1 Pa, un valor típico para plasmas fríos, ya que permite una buena densidad de colisiones sin elevar demasiado la temperatura del gas. La temperatura del gas se fijó en 300 K, simulando condiciones de operación a temperatura ambiente. El sistema se activó con un voltaje de 500 V DC, aplicado entre dos electrodos. El electrodo superior se configuro como terminal (con voltaje aplicado) y el inferior como tierra (conectado a tierra), generando un campo eléctrico que ioniza el gas.

Los contornos laterales del dominio se configuraron con condiciones aislamiento, simulando la interacción real con las superficies internas de la cámara. Finalmente, el estudio se realizó de manera temporal, simulando desde 0 hasta 10 segundos, para capturar la formación y evolución del plasma, en la TABLA 6 se muestran los parámetros utilizados para simular un sistema de plasma frío.

Parámetro	Valor	Unidad	Función en el modelo
Dimensión del dominio	0.1 × 0.05	m	Representa la cámara rectangular donde se genera el plasma frío.
Presión del gas	6541,1	Pa	Presión adecuada para ignición sin calentamiento excesivo.



Temperatura del gas	300	K	Simula condiciones de operación para el plasma frío.
Voltaje aplicado	800	V (DC)	Campo eléctrico necesario para sostener el plasma con solo SF6.
Electrodos	Terminal (superior), tierra (inferior)	—	Configura la dirección del campo eléctrico vertical.
Condiciones en las paredes	Aislamiento	—	Representa el límite del sistema de plasma.
Estudio	Temporal	—	Permite observar la evolución del plasma en el tiempo.
Tiempos de simulación	3-5 6-10 10-15	s	Tiempo de simulación necesaria para tratar a cada contaminante.

TABLA 6. Parámetros de configuración del sistema de plasma frío en la simulación.

Para el tratamiento del gas contaminado se empleará un sistema de plasma frío generado mediante descarga de barrera dieléctrica (DBD), el cual permite actuar sobre las moléculas del gas sin elevar significativamente la temperatura. En este tipo de descarga, el plasma interactuará con los contaminantes presentes, esto hará que el tiempo necesario para su acción variara según el tipo de impureza. Para el caso del vapor de agua, al tratarse de una sustancia en fase gaseosa y con estructura polar, su modificación ocurre rápidamente, por lo que se estimó un tiempo de tratamiento de 3 a 6 segundos. Las partículas de polvo, al ser sólidas, requieren más tiempo debido a su menor interacción con el sistema de plasma, estimándose entre 6 y 10 segundos. Finalmente, el aceite en forma líquida presenta mayor resistencia al proceso, ya que el plasma actúa principalmente sobre su superficie, requiriendo entre 10 y 15 segundos para lograr un efecto visible. Por este motivo, se considera un tiempo de 15 segundos como el valor estándar de simulación, asegurando que todos los



contaminantes hayan sido expuestos al plasma el tiempo suficiente para reducir su influencia en el comportamiento eléctrico del gas.

3.3. Fundamentos matemáticos en la modelación del sistema de plasma frío.

Simular el sistema de plasma frío para el pretratamiento del gas SF₆, juntos con todas sus especies y reacciones, llega a implicar varios fundamentos matemáticos que son de vital importancia para comprender y ejecutar su funcionamiento.

3.3.1. Ecuaciones matemáticas de los módulos dentro del software

Los diferentes módulos o interfaces físicas se seleccionaron para definir el tipo de fenómeno que se desea simular. Estos "módulos" son paquetes pre configurados que contienen las ecuaciones fundamentales, condiciones de contorno y parámetros específicos para un campo particular de su funcionamiento y acondicionamiento. Una vez iniciada la simulación, el software nos permite elegir entre estas físicas para estructurar y simplificar el proceso de configuración.

3.3.2. Electroestática

Utilizamos las ecuaciones (1 y 2), cuando se implementan en el módulo de Electroestáticas para resolver problemas relacionados con campos eléctricos estáticos, como:

- Distribución del potencial eléctrico en medios dieléctricos.
- Fuerzas eléctricas en partículas cargadas.
- Cálculo de capacitancias en dispositivos eléctricos.

(1)

$$\nabla \cdot D = p_v$$

∇ : Es el operador divergencia. Calcula la tasa de flujo de un vector saliendo de (o entrando en) un punto. Indica si hay más "fuente" o "hundimiento" de un campo en un punto del espacio.

D : Es el desplazamiento eléctrico (vector). Representa cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por el medio en el que se encuentra.

p_v : Es la densidad de carga volumétrica. Mide cuánta carga eléctrica hay por unidad de volumen en un punto del espacio (C/m^3).



- Conservación de carga eléctrica

(2)

$$E = -\nabla V$$

E : Es el campo eléctrico, que describe la fuerza eléctrica por unidad de carga que actúa en un punto del espacio.

V : Es el potencial eléctrico, una cantidad escalar que indica la energía potencial eléctrica por unidad de carga.

$-\nabla V$: Es el gradiente negativo del potencial eléctrico, que indica cómo cambia V en el espacio y da lugar al campo eléctrico. El signo negativo muestra que el campo eléctrico apunta hacia donde el potencial disminuye más rápidamente.

- Ecuación de conservación de carga

La ecuación (3), relaciona el campo eléctrico con las cargas presentes en un volumen

(3)

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r E) = p_V$$

ϵ_0 : Es la permitividad del vacío, una constante física que mide cómo el campo eléctrico se comporta en el vacío.

ϵ_r : Es la permitividad relativa del material, que indica cuánto afecta el material al campo eléctrico en comparación con el vacío.

p_V : Es la densidad de carga volumétrica, es decir, la cantidad de carga eléctrica por unidad de volumen en el espacio.

3.3.3. Plasma

A continuación, tendremos un conjunto de ecuaciones (4-9), de transporte y balance en plasma frío. Estas ecuaciones modelan fenómenos como la densidad de electrones (n_e), el transporte de energía de los electrones (n_ϵ) y la distribución de energía en el plasma.

- Ecuación de continuidad de los electrones

(4)

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot T_e = R_e - (u \cdot \nabla)n_e$$

n_e : Es la densidad de electrones en el plasma.



$\frac{\partial n_e}{\partial t}$: Representa el cambio en la densidad de electrones en el tiempo.

T_e : Divergencia del flujo de electrones

$\nabla \cdot T_e$: Es el término de generación o recombinación de electrones, dependiendo de los procesos que ocurren en el plasma.

$(u \cdot \nabla)n_e$: Representa el transporte de electrones debido a un flujo convectivo en el plasma.

- Flujo de electrones

El software utiliza la ecuación (5), para modelar cómo los electrones interactúan con el campo eléctrico, las moléculas neutras y otras partículas.

$$T_e = -(\mu_e \cdot E)n_e - D_e \cdot \nabla n_e \tag{5}$$

T_e : Es el flujo de electrones.

μ_e : Es la movilidad electrónica

E : Campo eléctrico

$\mu_e \cdot E$: Describe el movimiento de electrones bajo el campo eléctrico

∇n_e : Gradiente de densidad de electrones

D_e : como coeficiente de difusión.

- Ecuación de transporte de energía de electrones

$$\frac{\partial n_\epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot T_\epsilon + E \cdot T_e = S_{\epsilon n} - (u \cdot \nabla)n_e + (Q + Q_{gen})/q \tag{6}$$

$\frac{\partial n_\epsilon}{\partial t}$: Densidad de energía de los electrones.

$\nabla \cdot T_\epsilon$: Divergencia del flujo de energía de los electrones

$E \cdot T_e$: Potencia generada por el campo eléctrico debido al movimiento de electrones.

$S_{\epsilon n}$: Fuentes de energía de los electrones, como colisiones con otras partículas.

$(Q + Q_{gen})/q$: Término relacionado con fuentes externas o generación de energía en el plasma.



- Campo eléctrico

La ecuación (7), representara la fuerza por unidad de carga que experimenta una partícula en el campo.

$$E = -\nabla V \tag{7}$$

$-\nabla V$: el gradiente negativo del potencial eléctrico V .

- Conservación de carga

En la ecuación (8), se representa cómo se distribuye la densidad de flujo eléctrico en el espacio y la cantidad de energía eléctrica por unidad de volumen.

$$\nabla \cdot D = p_q \tag{8}$$

D : Divergencia del desplazamiento eléctrico

p_q : Densidad volumétrica de carga eléctrica

- Función de distribución de energía

Esta ecuación (9), describe la distribución de energía de los electrones en el plasma

$$f(\epsilon) = \phi^{-3/2} \beta_1 \exp(-(\epsilon \beta_2 / \phi)) \tag{9}$$

ϕ : Energía característica del plasma.

β_1, β_2 : Factores relacionados con constantes matemáticas

ϵ : Energía de los electrones

3.4. Definición de los materiales dentro software

En COMSOL, la definición de materiales fue un paso fundamental que permitió asignar elementos y valores específicos a cada dominio del modelo. El gas fue definido como un material base con propiedades dieléctricas y conductividad propias que se aproximaron a su comportamiento idóneo, adicional de forma individual se incorporaron materiales adicionales con propiedades particulares que modificaron al gas (vapor de agua, partículas de polvo, aceite).



Esta configuración permite observar cómo dichas impurezas influyen en el comportamiento eléctrico del gas y evaluar su impacto dentro de un sistema simulado (subestación eléctrica sumergible).

3.5. Propiedades del gas SF₆ en condiciones estándar

El hexafluoruro de azufre, es un gas incoloro, inodoro, no inflamable y químicamente estable cuyas propiedades definidas en el software son presentadas en la TABLA 7. El gas posee una alta densidad, por lo que destacan sus excelentes propiedades dieléctricas, siendo aproximadamente 2.5 veces más eficiente como aislante eléctrico que el aire. Es un gas electronegativo, lo que significa que tiene gran afinidad por los electrones libres, lo cual lo hace ideal para su uso como medio de aislamiento y extinción de arco en equipos eléctricos de alta tensión. Aunque es atóxico en estado puro, puede generar productos peligrosos si se descompone por efectos como descargas eléctricas.

Propiedad del material	Unidad	Valor (aproximado)
Densidad	kg/m ³	6.17
Constante dieléctrica (εr)	-	1.0
Conductividad eléctrica	S/m	1 × 10 ⁻¹⁶
Composición química (fracción molar de SF ₆)	-	1.0 (100%)
Resistencia dieléctrica	Ohm x m	Uniforme (1)

TABLA 7. Propiedades predeterminadas del gas SF₆ en el software.

3.6 Propiedades de los contaminantes a aplicarse en el gas SF₆

3.4.1 Vapor de Agua (Humedad)

El vapor de agua es la fase gaseosa del agua, que se forma cuando el agua líquida se evapora o hierve. A temperatura y presión ambiente, se comporta como un gas transparente, incoloro



e inodoro. Es una sustancia compuesta por moléculas de H_2O en estado gaseoso, y es una parte natural del ciclo del agua en la atmósfera cuyas propiedades se ven representadas en la TABLA 8. La humedad que se infiltra en gases aislantes lo hace en forma de vapor, no de gotas líquidas. Generalmente este contaminante se une al gas en su transporte o al momento de entrar en contacto con los equipos en los que es utilizado. Aunque es eléctricamente neutro, su polaridad le otorga una pequeña permisividad relativa ligeramente superior a la del vacío o aire seco. Para una mayor aproximación a condiciones reales, el vapor de agua se considera como un contaminante de bajo impacto, con una presencia aproximada del 15–20 % en el dominio del gas.

Propiedad del material	Unidad	Valor (aproximado)
Densidad	kg/m ³	0.023
Permitividad relativa	ϵ_r	1.06
Conductividad eléctrica	S/m	1×10^{-7}
Conductividad térmica	k [W/(m x K)]	0.025
Viscosidad dinamica	μ [Pa x s]	1.23×10^{-5}

TABLA 8. Propiedades del vapor de agua en el software.

3.4.2 Partículas de polvo (Contaminantes Sólidos)

Las partículas de polvo representan uno de los contaminantes sólidos más comunes en subestaciones eléctricas, especialmente en instalaciones sumergibles donde pueden ingresar por pequeños sellos defectuosos o durante mantenimientos. Estas partículas pueden estar compuestas por materiales de diversa naturaleza, como minerales, óxidos metálicos o residuos dieléctricos, y dependiendo de su composición, tamaño y concentración, pueden alterar las propiedades eléctricas del medio donde se encuentran. En esta simulación, se



utilizó silicio policristalino como material representativo, debido a que el silicio es un componente frecuente en ambientes industriales y puede encontrarse como residuo sólido en forma de polvo, donde sus propiedades se ven enlistadas en la TABLA 9. Además, sus propiedades eléctricas intermedias permiten evaluar cómo un contaminante con cierta conductividad puede influir en el comportamiento eléctrico de un dominio.

Dado que este tipo de contaminante se dispersa de forma menos uniforme y con mayor volumen, se considerado una cobertura representativa de aproximadamente del 35-40 % del volumen del gas, lo que refleja una condición de contaminación de nivel medio en relación con la extensión y el impacto potencial del contaminante.

Propiedad del material	Unidad	Valor (aproximado)
Densidad	kg/m ³	2.650
Permitividad relativa	ϵ_r	4.5
Conductividad eléctrica	S/m	1×10^{-14}
Conductividad térmica	k [W/(m x K)]	1.3
Capacidad calorífica	J/(kg x K)	720

TABLA 9. Propiedades de las partículas de polvo en el software.

3.4.3 Aceite

El aceite mineral es un producto derivado del petróleo cuyas propiedades se reflejan en la TABLA 10, comúnmente utilizado en equipos eléctricos como transformadores e interruptores pertenecientes a subestaciones eléctricas sumergibles, debido a su capacidad de aislamiento eléctrico y disipación de calor. El aceite se caracteriza por ser químicamente estable, tener una alta rigidez dieléctrica y una baja conductividad eléctrica. Sin embargo,



cuando este aceite se filtra o se dispersa en forma de pequeñas gotas o películas dentro de un gas aislante como el gas SF₆, puede alterar las propiedades dieléctricas de este último, actuando como un contaminante. Su presencia en forma líquida puede modificar la distribución del campo eléctrico y potencialmente reducir la efectividad del aislamiento gaseoso, especialmente si se encuentra en zonas de alta tensión o acumulado en superficies críticas. Gracias a estas condiciones, se considera un nivel elevado de contaminación con una ocupación del 65-70 % del volumen del gas, lo cual refleja una situación crítica en la que el aceite, al estar ampliamente distribuido, influye significativamente en la homogeneidad dieléctrica del gas.

Propiedad del material	Unidad	Valor (aproximado)
Densidad	kg/m ³	870
Permitividad relativa	ϵ_r	5.3
Conductividad eléctrica	S/m	1×10^{-5}
Conductividad térmica	k [W/(m x K)]	0.25
Capacidad calorífica	J/(kg x K)	1800

TABLA 10. Propiedades del aceite en el software.



CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el capítulo IV se presentan los resultados obtenidos a través de las simulaciones del material gas SF₆, junto con sus respectivos contaminantes: vapor de agua, partículas de polvo, aceite y oxígeno. Se realizan pruebas del comportamiento eléctrico de estos materiales mediante las magnitudes de potencial eléctrico y campo eléctrico, obtenidas a través del módulo de electrostática. Estas variables permitieron observar si el gas mantiene su comportamiento eléctrico normal en estado puro y cómo dichas condiciones pueden modificarse al introducir contaminantes o al ser pretratado en un sistema de plasma, lo que puede alterar su estabilidad dieléctrica.

Estos contaminantes ya fueron definidos en el capítulo anterior para su correspondiente verificación. Por lo tanto, se analiza el comportamiento eléctrico del gas SF₆ en estado predeterminado, con contaminantes, y posteriormente tras su paso por el sistema de plasma, con el fin de verificar si continúa cumpliendo su función como gas aislante bajo distintas condiciones.

4.1 Comportamiento eléctrico predeterminado del gas SF₆

Utilizando el módulo de Electroestática de COMSOL, el gas SF₆ modelado con los valores de las propiedades descritos en la TABLA 7, se comportó como un material dieléctrico en condiciones normales, sin la aplicación de ningún contaminante externo.

Los resultados mostraron que, en ausencia de algún tipo de contaminante, el gas permanece eléctricamente estable, sin exhibir conducción de corriente ni cambios significativos en su comportamiento. Al no haber estímulos externos el gas no experimenta alteraciones en su estado dieléctrico ni en su capacidad para aislar. Esto valida su función como aislante eléctrico bajo condiciones normales.

4.1.1 Potencial eléctrico

En la simulación realizada, el potencial eléctrico del gas SF₆ se mostró uniforme y constante a lo largo de todo el dominio simulado. Dado que el gas no tuvo ninguna fuente de



contaminación, la tabla de colores muestra una distribución descendente del potencial eléctrico de arriba hacia abajo que demostró el comportamiento esperado, que en este caso fue de 13,200 V el cual fue el valor inicial seleccionado en el módulo, el cual se presenta en la Fig. 14. Este comportamiento comprueba el comportamiento característico del gas al ser un material dieléctrico, que no generan variaciones de potencial sin la influencia de materiales externo.

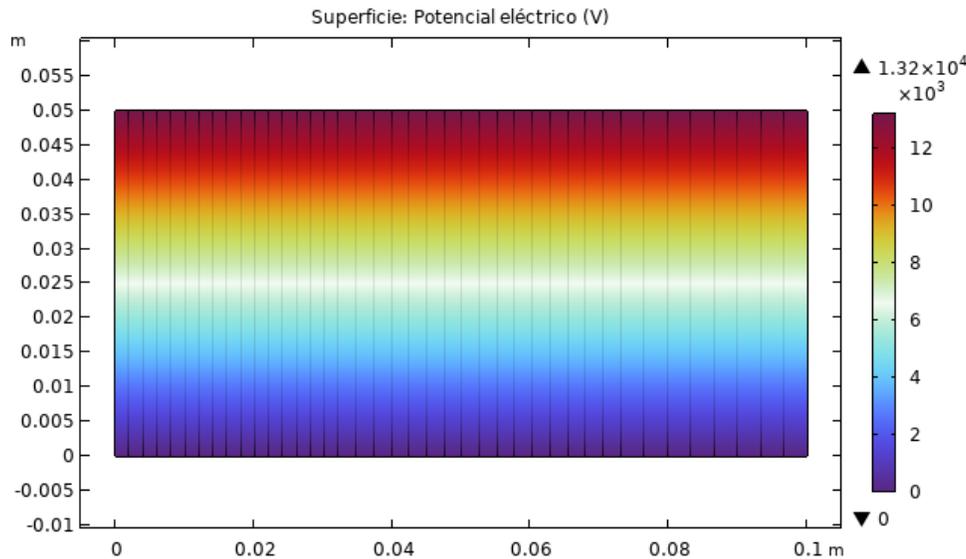


Fig. 14. Potencial eléctrico predeterminado del gas SF₆.

4.1.2 Campo eléctrico

En la Fig. 15, se presenta los resultados obtenidos de la tabla de colores, respecto a el campo eléctrico dentro del gas SF₆, el cual al tener el valor inicial de 13,200 V y una geometría de 0.1 x 0.05 m, el valor del campo eléctrico que resulto fue de 264,000 V/m, lo que nos indicó una distribución simétrica y sin concentraciones localizadas de campo. En este escenario, el gas no genera ningún riesgo de ruptura eléctrica. Este comportamiento confirma que el gas SF₆ se mantiene como un material dieléctrico sin que se genere una perturbación eléctrica interna en ausencia de contaminantes externos.

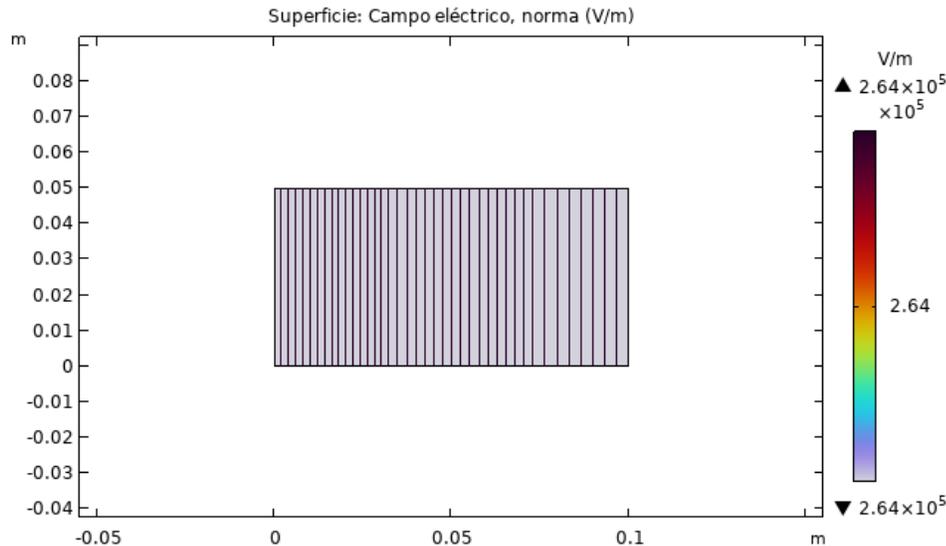


Fig. 15. Campo eléctrico predeterminado del gas SF₆.

4.2 Comportamiento eléctrico del gas SF₆ contaminado con vapor de agua

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del análisis eléctrico del gas SF₆ cuando se encuentra contaminado con el material de vapor de agua, que fue considerado uno de los contaminantes más comunes en el momento de transportar este gas, la simulación se realizó con el objetivo de observar cómo varían parámetros clave como el potencial eléctrico y el campo eléctrico al introducir humedad en el dominio del gas.

Estos resultados permiten evidenciar si la presencia de vapor de agua afecta negativamente las propiedades dieléctricas del gas, comprometiendo su efectividad como medio aislante.

La evaluación se centra en los cambios espaciales del campo eléctrico, zonas de concentración o disipación del mismo, y la influencia directa que estos efectos tienen sobre la capacidad del gas para resistir la formación de descargas eléctricas.

4.2.1 Potencial eléctrico

Los resultados del potencial eléctrico del gas contaminado con vapor de agua, en la tabla de colores no evidenciaron alteraciones significativas en su distribución. Las zonas donde se ubicó el contaminante no mostraron variaciones notables en los niveles de potencial, manteniéndose una distribución descendente desde la terminal (13,200 V), hasta la tierra ubicados en el dominio.



Como se observó anteriormente en los resultados predeterminados del gas SF₆. Este comportamiento indicado en la Fig. 16. Es el que se debería de presentar, ya que el potencial eléctrico al ser una magnitud escalar y continua, debe de distribuirse de forma estable en medios dieléctricos, incluso en presencia de ciertas impurezas.

Adicional se observa que las líneas que equipotencial no varían al igual que el estado en el que están en el gas de forma predeterminado.

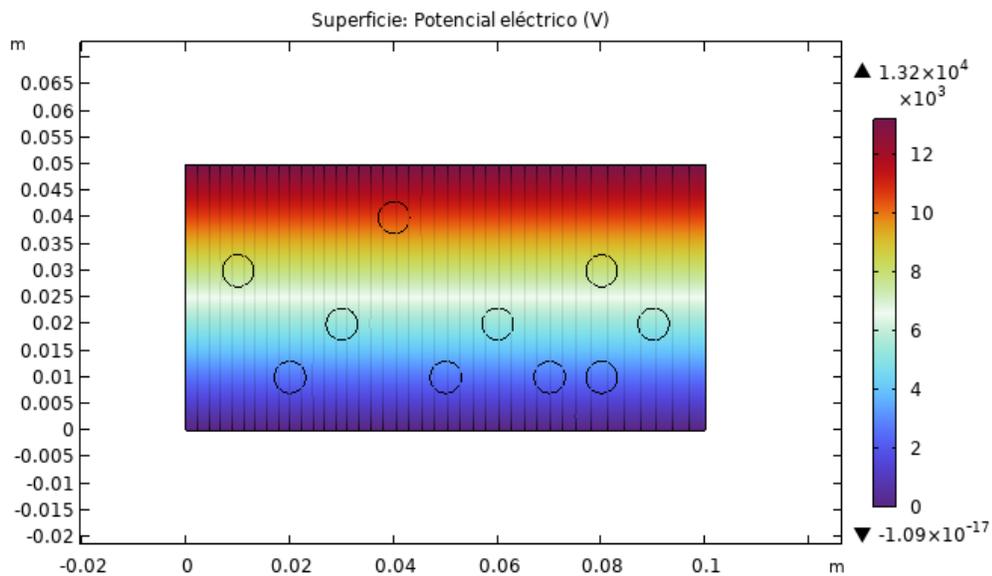


Fig. 16. Potencial eléctrico del gas SF₆ contaminado con vapor de agua.

4.2.2 Campo eléctrico

Por medio de los valores obtenidos de la tabla de colores en la Fig. 17. Se muestran los resultados obtenidos para el campo eléctrico, mostrando que, al introducir vapor de agua en el dominio del gas, se genera una redistribución localizada de la intensidad del campo. En las zonas donde se ubicó el contaminante, los valores del campo eléctrico disminuyeron ligeramente, alcanzando un valor mínimo de aproximadamente 256,000 V/m dentro del área del contaminante.

Sin embargo, en los bordes de estas regiones contaminadas, el campo se concentró con mayor intensidad, alcanzando un valor máximo aproximado de 272,000 V/m. En el resto del



dominio, donde no se introdujo contaminante, el campo eléctrico se mantuvo constante en 256,000 V/m, evidenciando que la humedad perturba la uniformidad del campo en su entorno más cercano.

Aunque estos valores aún se encuentran por debajo del umbral de rigidez dieléctrica del gas predeterminado, los resultados sugieren que el vapor de agua genera zonas de concentración de campo eléctrico que podrían representar puntos vulnerables si llegaran a coincidir con un aumento en el voltaje inesperado. Esta distorsión local es un indicador de que la presencia de humedad puede comprometer, de forma anticipada, el comportamiento dieléctrico del gas en condiciones operativas exigentes.

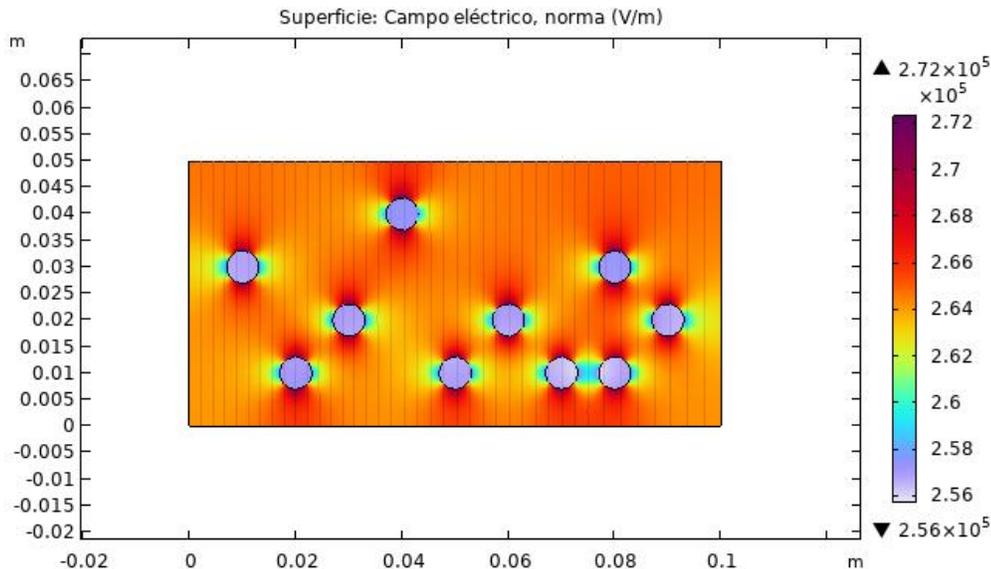


Fig. 17. Campo eléctrico del gas SF₆ contaminado con vapor de agua.

4.3 Comportamiento eléctrico del gas SF₆ contaminado por partículas de polvo.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del análisis eléctrico del gas SF₆ cuando se encuentra contaminado con partículas de polvo sólido (silicio), material elegido por su presencia común en entornos industriales y su naturaleza conductora en determinadas condiciones. Estas partículas pueden encontrarse en el interior de contenedores metálicos y carros transportadores de gas. Debido al desgaste de componentes o a la acumulación de contaminantes ambientales.



La simulación, al igual que con el contaminante anterior, se realizó con el propósito de observar cómo varían los parámetros de potencial eléctrico y campo eléctrico cuando estos sólidos están presentes en el dominio del gas. Este análisis permite identificar si la acumulación de polvo puede afectar la uniformidad del campo eléctrico o si el contaminante puede generar zonas de concentración del mismo, comprometiendo así la función dieléctrica del gas, aspecto clave para el mantenimiento de su capacidad aislante ante esfuerzos eléctricos elevados.

4.3.1 Potencial eléctrico

El resultado obtenido del potencial eléctrico del gas contaminado con partículas de polvo sólido no muestra alteraciones en los valores representados en la tabla de colores, los cuales se observan en la Fig. 18. Estos valores corresponden a la distribución general del voltaje, que mantiene un patrón descendente desde la terminal hacia la conexión a tierra del dominio, con un valor máximo de 13,200 V y un valor mínimo cercano a 0 V. No obstante, se identifica una modificación local en la distribución del potencial en las zonas internas del contaminante, definidas mediante geometrías semicirculares.

En estas áreas, las líneas equipotenciales se estrechan visiblemente, generando una mayor concentración en los bordes del contaminante y una compresión del campo dentro de su dominio. Este estrechamiento puede interpretarse como una alteración en la uniformidad dieléctrica del gas, lo que podría generar zonas localizadas de mayor esfuerzo eléctrico o facilitar la aparición de puntos débiles ante posibles sobrevoltajes.

Aunque en esta simulación no se observa una caída abrupta del potencial, este comportamiento indica que las partículas de polvo podrían interferir con la distribución natural del voltaje predeterminado, comprometiendo potencialmente la capacidad aislante del gas en condiciones más críticas o con una mayor cantidad de contaminante.

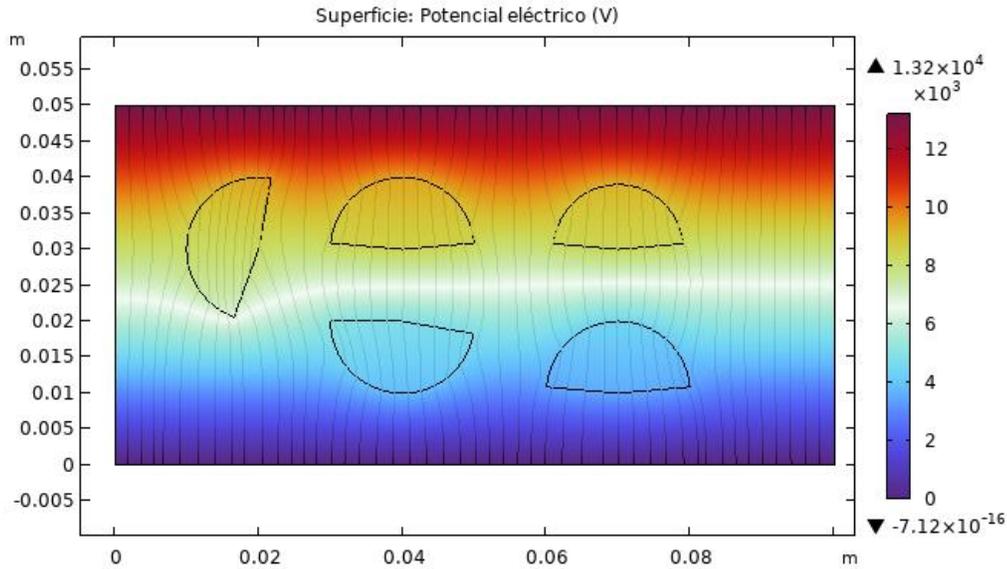


Fig. 18. Potencial eléctrico del gas SF₆ contaminado con partículas de polvo.

4.3.2 Campo eléctrico

La Fig.19. Muestra por medio de la tabla de colores el comportamiento del campo eléctrico en presencia de partículas de polvo sólido, se observó una modificación significativa en su distribución dentro del dominio del gas. En las zonas internas del contaminante, que fueron definidas con una geometría semicircular, el campo eléctrico experimenta una disminución considerable, alcanzando un valor mínimo aproximado de 94,366 V/m.

Este descenso contrasta con los valores registrados en el contorno lateral del dominio del contaminante (de izquierda a derecha), donde el campo asciende a aproximadamente 162,780 V/m. A su vez, en el contorno vertical (de arriba hacia abajo), se detecta un incremento más marcado en la intensidad del campo eléctrico, con valores cercanos a los 498,010 V/m, tanto en la parte superior como en la inferior del dominio del contaminante.

En el resto del gas SF₆, donde no hay presencia de contaminante, el campo eléctrico se mantiene relativamente estable con un valor promedio de 259,920 V/m. Esta distribución sugiere que las partículas de polvo no solo interfieren con la homogeneidad del campo, sino que también inducen concentraciones locales de mayor intensidad en sus alrededores, lo que podría representar puntos de riesgo frente a esfuerzos eléctricos elevados. La caída interna del campo y su refuerzo en el contorno del contaminante son señales claras de una



perturbación dieléctrica que, en mayores concentraciones o bajo condiciones operativas más exigentes, podría desencadenar un fallo del aislamiento gaseoso.

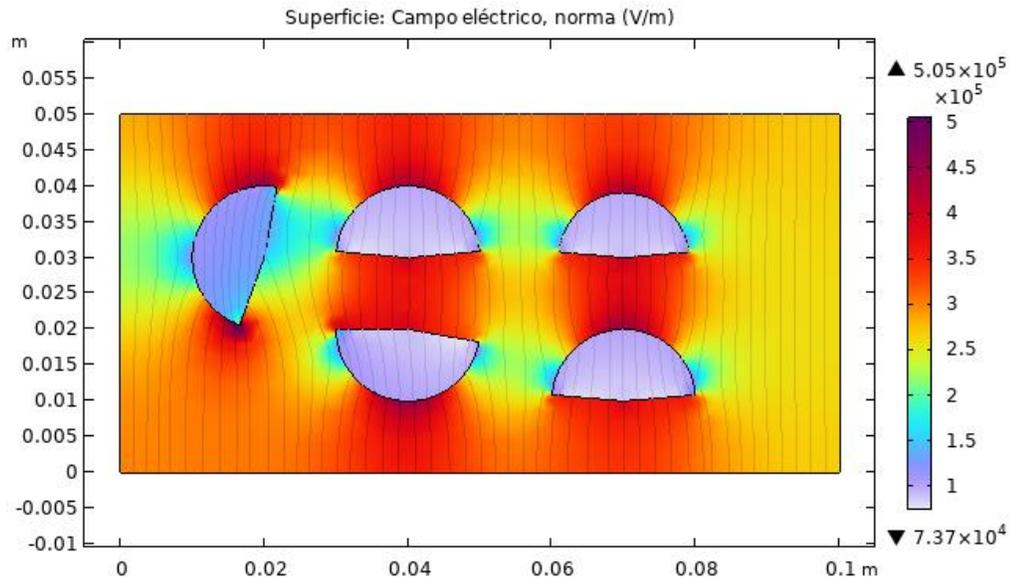


Fig. 19. Campo eléctrico del gas SF₆ contaminado con partículas de polvo.

4.4 Comportamiento eléctrico del gas SF₆ contaminado con aceite

Para el caso del aceite como contaminante se presentan los resultados obtenidos del análisis eléctrico del gas SF₆ cuando se encuentra contaminado con residuos de aceite mineral, un contaminante frecuente en subestaciones eléctricas debido a fugas o derrames provenientes de transformadores y equipos aislados en aceite.

Para representar este tipo de impureza se utilizó el material aceite disponible en la biblioteca de COMSOL, cuyas propiedades dieléctricas permiten simular el comportamiento de una mancha de aceite que ha ingresado al dominio del gas. La simulación tuvo como objetivo evidenciar cómo se ven afectadas las variables del potencial y el campo eléctrico, cuando el aceite está presente dentro del dominio dieléctrico del gas.

Este análisis es relevante ya que, a pesar de que el aceite también es un aislante, su presencia no intencionada puede modificar localmente la uniformidad del campo eléctrico o alterar la



distribución de potencial, especialmente si se encuentra acumulado en formas irregulares. Por tanto, los resultados obtenidos permitirán observar si este tipo de contaminación genera un cambio en las variables que fueron analizadas y como cambia el comportamiento dieléctrico del gas SF₆.

4.4.1 Potencial eléctrico

Los resultados obtenidos del potencial eléctrico del gas contaminado con aceite mineral muestran que, los valores de voltaje se mantienen constantes con un máximo aproximado de 13,200 V en la parte superior del dominio y un descenso progresivo hacia la terminal de tierra del dominio, se observan alteraciones sutiles en la distribución espacial del mismo.

Para representar la contaminación se emplearon geometrías elipsoidales ligeramente inclinadas, simulando la forma y dispersión de gotas de líquido dentro del gas. En las regiones donde se ubican estas manchas de aceite, las líneas equipotenciales se contraen de manera visible en los bordes de los dominios donde se ubicaron los contaminantes, lo cual indica una redistribución local del potencial.

Al interior del contaminante, estas líneas tienden a mantenerse más lineales, reflejando una leve estabilización, mientras que, al salir por la parte posterior del dominio del contaminante, adoptan una curvatura con forma de onda, efecto que sugiere una desviación en la continuidad del campo. Esta deformación del patrón equipotencial puede estar asociada a la diferencia de propiedades dieléctricas entre el gas y el aceite, lo que modifica localmente la distribución del voltaje y podría favorecer la aparición de zonas de esfuerzo eléctrico en situaciones de sobrecarga.

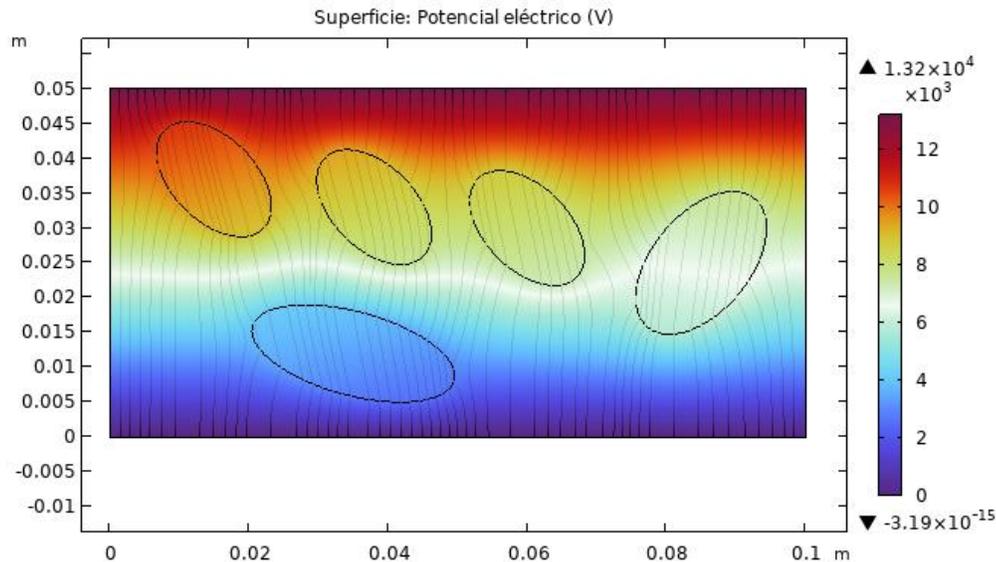


Fig. 20. Potencial eléctrico del gas SF_6 contaminado con aceite.

4.4.2 Campo eléctrico

En los resultados obtenidos del campo eléctrico en el caso de que el gas fuese contaminado con gotas de aceite evidencian una redistribución significativa de la intensidad del campo en las proximidades del contaminante. En las zonas del dominio sin presencia de aceite, el campo eléctrico se mantiene constante con un valor aproximado de 318,000 V/m.

En los contornos superior e inferior de las geometrías elipsoidales que representan las manchas de aceite, se observa una concentración del campo con un valor máximo de aproximadamente 567,609 V/m, indicando una intensificación del esfuerzo eléctrico en esas regiones.

Se observa que, en los laterales del contaminante, el campo eléctrico disminuye, alcanzando un valor mínimo cercano a 146,000 V/m en las zonas más próximas, y aumentando ligeramente a unos 198,000 V/m conforme se aleja del borde. En el interior del contaminante, el campo eléctrico se reduce aún más, con un valor aproximado de 104,600 V/m. Esta distribución desigual sugiere que la presencia del aceite altera la homogeneidad dieléctrica del gas, generando zonas de concentración y disipación del campo que podrían convertirse en puntos críticos ante una elevación repentina del voltaje. La diferencia en las propiedades



dieléctricas entre el gas y el aceite mineral es probablemente responsable de estas distorsiones.

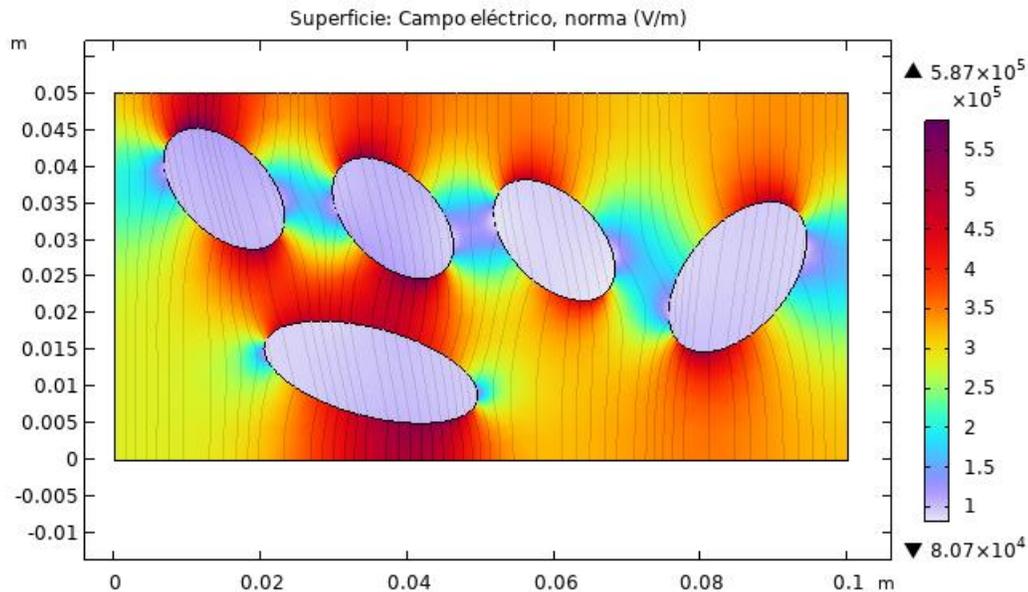


Fig. 21. Campo eléctrico del gas SF₆ contaminado con aceite.

4.5 Pretratamiento del gas SF₆ mediante el sistema de plasma frío

Después del pretratamiento del gas SF₆ contaminado mediante el sistema de plasma frío, se observó una disminución variada de la intensificación del campo eléctrico que previamente se presentaba en presencia de impurezas como vapor de agua, aceite y partículas sólidas. Este comportamiento indica que el plasma frío, generado bajo condiciones de presión cercanas a 6541,1 Pa, temperatura cercana a 300 K, voltaje de 800 V y un tiempo de simulación de 15 segundos que variara de acuerdo al tipo de contaminante que se tratar con el sistema, logró inducir reacciones químicas que redujeron los contaminantes.

Al reducir la densidad de especies contaminadas, el campo eléctrico se distribuye de manera más uniforme en el dominio principal donde fue ubicado el gas, mitigando los picos de intensificación que antes comprometían la rigidez dieléctrica del gas. Estos resultados reflejaron la efectividad del pretratamiento con plasma en restablecer las propiedades dieléctricas del SF₆, favoreciendo al uso del gas como aislante en condiciones seguras.



4.6 Comportamiento eléctrico del gas SF₆ pretratado con plasma frío (vapor de agua)

Para el pretratamiento del gas con el contaminante vapor de agua se presentaron los resultados obtenidos del análisis eléctrico del gas previamente contaminado con vapor de agua, tras haber sido sometido a un pretratamiento mediante plasma frío.

En esta simulación se observaron cambios en los parámetros eléctricos de potencial eléctrico y el campo eléctrico, luego de aplicar el tratamiento, evaluando si el sistema de plasma logra mitigar los efectos negativos asociados al material de vapor de agua.

Los resultados mostraron una redistribución más uniforme del campo eléctrico y una atenuación en las zonas de alta intensidad, lo cual mostro que el plasma ha reducido la densidad del material contaminante. Esta disminución en la perturbación eléctrica permite recuperar en su mayoría las propiedades dieléctricas del gas, aumentando su capacidad de resistir la formación de descargas eléctricas y mejorando su desempeño como medio aislante. El tiempo de simulación es de 6 segundos, debido a que el vapor de agua, al ser un contaminante en fase gaseosa con propiedades polares, interactúa con mayor facilidad con los efectos generadas por el plasma. En los primeros segundos de tratamiento, el plasma rompe enlaces débiles y desestabiliza las moléculas de vapor, fragmentándolas o reordenándolas químicamente. Esta rápida acción justifica que con un tiempo breve ya se logren efectos visibles en la mejora del comportamiento eléctrico del gas.

4.6.1 Potencial eléctrico

Tras el pretratamiento del gas contaminado con vapor de agua mediante plasma frío, se observó una corrección significativa en la distribución del potencial eléctrico dentro del dominio.

En comparación con la condición contaminada, donde los valores mínimos del potencial no alcanzaban cero, los resultados actuales muestran que el valor más bajo de la escala de colores es exactamente 0 V, lo cual indica una restauración del gradiente de potencial esperado en condiciones dieléctricas normales.

Esta modificación sugiere que el tratamiento con plasma redujo la influencia del material de vapor de agua sobre el equilibrio eléctrico, permitiendo que el potencial se distribuya con



mayor regularidad y sin interrupciones anómalas asociadas a la presencia de impurezas. Este comportamiento vendría a hacer el adecuado, ya que, como se evidencia en la simulación predeterminada del gas SF₆, en un sistema bien referenciado eléctricamente, el potencial debe alcanzar 0 V en una parte del dominio, lo cual ahora se cumple tras el pretratamiento.

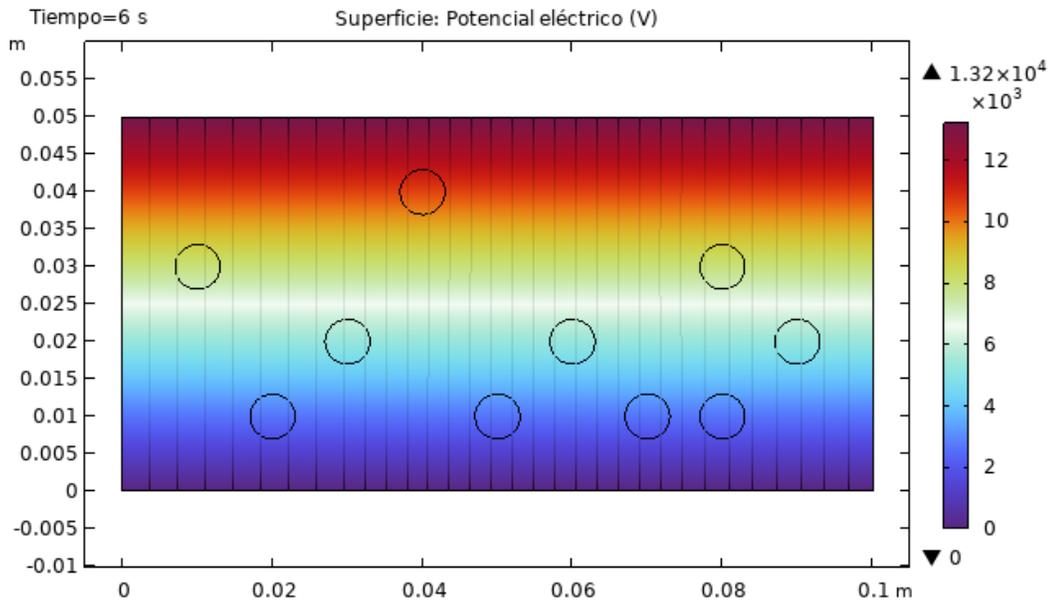


Fig. 22. Potencial eléctrico del gas SF₆ pretratado, contaminado con vapor de agua.

4.6.2 Campo eléctrico

Respecto al campo eléctrico, los resultados muestran una disminución evidente de los valores máximos que anteriormente se concentraban alrededor de las circunferencias del contaminante. Antes del tratamiento, se observaban intensidades de hasta 272,489 V/m en estas regiones; tras la aplicación del plasma frío, el valor máximo se redujo a 265,000 V/m, ahora localizado dentro del dominio del contaminante. En las zonas sin contaminación visible, como la superficie principal del gas, el campo alcanza 262,000 V/m, mientras que en los contornos verticales (de arriba hacia abajo) se registran valores de hasta 257,310 V/m y en los horizontales (de izquierda a derecha) 262,000 V/m.



A pesar de estas variaciones, la distribución global del campo es más estable, con diferencias menos pronunciadas y una tendencia más uniforme hacia el valor de referencia del gas puro, que es de aproximadamente 264,000 V/m. Cumpliéndose así el propósito del sistema de plasma frío, que, al reducir la presencia de materiales externos al gas SF₆, evita acumulaciones de carga que intensifican el campo eléctrico, estabilizando así la distribución dieléctrica en el dominio a una similar de la predeterminada.

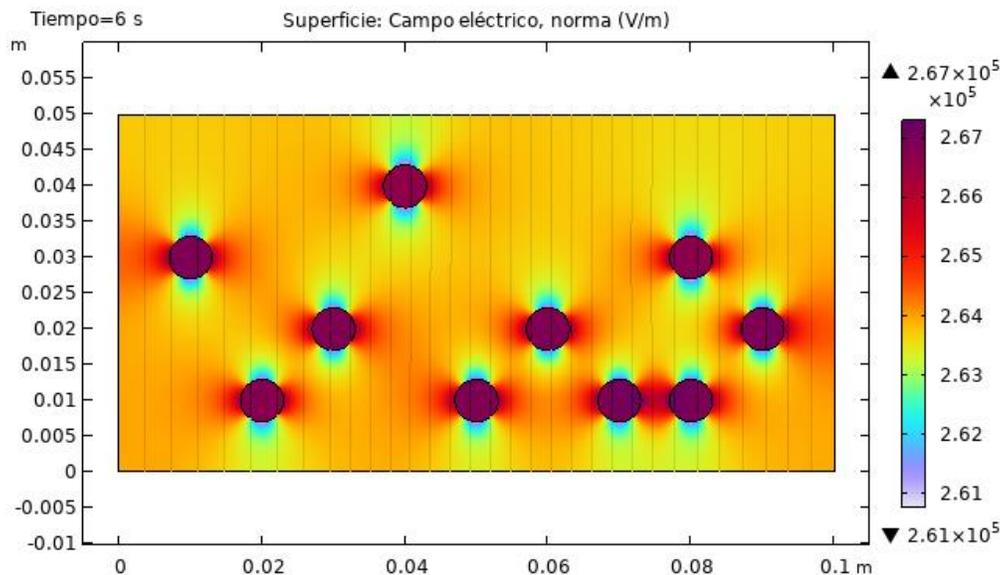


Fig. 23. Campo eléctrico del gas SF₆ pretratado, contaminado con vapor de agua.

4.7 Comportamiento eléctrico del gas SF₆ pretratado con plasma frío (partículas de polvo)

Para esta simulación se presentan los resultados del análisis eléctrico del gas SF₆ contaminado con partículas de polvo sólido, posterior a pasar por el proceso de pretratamiento con plasma frío. Durante esta simulación se observó cómo el sistema de plasma influye en la distribución del potencial eléctrico y del campo eléctrico cuando este tipo de contaminante sólido está presente.



Los resultados obtenidos muestran una reducción notable en los picos de intensidad del campo eléctrico y una mejora en la uniformidad de su distribución dentro del dominio del gas, en comparación con el estado contaminado. Esto nos demostró que el plasma frío logró reducir de manera parcial la influencia conductora de las partículas sólidas, disminuyendo su impacto sobre la rigidez dieléctrica del gas. En consecuencia, el SF₆ recupera parte de su capacidad de aislamiento, lo cual es fundamental para su uso seguro en subestaciones eléctricas sometidas a distintos valores de voltaje. El tiempo de exposición en la simulación al plasma es de 10 segundos, lo cual se considera adecuado debido a que los contaminantes sólidos requieren un mayor tiempo de interacción para que el plasma modifique sus propiedades superficiales. En este intervalo, el sistema de descarga por barrera dieléctrica permitió que el polvo perdiera parcialmente su capacidad de distorsionar el campo eléctrico, reduciendo su impacto como foco de posibles descargas parciales o arcos eléctricos.

4.7.1 Potencial eléctrico

Luego del pretratamiento con plasma frío, el análisis del potencial eléctrico en el gas contaminado con partículas de polvo sólido mostró una recuperación notable en la distribución del potencial. En la tabla de colores se evidenció que los valores volvieron a situarse entre 13,200 V como máximo y 0 V como mínimo, rango característico del gas predeterminado sin contaminar. A diferencia del estado previo al pretratamiento, donde las líneas de equipotencial se deformaban y achicaban visiblemente al atravesar los dominios contaminados, ahora estas líneas presentan solo ligeras irregularidades dentro del interior del contaminante y a la salida de estos.

Esta mejora indica que el plasma frío logró reducir de manera significativa la perturbación eléctrica provocada por las partículas sólidas, acercando el comportamiento del sistema al de un dieléctrico estable. El acercamiento de los valores mostrados por los extremos de potencial con los del gas predeterminado refuerza el resultado de que el gas pretratado recupera su integridad dieléctrica.

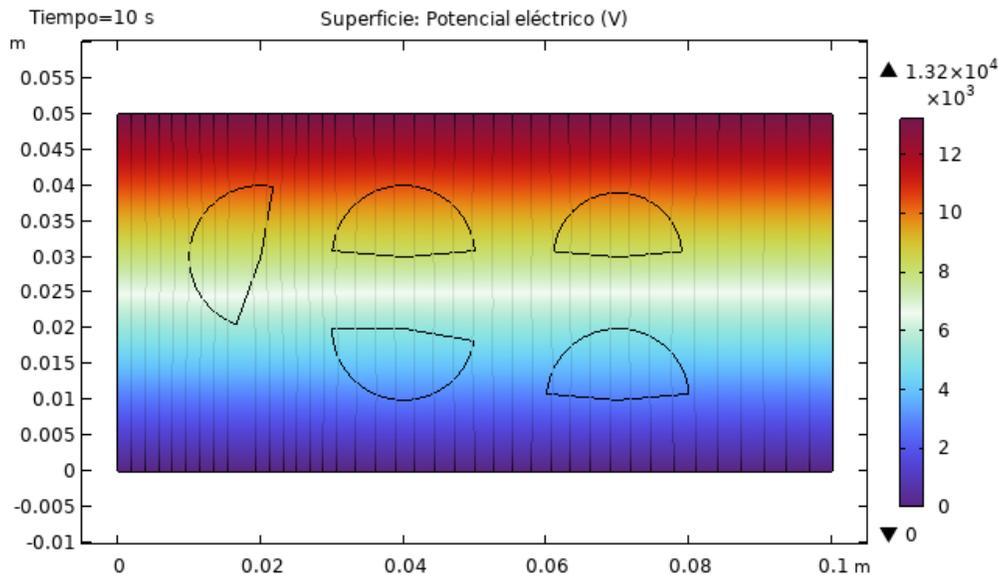


Fig. 24. Potencial eléctrico del gas SF_6 pretratado, contaminado con partículas de polvo.

4.7.2 Campo eléctrico

En cuanto al campo eléctrico, los resultados después del pretratamiento reflejaron una evidente estabilización en comparación con el estado contaminado. El valor máximo alcanzado demostrado en la tabla de colores fue de 295,000 V/m, mientras que el mínimo fue de 229,000 V/m. Se observó que en las zonas donde no hay contaminantes, el campo alcanza valores cercanos a 262,400 V/m, muy próximo al valor ideal del gas sin contaminar (264,000 V/m).

Dentro de los dominios de los contaminantes, el valor más bajo fue de 238,520 V/m, mostrando una mejora significativa respecto al estado previo al tratamiento, en el que solo alcanzaba 150,000 V/m. En los contornos verticales (de arriba hacia abajo) se registró un valor aproximado de 287,411 V/m y en los horizontales (de izquierda a derecha), 250,245 V/m. Estos datos indican que, aunque existen variaciones espaciales dentro del dominio, el campo eléctrico tiende a estabilizarse en torno al valor del gas predeterminado, reflejando la efectividad del plasma frío al disminuir la influencia perturbadora del contaminante sólido.

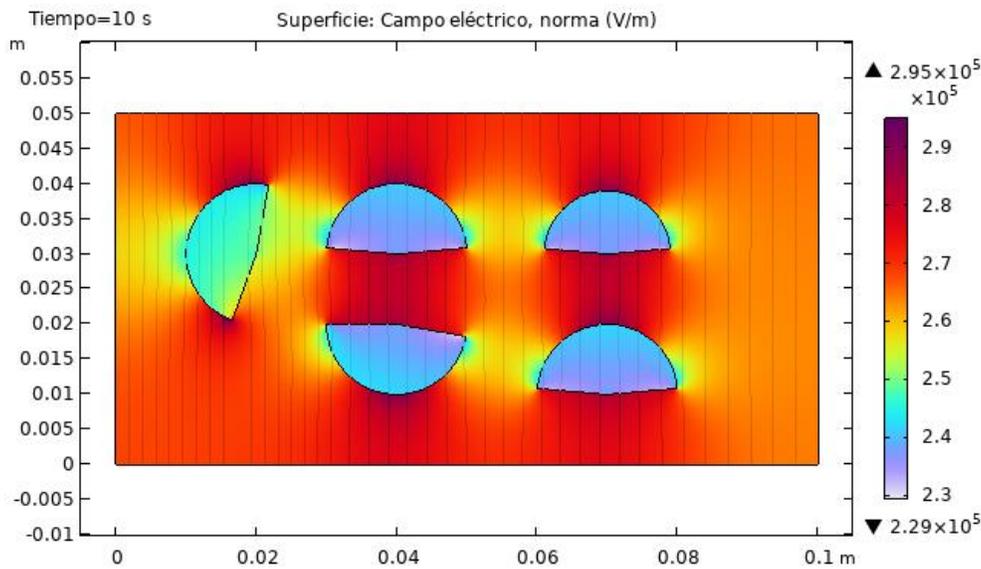


Fig. 25. Campo eléctrico del gas SF₆ pretratado, contaminado con partículas de polvo.

4.8 Comportamiento eléctrico del gas SF₆ pretratado con plasma frío (aceite)

Para la simulación del aceite como contaminante, se obtuvo los resultados del análisis eléctrico del gas luego de haber sido pretratado mediante el sistema de plasma frío, esto con el objetivo de observar el impacto del tratamiento sobre los residuos de aceite mineral introducidos en el dominio.

Tras el pretratamiento, se observa una disminución menos notoria respecto a las anteriores simulaciones de las irregularidades en la distribución del potencial eléctrico y una reducción en la concentración localizada del campo eléctrico que previamente era inducida por la presencia del material. Estos cambios indican que el plasma frío actuó sobre los dominios del contaminante, atenuando su influencia en la distorsión del campo.

Aunque el aceite es también un material dieléctrico, su presencia no intencionada y mal distribuida pudo perturbar el equilibrio eléctrico del gas; por lo tanto, los resultados del pretratamiento evidenciaron una mejora en la uniformidad del campo y una recuperación parcial de los valores de voltaje ideales de aislamiento mostradas en la simulación predeterminada del gas SF₆.

Para este contaminante el tiempo de exposición en el plasma fue de 15 segundos, dado que el material al ser una sustancia líquida con mayor viscosidad y adherencia, requiere un mayor



tiempo de interacción con en el sistema de plasma en la descarga por barrera dieléctrica. Este periodo permitió una descomposición parcial de los enlaces orgánicos del contaminante, facilitando una disminución de su efecto sobre la distorsión del potencial y campo eléctrico.

4.8.1 Potencial eléctrico

Después del pretratamiento del gas SF₆ contaminado con residuos de aceite mineral mediante plasma frío, se observó que el valor máximo del potencial eléctrico, obtenido a través de la tabla de colores, se mantiene en 13,200 V, mientras que el mínimo es de 0 V, tal como ocurre en el gas sin contaminar.

Las líneas de equipotencial ya no presentan las deformaciones marcadas observadas en la simulación contaminada, aunque se evidencian ligeras curvaturas al entrar o salir del contorno del dominio del contaminante. Estas pequeñas desviaciones indican que, si bien la geometría del dominio del aceite sigue generando cierta alteración, el efecto distorsionador sobre el potencial eléctrico ha sido parcialmente mitigado. Esta estabilización sugiere que el plasma logró reducir la influencia dieléctrica negativa del aceite, mejorando la distribución del potencial eléctrico hacia un comportamiento más cercano al del gas predeterminado.

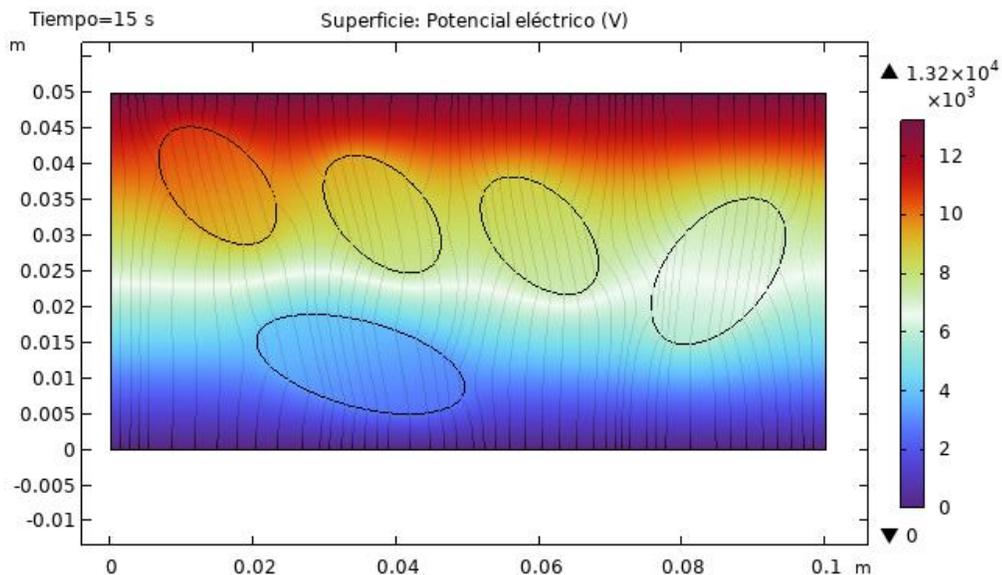


Fig. 26. Potencial eléctrico del gas SF₆ pretratado, contaminado con aceite.



4.8.2 Campo eléctrico

En el resultado del campo eléctrico, el pretratamiento con plasma frío produjo una disminución en los picos de intensificación que se presentaban alrededor de los residuos de aceite. El valor máximo registrado en la tabla de colores fue de $296,456 \text{ V/m}$, localizado en los contornos superior e inferior del dominio del contaminante, mientras que en las zonas donde no existe presencia de impurezas se observó un valor promedio de $217,200 \text{ V/m}$. Este comportamiento contrasta con la simulación contaminada, donde las intensificaciones eran más pronunciadas.

Las líneas de equipotencial mantienen una leve curvatura al atravesar el dominio del aceite, pero ahora reflejan una menor perturbación. La reducción de la acumulación local de cargas y la dispersión más homogénea del campo eléctrico demuestran que el plasma actuó de manera prevista tal como se observó en las anteriores simulaciones, favoreciendo una mayor estabilidad dieléctrica.

Esto respalda la efectividad del pretratamiento en la restauración de las propiedades aislantes del SF_6 , especialmente frente a impurezas orgánicas como el aceite.

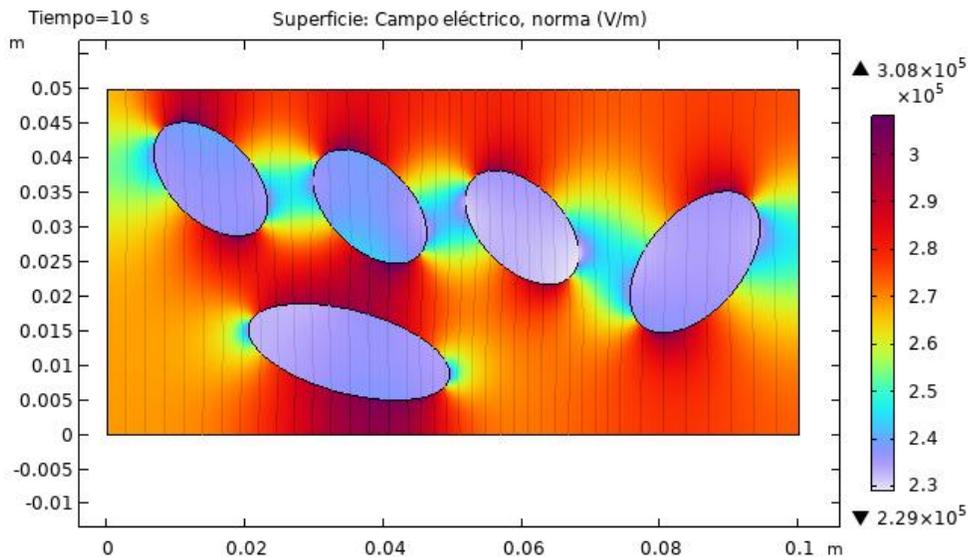


Fig. 27. Campo eléctrico del gas SF_6 pretratado, contaminado con aceite.



4.9 Análisis del comportamiento eléctrico del gas SF₆: predeterminado, contaminado y pretratado

El análisis presentado en la TABLA 11, nos permitió comparar con claridad el comportamiento eléctrico del gas SF₆ bajo tres condiciones: predeterminado, contaminado con distintos agentes, y posteriormente pretratado con plasma frío. A partir de las distintas simulaciones realizadas, se evaluaron los valores máximos del campo eléctrico (en V/m) y se analizaron visualmente las distorsiones en las líneas de potencial eléctrico (equipotenciales) como indicadores del efecto de la contaminación y la eficacia del tratamiento.

Estado del gas	Contaminante	Campo eléctrico (V/m)	Comportamiento del potencial eléctrico
Puro	—	264,000	Equipotenciales distribuidas de forma regular y simétrica.
Contaminado	Vapor de agua	272,000	Ligeras alteraciones; líneas afectadas por la presencia del contaminante.
	Partículas de polvo	498,010	Perturbación intensa; atracción visible de líneas equipotenciales hacia el centro del dominio del contaminante.
	Aceite	567,609	Distorsión severa; curvatura interna en el dominio del contaminante.
Pretratado (Sistema de plasma)	Vapor de agua	266,310	Equipotenciales recuperan la forma original del gas puro.
	Partículas de polvo	265,400	Reducción significativa de la curvatura; patrón más regular.
	Aceite	286,456	Mejoras claras en la distribución; menor deformación interna.

TABLA 11. Análisis del comportamiento eléctrico del gas SF₆.



En la simulación inicial con SF₆ en estado puro, se observó un campo eléctrico máximo de 264,000 V/m y una distribución homogénea y simétrica de las líneas de equipotencial, lo que refleja un comportamiento eléctrico estable y adecuado para su uso como aislante en subestaciones eléctricas. Este caso sirve como referencia base para los demás análisis.

Con la introducción de vapor de agua, el campo eléctrico aumentó ligeramente a 272,000 V/m, con una leve distorsión en las líneas de potencial cerca del contaminante. Esto indica una pérdida parcial de simetría y una ligera reducción en la eficacia dieléctrica del gas. Tras el pretratamiento con plasma frío, el campo se redujo a 257,310 V/m y las líneas de equipotencial recuperaron su forma regular, lo que sugiere que el plasma fue efectivo en neutralizar el contaminante y restaurar el comportamiento dieléctrico original.

En la simulación con partículas de polvo, el campo eléctrico se incrementó de forma importante hasta 498,010 V/m, con una distorsión severa del campo en la región central del dominio. Este resultado muestra una alteración considerable en la estabilidad eléctrica, con riesgo de descargas parciales. Después del pretratamiento, el campo disminuyó a 262,400 V/m y la deformación de las líneas de potencial se redujo notablemente, aunque no se alcanzó la perfección del estado puro. Aun así, el comportamiento eléctrico mejoró considerablemente, indicando una recuperación parcial exitosa.

Finalmente, con la contaminación por aceite, se obtuvo el valor más alto de campo eléctrico: 567,609 V/m, con una intensa curvatura de las líneas de equipotencial, lo que revela una alteración crítica del entorno dieléctrico. Este contaminante demostró ser el más perjudicial para el SF₆. Tras el tratamiento con plasma, el campo se redujo a 296,456 V/m, con una mejora evidente en la forma de las líneas de potencial, aunque con deformaciones residuales. Esto sugiere que el plasma logró atenuar los efectos del aceite, pero no neutralizarlos completamente.



Conclusiones

- La revisión bibliográfica sobre la caracterización del gas SF₆ y de los contaminantes seleccionados confirmaron su vulnerabilidad frente a sustancias como vapor de agua, partículas de polvo y aceites durante procesos de manipulación y transporte. Esta información permitió definir adecuadamente los parámetros de configuración en el software seleccionado, facilitando el diseño conceptual del sistema de plasma frío tanto en su configuración como en los elementos presentes en un sistema de plasma. La revisión aplicada permitió observar y analizar el gas en tres estados: predeterminado, contaminado y pretratado, manteniendo constante el dominio para evaluar exclusivamente el impacto eléctrico de cada caso, el módulo de software que nos permitirá observar los cambios y resultados será el módulo de electrostática el cual se encuentra dentro del propio software y es configurable con las funciones de operación de las simulaciones.
- Los resultados numéricos y gráficos (tablas de colores) obtenidos mostraron que la presencia de contaminantes afecta significativamente la uniformidad del campo eléctrico del SF₆, incrementando sus valores máximos hasta casi duplicarlos en el caso del aceite (567,609 V/m), y distorsionando las líneas de equipotencial. Esto indica que la contaminación deteriora la capacidad dieléctrica del gas, generando zonas de mayor concentración de campo eléctrico que pueden traducirse en riesgo de ruptura eléctrica en condiciones reales de operación.
- Tras aplicar el sistema de plasma frío como pretratamiento, se observó en la simulación una recuperación parcial o total del comportamiento eléctrico original del gas SF₆, evidenciado una notable reducción del campo eléctrico (hasta 257,310 V/m en el caso del vapor de agua) y una regularización de las líneas de potencial eléctrico. Esto valida la eficacia del modelo de plasma frío desarrollado, posicionándolo como una alternativa funcional para mantener el uso del gas aislante en condiciones de operación como las de las subestaciones eléctricas sumergibles, especialmente ante contaminaciones comunes y previsibles durante su transporte y manipulación.



Recomendación

- Este trabajo de grado, al haberse desarrollado completamente mediante simulaciones computacionales bajo condiciones ideales, permite sugerir como línea futura de investigación la construcción de un sistema físico a escala que permita observar de manera experimental el comportamiento eléctrico del gas SF₆ contaminado al ser pretratado en un sistema de plasma frío. Esta implementación permitiría evaluar con mayor precisión la efectividad del pretratamiento en condiciones reales, así como analizar posibles efectos no contemplados en la simulación, como pérdidas dieléctricas, inestabilidad del sistema y temperaturas no deseadas.



Referencias bibliográficas.

- [1] A. del Ecuador, "Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica," *Regist. Of*, no. 418, pp. 1-28, 2015.
- [2] (2 021). *PLAN NACIONAL DEL BUEN VIVIR* . 2021. [Online] Available: <https://www.gobiernoelectronico.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/09/Plan-Nacional-para-el-Buen-Vivir-2017-2021.pdf>
- [3] R. Flores and F. Delgado, "Aplicaciones del SF6 en la Industria Eléctrica y su Impacto en el Medio Ambiente," *Ingeniería*, vol. 16, no. 3, pp. 229-241, 2012.
- [4] D. Q. y. M. M. S. Solomon, ""Cambios en los impulsores climáticos humanos y naturales" ", no. 2 pp. 1 -77
- [5] C. Loza, M. E. Cerón-Cucchi, E. H. Cabezas-Garcia, A. Ortiz-Chura, L. Gualdrón-Duarte, and J. I. Gere, "On the use of the SF6 gas tracer technique in Latin America for measuring methane emissions in ruminants: a review and analysis," *New Zealand Journal of Agricultural Research*, pp. 1-30, 2024.
- [6] C. E. d. Ecuador, "Análisis Ambiental Social SE Chorrillos," Corporación Eléctrica del Ecuador, ECUADOR, 20 20. [Online]. Available: <https://www.celec.gob.ec/transelectric/images/stories/noticias/2020WEB/PDF2020/DocumentosINTERECUPER2020/An%C3%A1lisis%20Ambiental%20Social%20SE%20Chorrillos.pdf>
- [7] R. Filipiak, B. Rodríguez, and M. Wiebe, "Análisis técnico-económico para celdas aisladas en SF6 de 60KV (GIS)," 2016.
- [8] M. D. y. Á. Zambrano, "ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL CONSTRUCCIÓN DE SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE SECCIONAMIENTO MONTECRISTI," Corporación Nacional de Electricidad CNEL EP, 2 023. [Online]. Available: <https://www.cnelep.gob.ec/wp-content/uploads/2023/06/ESTUDIO-DE-IMPACTO-AMBIENTAL.pdf>
- [9] L. A. Gutiérrez Salazar, "Caracterización de las subestaciones eléctricas de transmisión y distribución que hagan parte del SIN, del STR o del SDL dentro de la región central (Cundinamarca, Boyacá, Tolima, Meta y Bogotá DC), como parte del convenio marco de cooperación interinstitucional 064 de 2018."
- [10] S. Freire Pérez, "Análisis comparativo de costes de subestaciones eléctricas de muy alta tensión entre diferentes tecnologías: AIS, GIS, HIS y otras tecnologías de compactación y aprovechamiento del espacio," 2020.
- [11] T. M. Beltrán García and S. S. Quintero Meek, "Propuesta de elaboración del protocolo distrital para la gestión integral del hexafluoruro de azufre (SF6) en el sector eléctrico," 2020.
- [12] E. F. Cutzal Granillo, "Diseño de investigación del modelo para la determinación del valor nuevo de reemplazo a un transportista, por la implementación de subestaciones encapsuladas en gas SF6 y sus efectos económicos en la asignación de peaje por la comisión nacional de energía eléctrica," 2021.
- [13] J. C. Julio Rodríguez, "Diseño de subestación de media tensión a 34, 5kv aislada en Sf6," 2024.



- [14] L. Sánchez and O. Reyes, "Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe: Una revisión general," 2020.
- [15] R. Flores and R. Muñoz-Ledo, "El Programa de Mecanismo de Desarrollo Limpio como una alternativa ante el cambio climático," *Ingeniería química*, no. 466, pp. 160-168, 2009.
- [16] K. Ruiz Dillon, *Gas SF6*. p. 330.
- [17] A. T. Cid Coffré, "Análisis técnico económico de planta térmica de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos municipales para Santiago de Chile," 2016.
- [18] B. E. Poling, J. M. Prausnitz, and J. P. O'Connell, *The properties of gases and liquids*. McGraw-hill New York, 2001.
- [19] E. A. L. Vianna, A. R. Abaide, L. N. Canha, and V. Miranda, "Substations SF6 circuit breakers: Reliability evaluation based on equipment condition," *Electric Power Systems Research*, vol. 142, pp. 36-46, 2017.
- [20] N. J. Ricketts and S. P. Cashion, "Hydrofluorocarbons as a replacement for sulphur hexafluoride in magnesium processing," *Magnesium technology 2001*, pp. 30-36, 2001.
- [21] L. Elen, Y. Türen, and E. Koç, "AZ91 Mg alaşımına farklı oranlarda Sb ilavesi ile katılma hızının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi," *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 11, no. 2, pp. 451-463, 2019.
- [22] J.-H. Cheng, S. C. Bartos, W. M. Lee, and S.-N. Li, "SF6 usage and emission trends in the TFT-LCD industry," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 17, pp. 106-110, 2013.
- [23] D. S. O'Connor *et al.*, "Control of apoptosis during angiogenesis by survivin expression in endothelial cells," *The American journal of pathology*, vol. 156, no. 2, pp. 393-398, 2000.
- [24] Z. Zhang, X. Chen, S. Mazumdar, T. Zhang, and Q. Chen, "Experimental and numerical investigation of airflow and contaminant transport in an airliner cabin mockup," *Building and Environment*, vol. 44, no. 1, pp. 85-94, 2009.
- [25] G. Chabot, S. Bourgault, B. Cinq-Mars, É. Tourville, and M. Caissie, "Effect of air and sulfur hexafluoride (SF6) tamponade on visual acuity after epiretinal membrane surgery: a pilot study," *Canadian Journal of Ophthalmology*, vol. 52, no. 3, pp. 269-272, 2017.
- [26] S. W. Heijmink *et al.*, "Prostate cancer: body-array versus endorectal coil MR imaging at 3 T—comparison of image quality, localization, and staging performance," *Radiology*, vol. 244, no. 1, pp. 184-195, 2007.
- [27] K. Kalantarinia and M. D. Okusa, "Ultrasound contrast agents in the study of kidney function in health and disease," *Drug Discovery Today: Disease Mechanisms*, vol. 4, no. 3, pp. 153-158, 2007.
- [28] K. C. Agrawal, *Industrial power engineering handbook*. Elsevier, 2001.
- [29] J. L. Bessede, I. Huet, G. Montillet, E. M. J. Barbier, and J. Micozzi, "Implementation of treatment & recovery of the SF6 gas containing a high amount of decomposition products due to high voltage electrical interruptions," 2004.
- [30] S. A. Boggs, "Sulphur hexafluoride: introduction to the material and dielectric," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 5, no. 5, pp. 18-21, 1989.
- [31] L. G. Christophorou, J. K. Olthoff, and D. S. Green, "Gases for electrical insulation and arc interruption: possible present and future alternatives to pure SF6," 1997.



- [32] F. E. Cruz Juárez, R. A. Osorio Alvarado, and I. M. Paula Rosa, "Propuesta de diseño de una subestación aislada en Gas SF6," 2017.
- [33] Y. Xu, H. Zhou, B. Li, and X. Zhao, "Study on detection of SF6 gas leakage based on photoacoustic spectrometry," 2009, vol. 1: IEEE, pp. 261-265.
- [34] H. Knobloch and K. Schuler, "Responsible Handling of Sulfur Hexafluoride (SF6) by Manufacturers of High-Voltage Switchgear," in *Gaseous Dielectrics X*: Springer, 2004, pp. 293-298.
- [35] D. B. Durocher, M. Haim, L. T. Connor, and J. de Jong, "Safety by design: Solid insulated technologies challenge the use of SF6 in medium-voltage switchgear," 2015: IEEE, pp. 1-9.
- [36] P. E. Menéndez Escalante, "Diseño de investigación para la evaluación del impacto ambiental y medidas de mitigación del hexafluoruro de azufre (SF6) por el uso de equipos eléctricos dentro de las subestaciones eléctricas encapsuladas en gas (tipo GIS)," 2023.
- [37] S. AG. "Equipos Eléctricos Tipo GIS "
<https://www.siemens.com/global/en/products/energy/medium-voltage/systems/medium-voltage-blue-gis.html> (accessed.
- [38] J. Tang, J. Pan, Q. Yao, Y. Miao, X. Huang, and F. Zeng, "Feature extraction of SF6 thermal decomposition characteristics to diagnose overheating fault," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 751-757, 2015.
- [39] M. K. Prasetyo, T. B. U. A. Subekhi, A. Abdulah, and A. Suprayitno, "Analysis of the pressure drop of sulfur hexafluoride (sf6) gas in a circuit breaker 150 KV Siemens 3AQ1EG," *Jurnal Teknologika*, vol. 14, no. 1, pp. 12-25, 2024.
- [40] X. Zhang, Z. Cui, Y. Li, H. Xiao, Y. Li, and J. Tang, "Study on degradation of SF 6 in the presence of H 2 O and O 2 using dielectric barrier discharge," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 72748-72756, 2018.
- [41] J. Sosa Escalada, "Subestaciones eléctricas de alta tensión aisladas en gas," ed: Argentina: Sosa Escalada, 2002.
- [42] J. R. Sotelo Lagos, "Dimensionamiento de subestaciones eléctricas de media tensión aplicativo en java," 2012.
- [43] J. C. Jimenez Colqui, "Dimensionamiento De Subestación Eléctrica De Distribución 12/0.44-0.22 kv Para Satisfacer La Demanda De Energía Eléctrica En El Nivel 15 De La Unidad Minera Casapalca-Huarochirí," 2020.
- [44] C. Colombia, "INFORME DE RESULTADOS 2021," *Universidades*, vol. 7, no. 7, p. 0.
- [45] V. Rodriguez, "Interacción transitoria por proximidad entre la subestación GIS a 115kv de la refinería Francisco I. Madero con la subestación GIS de la Comisión Federal de Electricidad," 2013.
- [46] K. J. Knudson, "Tiwanaku influence in the south central Andes: strontium isotope analysis and Middle Horizon migration," *Latin American Antiquity*, vol. 19, no. 1, pp. 3-23, 2008.
- [47] C. Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison, and P. Leprince, "Atmospheric pressure plasmas: A review," *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 61, no. 1, pp. 2-30, 2006.
- [48] A. Fridman, *Plasma chemistry*. Cambridge university press, 2008.



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



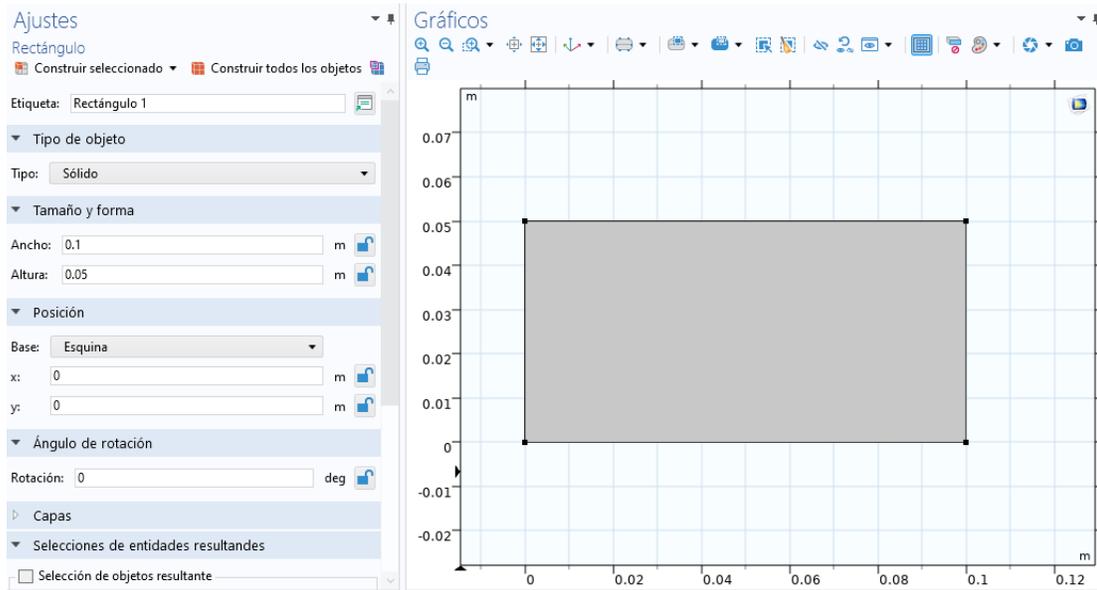
- [49] R. Brandenburg, "Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 26, no. 5, p. 053001, 2017.
- [50] X. Lu, M. Laroussi, and V. Puech, "On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 21, no. 3, p. 034005, 2012.
- [51] T. L. D. R. Multifísica COMSOL 2024. <https://www.comsol.com/> (accessed 08-06-2024, 2024).
- [52] COMSOL and Multiphysics TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS, ed.



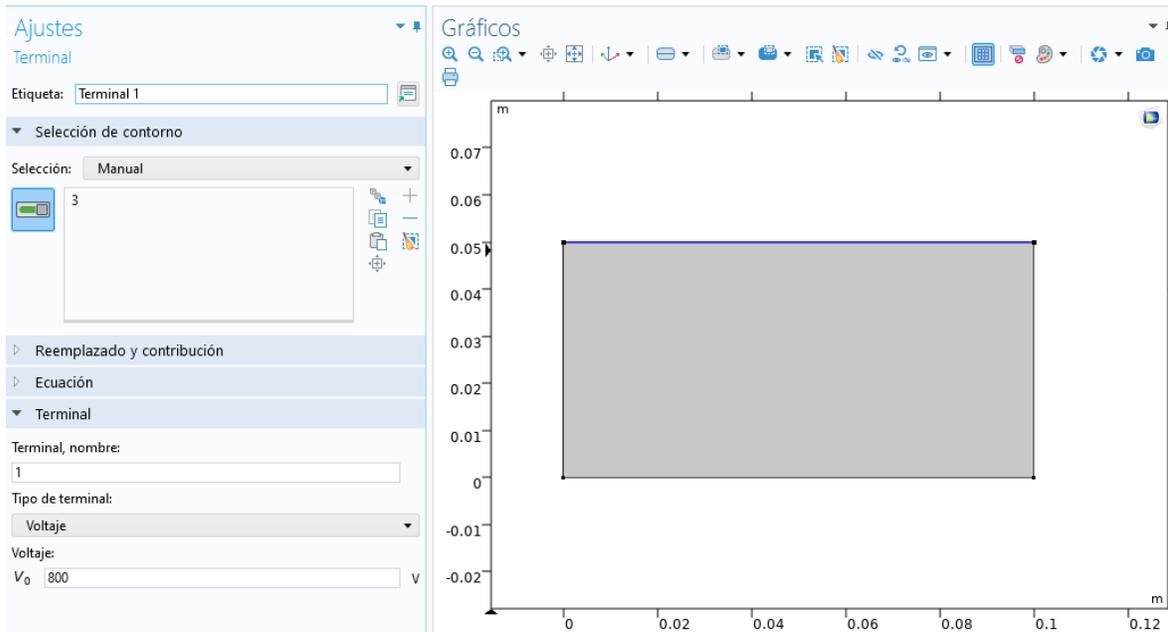
ANEXOS

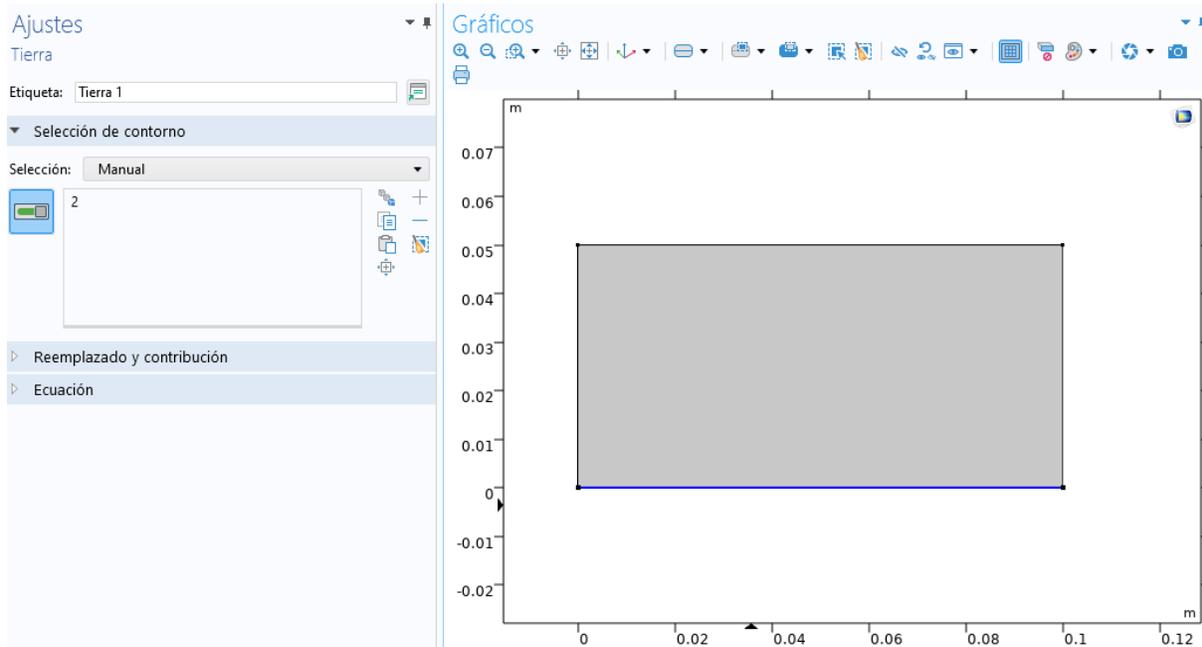
Configuración y parámetros del sistema de plasma frío en la simulación

- Contenedor

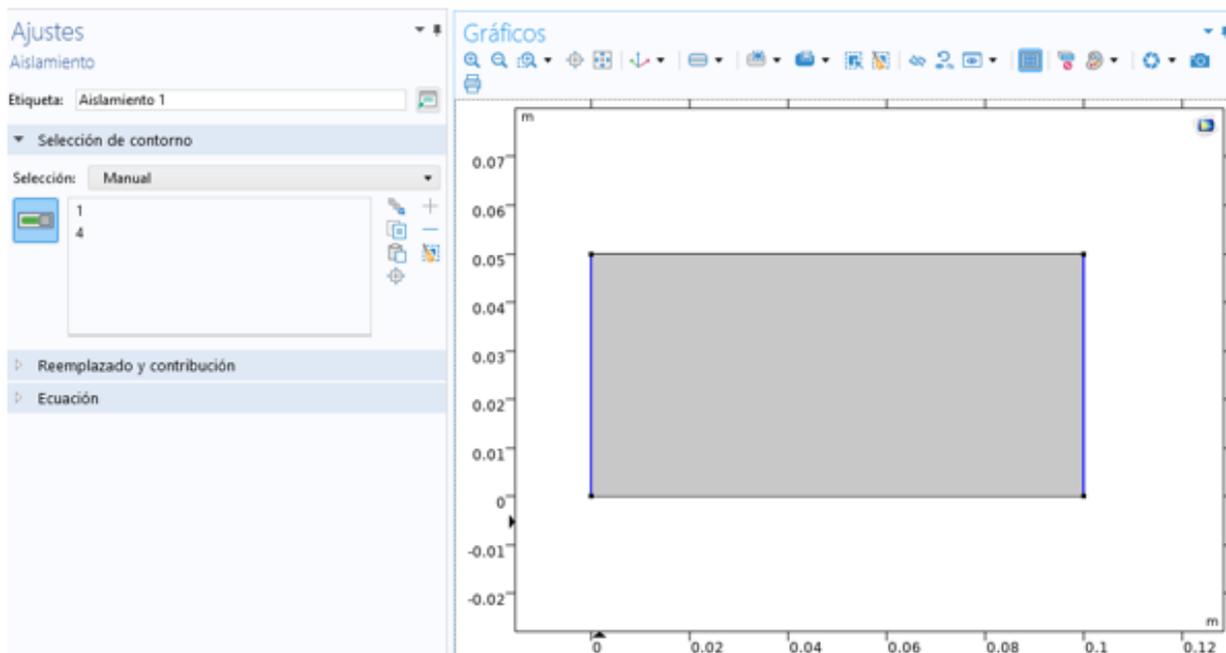


- Electrodos (terminal y tierra)



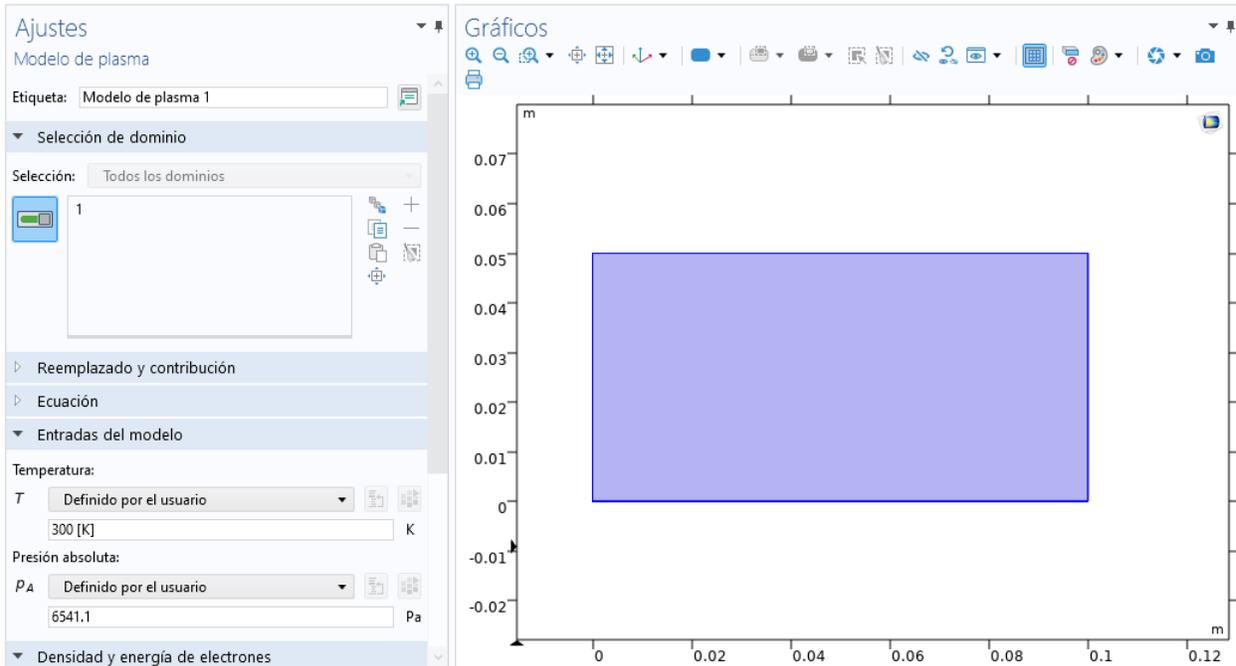


- Aislamiento

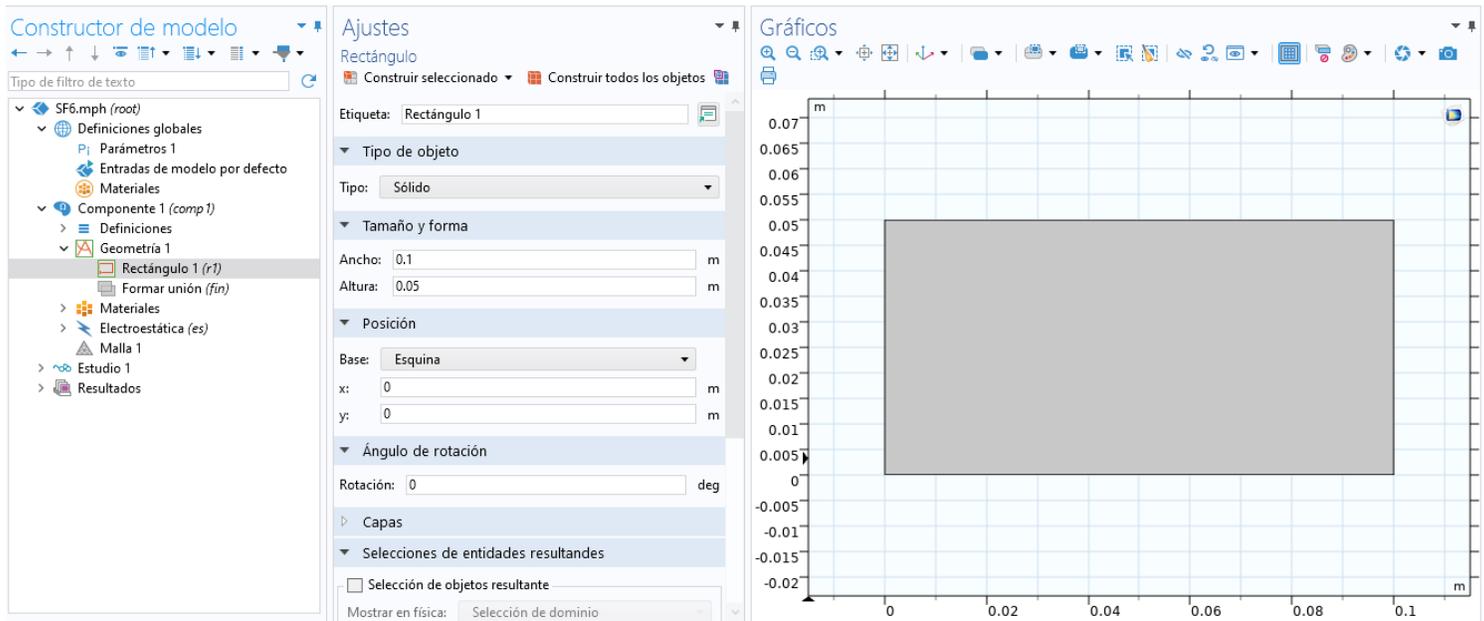


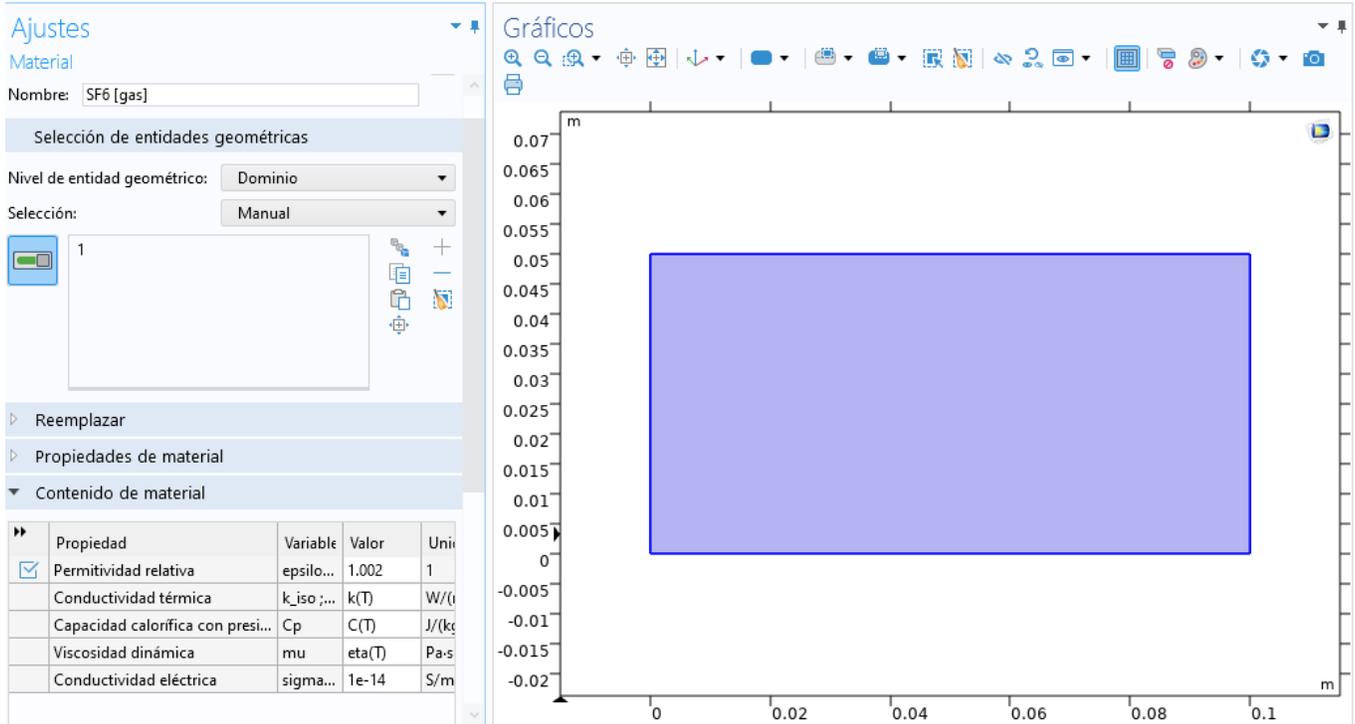


- Paramentos del sistema de plasma



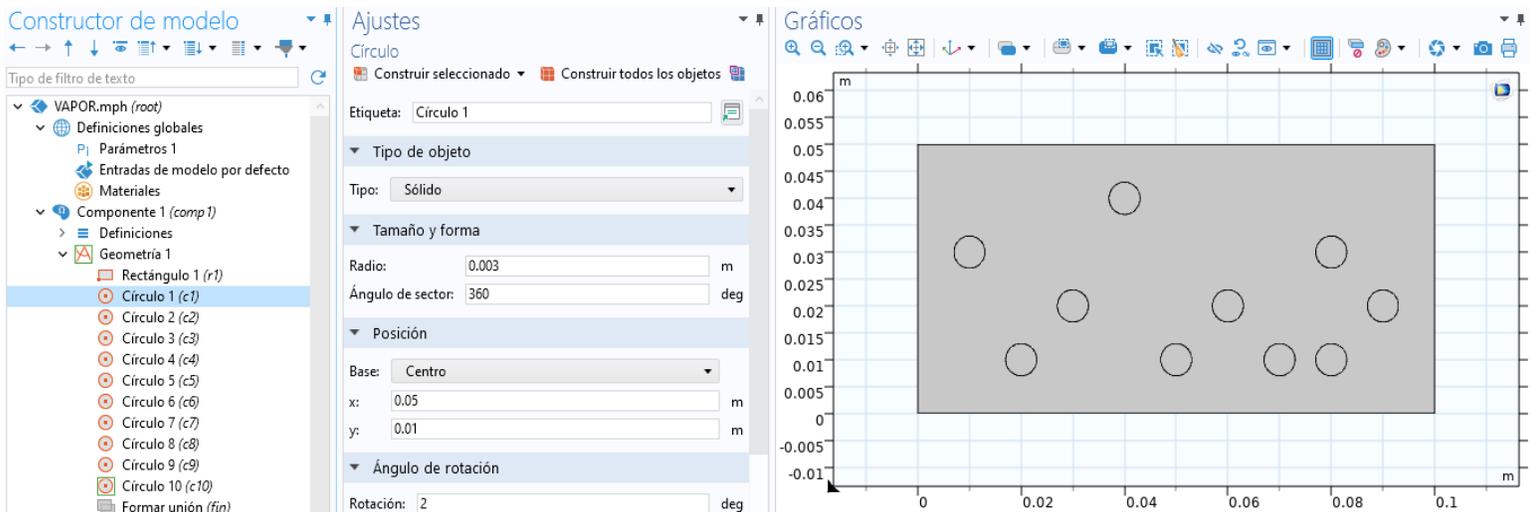
Domínios y propiedades del gas SF6

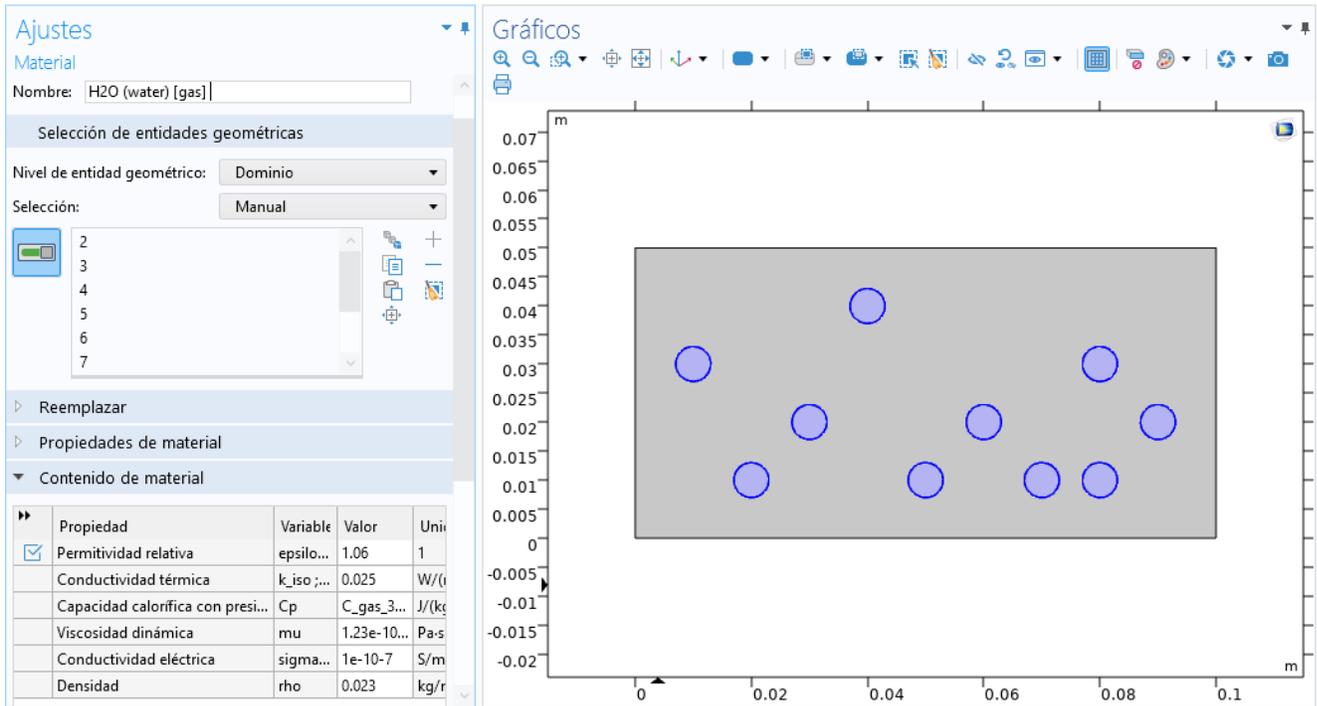




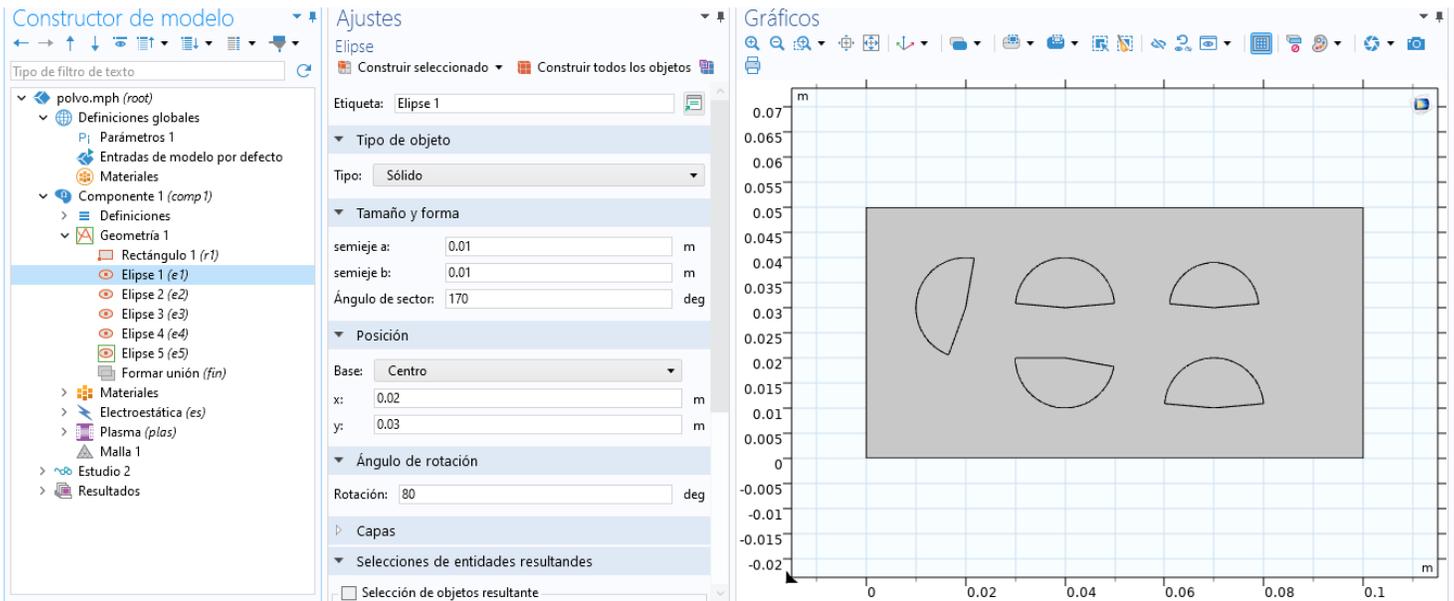
Dominios y propiedades de los contaminantes dentro del gas SF6

- Vapor de agua





- Polvo





Ajustes

Material

Nombre:

Selección de entidades geométricas

Nivel de entidad geométrica:

Selección:

2

3

4

5

6

Reemplazar

Propiedades de material

Contenido de material

Propiedad	Variable	Valor	Unid
Coefficiente de expansión térmica	alpha_...	(alpha_5...	1/K
Deformación térmica	dL_iso...	(dL_soli...	1
Coefficiente tangencial de expansión	alphan...	0.5	1/K
<input checked="" type="checkbox"/> Permitividad relativa	epsilo...	4.5	1
Densidad	rho	2.650	kg/m ³
Capacidad calorífica con presión constante	Cp	720	J/(kg·K)

Gráficos

- Aceite

Constructor de modelo

Tipo de filtro de texto

- ACEITE.mph (root)
 - Definiciones globales
 - Parámetros 1
 - Entradas de modelo por defecto
 - Materiales
 - Componente 1 (comp 1)
 - Definiciones
 - Geometría 1
 - Rectángulo 1 (r1)
 - Elipse 1 (e1)
 - Elipse 2 (e2)
 - Elipse 3 (e3)
 - Elipse 4 (e4)
 - Elipse 5 (e5)
 - Formar unión (fin)
 - Materiales
 - Plasma (plas)
 - Electroestática (es)
 - Malla 1
 - Estudio 2
 - Resultados
 - Conjuntos de datos
 - Vistas
 - Valores derivados
 - Tablas
 - Color Tables

Ajustes

Elipse

Construir seleccionado

Etiqueta:

Tipo de objeto:

Tamaño y forma

semieje a: m

semieje b: m

Ángulo de sector: deg

Posición

Base:

x: m

y: m

Ángulo de rotación

Rotación: deg

Selecciones de entidades resultantes

Selección de objetos resultante

Gráficos

