



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

**PROPUESTA DE DISEÑO: PARA UN SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DEL
GAS HEXAFLUORURO DE AZUFRE SF₆ EN EQUIPOS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN**

Julio Enmanuel López Sical

Asesorado por el MBA. Ing. Fernando Wilfredo Velasquez Mijangos

Guatemala, agosto de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE DISEÑO: PARA UN SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DEL
GAS HEXAFLUORURO DE AZUFRE SF₆ EN EQUIPOS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JULIO ENMANUEL LÓPEZ SICAL

ASESORADO POR EL MBA. ING. FERNANDO WILFREDO VELASQUEZ
MIJANGOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton d León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

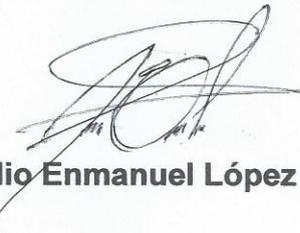
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

**PROPUESTA DE DISEÑO: PARA UN SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DEL
GAS HEXAFLUORURO DE AZUFRE SF₆ EN EQUIPOS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 24 de julio de 2018.



Julio Enmanuel López Sical

Guatemala, 14 de julio de 2018.

Director
Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Eléctrica
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del (la) estudiante **Julio Enmanuel López Sical** carné número **200619681**, quien opto la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Energía y Ambiente.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Fernando Wilfredo Velásquez Mijangos
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 11,598

MSc. Fernando Wilfredo Velásquez Mijangos
(Asesor (a))

MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes M.
Coordinador de Área
Desarrollo social y energético

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504

M.A. Ing. Edgar Darío Álvarez C.
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Cc archivo/LZ.L.A.

RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA: Proceso de Graduación aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.



El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística de su Proyecto de Graduación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: PROPUESTA PARA UN SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DEL GAS HEXAFLUORURO DE AZUFRE SF6 EN EQUIPOS ELÉCTRICOS DE POTENCIA DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN, presentado por el estudiante universitario JULIO ENMANUEL LÓPEZ SICAL, considerando que el protocolo es viable para realizar el Diseño de Investigación procedo aprobarlo, ya que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Otto Fernando Andriño González
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica



Universidad de San Carlos
De Guatemala

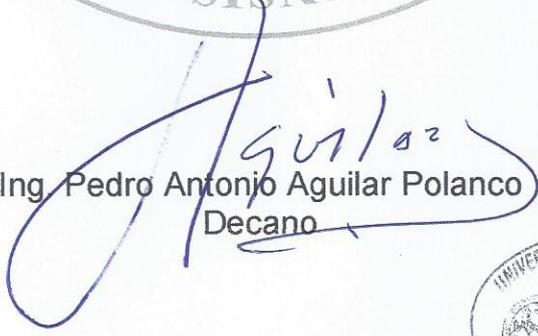


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.D.272.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE DISEÑO: PARA UN SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DEL GAS HEXAFLUORURO DE AZUFRE SF6 EN EQUIPOS ELÉCTRICOS DE POTENCIA DE MEDIA Y ALTA TENSION**, presentado por el estudiante universitario: **Julio Emmanuel López Sical**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, julio de 2018

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser mi guía estando presente todos los días de mi vida, cuidando de mi familia y de mi persona dándome las bendiciones y fuerzas para alcanzar siempre mis metas.
- Mi padre** Julián Noe Lopez Suntecún (q. e. p. d.), por ofrecerme la oportunidad de estudiar e impulsarme siendo precursor en mi fortalecimiento académico, hoy se cumple una etapa que el inicio.
- Mi madre** Ana Maria, por su paciencia, cariño y apoyo incondicional durante este camino siendo mi mayor fuerza e inspiración para seguir.
- Mi hermana** Evelyn Margit, por creer en mí y por tu cariño incondicional sin ti esta meta no sería posible.
- Mi familia** Mis abuelos, tíos, por su ejemplo de constancia, dedicación, consejos y cariño a toda mi familia sus palabras fueron motivos para seguir.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios que me albergó y permitió forjarme como profesional.

Facultad de Ingeniería

Por brindarme los conocimientos necesarios que llevaron a la conclusión de este gran proyecto.

Mi asesor

Fernando Wilfredo Velásquez, por su valioso tiempo y consejos en este proyecto de investigación.

TRELEC, S.A

Por brindarme la oportunidad de iniciar laboralmente como profesional y proporcionarme las herramientas para el desarrollo del presente trabajo.

Mis amigos

Porque durante este camino me brindaron su apoyo para seguir adelante.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
1. INTRODUCCIÓN	VII
2. ANTECEDENTES	1
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3.1. Descripción del problema	7
3.2. Determinación del problema.....	8
3.3. Delimitación del problema	8
3.4. Formulación del problema	9
3.4.1. Pregunta central:	9
3.4.2. Preguntas auxiliares	9
3.5. Viabilidad.....	10
3.6. Consecuencias de la implementación de la investigación	10
4. JUSTIFICACIÓN	11
5. OBJETIVOS	13
5.1. General.....	13
5.2. Específicos	13
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Gas sf6 como medio aislante y de extinción.....	17

7.2.	Aplicaciones típicas del sf6	18
7.3.	Propiedades del sf6.....	21
7.3.1.	Propiedades físicas, químicas y ambientales.....	21
7.3.2.	Calidad del SF6 basado en las normas industriales pertinentes.....	23
7.3.3.	Diferentes clases de reutilización	24
7.3.4.	Recuperación y reutilización en sitio	25
7.4.	Incineración del SF6.....	25
7.5.	Rigidez dieléctrica en función de la distancia entre electrodos según el flujo dieléctrico	26
7.6.	Deterioro del gas sf6	27
7.7.	Impurezas en sf6.....	28
7.7.1.	Impurezas durante el tratamiento y en puesta en operación.....	30
7.7.2.	Impurezas en interruptores de potencia	30
7.7.3.	Impurezas provocadas por arcos internos.....	30
7.8.	Efectos de las impurezas	31
7.9.	Desviación de las propiedades indicadas. Impurezas.....	32
7.10.	Propiedades eléctricas	33
7.11.	Peligros de las impurezas tóxicas	33
7.12.	Rango de presiones de utilización del sf6 en equipos eléctricos	35
8.	ÍNDICE PROPUESTO	37
9.	METODOLOGÍA	39
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	41
10.1.	Análisis y obtención de información	41

11.	CRONOGRAMA.....	43
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	45
13.	BIBLIOGRAFÍA	47
14.	APÉNDICES.....	51

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Principales aplicaciones del SF6 en la industria	19
2.	Curva de presión de vapor saturado del SF6.....	22
3.	Diagrama de decisión para el destino de SF6 retirado.....	24
4.	Evaluación del gas y categorización como producto o residuo	26
5.	Rigidez dieléctrica vs distancia electrodos	27
6.	Árbol de problemas	53

TABLAS

I.	Diferentes valores del PCT para los GEI's.....	20
II.	Calidades del gas SF6, según normas electrotécnicas relevantes	23
III.	Impurezas máximas permitidas en el gas SF6 en equipos de potencia.....	28
IV.	Origen de las impurezas del SF6	29
V.	Indicador de descomposición del SF6.....	29
VI.	Cantidades máximas admisibles de impurezas en gas nuevo SF6	33
VII.	Tensión perforación.....	33
VIII.	Cronograma de actividades	43
IX.	Presupuesto	45
X.	Factibilidad del estudio.....	51
XI.	Matriz de coherencia	52

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación consiste en analizar las diversas pruebas que se realizan al interruptor de potencia el tipo de actividad que deben ejecutarse en el mantenimiento de esta índole entiéndase pruebas eléctricas, para determinar el estado de los componentes y el estado del gas SF6 utilizado como medio de extinción del arco eléctrico. Este estudio se basa en el análisis de pruebas a 22 interruptores de potencia pertenecientes a la empresa TRELEC, S.A., en la cual se pudo determinar que las pruebas previamente realizadas señalaban un deterioro en la calidad del gas producto del tiempo de vida que lleva en operación, en los equipos a los cuales no se les había realizado un mantenimiento de sus recámaras basado en los protocolos de mantenimiento del fabricante.

El problema que tiene la empresa es que actualmente no se tiene información necesaria para el control sobre el gas SF6 de quipos eléctricos de potencia que utilizan como medio de extinción de los arcos eléctricos.

En el caso de fallas, los interruptores son capaces de interrumpir el flujo de energía eléctrica aislando el elemento de falla, protegiendo al resto del equipo y personal de servicio, evitando consecuencias mayores, para que el interruptor cumpla con estas funciones debe contar con un buen diseño eléctrico para asegurar que el interruptor soporte esfuerzos eléctricos y térmicos a los que es sometido el medio que utiliza para suprimir el arco que se produce es un gas denominado hexafluoruro de azufre (SF6), es un medio de extinción del arco eléctrico más utilizado en la subestaciones eléctricas, interruptores de potencia, transformadores y subestaciones encapsuladas, el SF6 es un gas que

contribuye al efecto invernadero por lo cual su manejo debe realizarse con los cuidados adecuados, para evitar emisiones mayores al medio ambiente.

La investigación está dividida en seis fases, iniciando en el primer capítulo en el cual se desarrolla una descripción general del interruptor de potencia, el principio de funcionamiento de la extinción de arcos eléctricos, su sistema de accionamiento y los diferentes medios utilizados, a través de la historia para la extinción del arco eléctrico.

El segundo capítulo presenta las características físicas, químicas y dieléctricas del gas hexafluoruro de azufre (SF₆), sus diferentes aplicaciones, control de la calidad del gas y manejo.

En el tercer capítulo, se describen las labores que se realizan para la puesta en servicio posterior a realizar el mantenimiento, indicaciones generales de montaje, trabajos preparatorios, tipos de pruebas al gas hexafluoruro de azufre (SF₆).

En el cuarto capítulo se realiza un breve análisis del impacto ambiental que pueda producir el gas SF₆.

El sexto capítulo se enfoca en el análisis de los resultados finales, recomendaciones.

2. ANTECEDENTES

La disponibilidad de la energía eléctrica es fundamental para el progreso económico, esto se logra con un conjunto de dispositivos que permiten que el suministro de energía eléctrica sea confiable en un sistema de transmisión. Los interruptores de potencia son los componentes centrales de las subestaciones eléctricas son equipos mecánicos de maniobra que permiten la interrupción y paso de la corriente eléctrica. (Siemens AG, 2013)

Contar con un correcto protocolo de mantenimiento permite prolongar la vida útil del interruptor, tanto en su operación normal para las maniobras de interrupción de la corriente o durante la presencia de una falla. Los interruptores de potencia posiblemente tarde o temprano, logren experimentar algún tipo de falla. Determinar el tipo de falla puede ser al momento por muchas razones en las que se toma en cuenta por el propio envejecimiento del equipo y las fallas externas. (Megger , 2003).

Una falla durante este proceso de flujo de corriente o de la energía conlleva a las pérdidas y a la baja calidad de energía entregada al usuario final, por ello los interruptores de potencia tienen un rol importante en hacer que todo suceda con normalidad ante la eventualidad de una falla y durante el suministro de la energía y todo esto que no se vea afectada el medio ambiente de alguna manera negativa.

El interruptor de potencia es como ya se ha mencionado el equipo donde recae la responsabilidad a última instancia de abrir rápidamente el circuito cuando se produzca una falla, con esto se está hablando que el interruptor cuenta con milisegundos para realizar la extinción de la falla, en ocasiones el interruptor se encuentra inactivo sin operarse, debido a donde se encuentre en su configuración y no necesite realizarse con constancia maniobras que provocan en algunos casos el deterioro periódico de los componentes internos. (Megger , 2003)

Es de suma importancia contar con las pruebas de fábrica realizadas a los interruptores de potencia previo a ponerlos en operación, dichas pruebas funcionan como un punto de partida para próximas pruebas que se realicen al equipo de aquí en adelante, debido a los desgastes mecánicos que puedan crecer y afectar el desempeño correcto del interruptor de potencia y verificar el funcionamiento correcto del interruptor. (Megger , 2003)

Un diagnóstico a tiempo realizado con base en los resultados de las pruebas efectuadas a los interruptores de potencia permite establecer y dimensionar la intervención de la realización de un mantenimiento mayor al equipo. (Silvestre, 2008).

Durante la extinción del arco eléctrico dentro de las recámaras se produce un calentamiento al momento en el que se abren los contactos del interruptor, se ha tenido una evolución en los equipos respecto a que método o medio utilizar para enfriar y extinguir de cierta manera el arco producido, en los que se pueden mencionar los interruptores sumergidos en aceite de grandes y pequeñas dimensiones, pero su inconveniente es que se consideran un equipo inflamable por el medio que utilizan para la extinción del arco. (Silvestre, 2008).

A continuación, se tiene los interruptores de aire que presentan la ventaja de no ser un material explosivo, pero necesitan de grandes cantidades de aire, para lograr mitigar el calentamiento producido por el arco, por lo cual se centraliza solo para capacidades relativamente pequeñas. (Silvestre, 2008).

Continuando en el desarrollo del medio para enfriamiento y extinción del arco aparecieron los interruptores de vacío, estos presentaron grandes ventajas al igual que desventaja que una vez logrando extinguir el arco se pierde el vacío, lo cual produciría una falla adversa al interruptor de potencia. (Silvestre, 2008).

Por último, uno de los medios más utilizados actualmente en lo que se refiere a la extinción del arco en los interruptores de potencia ha sido los que utilizan el gas hexafluoruro de azufre conocido como gas SF₆, un gas con excelentes capacidades dieléctricas, lo que permite recuperar sus propiedades luego de extinguir el arco, que viene a ser un medio perfecto para la extinción del arco provocando que los interruptores de potencia con este medio se han de menor dimensiones para capacidades altas. (Silvestre, 2008).

El funcionamiento correcto de un parque de interruptores de potencia para maniobras en una subestación eléctrica es de vital importancia su buen funcionamiento para determinar dónde o que protocolo es necesario implementar para un mantenimiento adecuado. (Oñate & Bermúdez).

El gas SF₆ como medio aislante de los equipos posee características dieléctricas, que pueden reducir hasta un 80 % el espacio físico que normalmente ocuparía una subestación convencional esto representa una reducción de dimensionamiento. (Oñate & Bermúdez).

Todos los equipos aislados en gas SF6 se encuentran herméticamente y debidamente cerrados para posibles fugas del gas. (Oñate & Bermúdez)

El SF6 es un gas aislante no inflamable y no tóxico, aunque afecta relativamente poco a la capa de ozono, tiene un alto potencial de efecto invernadero. Estos gases cuando se liberan a la atmósfera impiden que la radiación infrarroja de onda larga emitida por la superficie de la tierra salga al espacio exterior. Se comportan como las paredes de vidrio de los invernaderos, haciendo que el aire interior se caliente. Entre los gases naturales de efecto invernadero están el vapor de agua, el dióxido de carbono, el ozono, el metano, y los óxidos de nitrógeno. Los gases de efecto invernadero creados por el hombre son los HFC, PFC, CFC y el SF6. (Asociación de Fabricantes de Bienes de Equipo Eléctricos, 2004).

En relación con el efecto invernadero, el gas que más contribuye al efecto invernadero es el vapor de agua, que es el causante de aproximadamente dos terceras partes del calor generado en la superficie terrestre por efecto invernadero natural. El resto es debido a pequeñas cantidades de dióxido de carbono, metano y otros gases. (Asociación de Fabricantes de Bienes de Equipo Eléctricos, 2004)

Las personas contribuimos en el efecto invernadero natural de distintas maneras, haciendo que la temperatura de la atmósfera aumente. Los gases de efecto invernadero producidos por el hombre tienen un efecto más intenso, semejante al que tienen las paredes de vidrio de un invernadero. Producen una especie de barrera en la atmósfera que se hace cada vez más opaca para la radiación infrarroja de onda larga, producida por la superficie terrestre. Esta radiación producida en la superficie terrestre se refleja en la barrera de gas en la atmósfera, produciendo así un aumento de la temperatura en la parte más

baja de la atmósfera. (Asociación de Fabricantes de Bienes de Equipo Eléctricos, 2004).

El hexafluoruro de azufre (SF₆) es un gas de efecto invernadero con los índices de poseer el mayor o los mayores efectos de manera potencial en el calentamiento de la tierra, registrado ante el panel intergubernamental de Cambio Climático, por lo que basta con pequeñas emisiones de dicho gas para contribuir de manera notable en el calentamiento global. (Asociación de Fabricantes de Bienes de Equipo Eléctricos, 2004).

El SF₆ se utiliza como medio de extinción de arco eléctrico, es el más utilizado a nivel mundial en las subestaciones eléctricas para los equipos de potencia, tales como interruptores, transformadores y subestaciones encapsuladas. Por lo cual su uso se incrementa con los años y seguirá de una manera continua, también crece el riesgo de emisiones que contribuyan al aumento de la temperatura ambiental. Las principales características del SF₆ tales como el método de obtención, sus propiedades físicas, y eléctricas, áreas de aplicación, ventajas y desventajas al utilizarlo en equipos eléctricos, los factores de degradación al utilizarlo como medio de extinción del arco eléctrico, así como sus efectos a la salud en el ambiente laboral y medio ambiente. Asimismo, se hacen recomendaciones para reducir las fugas de dicho gas durante su operación normal, y los cuidados que deben tenerse para evitar el deterioro de sus propiedades dieléctricas, y emisiones mayores al medio ambiente. (Asociación de Fabricantes de Bienes de Equipo Eléctricos, 2004).

Como surgió o se determinó el daño que produce el gas SF₆, todo está escrito y pactado en el Protocolo de Kioto, que es un protocolo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático, es un acuerdo internacional que tiene como meta principal, reducir las emisiones de

seis gases pertenecientes al efecto invernadero causantes del calentamiento global a los que pertenecen: dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), y gases industriales fluorados: hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) que menciona sobre el cambio climático, surge con el fin de promover un desarrollo sostenible, cumplir con los compromisos cuantificados para lograr la reducción de las emisiones. (Naciones Unidas, 1998)

Es importante mencionar que de los países participantes Estados Unidos mayor emisor de gases de efecto invernadero a nivel mundial no ratificó su compromiso en la reducción de emisiones que fue el país que no firmó dicho protocolo. Con el convenio del protocolo de Kioto se da un paso considerado para crear un régimen mundial, donde se logra la reducción y estabilización de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). (Naciones Unidas, 1998).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Descripción del problema

El funcionamiento del interruptor de potencia también cubre la necesidad de establecer el flujo de corriente; actualmente existen interruptores con mayor capacidad de interrupción. Para que el interruptor realice con éxito las funciones para las que fue diseñado es necesario que cuente con un sistema mecánico que cumpla con los requerimientos a los que va ser sometidos de apertura y cierre de sus contactos, tanto en tiempo y forma, debe contar con un diseño eléctrico confiable para asegurar que el equipo soporte los esfuerzos eléctricos y térmicos a los que será sometido en una operación normal, así como de falla durante su vida de operación.

Para lograr que el interruptor de potencia alcance y funcione adecuadamente en su vida de operación y ante constantes movimientos que se realicen durante las maniobras o liberar las fallas a tiempo, se debe realizar inspecciones constantes, así como realizarle pruebas eléctricas del comportamiento de los tiempos de apertura y cierre, su resistencia estática y dinámica.

Se utiliza varios medios para la extinción del arco eléctrico, como medio aislante en sus recámaras el interruptor de potencia utiliza un gas denominado hexafluoruro de azufre (SF₆) este gas pertenece a los que contribuye a los efectos del gas invernadero, debido a sus componentes químicos, por lo cual es necesario durante la vida de operación del interruptor de potencia llevar un

debido proceso de monitoreo del gas, evitando posibles fugas de sus recámaras al cual también se les hace las pruebas de su calidad.

3.2. Determinación del problema

Actualmente, la industria eléctrica requiere de pruebas para determinar el funcionamiento de los equipos, se debe tener un sistema de control del gas hexafluoruro de azufre en la aplicación de equipos de sistemas eléctricos de potencia, para el control de la liberación de humedad y la descomposición cuando existe presencia del arco eléctrico.

3.3. Delimitación del problema

El proyecto de investigación se llevará a cabo en una empresa de energía eléctrica para el desarrollo fueron otorgados los permisos necesarios, con las condiciones de políticas de integridad y seguridad de la información de la empresa. El proyecto será desarrollado en un plazo no mayor a un año y será aplicado al área de mantenimiento y operaciones.

- Alcance de tiempo: el estudio se enmarca en el tiempo entre el último trimestre 2017 al segundo trimestre de 2018, ya este es el lapso propuesto por la gerencia de operaciones
- Alcance de espacio: se dará en el área operaciones, mantenimiento.
- Alcance metodológico: el estudio se desarrollará en fases secuenciales y desde el diagnóstico de la situación actual, proceso de implementación.

- Exploración del problema: se describe cómo afecta el no tener un sistema de control del gas hexafluoruro de azufre.
- Aplicabilidad de los resultados: son válidos para el área de operaciones y mantenimiento.

3.4. Formulación del problema

La falta de un plan sistema de control del gas hexafluoruro de azufre puede provocar deterioración al equipo de potencia y generar contaminación.

3.4.1. Pregunta central:

Para hacer un correcto plan de monitoreo del uso de gas hexafluoruro de azufre se debe tener un control de las operaciones en los sistemas eléctricos de potencia, que permita realizar un diagnóstico temprano para ser eficientes y evitar indisponibilidades.

3.4.2. Preguntas auxiliares

- ¿Cuál son los efectos que se producen durante la interrupción del arco eléctrico, descargas eléctricas o durante una maniobra de operación normal?
- ¿Cuáles son las condiciones de mantenimiento a los equipos de potencia?
- ¿Cuáles los protocolos para realizar pruebas a los equipos y dar mantenimiento preventivo y correctivo?

3.5. Viabilidad

Este proyecto presenta el proceso de cómo utilizar el gas SF6 como medio dieléctrico en equipos de potencia y determinar el período de mantenimiento a equipos que utilizan el gas SF6.

3.6. Consecuencias de la implementación de la investigación

De realizarse

- Se tendrá protocolo para el mantenimiento de equipos eléctricos.
- Contar con un plan de manejo del medio ambiente al utilizar SF6.
- Se tendrá una respuesta inmediata si con una emergencia.
- Planificación de las operaciones de campo en el diseño, instalación, manteniendo de equipos.

De no realizarse

- La falta un plan de control del gas SF6 puede provocar la contaminación de medio ambiente.
- Perder equipo de trabajo en las áreas de operaciones de sistemas eléctricos.
- No se tendrá un protocolo adecuado para la realización de la intervención a los interruptores de potencia como los equipos de potencia encapsulados en hexafluoruro de azufre SF6.

4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo corresponde a la línea de investigación de energía, aplicada al área de trabajo de conservación de la energía de la división de la transmisión de energía.

Se enfocará en el análisis de las pruebas realizadas al parque de interruptores de potencia a los cuales no se han intervenido con un mantenimiento mayor, también cuentan con más de 15 años sin realizarle una intervención en sus componentes mecánicos como a los secantes y al material utilizado como aislante de las recamaras como medio de supresor del arco eléctrico. El estudio que determinó la intervención de estos equipos, se basó mediante pruebas al equipo realizadas previamente que dictaminaron la necesidad de realizarle el mantenimiento mayor, para evitar pérdidas del equipo y fallas al sistema consideradas.

Los motivos que llevaron a realizar el estudio con base en los interruptores de potencia, se centran que son equipos que forman parte del control y funcionamiento seguro de cualquier red eléctrica, asegurando el flujo continuo de corriente en las condiciones normales de operación, así como resguardan como medio de protección al transformador de potencia, siendo este uno de los equipos más relevante en una subestación eléctrica. Una condición anormal del interruptor afecta a la calidad del servicio de transporte provocando una indisponibilidad forzada a la red del suministro, por lo cual es necesario realizar los trabajos necesarios al equipo para su mejoramiento y ser eficientes.

Así, el presente trabajo será de utilidad para los responsables de determinar las próximas intervenciones, ya que además permitirá mostrar un protocolo adecuado para la realización de la intervención mayor a los interruptores de potencia como los equipos de potencia encapsulados en hexafluoruro de azufre (SF6); además de ofrecer comentarios finales sobre los trabajos realizados y que cambios son necesarios realizar a los equipos en relación a repuestos que no fueron posibles de dictaminar previamente, por lo cual no fue viable durante estos trabajos decidir si aplicaban para realizar su cambio.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Determinar el plan de monitoreo del uso de gas hexafluoruro de azufre, para tener un control de las operaciones en los sistemas eléctricos de potencia, que permita realizar un diagnóstico temprano para ser eficientes y evitar indisponibilidades.

5.2. Específicos

- Establecer los efectos que se producen durante la interrupción del arco eléctrico, descargas eléctricas o durante una maniobra de operación normal.
- Determinar las condiciones de mantenimiento a los equipos de potencia.
- Establecer los protocolos para realizar pruebas a los equipos y dar mantenimiento preventivo y correctivo.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

El estudio de la presente investigación tiene por objeto proporcionar información necesaria para el control sobre el gas SF6 de equipos eléctricos de potencia que utilizan como medio de extinción de los arcos eléctricos, que se producen dentro de sus recámaras. Debido a que el SF6 posee un elevado potencial de efecto invernadero y forma parte de los gases controlados en el Protocolo de Kioto.

El alcance es apoyar en la gestión para el control y manejo adecuado del SF6 para equipos eléctricos en subestaciones eléctricas en equipos de patio, se desea proponer fundamentos para el manejo adecuado del gas SF6, por sus efectos dañinos al ambiente teniendo un control reduciendo las emisiones que produce, que es de intereses para varios sectores presentando a continuación alguna de éstas.

- Instituciones pertenecientes al sector eléctrico de Guatemala como: Instituto Nacional de Electrificación (INDE), Empresa Eléctrica de Guatemala (EEGSA), Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), entre otras.
- Profesionales interesados en implementar adecuadamente el correcto manejo del SF6.
- Estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Este estudio con lo anterior, se pretende contribuir directamente que los interesados en el tema tratado, adquieran los fundamentos de forma clara y objetiva sobre los equipos que deben utilizarse en las operaciones de extracción y procedimientos de ejecución para garantía de que están cumpliendo las responsabilidades que le corresponden, un manejo y conocimiento apropiado del SF6 para la protección del medio ambiente durante todas las fases de explotación de los equipos eléctricos de media y alta tensión que lo contienen.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Gas sf6 como medio aislante y de extinción

Gas hexafluoruro de azufre se utiliza como medio de aislamiento para equipos de media y alta tensión, además de interruptores automáticos para la extinción del arco eléctrico. Es un gas inodoro, incombustible, inerte, tiene una resistencia dieléctrica a presión atmosférica aproximadamente tres veces más elevada en comparación con el aire, a la igual presión posee cualidades para la extinción del arco eléctrico de tres a cuatro veces superior que el aire. (Granero, 2016)

Las ventajas características de las instalaciones de distribución aisladas con SF6 son las siguientes:

- Escaso espacio
- Poco peso
- Ausencia de contaminación del medio ambiente
- Protección eficaz contra contactos
- Factor de ruido reducido
- Reducción de mantenimiento
- Reducción de período de montaje

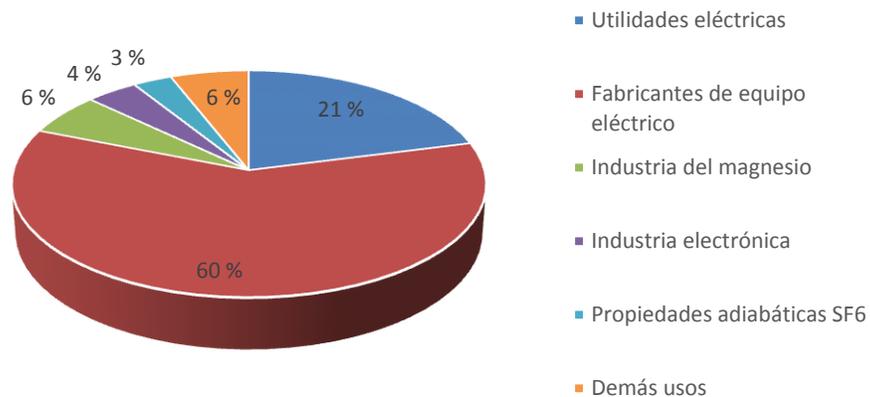
7.2. Aplicaciones típicas del sf6

Es un gas que tiene características eléctricas y térmicas que se utiliza en varios sectores eléctricos como medio aislante, para la extinción del arco eléctrico. Esta fiabilidad le permite al gas tener un adecuado rendimiento en equipos, tanto de alta como de media tensión. (Proyección electroluz, s.f.)

En el sector eléctrico, para la fabricación puestas en marcha y operación de los diferentes equipos tanto como interruptores de potencia, transformadores y en subestaciones encapsuladas (GIS) este consume el 80 % de la producción mundial del SF6. (Smythe, 2004).

El SF6 tiene un potencial de calentamiento global de 22 200 °C, por lo tanto se utiliza únicamente en sistemas completamente aislados y cerrados. (Bohn, y otros, s.f).

Figura 1. Principales aplicaciones del SF6 en la industria



Fuente: (Smythe, 2004)

El SF6 produce efecto invernadero (GEI's) con capacidades de absorción de radiación provocando el potencial de calentamiento de la tierra (PCT) esto como medida en comparación con el CO2 considerándose en un tiempo estimado, el gas SF6 presenta el valor más alto de PCT en emanaciones pequeñas a la atmosfera esto incrementa el riesgo del calentamiento del planeta conforme los años.

Tabla I. **Diferentes valores del PCT para los GEI's**

Especie	Tiempo de vida años	Potencial de Calentamiento Global		
		20 años	100 años	500 años
CO2	variable	1	1	1
CH4	12±3	56	21	6.5
N2O	120	280	310	170
HFC-23	264	9,100	11,700	9,800
HFC-32	5.6	2,100	650	200
SF6	3200	16,300	23,900	34,900
Perfluorometano	50000	4,400	6,500	10,000
Perfluoroetano	10000	6,200	9,200	14,000
Perfluorohexano	3200	5,000	7,400	10,700

Fuente: (Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, 2001).

Dependiendo de la función que desarrolle el gas SF6 en el equipo pueden modificar sus propiedades; en los interruptores de potencia se utiliza como medio aislante, para la extinción del arco eléctrico y con la capacidad de extinguir la energía que se produce en consecuencia esto se debe a su alto esfuerzo dieléctrico y su capacidad de baja conductividad térmica. En las subestaciones encapsuladas en SF6 que por su construcción son utilizados en espacios mínimos, donde es importante optimizar el área, todos los componentes que la conforman internamente en las cámaras como lo son interruptores, conectores, boquillas, transformadores de potencia y demás componentes interconectados se encuentran aislados con el gas, cabe mencionar que este tipo de subestaciones son libre de mantenimiento en comparación con otras subestaciones, además reducen el campo magnético en forma considerable eliminando el campo eléctrico. (Flores , Delgado, & Romero , 2012).

El SF6 al ser sometido a esfuerzos de tensiones de corriente en los equipos eléctricos de potencia que se pueden representar como chispas, arqueo, efectos corona entre otros, va mostrando un grado de descomposición parcial al ser sometidos ante estos esfuerzos en conjunto con la presencia de contaminantes como el aire y la humedad esto va desarrollando subproductos que son altamente tóxicos como corrosivos que afectan la salud de los operadores si son sometidos durante varias horas en un mantenimiento o trabajo. (Flores , Delgado, & Romero , 2012).

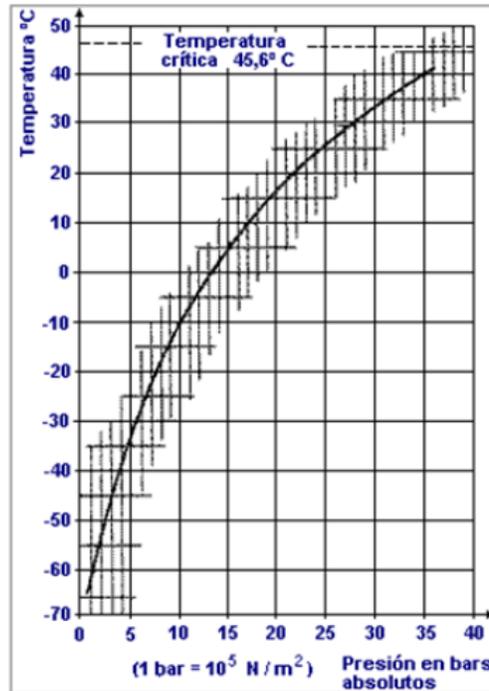
7.3. Propiedades del sf6

El SF6 por sus propiedades físicas, se comporta en estado gaseoso a temperatura ambiente y presiones normales, y su densidad (a 20 °C y 1 bar) es de 6,14 g/l aproximadamente cinco veces más denso que el aire, y se puede acumular en zonas a nivel del suelo niveles inferiores corriendo peligro de asfixia.

7.3.1. Propiedades físicas, químicas y ambientales

Una vez el gas tiene contacto con el aire este se mezcla llegando a no poder ser separado nuevamente, al comprimirse a temperatura ambiente a 25 bares el SF6 se vuelve líquido y puede ser almacenado y transportado en contenedores de gas a presión. (Granero, 2016; Bohn, y otros, s.f).

Figura 2. Curva de presión de vapor saturado del SF6



Fuente: (IEC 60480, 2004)

Su temperatura alcanza su estado crítico en 45,6 °C para ser licuado por compresión a temperatura ambiente para su transporte en estado líquido adecuadamente en botellas.

7.3.2. Calidad del SF6 basado en las normas industriales pertinentes

Tabla II. **Calidades del gas SF6, según normas electrotécnicas relevantes**

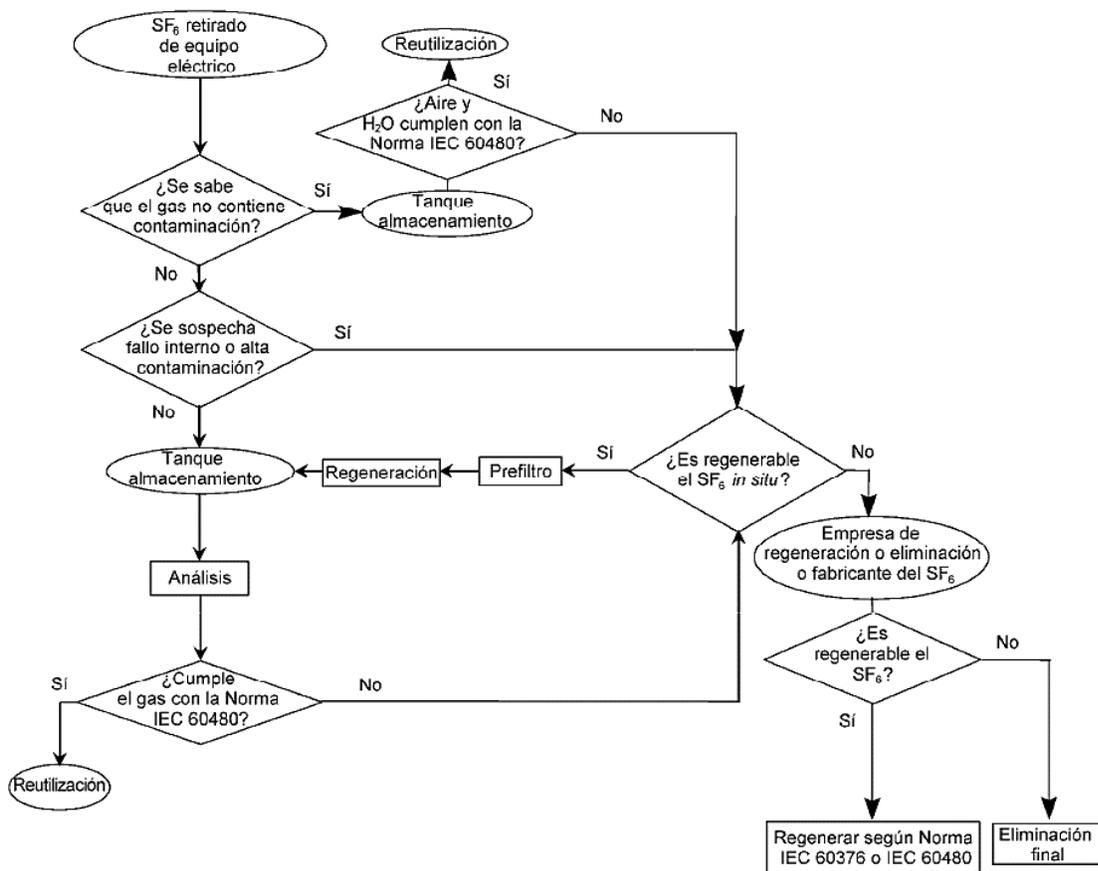
Composición	IEC 60376 (2005) SF6 nuevo (análisis de la fase líquida)	IEC 60480 (2004) SF6 usado	IEC 62271-303 (2008) SF6 usado Especificación del fabricante de gas para la reutilización del SF6
SF6	99,5 % en volumen	Aprox. 97,00 % en volumen	90,7 % en volumen
Aire	2 000 ppm en masa (1% en volumen)	3 % en volumen	<30 % en volumen (6 % en masa)
CF4	2 400 ppm en masa (4 000 ppm en volumen)		<5 % en volumen (3 % en masa)
H2O	25 ppm en masa (punto de rocío aprox. -36 °C) (200 ppm en volumen)	25...95 ppm en masa (punto de rocío aprox. -36 °C... -23 °C) (200...750 ppm en volumen)	< 1 000 ppm en masa (punto de rocío aprox. 5 °C)
Aceite mineral	10 ppm en masa	10 ppm en masa	< 0,1 % en masa
Acidez expresada en HF (ácido fluorhídrico)	0,8 ppm en masa (6 ppm en volumen)	"productos de descomposición gaseosos reactivos totales" total de 50 ppm en volumen (12 ppm en volumen para SO2 y SOF2+25 ppm en volumen para HF)	< 1 000 ppm en masa

Fuente: (Bohn, y otros, s.f)

7.3.3. Diferentes clases de reutilización

Extraído el SF₆ del equipo eléctrico deberá cumplir los requisitos de calidad de gas indicados en la norma IEC 60480 para poder ser reutilizado nuevamente. Una de las cualidades del SF₆ es que puede ser recuperado, reutilizado y purificado en el sitio siempre y cuando se utilicen los equipos de mantenimiento adecuados. (Bohn, y otros, s.f)

Figura 3. Diagrama de decisión para el destino de SF₆ retirado



Fuente: (Bohn, y otros, s.f).

7.3.4. Recuperación y reutilización en sitio

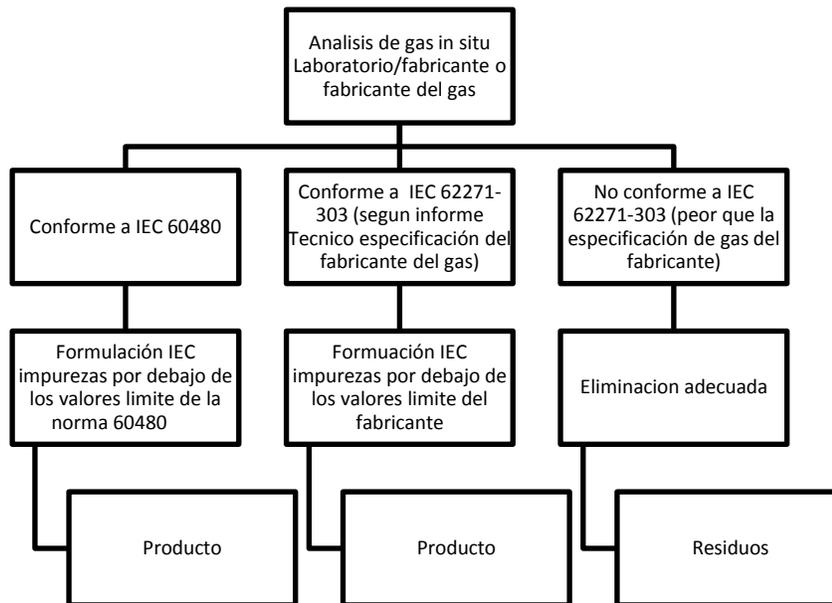
Como parte del proceso normal de envejecimiento del SF6 se pueden identificar durante la inspección impurezas como lo son polvo, humedad, compuestos de SO2, aceite y aire. (Bohn, y otros, s.f).

Posterior a realizar los trabajos y si el SF6 tratado reúne los requisitos el equipo en intervención puede volver a cargarse directamente por medio del equipo de evacuación y carga, este mismo procedimiento es el que se realiza para equipos durante la inspección o montaje en equipos de conmutación. (Bohn, y otros, s.f; Afbel , 2015).

7.4. Incineración del SF6

Si el SF6 analizado no reúne los requerimientos de la especificación de la reutilización y que indica que no puede ser reutilizado o regenerado para obtener gas nuevo, se procederá a incinerarse en una instalación autorizada. (Bohn, y otros, s.f).

Figura 4. **Evaluación del gas y categorización como producto o residuo**

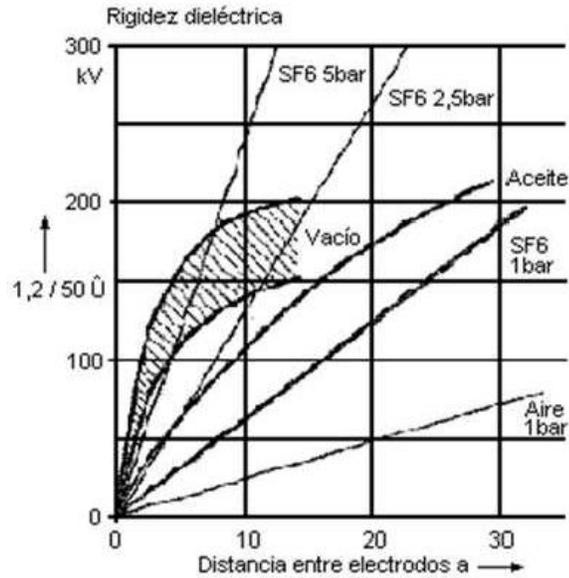


Fuente: (Bohn, y otros, s.f)

7.5. Rigidez dieléctrica en función de la distancia entre electrodos según el flujo dieléctrico

La rigidez dieléctrica es una representación comparativa de varios fluidos dieléctricos, la tensión en crecimiento.

Figura 5. **Rigidez dieléctrica vs distancia electrodos**



Fuente: (Granero, 2016)

- Factor de pérdidas dieléctricas: $\leq 2 \times 10^{-7}$
- El SF6 siendo un gas electronegativo, propiedad que tiende a captar los electrones libres es utilizado como medio extintor en los interruptores. (Granero, 2016)

7.6. Deterioro del gas sf6

El deterioro o descomposición del gas SF6 en los equipos aislados por este gas se deben a varios factores como lo son las descargas eléctricas siendo este el modo más común de su disociación. El gas SF6 se descompone en subproductos al estar expuesto a los fenómenos eléctricos como son: (Flores , Delgado, & Romero , 2012).

- Efecto corona
- Arqueos eléctricos
- Descargas parciales

Tabla III. **Impurezas máximas permitidas en el gas SF6 en equipos de potencia**

Contaminante	Nivel Máximo permitido por IEC 376	Nivel máximo permitido por ASTM D-2472-00	Método de prueba
CF4 [% peso]	0.05	0.05	ASTM D- 2685 IEC 376
Aire expresado como O2 + N2 [% peso]	0.05	0.05	ASTM D- 2685 IEC 376
Contenido de agua [ppm]	15	8	ASTM D- 2029 IEC 376
Acidez máxima [Expresada como ppm HF]	0.3	0.3	ASTM D- 2284 IEC 376
Pureza mínima [% peso]	-----	99.8	ASTM D- 2685 IEC 376

Fuente: (IEC 376 , 1974)

7.7. Impurezas en sf6

El SF6 que se extrae de los equipos eléctricos tiene diferentes clases de impurezas. Estas impurezas pueden contaminar el gas nuevo durante la manipulación. La cantidad de impurezas que se esperan en el SF6 dependen de la manipulación del gas como del funcionamiento del equipo. (IEC 60480, 2004).

Tabla IV. **Origen de las impurezas del SF6**

Situación y utilización del SF6	Orígenes de las impurezas	Impurezas posibles
Durante el tratamiento y en servicio	Fugas y evacuación incompleta desorción	Aire, aceite, H2O
Función aislante	Descargas parciales, efecto corona y chispas	HF, SO2, SOF2, SOF4, SO2F2
Interruptores	Erosión del arco de corte	H2O, HF, SO2, SOF2, SOF4, SO2F2, CUF2, SF4, WO3, CF4, ALF3
	Erosión mecánica	Polvo metálico, partículas
Arcos internos	Fusión y descomposición de metales	Aire, H2O, HF, SO2, SOF2, SOF4, SO2F2, SF4, CF4 Polvo metálico, ALF3, FeF3, WO3, CuF2

Fuente: (IEC 60480, 2004)

Tabla V. **Indicador de descomposición del SF6**

Fuente de descomposición	Fórmula	Estado	Cantidad generada
Contactos calientes	SOF2	Gas	Baja
	SO2F2	Gas	Baja
	SO2	Gas	Baja
Descargas parciales	HF	Gas	Baja
	SO2	Gas	Baja
	SOF4	Gas	Baja
	SO2FS	Gas	Baja
	SOF2	Gas	Baja
	SF4	Gas	Baja
Arcos de maniobra sin carga	S2F10	Gas	Baja
	SOF2	Gas	Baja
	SOF4	Gas	Baja
Arcos fuertes de maniobra	SO2F2	Gas	Baja
	SF4	Gas	Media
	WF6	Gas	Media
	SOF2	Gas	Media
	CF4	Gas	Media
	HF	Gas	Baja
	CUF2	Sólido	Media
WO3	Sólido	Media	
Arcos internos	HF	Gas	Media
	SF4	Gas	Alta
	CF4	Gas	Media
	ALF	Sólido	Alta
	FEF3	Sólido	Alta

Fuente: (Flores , Delgado, & Romero , 2012)

7.7.1. Impurezas durante el tratamiento y en puesta en operación

Durante la operación del llenado y vacío en los equipos puede darse lugar a contaminación por el aire y vapor de agua. En el desarrollo de este proceso se puede absorber humedad en las superficies internas además como en los componentes de polímeros propios del equipo logrando así introducirse en el SF6 aceite del equipo de tratamiento como lo son bombas y compresores. (IEC 60480, 2004)

7.7.2. Impurezas en interruptores de potencia

Durante la interrupción del flujo de la corriente, se producen arcos de alta temperatura provocando la degradación del SF6 produciéndose reacciones químicas entre los productos formados. La manera de poder llevar un control de la cantidad de estos productos formados es por el número de operaciones, el diseño del equipo y la utilización de adsorbentes. El interruptor de potencia contribuye a demás con el contenido de partículas y metales procedentes del roce de sus contactos. (IEC 60480, 2004)

7.7.3. Impurezas provocadas por arcos internos

Un interruptor de potencia en operación puede similarmente poseer cierta cantidad de impurezas esperadas en el SF6 en comparación con los equipos que se encuentran defectuosos, provocando, así llegar hacer un riesgo potencialmente toxico. (IEC 60480, 2004)

Las formaciones de otras impurezas en el SF6 se producen por la acción de las descargas eléctricas a las que se ve sometido durante su puesta en

operación, se descompone con la temperatura hacia los 2000°k aproximadamente, en el interior cuando se produce una descarga eléctrica el calor que se forma con el arco lo descompone en $SF_6 = S + 6F$. (Granero, 2016)

Cuando el arco eléctrico se evapora y se enfría por debajo de los 2000°k el SF_6 vuelve a reponerse en su estado inicial casi en su totalidad. Este estado no es ideal debido a que existen reacciones secundarias con el material de los contactos originando subproductos primarios y secundarios sólidos o gaseoso, tales como:

- Fluoruros metálicos: CuF_2 , WF_6 (a veces con contenido de S)
- Fluoruros de azufre: SF_4 , S_2F_2

EL fluoruro de hidrógeno (HF) es altamente corrosivo, afectando los materiales que contienen silicona, porcelana, vidrio. (Granero, 2016)

El fluoruro metálico se hace presente en forma de polvo. Derivado de las reacciones químicas secundarias se desprende que el agua (H_2O) es la fuente de la causa de la formación del fluoruro de hidrógeno (HF) (Granero, 2016)

7.8. Efectos de las impurezas

Cuando los porcentajes son mínimos en algunos tipos de impurezas se pueden llegar a despreciar tal es el caso del nitrógeno que proviene de la dilución del producto. Por el contrario, para las cantidades de otros tipos de impurezas se deben limitar a niveles solas o combinadas logrando así no ser un riesgo para el funcionamiento del material en cuestión. (Granero, 2016).

Un ejemplo claro sobre los efectos de las impurezas son el agua, las impurezas ácidas y el oxígeno cuando se combinan pueden corroer el material en el que se encuentra en contacto produciendo un funcionamiento mecánico defectuoso, el agua al tener contacto con impurezas ácidas puede llegar a condensarse a temperaturas de operación bajas y presiones elevadas, llegando a ser un peligro latente para el material eléctrico. En estas condiciones es necesario mantener baja la tasa de este tipo de impurezas para ser despreciable la corrosión o la condensación. (Granero, 2016).

Ante esto no existen reglas aun definidas sobre los límites aceptables de un gas impuro, los límites dependen tanto de los factores de diseño y propiedades del material, así como la distancia mínima de contorneo, longitud de la línea de fuga, la presencia de arcos en el interior de la recámara, el tipo de material con el que el gas está en contacto, el sistema de absorción, etc. Todos estos factores los determina el fabricante para cada caso el contenido permitido de impurezas en el gas previo a ser intervenido o sustituirlo.

El SF6 por ninguna razón debe utilizarse cuando se contenga impurezas que pueden condensarse alcanzando punto de rocío a una temperatura superior en comparación con la temperatura más baja de funcionamiento a la que está prevista el equipo. (Granero, 2016)

7.9. Desviación de las propiedades indicadas. Impurezas

Las cantidades máximas admisibles de las impurezas en el SF6 nuevo son:

Tabla VI. **Cantidades máximas admisibles de impurezas en gas nuevo SF6**

Humedad	15 ppm a -40 °C
Aire (O2 y N2)	0,05 %
CF4:	005 %
Acidez expresada en FH:	0,3 ppm.
Fluoruros hidrolizables expresados en FH	1,0 ppm
Contenido en aceite	10 ppm

Fuente: (Granero, 2016)

7.10. Propiedades eléctricas

Tensión de perforación a 50Hz en un campo homogéneo

Tabla VII. **Tensión perforación**

Presión 1 atmósfera	3 veces superior al aire o N2
Presión 2,5 atmósferas	9 veces superior al aire o N2, y aproximadamente igual al aceite para transformadores e interruptores
Presión 4,0 atmósferas	12 veces superior al aire o N2

Fuente: (Granero, 2016)

Tensión soportada a impulsos tipo rayo onda 1,2/50 μ s en campos no considerados homogéneos.

7.11. Peligros de las impurezas tóxicas

La presencia de productos de descomposición en pequeñas cantidades se detecta por un olor desagradable, en contacto irritación de boca nariz y ojos. Estos síntomas o fenómenos se presentan en pocos segundos, antes que tenga

lugar reacción tóxica alguna, una vez personal con los síntomas debe salir inmediatamente a un espacio libre. (Granero, 2016)

Si las condiciones son normales, el gas se elimina realizando un tratamiento en vacío, aunque en ocasiones si después de realizar este proceso sigue persistiendo los olores es necesario la intervención en el interior del equipo. El equipo debe estar previstos de filtros especiales que son utilizados para absorber los productos en descomposición, durante este proceso no son necesarias máscaras ni dispositivos de protección siempre y cuando no existan olores ni polvo en el área de trabajo, por ello es necesario realizar una inspección antes de iniciar los trabajos para así determinar si se tendrá exposición a los productos de descomposición y disponer de los dispositivos de protección adecuados.

Entre ellos máscaras con filtros para polvo y de carbón activado, contar con gafas de vidrio, evitar el contacto directo utilizando guantes de caucho para prevenir la irritación de la piel, cualquier recomendación para la intervención de los equipos en gas es recomendable realizar la consulta con el fabricante que indicara que material y reglas de seguridad son necesarias. (Granero, 2016)

SF₆ es un gas no tóxico, mas no es posible respirarlo ni permanecer en un ambiente completo del mismo, por lo que no se debe ingresar a un lugar o equipo que contenga SF₆ sin contar con la ventilación adecuada, al ser más pesado que el aire, puede acumularse en fosas, canales, subterráneos, pozas, el personal que mantenga contacto con el SF₆ debe ser capacitado y debe estar consciente del peligro de asfixia en estos lugares. (Granero, 2016)

7.12. Rango de presiones de utilización del sf6 en equipos eléctricos

Las propiedades del SF6 al igual que su rigidez dieléctrica aumentan con la presión, al igual que aumenta su temperatura de punto de rocío.

En alta tensión para los equipos se utiliza la presión más elevada posible, cuya temperatura de condensación sea inferior en comparación con la temperatura de funcionamiento más baja para el equipo. Con frecuencia se utiliza la presión a 6 BAR absolutos donde la temperatura de condensación es de -25 °C. (Granero, 2016)

En equipos de media tensión en compartimientos puramente SF6, las presiones acostumbradas son de 1.5 a 2 bar absolutos este rango es considerado suficiente para efectos de aislamiento permitiendo así una vida media 20 años. (Granero, 2016)

Para los interruptores de media tensión las presiones vienen determinadas por el fabricante considerando siempre la temperatura de condensación la que tiene que ser inferior a la temperatura mínima de funcionamiento prevista para el equipo. (Granero, 2016)

8. ÍNDICE PROPUESTO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE TABLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS
ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. GAS SF₆ COMO MEDIO AISLANTE Y DE EXTINCIÓN
 - 1.1. Principales aplicaciones del SF₆ en la industria
2. PROPIEDADES DEL SF₆
3. IMPUREZAS DEL SF₆
4. EFECTO DE LAS IMPUREZAS
5. PROGRAMA DE MANTENIMIENTO
6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

La presente investigación es de carácter descriptivo, tiene como principal objetivo dar a conocer la manera adecuada sobre el manejo del SF6 en equipos de media y alta tensión que utilizan este gas dentro de sus recámaras, por lo que permitirá establecer un protocolo que relacione las actividades a realizar estableciendo los métodos y manera de ejecución.

El protocolo que se propone realizar al finalizar podrá ser aplicado para la ejecución de mantenimiento preventivo como correctivo con la calidad total y compromiso de los operadores a cargo directamente de los trabajos y equipos. Con el objetivo de ser más eficientes en el uso del equipo y evitar posibles fallas a los equipos a intervenir.

Establecer con base en las pruebas realizadas a los equipos, las diferentes actividades que deben realizarse. Proceder según la norma lo recomienda

- Fase I. Revisión documental

Fase que consistirá en la recopilación de información relacionada con el gas hexafluoruro de azufre SF6, de documentos de su manipulación considerando la norma IEC 60480 y recomendaciones del fabricante acerca del tiempo adecuado para que un equipo que utiliza en sus cámaras gas SF6 sea intervenido, manuales, registro de fallas, experiencias de mantenimientos realizados al parque de interruptores de potencia.

- Fase II. Diagnóstico

Recopilada la información, se procede a la toma de decisiones y el armar un protocolo sobre el adecuado manejo del SF6.

En esta etapa se determinará la organización de la información que se recopilará, donde se incluye tablas de registro del comportamiento del SF6 ante las fallas y su degradación parcial, productos que se forman con las diferentes tensiones a la que es sometido, descargas electricas o durante una maniobra de operación normal y medios de diseño para reducirlos.

- Fase III. Mantenimiento enfocado a mejoras

Para que un equipo logre funcionar eficientemente es necesario que se trabaje dentro de los parámetros establecidos y recomendaciones del fabricante, manteniendo estos controles de parámetros de revisiones, se logra llevar un registro de los equipos y medir su estado. Esta investigación pretende establecer con base en las recopilaciones de las fases anteriores un protocolo de lo adecuado a realizar, tanto como monitoreo y el manejo de los desechos en los equipos de media y alta tensión encapsulados en SF6, con la finalidad de evitar emisiones al medio ambiente por ser gas de efecto invernadero.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

10.1. Análisis y obtención de información

Para la recolección de información, se clasificará por diferentes tipos estos dependiendo de los datos recolectados ya sea de manera cuantitativa o cualitativa, se ordenarán para esto, se utilizarán las herramientas de OFFICE como lo son Word y Excel para proceder a leerla, ordenarla y graficarla de ser necesario para su mejor comprensión.

El medio utilizado para la adquisición de información será con base en libros, informes de operación y mantenimiento, talleres, manuales y normas. Se recolectarán conforme se vayan realizando las consultas por carpetas el día de la consulta para tener un control de la información adquirida.

- Análisis estadístico de datos

Las diferentes herramientas estadísticas se emplearán donde sea necesario el análisis de los datos, ya que pueden darse datos cualitativos y cuantitativos.

Estadística descriptiva:

- Medidas de centralización: indica valores más representativos de un conjunto de datos
 - Media aritmética

- Mediana
- Moda

- Medidas de dispersión: para medir el grado de dispersión que existe en la distribución
 - Recorrido o amplitud
 - Desviación media
 - Varianza
 - Desviación típica

- Estadística inferencial
- Muestreo aleatorio simple
- Medidas de centralización

11. CRONOGRAMA

Tabla VIII. Cronograma de actividades

o.	Actividades	Semanas											
		Mes 1				Mes 2				Mes 3			
		0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
	Recopilación de información	■	■										
	Investigación preliminar	■	■										
	Análisis de información		■	■									
	Generación de borrador			■	■								
	Recopilación de información del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales				■	■							
	Análisis gráfico e interpretación de información					■	■	■					
	Redacción de informe final								■	■			
	Presentación										■		

Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para realizar este trabajo de investigación, la disponibilidad de los recursos económicos son necesarios, y para llevar a cabo los objetivos y metas señaladas en esta investigación, se contará con los recursos financieros del estudiante. Entre los gastos, se estipula el tiempo de estudio, costo de tiempo de desarrollo, y costo de recurso humano que participe durante la ejecución de la investigación.

El presupuesto sintético (global) que enmarca toda la información del recurso humano y otros recursos que se requerirán para completar dicha investigación.

La mayor parte de los insumos y del presupuesto es directamente financiado por la empresa, porque representa los pagos de planillas que la misma hace a sus colaboradores mes a mes.

Tabla IX. **Presupuesto**

Actividad	Costo total (expresado en quetzales)	Porcentaje
Personal técnico	800	8 %
Asesoría	2 500	28 %
Materiales insumos, equipos de medición y servicios técnicos para el desarrollo de la investigación.	4 000	44 %
Transporte	600	6 %
Material bibliográfico	700	7 %
Otros (papel, impresiones, material vario)	500	7 %
Total-horas hombre	Q 9 100	100 %

Fuente: elaboración propia.

13. BIBLIOGRAFÍA

1. ABB. (2008). *Interruptores de alta tensión para aplicaciones de hasta 800 Kv*. Ludvika, Suecia : Henningsons Tryckeri AB.
2. ABB. (2013). *Interruptores seccionadores, guía de aplicaciones*. Ludvika
3. Acevedo , J., & Herreño Rocha , A. (2009). *Caracterización de fenómenos de desgaste y deterioro en interruptores de potencia y su aplicación en la definición de la estrategia de mantenimiento*. CIER , 38-49.
4. Afbel . (2015). *Las buenas prácticas con el SF6*.
5. Alvarado, O. (s.f.). *Tecnologías de extinción de arco*. México : GE.
6. Asociación de Fabricantes de Bienes de Equipo Eléctricos. (s.f.). *Documento para el entrenamiento del personal que manipula Hexafluoruro de Azufre en equipos de conmutación eléctrica de media y alta tensión*. AFBEL.
7. Bohn, T., Buscher , A., Drews, B., Ball , P., Blumenthal, P., Hippsenstiel , M., . . . Grote , M. (s.f). *Documentos de formación relativa al SF6*. Berlín: ZVEI Zentral verband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V

8. CIGRE. (2004). *Guía para la gestión del SF6 en la industria eléctrica en España*. España.
9. Comisión Federal de Electricidad. (s.f). *Operación interruptores de potencia*. México
10. ENERSAFE. (06 de Julio de 2017). ENERSAFE. Obtenido de ENERSAFE: <http://www.enersafe.com.co/>
11. Estrada , J., & Lozano , H. (2015). *Impacto de modelos del arco eléctrico de un interruptor de potencia en un sistema eléctrico*. Pereira .
12. Flores , R., Delgado, F., & Romero , V. (2012). *Aplicaciones del SF6 en la Industria Eléctrica y su Impacto en el Medio Ambiente*. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 229-241.
13. Granero, A. (26 de Febrero de 2016). *Ingeniería de Maquinas y Sistemas Eléctricos*. Obtenido de IMSE: <http://imseingenieria.blogspot.com/2016/02/el-gas-sf6.html>
14. Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. (2001). *Tercer informe de evaluación cambio climático 2001*. Ginebra .
15. IEC 376 . (1974). *Specification and Acceptance of New Sulphur Hexafluoride First Edition*. (Supplement A-1973) (Supplement B-1974).

16. IEC 60480. (2004). *Líneas directrices para el control y tratamiento de hexafluoruro de azufre (SF6) extraído de equipos eléctricos y especificaciones para su reutilización*. Madrid : AENOR .
17. Megger . (2003). *Guía de prueba de interruptores*.
18. Naciones Unidas. (1998). *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
19. Oñate , I., & Bermúdez, G. (s.f.). *Pruebas eléctricas y puestas en servicio del equipo encapsulado en gas SF6 del patio de 69 kv de la subestación salitral*. Guayaquil.
20. Portillo, O. A. (2009). *Mantenimiento mayor de generadores sincrónicos de 37.5 MVA, 10kv, de la unidad No.2 Unidad No.3, de la planta hidroeléctrica de aguacapa y ejecución de plan de mantenimiento a 9 interruptores de potencia de 230Kv en SF6 tipo FXT de los generadores*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
21. Proyección electroluz. (31 de agosto de s.f.). *Uso del gas SF6 en aplicaciones eléctricas*. Obtenido de Proyección Electroluz : <http://www.Electroluz.com.ar>
22. Siemens AG. (2013). *Interruptores de potencia de alta tensión*. Interruptores de potencia de alta tensión, 4.

23. Smythe, k. (2004). *Trends in SF6 sales and end-use applications: 1961-2003*. En: "3rd International Conf. on SF6 and the Environment". Scottsdale, Arizona .

14. APÉNDICES

Tabla X. Factibilidad del estudio

Recursos de factibilidad	Costo	Descripción
Métodos de investigación		
El presente trabajo se basa en el mantenimiento mayor realizado a los interruptores de potencia previamente analizados en base a las pruebas realizadas a los equipos. Por lo tanto, el tipo de alcance del trabajo se fundamenta en recolección y análisis de datos.	Q. 5000 c/u	Mantenimiento preventivo que se realizan a los equipos anualmente en la unidad de mantenimiento de subestaciones costo por equipo aproximadamente
Materiales de investigación		
Para realizar y completar el proceso del trabajo se analizaron pruebas previamente realizadas a los equipos y mediante el estudio de los mismos se determinó que equipos serían los intervenidos.	Q. 7000	Tiempo de trabajo para analizar las pruebas eléctricas de los equipos
Recurso teórico		
Para el tema propuesto se tiene el acceso a las pruebas realizadas, el tema expuesto de la investigación principal cuenta con el suficiente acceso de información tanto por los medios de internet, revistas, libros.	Q. 1000	Los resultados de las pruebas y recomendaciones del contratista se entregan al finalizar los trabajos se incluye con el precio de los mantenimientos, se contabiliza los recursos extras para información
Recurso humano		
Los mantenimientos realizados fueron supervisados personalmente	Q. 8800	Salario aproximado por trabajos efectuados los días sábados y domingos días que se realizaron los mantenimientos
Recurso temporal		
Para la elaboración del presente trabajo de investigación se realizará en un plazo aproximadamente de 3 meses dentro del presente año, durante el cual se ejecutará los procesos de investigación tales como: Planteamiento del problema, marco teórico, diseño de la investigación, revisiones.	Q. 8000	Tiempo de trabajo, recursos personales como equipo de cómputo (Impresora, cartuchos, papel). Recursos como electricidad, internet, depreciación de vehículo propio, alimentación.
Recurso financiero		
Para el desarrollo del proyecto la entidad a cargo de los mantenimientos financio los mismos por lo cual no requiere de algún financiamiento adicional.	\$6445 c/l	Mantenimiento a cargo de un ingeniero certificado por fábrica de la marca de interruptores, mano de obra de trabajadores.

*c/l – cada interruptor

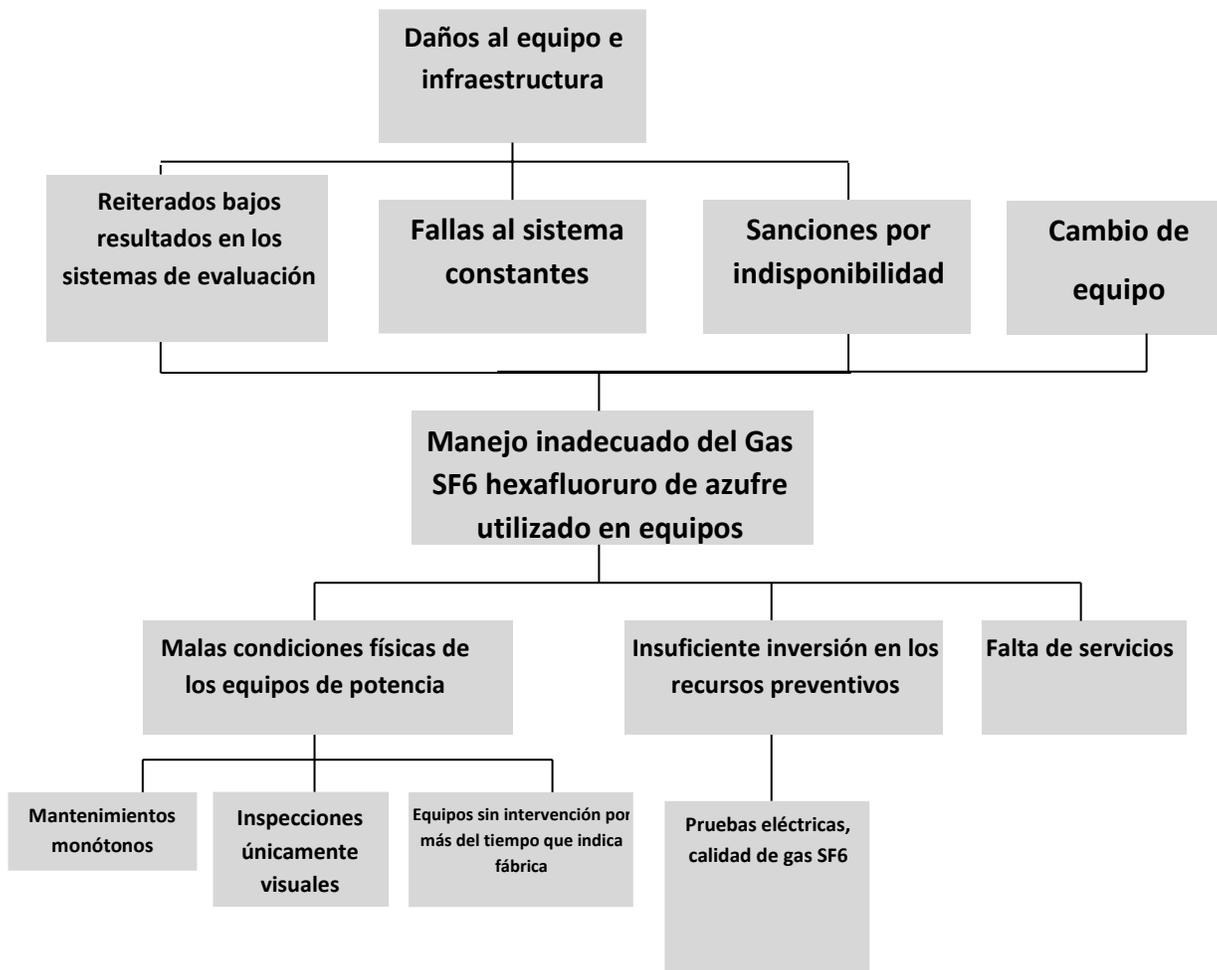
Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. Matriz de coherencia

PROBLEMA	PREGUNTAS	OBJETIVOS	MARCO METODOLOGICO	
<p>Diversos dispositivos son los que conforman una subestación eléctrica, forman parte del correcto, adecuado y seguro funcionamiento de la red eléctrico. Se menciona como uno de ellos el interruptor de potencia como dispositivo que asegura el flujo continuo de la corriente en condiciones normales de operación. Durante la presencia de una falla son capaces de interrumpir el flujo aislando la falla en sus recamaras. Es necesario realizar ciertos protocolos de mantenimiento durante la vida del equipo para garantizar su funcionamiento tanto de sus contactos como del medio utilizado como extintor de la falla del arco eléctrico. Se realiza el mantenimiento al parque de interruptores de potencia que sobrepasa el tiempo promedio de intervención recomendado por el fabricante.</p>	CENTRAL	<p>Cuáles son los procedimientos correctos al momento de ser intervenidos los equipos de potencia encapsulados en SF6 debido a que es un gas con propiedades dieléctricas, pero a la vez un gas que contribuye al efecto invernadero.</p>	<p>Que control y manejo es el adecuado para el gas SF6 en los equipos de potencia que usan este gas como medio de extinción del arco eléctrico en sus compartimientos</p>	<p>Mediante recomendaciones que realiza el fabricante del equipo, bajo las recomendaciones de la norma IEC 60480 para el control y tratamiento del SF6 y sus especificaciones para su reutilización</p>
	ESPECIFICOS	<p>El Gas SF6 porque es utilizado para los equipos de potencia dentro de sus recamaras como medio de extinción.</p>	<p>Conocer las cualidades del Hexafluoruro de Azufre gas SF6</p>	<p>Mediante cuadros indicativos que demuestren las propiedades del SF6, así como su degradación que es sometido</p>
	<p>Que efectos son los que producen el deterioro de los componentes mecánicos y del medio aislante SF6</p>	<p>Conocer los diferentes efectos, desgastes que se producen durante la interrupción del arco eléctrico, descargas eléctricas o durante una maniobra de operación normal</p>	<p>Se analizará en base a pruebas realizadas las condiciones a las cuales ha sido sometido los equipos. Se analizará el comportamiento de los equipos de potencia ante una falla y como se ven afectados sus contactos mecánicos, así como el comportamiento y efectos que se producen en el gas aislante.</p>	
	<p>Como debe realizarse el mantenimiento adecuado a los equipos de potencia que utilizan como medio aislante del arco eléctrico que se produce internamente en sus recamaras este gas denominado Hexafluoruro de azufre SF6</p>	<p>Determinar las condiciones en las cuales se procede a realizar un mantenimiento a los equipos de potencia tomando como referencia las condiciones del gas SF6 para su tratamiento correcto.</p>	<p>Se proveerán de parámetros correctos para la extracción del gas, así como las recamaras internas donde lo contiene para finalizar con el llenado del gas dando el tratado de pureza previamente.</p>	
<p>Además de las diferentes normas aplicables para el manejo del SF6, que procedimientos son los correctos</p>	<p>Proponer un protocolo para revisiones y mantenimiento futuros de los equipos de potencia que utilizan SF6</p>	<p>Durante el desarrollo del trabajo se realizará un protocolo donde se de las indicaciones sobre el manejo correcto del gas SF6, también el seguimiento adecuado.</p>		

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

