



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL Y  
MEDIDAS DE MITIGACIÓN DEL HEXAFLUORURO DE AZUFRE (SF<sub>6</sub>) POR EL USO DE  
EQUIPOS ELÉCTRICOS DENTRO DE LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS  
ENCAPSULADAS EN GAS (TIPO GIS)**

**Pedro Enrique Menéndez Escalante**

Asesorado por MBA. Ing. Fernando Wilfredo Velásquez Mijangos

Guatemala, abril de 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL Y  
MEDIDAS DE MITIGACIÓN DEL HEXAFLUORURO DE AZUFRE (SF<sub>6</sub>) POR EL USO DE  
EQUIPOS ELÉCTRICOS DENTRO DE LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS  
ENCAPSULADAS EN GAS (TIPO GIS)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**PEDRO ENRIQUE MENÉNDEZ ESCALANTE**  
ASESORADO POR MBA. ING. FERNANDO WILFREDO VELÁSQUEZ  
MIJANGOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, ABRIL DE 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

|            |                                       |
|------------|---------------------------------------|
| DECANA     | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| VOCAL I    | Ing. José Francisco Gómez Rivera      |
| VOCAL II   | Ing. Mario Renato Escobedo Martínez   |
| VOCAL III  | Ing. José Milton de León Bran         |
| VOCAL IV   | Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente       |
| VOCAL V    | Br. Fernando José Paz González        |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez       |

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| DECANO     | Ing. Ángel Roberto Sic García        |
| EXAMINADOR | Ing. Bayron Armando Cuyan Culajay    |
| EXAMINADOR | Ing. Jorge Gilberto González Padilla |
| EXAMINADOR | Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez      |



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL Y  
MEDIDAS DE MITIGACIÓN DEL HEXAFLUORURO DE AZUFRE (SF<sub>6</sub>) POR EL USO DE  
EQUIPOS ELÉCTRICOS DENTRO DE LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS  
ENCAPSULADAS EN GAS (TIPO GIS)**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 15 de octubre de 2022.

**Pedro Enrique Menéndez Escalante**



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por ser quién me guio todos los días de mi vida, bendiciendo y cuidando a cada uno de los integrantes de mi círculo familiar, dándome la fuerza necesaria para seguir y cumplir todo lo que me he propuesto.

### **Mi padre**

Carlos Enrique Menéndez González, por ser la persona que me motivó desde siempre para poder convertirme en la persona que actualmente soy y por todos sus sabios consejos en beneficio y amor hacia a mi persona

### **Mi madre**

Sonia del Carmen Escalante García, por ser la persona que siempre me apoyó y estuvo presente en los acontecimientos vividos hasta el día de hoy, brindándome su amor y comprensión.

### **Mis hermanos**

Adriana Sofía, Úrsula Leticia, Laura del Carmen y Salomón Menéndez, por ser mis compañeros de aventuras en la vida, por su apoyo incondicional y por creer siempre en mí.

**Mis sobrinos**

Paula Jeannette Ortíz Menéndez, Santiago y Gabriel Menéndez, Javier y Joaquín Adrián Galvez Menéndez, por ser esas personas especiales en la vida de cada uno de los miembros de mi familia.

**Mi familia**

Mis tías Iliana Jeannette y María del Rosario Menéndez Gonzalez y mi abuelita Celia Leticia Gonzalez por ser esos pilares que siempre me acompañaron durante toda mi vida y el cariño hacia mi persona.

**Mi novia**

Victoria Cruz Portillo, por ser la mujer que ha brindado su cariño, amor y apoyo, durante todo este proceso, y a lo largo de nuestra vida juntos.

## AGRADECIMIENTOS A:

|   |   |
|---|---|
| <b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b> | Por ser mi <i>alma mater</i> , la casa que me albergó por todos estos años, para poder forjarme como profesional.   |
| <b>Facultad de Ingeniería</b>                 | Por entregarme todas las herramientas a nivel conocimiento que me permitieron culminar este proyecto.   |
| <b>Mi asesor</b>                              | Fernando Wilfredo Velásquez, por ser ese ejemplo de profesional y su valioso tiempo en este proyecto de investigación.  |
| <b>Enérgica S.A.</b>                          | Por permitirme la oportunidad de tener la experiencia, proporcionarme las herramientas pertinentes, para desarrollar este proyecto de investigación. Por su apoyo, para poder concluir y seguir adelante. |
| <b>Mis amigos</b>                             | Por su apoyo para concluir y seguir adelante.   |



## ÍNDICE GENERAL

|   |     |
|---|-----|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....   | III |
| LISTA DE SÍMBOLOS.....  | VII |
| GLOSARIO.....   | VII |
| RESUMEN.....  | XII |
| <br>  |     |
| 1. INTRODUCCIÓN.....  | 1   |
| <br>  |     |
| 2. ANTECEDENTES.....  | 3   |
| <br>  |     |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....   | 7   |
| 3.1. Descripción del problema .....   | 7   |
| 3.2. Formulación del problema .....   | 8   |
| 3.3. Delimitación del problema.....   | 9   |
| <br>  |     |
| 4. JUSTIFICACIÓN.....   | 11  |
| <br>  |     |
| 5. OBJETIVOS.....   | 13  |
| 5.1. General .....  | 13  |
| 5.2. Específicos.....   | 13  |
| <br>  |     |
| 6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN .....                         | 15  |
| <br>  |     |
| 7. MARCO TEÓRICO .....  | 17  |
| 7.1. Gas hexafluoruro de azufre SF <sub>6</sub> .....                         | 17  |
| 7.2. El SF <sub>6</sub> como agente extintor en dispositivos eléctricos ..... | 18  |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 7.3.     | Subestaciones encapsuladas en gas de tipo GIS .....                   | 19 |
| 7.4.     | Propiedades del gas SF <sub>6</sub> .....                             | 20 |
| 7.4.1.   | Propiedades químicas, físicas y ambientales del SF <sub>6</sub> ..... | 21 |
| 7.4.2.   | Pureza y calidad del gas SF <sub>6</sub> .....                        | 23 |
| 7.4.3.   | Emisiones de SF <sub>6</sub> en equipos eléctricos.....               | 27 |
| 7.4.3.1. | Método de nivel 1.....  | 29 |
| 7.4.3.2. | Método de nivel 2.....  | 29 |
| 7.4.3.3. | Método de nivel 3.....  | 30 |
| 7.4.4.   | Impacto ambiental de las emisiones de SF <sub>6</sub> .....           | 30 |
| 7.4.4.1. | El efecto invernadero .....   | 30 |
| 8.       | PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....                               | 35 |
| 9.       | METODOLOGÍA .....   | 37 |
| 9.1.     | Características del estudio.....                                      | 37 |
| 9.2.     | Variables .....   | 39 |
| 10.      | TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....                          | 41 |
| 10.1.    | Análisis y obtención de la información.....                           | 41 |
| 10.2.    | Análisis cuantitativo de los datos .....                              | 41 |
| 11.      | CRONOGRAMA .....  | 43 |
| 12.      | FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....  | 45 |
| 13.      | REFERENCIAS .....   | 47 |

|     |                |    |
|-----|----------------|----|
| 14. | APÉNDICE ..... | 49 |
|-----|----------------|----|

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1. | Árbol del problema.....  | 8  |
| 2. | Estructura de la molécula SF <sub>6</sub> .....  | 18 |
| 3. | Subestación encapsulada en gas tipo GIS.....   | 20 |
| 4. | Propiedades del gas SF <sub>6</sub> .....  | 22 |
| 5. | Proceso de gestión del SF <sub>6</sub> dentro de equipos eléctricos .....                      | 26 |
| 6. | Árbol de decisión para la estimación del método de nivel de emisiones de SF <sub>6</sub> ..... | 28 |
| 7. | Metodología de nivel 1.....  | 29 |
| 8. | Metodología de nivel 2.....  | 29 |
| 9. | Metodología de nivel 3.....  | 30 |

### TABLAS

|       |   |    |
|-------|---|----|
| I.    | Nivel de calidad después de tratamiento.....                | 23 |
| II.   | Normas de concentraciones máximas para gases.....           | 24 |
| III.  | Contaminantes máximos en compuestos.....                    | 25 |
| IV.   | Principales propiedades calentamiento global .....          | 31 |
| V.    | Reducción equivalente del SF <sub>6</sub> .....             | 32 |
| VI.   | Gases de efecto invernadero.....                            | 33 |
| VII.  | Metodología recopilación de datos .....                     | 37 |
| VIII. | Cronograma.....   | 43 |
| IX.   | Recursos financieros necesarios para la investigación ..... | 45 |







## LISTA DE SÍMBOLOS

| <b>Símbolo</b>        | <b>Significado</b>     |
|-----------------------|------------------------|
| <b>H<sub>2</sub>O</b> | Agua                   |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | Dióxido de carbono     |
| <b>°C</b>             | Grados Celsius         |
| <b>SF<sub>6</sub></b> | Hexafluoruro de azufre |
| <b>pH</b>             | Potencial de hidrógeno |



## GLOSARIO

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| <b>Agente extintor</b>      | Son aquellas sustancias que, gracias a sus propiedades físicas o químicas, se emplean para apagar arcos eléctricos.  |
| <b>Arco eléctrico</b>       | Descarga eléctrica que se forma entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial y colocados en el seno de una atmósfera gaseosa.  |
| <b>Calentamiento global</b> | Se constituye por la absorción de la energía solar por parte de la tierra. La tierra al calentarse desprende calor a la atmósfera en forma de rayos infrarrojos.   |
| <b>Corrosión</b>            | Se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno.  |
| <b>Descomposición</b>       | El término descomposición se refiere a la reducción del cuerpo de un organismo vivo a formas más simples de materia.   |
| <b>Efecto invernadero</b>   | Fenómeno natural en el cual el proceso derivado de la radiación térmica, que emite la superficie terrestre es absorbido por partículas de gas de efecto invernadero y este se emite (irradia) en direcciones aleatorias. |

|  |   |
|--|---|
| <b>Gas <i>insulated</i> substation (GIS)</b> | Tipo de subestación eléctrica que engloba varios dispositivos y aparatos eléctricos, los cuales se encuentran herméticamente sellados por el gas dieléctrico SF <sub>6</sub> . En español: subestación con aislamiento de gas o subestación encapsulada en gas. |
| <b>Hexafluoruro de azufre</b>                | Gas que se utiliza de manera regular y constantemente en los equipos eléctricos, para aislar un arco eléctrico, dentro de estos equipos. Símbolo: SF <sub>6</sub> .   |
| <b>Incoloro</b>                              | Hace referencia a la carencia de color, es decir, no se ve.   |
| <b>Inerte</b>                                | Hace referencia a la carencia de vida, si bien, su uso se da en varias ciencias.  |
| <b>Irradiación</b>                           | Proceso por el cual un objeto se expone a la radiación, la exposición puede tener su origen en varias fuentes.  |
| <b>Mantenimiento preventivo</b>              | Actividades de limpieza, pruebas eléctricas, lubricación de equipos eléctricos que estén dentro de una subestación eléctrica, con el fin de prolongar la vida útil de cada uno de los dispositivos eléctricos.  |
| <b>Purificación del gas</b>                  | Se entiende como la eliminación de sustancias nocivas sólidas o gaseosas del aire.  |

|                              |   |
|------------------------------|---|
| <b>Recirculación de gas</b>  | Proceso en el cual se da tratamiento al gas en mención para su reinsertión a los equipos eléctricos.  |
| <b>Subestación eléctrica</b> | Instalación que tiene como finalidad regular y transformar los niveles de tensión óptimos para su transmisión y distribución.   |
| <b>Toxicidad</b>             | Capacidad de una sustancia química de producir efectos perjudiciales sobre un ser vivo, al entrar en contacto con él. Tóxico es cualquier sustancia, artificial o natural, que posea toxicidad. |



## RESUMEN

En la actualidad mundial, y a nivel nacional, en afán de encontrar maneras eficientes de mantener estable y brindar una buena calidad en el suministro de energía eléctrica, los especialistas en tecnologías de transformación de energía eléctrica han optado por aprovechar las bondades que se presentan en ciertos compuestos químicos, los cuales permiten brindar respuestas eficientes ante alguna falla que puedan presentar los dispositivos eléctricos, dentro de una subestación eléctrica.

Siendo así el caso del gas hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ), el cual, al ser un compuesto químico, mucho más denso que el aire encontrado en la atmósfera, y con altas propiedades dieléctricas en la extinción de arcos eléctricos, lo hacen un medio aislante ideal, en principio, utilizado como agente extintor dentro de interruptores automáticos de media y alta tensión.

Lo anterior, ha originado la creación de nuevos tipos de subestaciones eléctricas, dejando a un lado las subestaciones de tipo convencional, e introduciendo las subestaciones herméticas en gas  $\text{SF}_6$ , siendo estas de tipo GIS, (*gas insulated substation*), las cuales optimizan el espacio físico de los dispositivos eléctricos dentro de las subestaciones, con respecto a las convencionales que actualmente funcionan.

Las subestaciones encapsuladas en gas  $\text{SF}_6$  (GIS), están conformadas por los siguientes equipos: interruptor de potencia, seccionadores, transformadores de corriente y transformadores de potencial, los cuales se encuentran unidos y sellados herméticamente con el gas  $\text{SF}_6$ , reduciendo el

espacio físico, disminuyendo el tiempo de respuesta en la presencia de algún arco eléctrico ubicado en cualquier parte de la subestación tipo GIS.

El SF<sub>6</sub> es un gas que debe ser utilizado únicamente con sistemas herméticamente sellados, derivado de que este contiene propiedades que producen potencialmente el calentamiento global, para lo cual, al finalizar su utilización, existe la posibilidad de contar con programas y lineamientos que permitan su reciclado, para evitar emisiones a la atmósfera, de manera desordenada e irresponsable.

Al tener una subestación de tipo GIS, se conoce que son equipos eléctricos con bajo mantenimiento, permitiendo que se accionen de manera manual los disparos de liberación del gas, solo las veces que se tengan programados los mantenimientos predictivos, logrando así detectar a tiempo cualquier anomalía en el sistema eléctrico, o en el sistema del gas SF<sub>6</sub> como agente extintor para fallas de tipo arco eléctrico.

Al momento del ensamble de los dispositivos eléctricos que componen las subestaciones de tipo GIS, existe la manipulación del gas SF<sub>6</sub> para su llenado y puesta en operación; asimismo, para la ejecución de los mantenimientos predictivos se acciona la liberación de presión de gas SF<sub>6</sub>, logrando que existan emisiones de gas las cuales son liberadas al ambiente.

Teniendo en cuenta que en Guatemala la tecnología de subestaciones eléctricas de tipo GIS, se encuentra en expansión y cada vez más se presentan dentro del Sistema Nacional Interconectado (SNI), más subestaciones de este tiempo se han incorporado al sistema, por mencionar algunas: subestación eléctrica Minerva, subestación eléctrica Ciudad Vieja, subestación eléctrica Antigua Guatemala, subestación eléctrica Tinco, siendo estas de un voltaje de 69

KV. Resaltando en especial una de las más recientes y que posee tanto en voltaje de 69 KV, como en voltaje de 230 KV, subestación Eléctrica Incienso, ubicada en la zona 7 de la ciudad capital de Guatemala, propiedad de TRELEC, S.A.

Primordialmente, este estudio permite determinar las emisiones de gas SF<sub>6</sub>, liberadas al ambiente en los diferentes accionamientos del sistema, tanto a nivel mantenimiento, como al presentarse alguna falla de arco eléctrico, presente en los dispositivos eléctricos de la subestación tipo GIS, determinando los posibles daños a nivel biológico en el personal técnico que manipula este compuesto químico, así como también, los impactos ambientales que se puedan presentar.

Además, este estudio pretende determinar los controles de mitigación, para las emisiones deliberadas del gas SF<sub>6</sub>, en los mecanismos de accionamiento de las subestaciones eléctricas de tipo GIS.



# 1. INTRODUCCIÓN

El trabajo de investigación que se propone tiene el propósito de analizar el impacto ambiental y plantear las medidas de mitigación del gas hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ), causadas por las emisiones generadas en el uso de equipos eléctricos dentro de las subestaciones eléctricas de tipo GIS, siendo estas emisiones producidas durante las diferentes maniobras de los equipos eléctricos.

El estudio se enfoca en las emisiones del gas  $\text{SF}_6$  en la operación de la subestación encapsulada en gas tipo GIS (*gas insulated substation*), subestación eléctrica Incienso, propiedad de la empresa TRELEC, S.A, ubicada en la zona 7, de la Ciudad de Guatemala.

Actualmente, no existe un plan de acción de impacto ambiental y medidas de mitigación de las emisiones de gas  $\text{SF}_6$ , en el uso de los diferentes equipos eléctricos que componen la subestación tipo GIS, el diseño de la investigación tiene como fin implementar los pasos a seguir para minimizar dichas emisiones, realizando las maniobras pertinentes, para beneficiar el medioambiente y reducir los daños colaterales biológicos a los técnicos que manipulan este compuesto químico.

Se considera que existen dos momentos de operación de los equipos eléctricos en donde se acciona el gas  $\text{SF}_6$ , siendo este gas un agente extintor de arco eléctrico. Dichos momentos de operación se presentan durante una falla y cuando ocurre un accionamiento de mantenimiento preventivo.

Las emisiones del gas SF<sub>6</sub> que se presentan en los dos momentos posibles de operación de los equipos eléctricos dentro de la subestación tipo GIS, provocan el aumento de los índices de gases de efecto invernadero, por lo que es necesario conocer cómo manejar dichas emisiones, trabajarlo, reutilizarlo o en su defecto desecharlo, aplicando controles de mitigación que permitan a los operadores un mejor desempeño a la hora de la utilización del compuesto químico, que reduzca los daños posibles al medioambiente.

El diseño de investigación acerca de este compuesto consta de 5 fases, iniciando la primera fase que enmarca las generalidades básicas de las situaciones medioambientales del uso del gas SF<sub>6</sub> en respuesta a las necesidades del subsector eléctrico del país y, en concreto, para la red de transmisión y distribución de energía eléctrica de la Ciudad de Guatemala.

En la segunda fase se da a conocer cómo se desarrollará la investigación, estimando las cantidades de gas SF<sub>6</sub>, emitidas en el accionamiento de los equipos eléctricos ante una falla, sirviendo de agente extintor y las emitidas en la operación para el mantenimiento predictivo de dichos equipos.

En la tercera fase, se presentan los resultados obtenidos de la investigación, derivados de la labor de campo realizada durante este estudio. La cuarta fase se enfoca en el análisis y discusión de los resultados finales obtenidos.

En la quinta fase se describe el impacto ambiental y los controles de mitigación, de las emisiones del gas SF<sub>6</sub>, además, se dan a conocer las medidas de mitigación, en las emisiones del gas SF<sub>6</sub>, así como las recomendaciones en el manejo del mismo. Implementando procesos de operación dentro de los equipos eléctricos de una subestación eléctrica encapsulada, tipo GIS.

## 2. ANTECEDENTES

El servicio de energía eléctrica es un servicio de primera necesidad, por lo cual es necesario que todos los equipos involucrados en el suministro de energía eléctrica sean de calidad y presenten estándares internacionales en la operación.

Existe una relación directa entre tecnología y eficiencia, lo que conlleva a nuevos procesos en la eliminación de fallas, que puedan producir daños a los activos dentro de las subestaciones eléctricas, e interrumpen el servicio fluido de energía eléctrica.

Siendo la principal falla, los arcos eléctricos, los cuales a través del tiempo han sido disipados por medio del aire, siendo este el agente extintor de dicha falla. A este tipo de subestaciones que poseen equipos a la intemperie se les conoce como de tipo convencional. A las nuevas subestaciones con el gas SF<sub>6</sub> como agente extintor, las cuales se componen de una única pieza herméticamente sellada e interconectada, denominada de tipo encapsulada, o *gas insulated substation*, (GIS, por sus siglas en inglés).

Siendo el gas SF<sub>6</sub> responsable del ahorro de recursos en la evolución de estos sistemas que sustituyen, tanto al aceite, como al aire en su función de aislamiento y apagado del arco eléctrico (Megger, 2003).

Su alta estabilidad química, gran rigidez dieléctrica (en promedio 2.5 veces mayor a la del aire), electronegatividad y capacidad para volver a recombinarse lo han convertido en un gas indispensable en la industria (Siemens AG, 2015).

Es factible que los equipos que intervienen en las maniobras de accionamiento de la liberación del SF<sub>6</sub>, tanto para fallas, como para mantenimientos programados, alcancen índices altos de valores de corto circuito y logren ser equipos más compactos, gracias a los beneficios y propiedades del gas en mención.

El gas SF<sub>6</sub> es un compuesto químicamente estable, antes de los 2000 grados Celsius, por lo que a la temperatura que puede llegar un arco eléctrico, las partículas del SF<sub>6</sub>, se descomponen en pequeñas subpartes, con un grado de descomposición muy pequeño, pero que regularmente se cambian para volver a formar el SF<sub>6</sub> de nuevo.

Al ser el SF<sub>6</sub> un gas con propiedades electronegativas, es decir, que las partículas poseen la característica de absorber o atrapar electrones sueltos y formar nuevos iones negativos, elevando de esta manera su rigidez dieléctrica.

El gas SF<sub>6</sub>, posee una presión atmosférica de más del doble que el aire, por lo que permite que la velocidad de expansión del gas sea 15 % más rápida que el aceite, esto para el fin de extinción de arco eléctrico.

Son considerables los beneficios que trae a la industria eléctrica la implementación del gas SF<sub>6</sub>, en las subestaciones de tipo GIS, por su alto porcentaje de capacidad dieléctrica, logrando de manera sencilla y rápida la recuperación de sus propiedades químicas luego de haber extinguido el arco eléctrico dentro de los dispositivos.

El accionamiento de manera eficiente del sistema de liberación del gas SF<sub>6</sub>, al momento de presentar alguna falla existente dentro de la subestación, permite la protección de los demás equipos que conforman todo el módulo

hermético, reduciendo los costos por pérdidas o daños a los dispositivos eléctricos.

El SF<sub>6</sub> es un gas no inflamable que, al momento de entrar en contacto con la capa de ozono, el porcentaje de daño que causa a la misma es mínima. Pero a su vez, al estar presente en la atmósfera, adquiere un alto índice de efecto invernadero, al no permitir que la radiación infrarroja de tipo onda larga la cual es emitida por la superficie terrestre salga hacia el espacio. Sus propiedades físicas, así como su proceso lento de degradación, además de su capacidad calórica lo convierten en uno de los gases de efecto invernadero de mayor preocupación a nivel mundial.

Si bien el gas SF<sub>6</sub> en su estado puro no es tóxico, durante su manipulación puede contaminarse con impurezas y reaccionar creando subproductos que lo transforman en sustancias peligrosas para la salud humana y el ambiente, por lo cual se recomienda tener el máximo cuidado en su manipulación, considerando siempre su reutilización, reciclaje, transporte y eliminación final de manera apropiada y responsable.

Las emisiones de SF<sub>6</sub> que se emiten en los equipos eléctricos pueden presentarse principalmente por dos factores, tales como: las fallas de arco eléctrico y las maniobras de operación para el mantenimiento de los dispositivos eléctricos. Lo ideal es que no existan emisiones a la atmósfera, pero en la realidad las fugas significativas se producen a partir de los casos antes mencionados.

Aunque el aporte del SF<sub>6</sub> a los índices de calentamiento global o acumulación de gases de efecto invernadero generados por el hombre en la atmósfera es del 0.2 %, valor relativamente despreciable, esto se debe a que la

mayoría del SF<sub>6</sub> producido se encuentra aún en servicio activo dentro de los dispositivos eléctricos dentro de las subestaciones eléctricas de tipo GIS, no obstante, una cantidad relativamente pequeña de SF<sub>6</sub> puede afectar el clima principal motivo con el cual la Conferencia de Kioto en 1997 lo incluyó en la lista de los seis gases de efecto invernadero de origen humano para su respectiva vigilancia (AFBEL, 2015).

Es de suma importancia conocer las emisiones residuales de SF<sub>6</sub>, que se liberan a la atmósfera cuando se presentan las operaciones de los equipos eléctricos dentro de las GIS, por lo que tomando como referencia una de las subestaciones más grandes de la Ciudad de Guatemala, y pionera en la tecnología de subestaciones encapsuladas en gas, siendo esta la Subestación Eléctrica Incienso, se determinará un control de mitigación a partir del cálculo de los porcentajes de emisión para las dos diferentes operaciones que se presenten durante la manipulación del gas SF<sub>6</sub>.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

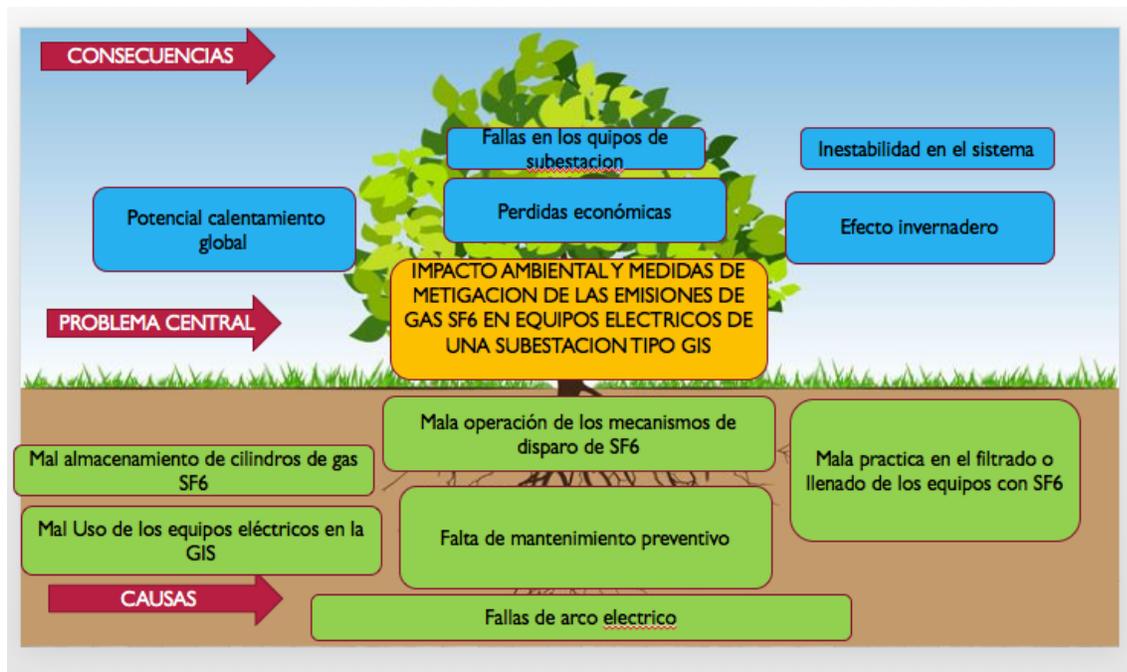
#### **3.1. Descripción del problema**

En la actualidad mundial, y derivado del crecimiento poblacional, se produce una mayor demanda de suministro de energía eléctrica. Hoy en día las redes de transmisión y distribución están en constante presión de cumplir y mantener estable la creciente demanda, así como proveer un suministro de electricidad económico, estable y eficiente, con equipos que estén a la altura de las necesidades.

Para el buen funcionamiento de los equipos eléctricos, es necesario realizar mantenimientos programados que permitan determinar el estado operativo óptimo para cumplir la función de detección e interrupción de la falla (arco eléctrico) cuando se presente dentro de las subestaciones eléctricas, y para este caso las de tipo encapsuladas en gas, liberando el SF<sub>6</sub> como agente extintor.

Este gas es considerado por los científicos especialistas como uno de los principales agentes de efecto invernadero derivado de sus componentes físicos y químicos, por lo que es necesario un seguimiento y control de mitigación de las emisiones dispersadas al ambiente.

Figura 1. **Árbol del problema**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft PowerPoint.

### 3.2. **Formulación del problema**

En la actualidad, tanto a nivel nacional como mundial, no se ha presentado un estudio que permita determinar las cantidades de emisiones de gas SF<sub>6</sub>, que se liberan al medioambiente, para las diferentes maniobras que se realizan dentro de una subestación encapsulada en gas (GIS).

- Pregunta central

¿Se conocen el impacto ambiental y las medidas de mitigación en las emisiones del gas hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), dentro de los equipos eléctricos de una subestación tipo GIS?

- Preguntas auxiliares
  - ¿Existen controles y un plan de mitigación de emisiones de gas SF<sub>6</sub>, en el manejo de las diferentes operaciones de los equipos eléctricos dentro de una subestación eléctrica tipo GIS?
  - ¿Cuál es la cantidad de emisión de gas SF<sub>6</sub>, liberado en las diferentes condiciones de operación de los equipos eléctricos dentro de una subestación de tipo GIS, sean estas fallas o maniobras de mantenimiento?
  - ¿Cuál es el impacto ambiental que se produce por la emisión de gas SF<sub>6</sub>, en la operación de equipos eléctricos?
  - ¿Existen protocolos que permitan la manipulación del gas SF<sub>6</sub>, para la reducción de emisiones liberadas al ambiente, en cada uno de los accionamientos de los dispositivos eléctricos dentro de una subestación tipo GIS?

### **3.3. Delimitación del problema**

El proyecto de investigación se llevará a cabo en una subestación propiedad de una transportista eléctrica, para el desarrollo fueron permitidos los requerimientos necesarios en torno de las condiciones de políticas de integridad y seguridad de la información. El estudio se desarrollará en un lapso no mayor a 8 meses y se aplicará en el área de subestaciones eléctricas.

- Alcance de tiempo: el estudio se desarrollará en el primer semestre del 2023 y finales del mismo año.

- Alcance del espacio: comprendido en el área de subestaciones eléctricas.
- Alcance metodológico: el estudio se desarrollará en etapas secuenciales, desde un estudio previo hasta la obtención de resultados.
- Exploración del problema: describe cómo repercute a nivel ambiental el no contar con un plan de mitigación de emisiones de SF<sub>6</sub>.
- Aplicabilidad de los resultados: son válidos, para el área de subestaciones eléctricas.

## 4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo corresponde a la línea de investigación de ambiente, aplicada al área de impactos y medidas de mitigación aplicados a sistemas atmosféricos, líticos y ecosistemas acuáticos y terrestres.

Se hará énfasis en las emisiones que se produzcan de la operación de los equipos eléctricos de la subestación eléctrica Incienso con un voltaje de operación de 69 KV, simulando fallas que permitan obtener datos estimados del SF<sub>6</sub> al fungir como agente extintor de arco eléctrico y emisiones por parte de maniobras operativas para el mantenimiento de los equipos, esto permitirá desarrollar controles de mitigación.

La razón por la cual se realizará este estudio a los equipos eléctricos de las subestaciones encapsuladas en gas, es que no existen registros de las emisiones de gas SF<sub>6</sub>, que puedan ser liberadas a la atmósfera, al momento de operar las diferentes partes herméticas (transformadores de potencial, seccionadores e interruptores de potencia), que componen las subestaciones tipo GIS.

Esto con el fin de mantener un control óptimo de los equipos permitiendo prolongar la vida de operación de los activos de la subestación encapsulada.

Así, el presente estudio será de utilidad para que existan medidas corporativas que permitan mejores competencias en el personal operativo, teniendo planes concretos para mejorar la eficiencia del suministro de energía

eléctrica, contribuyendo a minimizar el impacto negativo al ambiente, y permitiendo una larga vida útil de los equipos eléctricos.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Evaluar el impacto ambiental y proponer las medidas de mitigación en las emisiones del gas hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), dentro de los equipos eléctricos de una subestación tipo GIS.

### **5.2. Específicos**

- Dar controles y un plan de mitigación de emisiones de gas SF<sub>6</sub>, en el manejo de las diferentes operaciones de los equipos eléctricos dentro de una subestación eléctrica tipo GIS (corrección de detalles).
- Determinar la cantidad de emisión de gas SF<sub>6</sub>, liberados en las diferentes condiciones de operación de los equipos eléctricos dentro de una subestación de tipo GIS, sean fallas o maniobras de mantenimiento.
- Dar a conocer el impacto ambiental que se produce por la emisión de gas SF<sub>6</sub>, en la operación de equipos eléctricos.
- Dar a conocer protocolos que permitan la manipulación del gas SF<sub>6</sub>, para la reducción de emisiones deliberadas al ambiente, en cada uno de los accionamientos de los dispositivos eléctricos dentro de una subestación tipo GIS.



## **6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

En este trabajo se pretende identificar las medidas de mitigación e impacto ambiental del SF<sub>6</sub>, en el uso de equipos eléctricos en las subestaciones eléctricas encapsuladas en gas (GIS).

La identificación del impacto ambiental que producen las emisiones de gas SF<sub>6</sub>, en el uso de los equipos eléctricos, permitirá al estudio ser referente para el estudio futuro de los daños ocasionados a nivel medioambiental, esto para todos aquellos que deseen intervenir en el ámbito de las subestaciones eléctricas.

Para identificar el impacto ambiental y los efectos que pueda causar, es necesario conocer la cantidad de emisiones que son expulsados de los equipos eléctricos en su operación. Conocer el marco legal ante el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), en cuanto a la regulación del uso del gas, sus efectos directos a la atmósfera.

El impacto ambiental y las posibles fuentes de emisión de gases causantes del efecto invernadero, es un tema de importancia a nivel global, siendo de suma importancia en las políticas de gobierno para los países, que buscan velar por el futuro climático del planeta.

Derivado de que, en la Maestría de Energía y Ambiente, existe el área ambiental, este proyecto pretende demostrar y dar a conocer el impacto ambiental y las medidas de mitigación del gas SF<sub>6</sub>, en el uso de los equipos eléctricos dentro de las subestaciones encapsuladas en gas (GIS).

Mediante la presente investigación se aportará una perspectiva profesional y científica, fundamentada en conocimientos de ingeniería eléctrica y también en el área ambiental. El proyecto complementa la identificación del impacto ambiental y las medidas de mitigación del SF<sub>6</sub> en el uso de los equipos eléctricos dentro de las subestaciones tipo (GIS), por último, se brindará una propuesta de controles de mitigación del gas.

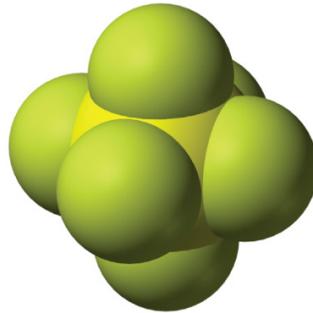
## 7. MARCO TEÓRICO

### 7.1. Gas hexafluoruro de azufre SF<sub>6</sub>

El hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) es un compuesto químico inorgánico, el cual se denota por la fórmula SF<sub>6</sub>, siendo este un gas que posee ciertas propiedades, tales como el ser inodoro, incoloro, inflamable y no tóxico. Derivado de estas características y teniendo en cuenta que posee ciertas cualidades dieléctricas, lo convierte en el agente extintor con mayor uso en los dispositivos eléctricos. El gas SF<sub>6</sub> es el principal componente que dispersa el arco eléctrico, que se presenta al momento de una falla en los equipos eléctricos de media y alta tensión.

El SF<sub>6</sub>, es un compuesto químico de condiciones estables a nivel molecular prácticamente indestructible por la radiación solar, y al mismo tiempo poco reactiva, en otras palabras, al encontrarse las moléculas de SF<sub>6</sub> en la atmósfera, es muy poco probable que se combine con otras moléculas que permitan reducir sus efectos de calentamiento.

Figura 2. **Estructura de la molécula SF<sub>6</sub>**



Fuente: ABB AB High Voltage Product. (2015). *Interrupedores de alta tensión para aplicaciones de hasta 800 kV.*

## **7.2. El SF<sub>6</sub> como agente extintor en dispositivos eléctricos**

A mediados de los años 60`s, se empezó a introducir en el mercado eléctrico, una nueva tecnología de corte de fallas, para la extinción de arco eléctrico, consistiendo esta tecnología en implementar el uso del gas SF<sub>6</sub>, gracias a sus altas propiedades dieléctricas, las cuales se presentaron dentro de los interruptores de potencia, por primera vez, en dispositivos eléctricos.

El SF<sub>6</sub> es un gas inerte, el cual mantiene su propiedad térmica de manera estable, posicionando al SF<sub>6</sub> como el gas de mayor aprobación y uso en la industria eléctrica, aplicado en los dispositivos eléctricos de media y baja tensión, esto según su índice de rigidez dieléctrica que es 3 veces mayor que la del aire, logrando así reducir de manera drástica el espacio físico dentro de las subestaciones eléctricas.

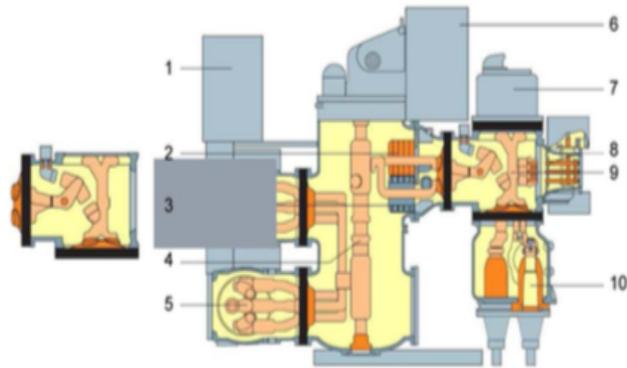
### **7.3. Subestaciones encapsuladas en gas de tipo GIS**

Las subestaciones encapsuladas en gas de tipo GIS son aquellas que se encuentran herméticamente selladas, y poseen todos los dispositivos eléctricos en una sola pieza, siendo estos equipos: interruptor de potencia, seccionador, transformador de potencial, transformador de corriente, encapsulado en cada parte de la sección de la subestación el gas hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ ), para la extinción de arco eléctrico que pueda presentarse en algún segmento de la subestación de tipo GIS.

Los dispositivos eléctricos antes mencionados, se encuentran instalados en estructuras metálicas conectados directamente a tierra, manejando una presión de manera moderada de gas  $SF_6$ , para su aislamiento fase a fase y fase a tierra.

Es por esta razón que las subestaciones de tipo GIS revolucionaron el mercado eléctrico, logrando ahorrar espacio, para la construcción de subestaciones, siendo las más comunes la de tipo convencional, donde el agente extintor es el aire, ya que se encuentran a la intemperie, siendo así que las subestaciones tipo GIS pueden llegar a ocupar 10 veces menos el espacio de una subestación de tipo convencional.

Figura 3. **Subestación encapsulada en gas tipo GIS**



1. Compartimento de control local integrado
2. Transformador de corriente
3. Embarrado de distribución I con seccionador de desconexión y puesta a tierra
4. Unidad de interruptor automático
5. Embarrado de distribución II con seccionador de desconexión y puesta a tierra
6. Mando mecánico de energía almacenada por resorte y unidad de control del interruptor automático (dispositivo común o individual)
7. Transformador de tensión
8. Seccionador de puesta a tierra con poder de cierre (alta velocidad)
9. Módulo de salida con seccionador de desconexión y puesta a tierra
10. Terminales del cable

Fuente: ABB AB High Voltage Product. (2015). *Interruptores de alta tensión para aplicaciones de hasta 800 kV*.

#### 7.4. **Propiedades del gas SF<sub>6</sub>**

El SF<sub>6</sub>, es un tipo de gas que posee varias propiedades, es un tipo de gas inerte y no inflamable, pero que al mismo tiempo produce de manera rápida asfixia, con un color y olor muy peculiares. En condiciones normales es muy estable y al ser expuesto a altas temperaturas, se descompone generando así productos de alto contenido tóxico que pueden presentar características corrosivas en presencia de condiciones húmedas.

#### **7.4.1. Propiedades químicas, físicas y ambientales del SF<sub>6</sub>**

Se obtiene el SF<sub>6</sub>, de manera comercial, mediante el proceso de reacción del azufre con respecto al flúor, es por esto que al momento de su producción se pueden encontrar ciertos subproductos, como lo son las impurezas del aire, moléculas de CO<sub>2</sub>, y ciertas cantidades de humedad, las cuales son filtradas en diferentes etapas para el llenado de los dispositivos eléctricos.

El SF<sub>6</sub> tiene la particularidad de pertenecer a cierto grupo de gases pesados, teniendo una densidad de 6.139 kg/m<sup>3</sup>, en condiciones normales, logrando así superar al aire al menos 5 veces más. El calor específico volumétrico que posee el SF<sub>6</sub>, es de valores muy altos, siendo 3.7 veces más que el aire, es por esta razón que se utiliza de la misma manera en los dispositivos eléctricos, debido a que produce un efecto refrigerante en los mismos.

El gas SF<sub>6</sub>, posee alta carga de electronegatividad, logrando así una mejor absorción de los electrones libres producidos dentro de la formación de arcos eléctricos entre los contactos de los interruptores de la subestación tipo GIS.

La interacción que existe entre los electrones que se encuentran de manera libre, con las moléculas, da origen a la creación de iones demasiado pesados y grandes que, a su vez, presentan poca o nula movilidad, por consiguiente, esta combinación de iones de SF<sub>6</sub>, convierten a dicho gas como el perfecto fluido de fuerza dieléctrica, excelente propiedad para la supresión del arco eléctrico, siendo esta propiedad 2.5 veces más alta que el aire común.

**Figura 4. Propiedades del gas SF<sub>6</sub>**

|   |  |
|---|--|
| Densidad a 20oC   | 6,14 kg/m <sup>3</sup>                   |
| Color del gas   | incolore                                 |
| Peso molecular  | 146.06                                   |
| Conductividad térmica                                       | 0.0136 w/mK                              |
| Temperatura crítica   | 45.55oC                                  |
| Densidad crítica  | 730 Kg/m <sup>3</sup>                    |
| Presión crítica   | 3,78 MPa                                 |
| Velocidad del sonido en SF <sub>6</sub>                     | 136 m/s. Es 3 veces menos que en el aire |
| Índice de refracción  | 1.000783                                 |
| Calor de formación  | -1221.66 Kg/mol                          |
| Calor específico  | 96,6 j/mole K                            |
| El campo de ruptura relativo a la presión                   | 89 V/m Pa                                |
| La constante dieléctrica relativa a 25oC y 1 barra absoluta | 1.00204                                  |
| Factor de disipación o bronceado a 25oC y 1 barra absoluta  | <2 x 10 <sup>-7</sup>                    |

Fuente: ABB. High Voltage Products. (2013). *Subestaciones tipo GIS, guía de aplicaciones*.

La principal causa de contaminación del ambiente por parte del SF<sub>6</sub>, se produce al momento de su manipulación. Los procesos de manipulación de dicho gas deben realizarse por medio de equipos especializados con personal calificado, derivado de los acuerdos realizados y pactados en el Protocolo de Kioto. Para minimizar el impacto ambiental por causas del gas SF<sub>6</sub>. Al momento de transportar dicho compuesto es necesario que sea a través de cilindros, en estado líquido, ya que en la actualidad aún no existe la tecnología que permita su comprensión en estado gaseoso, a grandes magnitudes.

Otras causas, por las cuales se contamina el SF<sub>6</sub>, es debido a los dispositivos eléctricos, los cuales se encuentran en operación dentro de las subestaciones de tipo GIS, debido a que se presenta humedad que puede llegar

a traspasar al interior de dicho equipo, de manera que el gas reacciona a contraflujo, esto debido a la diferencia de presiones parciales encontradas a lo largo de la pieza. Esta humedad, al encontrarse con las moléculas de SF<sub>6</sub> y combinarse, producen moléculas contaminantes como el ácido fluorhídrico (HF) y el dióxido de azufre SO<sub>2</sub>.

Las partículas contaminantes, principalmente, atacan los contactos de los interruptores de potencia, propiciando un punto caliente y posible falla del equipo eléctrico. De allí la importancia de realizar pruebas periódicas de pureza del gas SF<sub>6</sub>, en los dispositivos. En la mayoría de los casos el SF<sub>6</sub> contaminado, puede ser atendido en el sitio de ubicación del equipo, para alcanzar los índices positivos de reutilización.

Tabla I. **Nivel de calidad después de tratamiento**

| Sustancia        | Calidad         |                             |
|------------------|-----------------|-----------------------------|
|                  | Gas certificado | IEC 60376:2018<br>Gas nuevo |
| SF <sub>6</sub>  | 99 vol. %       | 98.5 vol. %                 |
| H <sub>2</sub> O | 8 micro L       | 200 micro L                 |
| Pto. Congelación | 62 gr           | 36 gr                       |
| Acidez total     | 0.1 micro L     | 7 micro L                   |
| Aire             | 500 mico L      | 10000 micro L               |
| CF <sub>4</sub>  | 500 mico L      | 4000 micro L                |

Fuente: Bohn *et. al.* (2016). *Documentos de formación relativa al SF<sub>6</sub>*.

#### 7.4.2. Pureza y calidad del gas SF<sub>6</sub>

Es necesario contar con óptimos niveles de pureza del gas para lograr el mayor desempeño posible y de manera confiable, puesto que, al concertar

partículas de humedad y corrosión en los equipos, pueden tener un impacto negativo sobre el efecto aislante dieléctrico.

Al determinar que el gas SF<sub>6</sub>, está contaminado con humedad o algún compuesto químico generado del contacto con alguna otra partícula de origen reactivo, debe ser sometido a varios tratamientos de procesamiento de recuperación por lo menos hasta 3 veces, para lograr nivelar las propiedades físicas y químicas del SF<sub>6</sub> usado, pero si al realizar dicha cantidad de procesos de recuperación, no se obtienen los niveles de pureza normados, se determina la eliminación de ese SF<sub>6</sub> usado.

De la misma forma, si se tiene la opción de realizar el proceso de reutilización al SF<sub>6</sub>, luego de haber estado sometido a un arco eléctrico de grandes magnitudes, este gas debe ser eliminado de manera inmediata, siempre con las medidas de precaución establecidas, derivado de que presentará un alto porcentaje de gases reactivos, llegando a los 80,000 ppv; asimismo, ya existe la posibilidad de percibir su olor a descomposición, propio del azufre.

Tabla II. **Normas de concentraciones máximas para gases**

| Contaminantes o grupo de contaminantes     | IEC 60376 Máxima concentración permitida | ASTM D 2472 Máxima concentración permitida |
|--|--|--|
| CF4  | 0.05% ó 500 ppmm                         | 0.05% ó 500 ppmm                           |
| Oxígeno + nitrógeno (aire)                 | 0.05% ó 500 ppmm                         | 0.05% ó 500 ppmm                           |
| Agua                                       | 12 ppmm ó 122 ppmv                       | 8.9 ppmm ó 71 ppmv                         |
| Acidez expresada como HF                   | 0.3 ppmm                                 | 0.3 ppmm                                   |
| Fluoruros hidrolizables expresados como HF | 1.0 ppmm                                 | -  |
| Aceite mineral                             | < 10 ppmm                                | < 10 ppmm                                  |

Fuente: Siemens. (2015). *Equipos eléctricos tipo GIS*.

Tabla III. **Contaminantes máximos en compuestos**

| <b>CONTAMINANTES MÁXIMOS GARANTIZADOS</b> |              |
|---|--------------|
| Pureza sf <sub>6</sub>                    | (%) 99.95    |
| Oxígeno                                   | 100 ppm vol. |
| Nitrógeno                                 | 250 ppm vol. |
| Agua                                      | 5 ppm vol.   |
| Flúor                                     | 0.3 ppm vol. |
| Tetracloruro carbónico                    | 100 ppm vol. |

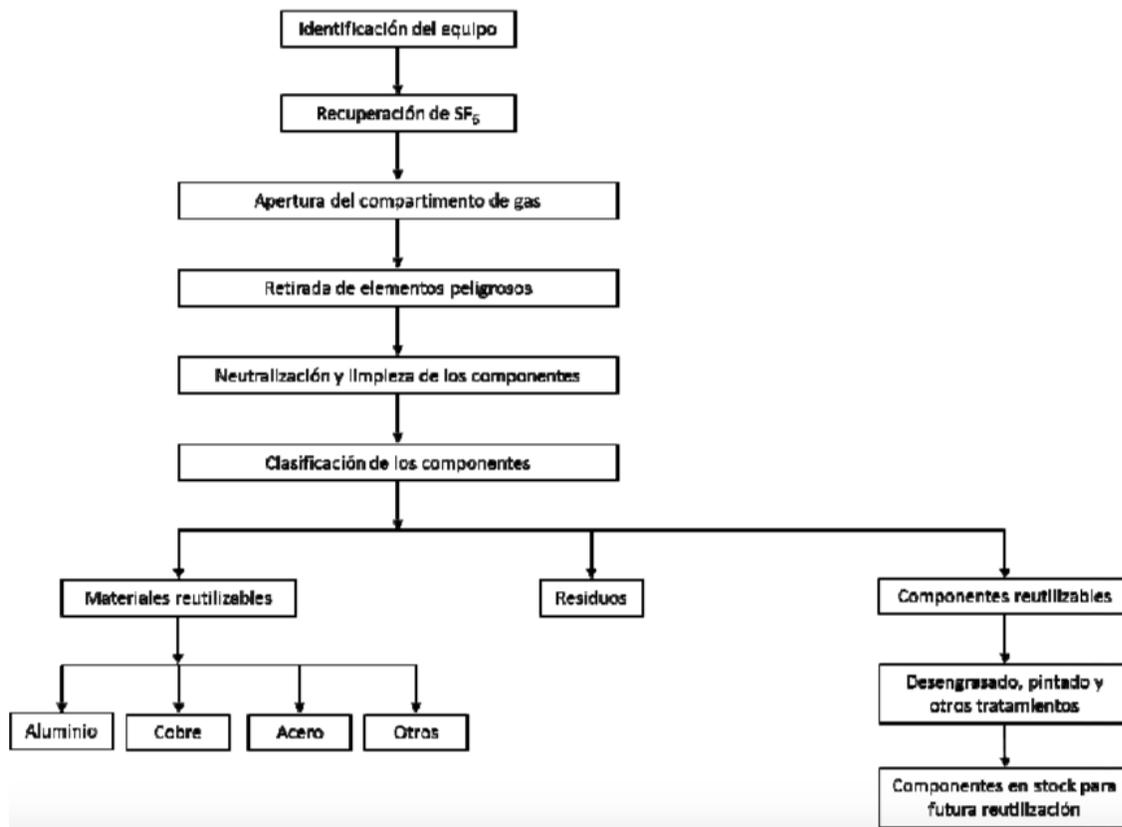
Fuente: Siemens. (2015). *Equipos eléctricos tipo GIS*

Es de suma importancia manejar buenas técnicas de reutilización del gas SF<sub>6</sub>, puesto que las emisiones de este gas afectan directamente a la atmósfera, por consiguiente, para minimizar el impacto ambiental, se debe seguir con criterio la norma IEC 60480, esto con los equipos especializados con filtros, que permiten la recirculación y recuperación de sus características como agente extintor.

En el caso de determinar rotundamente que, no es posible reutilizar las cantidades de gas SF<sub>6</sub> de cierto equipo eléctrico, es necesario seguir ciertos pasos para la eliminación del gas, proceso llamado incineración del SF<sub>6</sub>. Como se mencionó el SF<sub>6</sub>, es un gas muy estable, por consiguiente, al someterlo a temperaturas aproximadas a los 500 grados Celsius, el gas empieza a descomponerse y para completar su destrucción total es necesario aumentar la temperatura hasta los 1200 grados Celsius, derivando SO<sub>2</sub> y HF. Este proceso realizado en hornos especializados atrapa estos subcompuestos en torres de lavado para ser neutralizados por 2 compuestos inorgánicos inertes como los son sulfato de calcio y fluoruro de calcio.

El proceso es ejecutado dentro de un horno terciario y estático, que alcanza las altas temperaturas necesarias para fusionar resinas y materiales plásticos, provocando con esta combustión, eliminar de manera absoluta cualquier residuo de SF<sub>6</sub>, luego se aspira para obtener algunos residuos finales, los cuales serán de nuevo sometidos a procesos de incineración, eliminando por completo cualquier residuo o existencia del gas SF<sub>6</sub>.

Figura 5. **Proceso de gestión del SF<sub>6</sub> dentro de equipos eléctricos**



Fuente: Bohn *et. al.* (2016). *Documentos de formación relativa al SF<sub>6</sub>*.

### **7.4.3. Emisiones de SF<sub>6</sub> en equipos eléctricos**

Es posible estimar las emisiones de gas SF<sub>6</sub> por medio de ecuaciones propuestas para los diferentes accionamientos que se puedan presentar en los dispositivos eléctricos, es posible emitir gases de SF<sub>6</sub>, durante cada etapa del ciclo de vida de dichos equipos, iniciando desde la fabricación, hasta su instalación, mantenimiento, desmontaje y desecho final.

Existen dos grandes ramales, para clasificar los equipos eléctricos dentro de una subestación de tipo GIS, según el confinamiento del SF<sub>6</sub> presente, el primero se denomina, equipos herméticos, que son aquellos que nunca necesitarán recarga de gas SF<sub>6</sub> durante su vida operativa, según la conservación del nivel de llenado. El segundo denominado sistema de presión cerrados, donde se encuentran equipos que necesitan ser recargados de SF<sub>6</sub> a lo largo de su vida útil, según el principio de la conservación del nivel de llenado (IPCC, 2015).

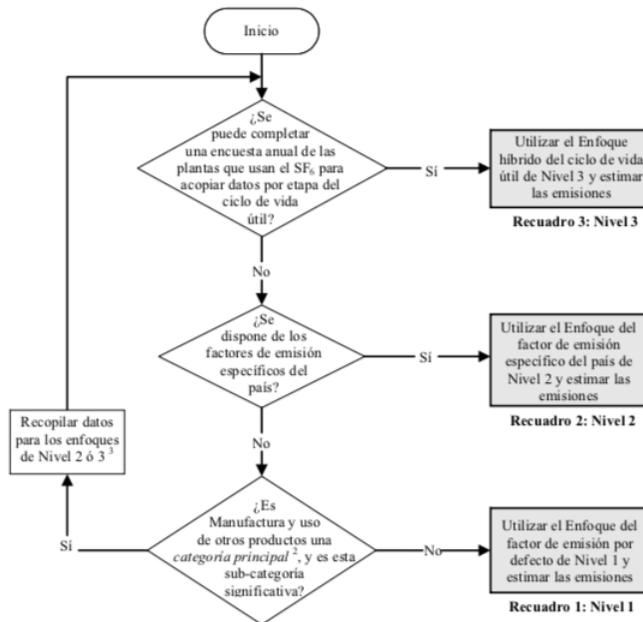
Las emisiones de SF<sub>6</sub> generadas para ambos ramales dependen de la combinación de la cantidad de gas instalado desde su origen, con la hermeticidad de los equipos y de los procesos de manipulación ejecutados para las distintas acciones aplicables de los equipos eléctricos (mantenimiento y fallas). A nivel mundial, las emisiones de SF<sub>6</sub> han disminuido de manera sustancial desde el 2000, las operaciones a nivel de transmisión y distribución eléctrica que conllevan al accionamiento de dichas emisiones se han reducido del 40 al 90 por ciento (IPCC, 2015).

Para estimar las emisiones de SF<sub>6</sub> originados de los equipos eléctricos dentro de la subestación tipo GIS, se necesita delimitar y escoger de manera adecuada el método de nivel, de exactitud y complejidad de los datos, determinando así resultados con mayor grado de certeza. Al igual que otros

estudios de emisiones de SF<sub>6</sub>, el escoger el método de nivel adecuado depende de la situación de los equipos actuales como categoría principal y la disponibilidad de datos.

El nivel 1, denota un enfoque por defecto basado en factores de emisión, el nivel engloba los factores de emisión específicos del país, y por último, el nivel 3 siendo este un método híbrido que se enfoca en el equilibrio de masas o en los factores de emisión para las diferentes etapas, según las circunstancias actuales del país. Por lo que el método de nivel 1, es menos exacto y el método de nivel 3 presenta estimaciones con mayor exactitud, de igual manera, es siempre necesario el contacto con los fabricantes de equipos para posibles datos de emisiones resultantes de la operación.

Figura 6. **Árbol de decisión para la estimación del método de nivel de emisiones de SF<sub>6</sub>**



Fuente: IPCC. (2015). *Emisión Gases SF6*.

### 7.4.3.1. Método de nivel 1

Este método de estimación de SF<sub>6</sub>, es el más sencillo, que se puede aplicar a los equipos eléctricos dentro de una subestación tipo GIS, totalizando las emisiones de fabricación, más emisiones de instalación de equipos, más emisiones del uso de los mismos, más la eliminación.

Figura 7. Metodología de nivel 1

#### MÉTODO DEL FACTOR DE EMISIÓN POR DEFECTO

Emisiones totales = Emisiones de la fabricación + Emisiones de la instalación de los equipos + Emisiones del uso de los equipos + Emisiones de la eliminación de los equipos

Fuente: IPCC. (2015). *Emisión Gases SF6*.

### 7.4.3.2. Método de nivel 2

Este método se basa en la ecuación del nivel 1, pero necesita factores de emisión específicos del país, a lo largo de un periodo determinado en la vida útil de los equipos eléctricos, asimismo, que contempla factores de recuperación o recirculación del SF<sub>6</sub> dentro de estos equipos.

Figura 8. Metodología de nivel 2

#### EMISIONES PROCEDENTES DE LA ELIMINACIÓN DE LOS EQUIPOS SEGÚN EL MÉTODO DEL FACTOR DE EMISIÓN ESPECÍFICO DEL PAÍS

Emisiones de la eliminación de los equipos = Capacidad nominal total de los equipos que se retiran  
• Fracción de SF<sub>6</sub> remanente al momento del retiro • (1 – fracción de los equipos que se retiran cuyo SF<sub>6</sub> es recuperado • eficiencia de recuperación • fracción del SF<sub>6</sub> recuperado que se recicla, se reutiliza sin otro tratamiento o se destruye\*)

Fuente: IPCC. (2015). *Emisión Gases SF6*.

### 7.4.3.3. Método de nivel 3

Este nivel, es el más exacto que puede existir al momento de estimar las emisiones de gas SF<sub>6</sub>, este a su vez compila mayor información integrando una alta gama de circunstancias en el ámbito nacional. Se puede incorporar para ejecutar en cualquiera de las subestaciones de tipo GIS, o donde se encuentren equipos individuales encapsulados en SF<sub>6</sub>. Además, incluye ecuaciones individuales para cada uno de los diferentes ciclos de los dispositivos eléctricos.

Figura 9. Metodología de nivel 3

$$\begin{aligned} & \text{EMISIONES TOTALES DE NIVEL 3} \\ \text{Emisiones totales} = & \sum \text{Emisiones de la fabricación de los equipos} \\ & + \sum \text{Emisiones de la instalación de los equipos} \\ & + \sum \text{Emisiones del uso de los equipos} \\ & + \sum \text{Emisiones de la eliminación y uso final de los equipos} \\ & + \sum \text{Emisiones del reciclado y destrucción del SF}_6 \end{aligned}$$

Fuente: IPCC. (2015). *Emisión Gases SF<sub>6</sub>*.

### 7.4.4. Impacto ambiental de las emisiones de SF<sub>6</sub>

A continuación, se explica el impacto que, sobre el medioambiente tienen las emisiones de SF<sub>6</sub>, con especial énfasis en el efecto invernadero.

#### 7.4.4.1. El efecto invernadero

En la actualidad el gas que posee el mayor aporte de gases de efecto invernadero es el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), siendo el incremento de su uso

de manera exponencial por la industria eléctrica, derivado de su alto contenido dieléctrico para la extinción de arcos eléctricos en equipos y subestaciones tipo GIS, siendo un material aislante eficiente y de accionamiento rápido.

El SF<sub>6</sub>, produce un efecto invernadero 23,500 veces más que el dióxido de carbono, mediante un proceso comparativo cabe indicar que, un kilo del gas SF<sub>6</sub>, produce efectos de altas temperaturas para la atmósfera, es decir se calienta la superficie terrestre lo mismo que un viaje vía aérea de 24 personas ida y vuelta desde Inglaterra hacia los Estados Unidos, y este mismo gas tiene una vida en la atmósfera de por lo menos 1000 años.

Tabla IV. **Principales propiedades calentamiento global**

| <b>Acrónimo químico</b> | <b>Tiempo de permanencia en la atmósfera</b> | <b>Poder de calentamiento global (GWP)*</b> | <b>Usos principales</b>   |
|-------------------------|--|---|---|
| HFC                     | 1 a 270 años                                 | 140 –<br>11,700                             | Refrigerantes, propelentes de aerosoles, solventes, y extinguidores de fuego. Se usan para reemplazar los gases que atacan la capa de ozono, como el R134a, presente en los sistemas de aire acondicionado de los coches. |
| PFC                     | 800 a<br>50,000 años                         | 6,500 –<br>9,200                            | Producción de aluminio y fabricación de semiconductores   |
| SF <sub>6</sub>         | 3,200 años                                   | 23,900                                      | Aislamiento y control de altos voltajes y corrientes; fabricación de semiconductores  |

Fuente: Granero (2016). *El gas SF<sub>6</sub>*.

Cada año se estima que la producción de SF<sub>6</sub>, es de más de 10,000 toneladas, de las cuales, aproximadamente en la industria eléctrica, se utilizan 8,000 toneladas, para temas de aislamiento y control de ciertos voltajes. La

cantidad sobrante de 2,000 toneladas, se utiliza en la fabricación de semiconductores.

Tabla V. **Reducción equivalente del SF<sub>6</sub>**

|   |
|---|
| Al reducir en 1.7 toneladas de SF <sub>6</sub> , liberados a la atmósfera equivale a: |
| 8.5 millones de automóviles parados por 1 año   |
| 95.4 millones de barriles de petróleo sin usar  |
| 11.6 plantas carboeléctricas apagadas por 1 año                                       |

Fuente: Granero (2016). *El gas SF<sub>6</sub>*.

Según el Protocolo de Kioto, es necesario medir cualquier agente de efecto invernadero y calentamiento global, en relación a su equivalencia de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), entonces realizando esta comparación, suponiendo una línea de tiempo de 100 años entre el CO<sub>2</sub> y el SF<sub>6</sub> es de 22,200, esto quiere decir que el aporte que realiza el SF<sub>6</sub> con gases de efecto invernadero equivale a 1 kilogramo de SF<sub>6</sub>, es 22,200 veces mayor.

Tabla VI. Gases de efecto invernadero

| Gas de efecto invernadero                                 | Origen  | Potencial (en 100 años) |
|---|---|-------------------------|
| <b>Dióxido de Carbono CO<sub>2</sub></b>                  | Combustión de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural en el transporte y la industria) y biomasa (limpieza de bosques/incendios forestales), fabricación de cemento, actividad volcánica   | 1                       |
| <b>Metano CH<sub>4</sub></b>                              | Cultivo de arroz, ganadería intensiva, tratamiento de aguas residuales, vertederos, minas de carbón (gas de la mina), producción de gas natural y aceite mineral, biología marina   | 25                      |
| <b>Óxido de Nitrógeno N<sub>2</sub>O (gas de la risa)</b> | Fertilizadores nitrogenados en agricultura, combustión y biomasa  | 298                     |
| <b>Clorofluorocarbonos (CFC)</b>                          | Grupo de productos químicos utilizados como propulsores en envases pulverizadores, líquidos de refrigeración, anestésicos, y gases de relleno en espumas.   | Hasta 14.400            |
| <b>Hidrofluorocarbonos (HFC)</b>                          | Propulsores en envases pulverizadores, líquidos de refrigeración, gases de relleno en espumas   | Hasta 14.800            |
| <b>Tetrafluoroetano (R-134a, HFC-134a)</b>                | Líquidos de refrigeración   | 1.430                   |
| <b>Hexafluoruro de Azufre SF<sub>6</sub></b>              | Utilizado, por ejemplo, como gas protector en la producción de magnesio y como extintor de arco y gas de aislamiento en equipos de conmutación de alta tensión, el SF <sub>6</sub> se utilizó anteriormente para fabricar ventanas, calzado y neumáticos, pero se prohibieron estos usos en el Reglamento 842/2006. | 22.200                  |

Fuente: EPA. (2015). *Emisión Gases y Efecto Invernadero*.



## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. GENERALIDADES BÁSICAS DE LA SITUACIÓN MEDIOAMBIENTAL
  - 1.1. Gases de efecto invernadero y efecto invernadero
  - 1.2. Impacto del efecto invernadero
  - 1.3. Potencial calentamiento global
  
2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
  - 2.1. Estimaciones de emisiones de SF<sub>6</sub>, por el método de nivel 1
  - 2.2. Estimaciones de emisiones de SF<sub>6</sub>, por el método de nivel 2
  - 2.3. Estimaciones de emisiones de SF<sub>6</sub>, por el método de nivel 3
  
3. IMPACTO AMBIENTAL DEL SF<sub>6</sub>

#### 4. PRESENTACIÓN DE RESULTADO

4.1. Presentación de datos de impacto ambiental

4.2. Presentación de controles de mitigación

#### 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICE

ANEXOS

## 9. METODOLOGÍA

### 9.1. Características del estudio

La presente investigación es de carácter descriptivo, tiene como principal objetivo dar a conocer el impacto ambiental y los controles de mitigación de las emisiones de gas SF<sub>6</sub>, dentro de las subestaciones encapsuladas en gas de tipo GIS, por lo que permitirá ser referente para futuras investigaciones.

Determinar los controles de mitigaciones, permitirá en un futuro, contar con mejores herramientas para el manejo responsable de dicho gas, teniendo en cuenta que se podrá aplicar en cualquier subestación de tipo GIS, aplicando las normas correspondientes y siendo responsables con el medio ambiente.

Tabla VII. Metodología recopilación de datos

| ÍTEM | Actividad   | Lugar de recopilación                    |
|------|---|--|
| 1    | Accionamiento de descarga de SF <sub>6</sub> a equipos GIS pruebas iniciales.                       | En sitio, subestación eléctrica incienso |
| 2    | Accionamiento de descarga de SF <sub>6</sub> a equipos GIS para puesta en marcha.                   | En sitio, subestación eléctrica incienso |
| 3    | Accionamiento de descarga de SF <sub>6</sub> a equipos GIS para mantenimiento.                      | En sitio, subestación eléctrica incienso |
| 4    | Accionamiento de descarga de SF <sub>6</sub> a equipos GIS para mantenimiento.                      | En sitio, subestación eléctrica incienso |
| 5    | Accionamiento de descarga de SF <sub>6</sub> a equipos GIS para eliminación de segmentos. (equipos) | En sitio, subestación eléctrica incienso |

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

- Fase I. Revisión de documentos

Esta fase pretende recopilar la mayor información posible relacionada con el hexafluoruro de azufre, con documentos relacionados con su manipulación teniendo en cuenta la Norma IEC 60480. Asimismo, consultar manuales de los equipos, disponiendo del tiempo necesario para comprender las recomendaciones y datos que proporcione el fabricante de este tipo de dispositivos eléctricos.

- Fase II. Diagnóstico

Una vez recopilada la información, se procederá a realizar las directrices de la toma de lecturas en campo, donde se incluyan tablas de comportamiento del gas SF<sub>6</sub>, para las diferentes circunstancias que se presenten en los diferentes accionamientos de la subestación tipo GIS. Asimismo, se incluirán los diferentes cálculos obtenidos para los 3 niveles de estudio que desarrollarán a lo largo del trabajo de campo a realizar.

- Fase III. Entrega de controles de mitigación

Esta fase pretende dar a conocer los controles de mitigación que se pueden manejar al momento de interactuar con los mecanismos de accionamiento del gas SF<sub>6</sub>, para las diferentes circunstancias de los equipos eléctricos.

Esta investigación pretende establecer un precedente acerca de la manera de manipular el gas SF<sub>6</sub>, como antecedente para futuros estudios, que permitan crear un récord del impacto ambiental que se produce con el mencionado gas, reduciendo así los gases de efecto invernadero.

## 9.2. Variables

- Variable gas hexafluoruro de azufre
  - Gas hexafluoruro de azufre SF<sub>6</sub>
  - Características del gas hexafluoruro de azufre SF<sub>6</sub>
  - Características fisicoquímicas
  - Características biológicas
  - Emisión de gases de SF<sub>6</sub> en equipos eléctricos
  - Emisiones en la operación de equipos eléctricos
  - Análisis de las emisiones de gas registradas
  - Especificaciones de fábrica en equipos eléctricos
  
- Parámetros fisicoquímicos SF<sub>6</sub>
  - Parámetros químicos
  - Oxígeno disuelto
  - Nitrógeno
  - Azufre
  - Dióxido de carbono
  - Agentes tóxicos
  - Parámetros biológicos
  - Efectos en biológicos
  - Efectos ambientales
  - Efectos tóxicos



## **10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

### **10.1. Análisis y obtención de la información**

Para la recopilación de la información se procederá a dividir, según las condiciones del tipo de estimación que se esté realizando, puesto que se obtendrá información de manera cuantitativa, donde se procederá al ordenamiento de los datos para lo cual se tendrán herramientas tales como los paquetes de Office, para su ordenamiento y expresión gráfica para una mejor comprensión.

El medio que se utilizará será la elaboración de pruebas en campo para que, por medio de las ecuaciones propuestas se estiman las emisiones de gas SF<sub>6</sub>, que se inyectan a la atmósfera.

### **10.2. Análisis cuantitativo de los datos**

Se presentarán los resultados de manera que sean tabulados y utilizando las diferentes herramientas matemáticas y estadísticas, para comprender cómo realmente se emiten ciertas partículas de SF<sub>6</sub> al medioambiente.

Es necesario que se consideren los datos obtenidos en campo, al ejecutar las diferentes maniobras de liberación del gas, debido a que esto permitirá crear un récord, que logre en determinado tiempo, establecer un protocolo para el cálculo de las emisiones de SF<sub>6</sub>, que permita a otras empresas del medio interesarse por dicho tema y sus repercusiones medio ambientales.



## 11. CRONOGRAMA

Tabla VIII. Cronograma

| Actividades  | Mes    |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | feb-23 | mar-23 | abr-23 | may-23 | jun-23 | jul-23 |
| Autorizaciones respectivas ante TRELEC<br>(dueña de la subestación Tipo GIS(para la recopilación de datos) | ■      |        |        |        |        |        |
| Evaluación de la Subestación GIS Incienso  |        | ■      |        |        |        |        |
| Manipulación de los equipos eléctricos   |        | ■      |        |        |        |        |
| Toma de muestras y datos de las emisiones de GAS SF6   |        | ■      | ■      |        |        |        |
| Maniobras y manipulación de pruebas en caliente  |        | ■      |        |        |        |        |
| Propuesta de manipulación de equipos para controlar las emisiones de SF6                                   |        |        | ■      |        |        |        |
| Analizar los resultados obtenidos y comparativa  |        |        |        | ■      |        |        |
| Evaluación de los controles de mitigación e impacto ambiental  |        |        |        | ■      | ■      |        |
| Recopilación de toda la información y resultados finales   |        |        |        |        | ■      |        |
| Redacción de informe final y artículo científico   |        |        |        |        |        | ■      |

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.



## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para la ejecución de dicho estudio es necesario contar con cierta disponibilidad financiera, debido a que el estudio pretende la toma de datos en campo, determinado por cierto tiempo de recopilación de información, en vista de que, sin contar con la factibilidad financiera, se podría comprometer la obtención de datos y truncar la finalidad del estudio.

El presupuesto aquí expuesto es un resumen global, de los costos a incurrir por la ejecución de dicho trabajo de investigación. En el mismo se contemplan todos los insumos, costo de tiempo, costo de recurso humano y demás que permitan la eficiente obtención de los datos.

Tabla IX. **Recursos financieros necesarios para la investigación**

| <b>Recurso</b>         | <b>Unidad</b> | <b>Costo</b>       |
|------------------------|---------------|--------------------|
| Personal técnico       | unidad        | Q. 350.00          |
| Asesoría               | unidad        | Q. 1,500.00        |
| Materiales consumibles | unidad        | Q. 350.00          |
| Transporte             | unidad        | Q. 50.00           |
| Material bibliográfico | unidad        | Q. 150.00          |
| Otros                  | unidad        | Q. 125.00          |
| <b>TOTAL</b>           |               | <b>Q. 2,525.00</b> |

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.



### 13. REFERENCIAS

1. ABB AB High Voltage Products. (2015). *Interruptores de alta tensión para aplicaciones de hasta 800 kV*. Ludvika, Suecia: Autor.
2. ABB. High Voltage Products. (2013). *Subestaciones tipo gis, guía de aplicaciones*. Ludvika, Suecia: Autor.
3. Acevedo, J., y Herreño Rocha, A. (noviembre, 2009). Caracterización de fenómenos de desgaste y deterioro en interruptores de potencia y su aplicación en la definición de la estrategia de mantenimiento. *Revista CIER*, 52, 38-49. Recuperado de [http://sg.cier.org.uy/publicaciones/revista.nsf/c9a5680fcc352290032571300050e4ae/1d70876e3672535b8325764e00481b3f/\\$FILE/05\\_Caracterizaciondefen.pdf](http://sg.cier.org.uy/publicaciones/revista.nsf/c9a5680fcc352290032571300050e4ae/1d70876e3672535b8325764e00481b3f/$FILE/05_Caracterizaciondefen.pdf).
4. Asociación de Fabricantes de Bienes de Equipo Eléctricos. (2015). *Documento para el entrenamiento del personal que manipula hexafluoruro de azufre en equipos de conmutación eléctrica de media y alta tensión*. España: Autor. Recuperado de <https://afbel.es/wp-content/uploads/2015/05/Manipulaci%C3%B3n-del-SF6-v2.pdf>.
5. Alvarado, O. (s.f.). *Tecnologías de extinción de arco*. México: Asociación de Fabricantes de Bienes de Equipo Eléctricos. Recuperado de <https://docplayer.es/24963873-Tecnologias-de-extincion-de-arco.html>.

6. Bohn, T., Buscher A., Drews, B., Ball, P., Blumenthal, P., Hippsenstiel , M., y Grote , M. (2016). *Documentos de formación relativa al SF<sub>6</sub>*. Berlín, Alemania: Zvei Zentral Verband Elecktrotechnik Und Elektronikindustrie.
7. Environmental Protection Agency. (2015). *Emisión Gases y Efecto Invernadero*. Estados Unidos: Autor.
8. Granero, A. (26 de febrero, 2016). El gas SF6. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://imseingenieria.blogspot.com/2016/02/el-gas-sf6.html>.
9. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). *Emisión de Gases de SF6*. Suiza: Autor.
10. Megger. (2003). *Guía de prueba de interruptores*. Reino Unido: Autor. Recuperado de [https://www.artecingenieria.com/pdf/Guias\\_Tecnicas\\_Megger/Castellano/CB\\_TestingGuide\\_es\\_V03.pdf](https://www.artecingenieria.com/pdf/Guias_Tecnicas_Megger/Castellano/CB_TestingGuide_es_V03.pdf).
11. Naciones Unidas. (1998). *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Estados Unidos: Autor. Recuperado de <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>.
12. Siemens AG. (2015). *Equipos Electricos Tipo GIS*. Estados Unidos: Autor.

## 14. APÉNDICE

### Apéndice 1. Matriz de coherencia y conceptualización

| Problema  | Objetivo general  | Marco teórico   | Hipótesis  | Variables  | Indicadores  |
|---|---|---|--|--|--|
| Falta de conocimiento del impacto ambiental y medidas de mitigación de las emisiones de SF <sub>6</sub> en subestaciones eléctricas de tipo GIS   | Evaluar el impacto ambiental y proponer las medidas de mitigación en las emisiones del gas hexafluoruro de azufre (SF <sub>6</sub> ), dentro de los equipos eléctricos de una subestación tipo GIS.                           | Gas hexafluoruro de azufre<br>Emisiones de gas de efecto invernadero  | El presente trabajo de investigación no comprobará una hipótesis | Emisiones de gas de SF <sub>6</sub> por método de nivel 1<br>Emisiones de gas SF <sub>6</sub> por método de nivel 2<br>Emisiones de gas SF <sub>6</sub> por el método de nivel 3<br>Hexafluoruro de azufre | Parámetros fisicoquímicos del SF <sub>6</sub><br>Medidas de mitigación<br>Recirculación del gas SF <sub>6</sub><br>Alternativas de tratamiento para pureza de SF <sub>6</sub><br>Agentes tóxicos<br>Dióxido de carbono<br>Emisiones de gas<br>Efectos biológicos |
| Pregunta principal  | Objetivos específicos   | Calentamiento global<br>Parámetros en las emisiones de gas SF <sub>6</sub><br>Subestaciones encapsuladas en gas de tipo GIS |  |  |  |
| ¿Se conoce el impacto ambiental y las medidas de mitigación en las emisiones del gas hexafluoruro de azufre (SF <sub>6</sub> ), dentro de los equipos eléctricos de una subestación tipo GIS? | 1. Aportar controles y un plan de mitigación de emisiones de gas SF <sub>6</sub> , en el manejo de las diferentes operaciones de los equipos eléctricos dentro de una subestación eléctrica tipo GIS (corrección de detalles) |   |  |  |  |

Continuación apéndice 1.

| Problema  | Objetivo general   | Marco teórico | Hipótesis | Variables | Indicadores |
|---|--|---------------|-----------|-----------|-------------|
|   | <b>Objetivos específicos</b>   |               |           |           |             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>¿Existen controles y un plan de mitigación de emisiones de gas SF<sub>6</sub>, en el manejo de las diferentes operaciones de los equipos eléctricos dentro de una subestación eléctrica tipo GIS?</li> </ul>                     | 2. Determinar la cantidad de emisión de gas SF <sub>6</sub> , liberado en las diferentes condiciones de operación de los equipos eléctricos dentro de una subestación de tipo GIS, sean fallas o maniobras de mantenimiento. |               |           |           |             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>¿Cuál es la cantidad de emisión de gas SF<sub>6</sub>, liberado en las diferentes condiciones de operación de los equipos eléctricos dentro de una subestación de tipo GIS, sean fallas o maniobras de mantenimiento?</li> </ul> | 3. Dar a conocer impacto ambiental que se produce por la emisión de gas SF <sub>6</sub> , en la operación de equipos eléctricos.   |               |           |           |             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>¿Cuál es el impacto ambiental que se produce por la emisión de gas SF<sub>6</sub>, en la operación de equipos eléctricos?</li> </ul>   | 4. Dar a conocer protocolos que permitan la manipulación del gas SF <sub>6</sub> , para la reducción de emisiones deliberadas al ambiente, en cada uno de los accionamientos de los dispositivos eléctricos                  |               |           |           |             |

Fuente: elaboración propia. empleando Microsoft Word.