



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE
TENOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DE PROTECCIONES Y MONITORIZACIÓN
PARA UNA SUBESTACIÓN GIS 220 KV

Autor: Quiralte Arveras, Isabel

Director: Portillo García, Julio Rafael

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Diseño de protecciones y monitorización para una subestación GIS 220 kV
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021/2022 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Isabel Quiralte Arveras

Fecha: 08/09/2022

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Portillo García, Julio Rafael

Fecha: / /

Índice de la memoria

1	Abstract/Resumen	11
1.1	Resumen del proyecto	11
1.1.1	Introducción	11
1.1.2	Definición del proyecto	11
1.1.3	Descripción del sistema	12
1.1.4	Resultados	13
1.1.5	Conclusiones	14
1.2	Abstract	14
1.2.1	Introduction	14
1.2.2	Project Definition	15
1.2.3	System Description	15
1.2.4	Results	16
1.2.5	Conclusions	17
2	Introducción	18
2.1	Motivación	18
3	Las subestaciones eléctricas GIS	20
3.1	Explicación de la tecnología	20
3.1.1	Breve historia	20
3.1.2	Concepto de diseño	23
3.1.3	Componentes principales	26
3.1.4	Puesta en marcha	35
3.1.5	Normativas	39
3.2	Ventajas e inconvenientes	40
3.2.1	Ventajas	40
3.2.2	Inconvenientes	43
3.3	Gas SF6	46
3.3.1	Características y usos	46

3.3.2	Desventaja de los impactos medioambientales	48
4	La subestación objeto de diseño de protecciones y monitorización	53
4.1	Características	53
4.2	Protecciones	53
4.2.1	Internas	53
4.2.2	Externas	63
4.3	Monitorización	68
5	El futuro de las subestaciones encapsuladas	75
6	Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)	77
7	BIBLIOGRAFÍA	78

Índice de figuras

Figura 1 Subestación B105 230 kV (Fuente: Alstom Grid).....	12
Figura 2 Desimetro de agujas WIKA.....	13
Figura 3 B105 Substation (From: Alstom Grid)	16
Figura 4 WIKA Densimeter (From: WIKA).....	17
Figura 5 Subestación GIS (Fuente: EEP).....	20
Figura 6 Subestación AIS (Fuente: Grupo Cobra).....	21
Figura 7 Cronología de la evolución de las GIS, modificado de Think Grid	22
Figura 8 Sistema de generación y consumo de la energía eléctrica	24
Figura 9 Relé de protección (Fuente: Secoin).....	26
Figura 10 Sistema de monitorización de las descargas parciales.....	26
Figura 11 Interruptor automático	27
Figura 12 Mecanismo de accionamiento por resortes de media tensión.....	28
Figura 13 Seccionador de puesta a tierra	28
Figura 14 Esquema de un transformador de corriente [8].....	29
Figura 15 Esquema de un transformador de tensión [8]	30
Figura 16 Esquema de un transformador de tensión [8]	30
Figura 17 Elementos de conexión.....	31
Figura 18 Aisladores estancos	32
Figura 19 Dispositivo de alivio de presión	33
Figura 20 Estructura química del SF6.....	33
Figura 21 Instalación de una subestación encapsulada.....	35
Figura 22 Plano explosionado de subestación encapsulada	36
Figura 23 Test de fugas de gas.....	38
Figura 24 Comparación real de una subestación AIS con una subestación GIS (Fuente: crushtymks).....	41
Figura 25 Esquema de comparación de una subestación AIS con una subestación GIS	42
Figura 26 Comparación de los efectos del SF6 y el CO2	44
Figura 27 Detector de fugas para SF6 (Fuente: dilo).....	46
Figura 28 Comparación del SF6 con otros medios aislantes	47
Figura 29 Estructura del SF6	47
Figura 30 Esquema del Efecto invernadero (Fuente: Iberdrola).....	49
Figura 31 Impactos del Hexafluoruro de azufre (Fuente: BBC).....	49
Figura 32 Comparación del impacto del SF6 y el CO2 (Fuente: BBC).....	50
Figura 33 Aumento del SF6 en Irlanda y Tasmania (Fuente: BBC).....	51
Figura 34 Conductores y recubrimientos del compartimento (Fuente: ABB)	54
Figura 35 Posición de aislamiento de barrera de gas (Fuente:ABB)	55
Figura 36 Posición de densímetro (Fuente:ABB).....	56
Figura 37 Posición de válvula de sobrepresión (Fuente:ABB).....	56
Figura 38 Posición de válvula de llenado (Fuente:ABB).....	57

Figura 39 Filtros de los compartimentos (Fuente:ABB).....	57
Figura 40 Modelo GDM-100 con y sin válvula de recalibración (fuente WIKA).....	60
Figura 41 Disco de ruptura activado y original (Fuente: BS&B)	63
Figura 42 Principio de la protección diferencial de barras [29].....	64
Figura 43 Esquema de protección de barras mediante relé de sobre corriente [29].....	65
Figura 44 Esquema de protección de barras de voltaje con “acopladores lineales” [29].....	66
Figura 45 Esquema de protección de barras porcentual[29].....	66
Figura 46 Esquema de protección de alta impedancia [29]	67
Figura 47 Esquema de protección de baja impedancia [29]	67
Figura 48 Fuentes típicas de descargas parciales (Fuente: ABB)	69
Figura 49 Sensor para descargas parciales (Fuente: ABB)	71
Figura 50 Sistema acústico de medida (Fuente: ABB)	72
Figura 51 ii910 Acoustic Imager [31].....	74
Figura 52 Primer disyuntor de g ³ de 420 kV de General Electric.....	75

Índice de tablas

Tabla 1 Regulaciones del tratamiento de SF6 (Fuente: dilo).....	48
Tabla 2 Tarifas del Impuesto sobre Gases Fluorados de Efecto Invernadero.....	52
Tabla 3 Presiones relativas de la subestación elegida.....	62

DISEÑO DE PROTECCIONES Y MONITORIZACIÓN PARA UNA SUBESTACIÓN GIS 220 KV

Autor: Quiralte Arveras, Isabel.

Director: Portillo García, Julio Rafael.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

1 Abstract/Resumen

1.1 Resumen del proyecto

En este proyecto se han analizado las protecciones eléctricas de las subestaciones encapsuladas en gas, debido a su naturaleza, y se han diseñado dichas protecciones para un modelo de subestación específica.

Palabras clave: subestación, GIS, protecciones, monitorización

1.1.1 Introducción

Las subestaciones eléctricas tienen como propósito principal la transformación de tensión, frecuencia, número de fases o conexión de dos o más circuitos. Por este papel crítico que tiene en la red eléctrica, su correcto funcionamiento es de gran importancia para todos los usuarios y trabajadores de la red.

Las subestaciones más tradicionales son las AIS o aisladas en aire. Este tipo tiene bajo coste, pero requiere de mucho espacio, que a veces no está disponible. Con el crecimiento de las ciudades el terreno se redujo y se encareció, por esta razón, se crearon las subestaciones encapsuladas en gas hexafluoruro de azufre.

Las subestaciones encapsuladas o GIS reducen el espacio de la instalación sin renunciar a hacer llegar la electricidad a las ciudades de maneras más eficiente. Las subestaciones GIS se rodean de una carcasa que contiene hexafluoruro de azufre, un gas inodoro, incoloro, no tóxico y no inflamable, que se utiliza como aislante eléctrico de todos sus componentes.

La subestación del trabajo será una subestación GIS de 230 kV B105 de ALSTOM | GRID, por su accesibilidad al público.

De este modelo de subestación, se detectarán los componentes de protección esenciales y se seleccionarán unas protecciones que se ajusten a los requisitos de dicha subestación. De esta manera, quedarán definidas las protecciones necesarias con modelos reales aplicables al modelo escogido.

1.1.2 Definición del proyecto

En este proyecto se comienza con la investigación del tema de las subestaciones eléctricas, entendiendo y quedando expuesto el completo entendimiento de estas y las funciones críticas que llevan a cabo.

En este primer paso quedan definidos los elementos de las subestaciones eléctricas encapsulada y su razón de ser. Con esto se remarca la importancia de proteger los equipos para reducir riesgos.

Las protecciones esenciales de la subestación se clasifican en protecciones internas (la compartimentación, el densímetro de agujas y los discos de ruptura) y externas (transformadores y sistema de protección de diferencial de barras). Además de eso, se estudia la monitorización de descargas parciales como causa del deterioro del sistema de aislamiento y como vigilarlo.

1.1.3 Descripción del sistema

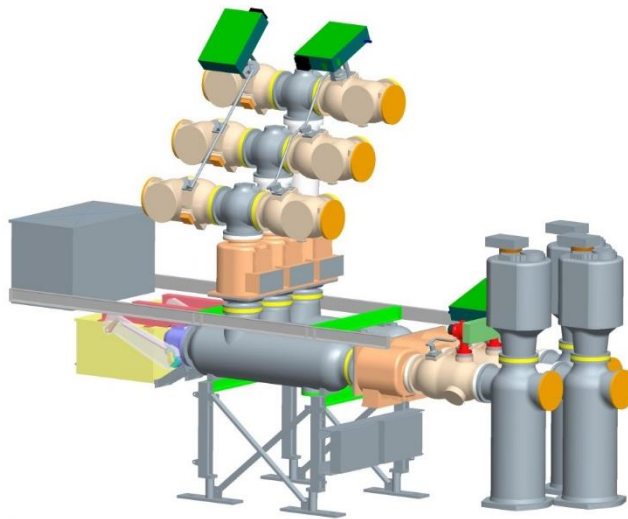


Figura 1 Subestación B105 230 kV (Fuente: Alstom | Grid)

El sistema expuesto en la figura superior es la subestación B105 de la cual se han calculado las protecciones. Esta subestación, al ser encapsulada posee varias características específicas, como son las protecciones internas que protegen a la instalación de posibles explosiones de la carcasa.

En el lado de las protecciones externas, las protecciones son comunes con otras subestaciones. Estas protecciones externas son: los transformadores de corriente y tensión y la protección diferencial de barras.

Los transformadores de corriente y los transformadores de tensión, al igual que los discos de ruptura son diseños proporcionados por el proveedor para el cliente. Con lo cual los parámetros, especialmente para el disco de ruptura, vienen dados pero las tecnologías ya están dadas del proveedor.

1.1.4 Resultados

Una vez analizados los parámetros de la subestación, se han escogido unos productos que están dentro de los rangos aceptables o que cumple con las características necesarias:

- Compartimentación, con presión de diseño a 9 bar.
- Densímetro de agujas Modelo GDM-100 con dos umbrales y válvula de recalibración y umbrales $P1 = 5,8$ bar y $P2 = 5,5$ bar.

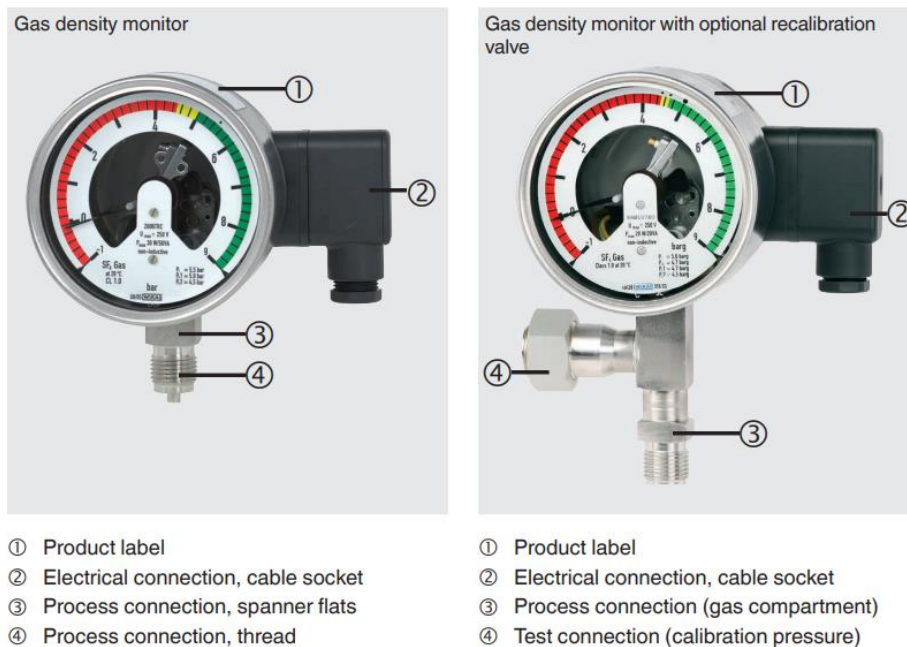


Figura 2 Desimetro de agujas WIKA

- Disco de ruptura a 9 bar, proporcionado por el fabricante
- Sistema de descargas parciales ii910 de FUKU

1.1.5 Conclusiones

Como parte de las conclusiones del trabajo, cabe mencionar el futuro de la subestación encapsulada. La gran desventaja de las subestaciones encapsuladas es el gas que utilizan para aislarse, el hexafluoruro de azufre.

Este gas, de efecto invernadero, es 23500 veces más contaminante que el CO₂. Por esta razón, se están desarrollando solución con un gas llamado g₃ (pronunciado g-cubed) que supones una solución mucho más respetuosa con el medio ambiente.

1.2 Abstract

In this project, the electrical protections of gas encapsulated substations have been analyzed, looking at those who have a role on protection the unique characteristics of the GIS, and these protections have been designed for a specific substation model.

Keywords: substation, GIS, protections, monitoring.

1.2.1 Introduction

The main purpose of electrical substations is the transformation of voltage, frequency, number of phases or connection of two or more circuits. Because of their critical role in the electrical network, ensuring correct operation of the GIS is of great importance for all users and workers of the network.

The most traditional substations are the AIS or air-insulated substations. This type is low cost, but requires a lot of space, which sometimes is not available. With the growth of cities, the land available became smaller and more expensive, and for this reason, substations encapsulated in sulfur hexafluoride gas were created.

Encapsulated or GIS substations reduce the installation space without sacrificing the ability to deliver electricity to cities in a more efficient way. GIS substations are surrounded by a casing containing sulfur hexafluoride, an odorless, colorless, non-toxic and non-flammable gas, which is used as an electrical insulator for all components.

The substation that will be used and analyzed in this paper will be an ALSTOM | GRID 230 kV B105 GIS substation, due to its accessibility to the public.

From this substation model, the essential protection components will be detected, and protections will be selected to meet the requirements of this substation. In this way, the necessary protections will be defined with real models applicable to the chosen model.

1.2.2 Project Definition

This project begins with the investigation of the topic of electrical substations, understanding and explaining the complete understanding of these and the critical functions and how they perform.

In this first step, the elements of the encapsulated electrical substations and their reasons for existence are defined. This underlines the importance of protecting the equipment to reduce risks.

The essential protections of the substation are classified into internal protections (compartmentation, needle densimeter and rupture discs) and external protections (transformers and bus differential protection system). In addition, the monitoring of partial discharges as a cause of the deterioration of the insulation system and how to monitor it is studied.

1.2.3 System Description

The system shown in the figure below is the B105 substation for which the protections have been calculated. This substation, being encapsulated, has several

specific characteristics, such as internal protections that protect the installation from possible casing explosions.

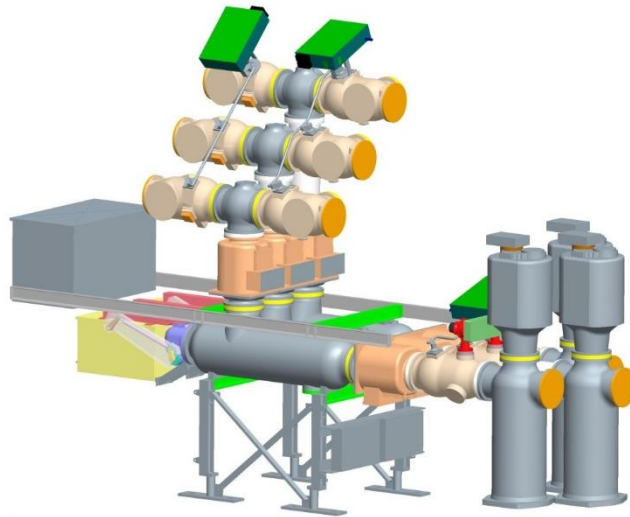


Figura 3 B105 Substation (From: Alstom / Grid)

On the external protections side, the protections are common with other substations. These external protections are current and voltage transformers and busbar differential protection.

The current transformers and voltage transformers, as well as the rupture discs, are designs provided by the supplier for the customer. Thus, the parameters, especially for the rupture disc, are given but the technologies are already provided by the supplier.

1.2.4 Results

After analyzing the parameters of the substation, some products have been chosen that are within the acceptable ranges or that meet the necessary characteristics:

- o Compartmentation, with design pressure at 9 bar.

o Needle-type densimeter Model GDM-100 with two thresholds and recalibration valve and thresholds $P1 = 5.8$ bar and $P2 = 5.5$ bar.

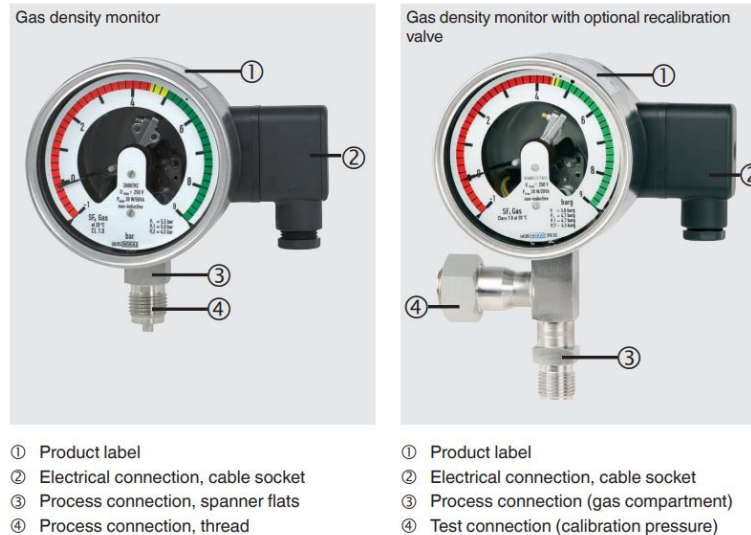


Figura 4 WIKA Densimeter (From: WIKA)

o Rupture disk at 9 bar, provided by the manufacturer.

o Partial discharge system ii910 from FUKU.

1.2.5 Conclusions

As part of the conclusions of the work, it is worth mentioning the future of the encapsulated substation. The great disadvantage of encapsulated substations is the gas they use to insulate themselves, sulfur hexafluoride.

This greenhouse gas is 23,500 times more polluting than CO₂. For this reason, solutions are being developed with a gas called g₃ (pronounced g-cubed) which is a much more environmentally friendly solution.

2 Introducción

Con la finalidad de profundizar en los conocimientos adquiridos, en particular, explorar el campo de la ingeniería eléctrica se ha centrado este trabajo en el diseño de protecciones y monitorización de una subestación eléctrica GIS 220 kV (o subestación encapsulada en SF6).

Las subestaciones eléctricas tienen como propósito principal la transformación de tensión, frecuencia, número de fases o conexión de dos o más circuitos. La manera más común de ver las subestaciones es: en la periferia, como es el caso de una subestación al aire; o en las ciudades como es el caso que aplica de las subestaciones GIS.

Las subestaciones GIS tienen, por su naturaleza, protecciones particulares de su forma y características. Así, se estudiará este tema más adelante.

2.1 Motivación

Con todos los conocimientos adquiridos en los últimos años de grado de ingeniería industrial y debido a que mi rama, organización industrial, se podría considerar la menos ingenieril de todas las que ofrece la escuela, siempre tuve claro que el trabajo de fin de carrera me serviría como método para descubrir esa parte más enfocada a la ingeniería práctica y más centrada en otras ramas de esta carrera, para así, salir de mi zona de confort y descubrir otras posibilidades y salidas.

El hecho que este trabajo fuese enfocado a la ingeniería eléctrica y, teniendo en cuenta, que las asignaturas relacionadas con la ingeniería eléctrica fueron, en su momento, mis preferidas, me llevo a elegir este tema por encima de otros y así acabe decidiéndome, finalmente, por un trabajo de fin de carrera sobre subestaciones eléctricas encapsuladas en gas.

Además de lo mencionado en el párrafo anterior, me interesaron, en especial, las subestaciones GIS debido a sus diferentes usos y su eficiencia, debido a su tamaño el cliente y el planeta se ven beneficiados en muchos aspectos.

Las subestaciones son un componente esencial en el sistema eléctrico y como tal, son imprescindibles para su correcto funcionamiento y para poder hacer llegar luz a todos los

puntos conectados al sistema; por ello, no se pueden suprimir y, es necesario encontrar opciones que se adapten a los espacios reducidos y reducir las emisiones lo máximo posible, con el fin de adaptarse a los retos climáticos del presente. Por estas razones mencionadas, decidí centrar mi trabajo en las subestaciones encapsuladas y, así, poder profundizar más en el papel fundamental de este componente crucial del sistema eléctrico.

3 Las subestaciones eléctricas GIS

3.1 Explicación de la tecnología

3.1.1 Breve historia

Con el rápido crecimiento de las ciudades durante el siglo 20, se hizo impetuosa la necesidad de abastecer de energía eléctrica a la población, que iba en incremento. Además, por las características de la energía era necesario transportar esta energía en alta tensión, lo cual, convierte en imprescindible la presencia de una subestación eléctrica.

A todo lo mencionado, se unía el hecho de que el precio de los terrenos crecía exponencialmente y el espacio disponible en las ciudades era cada vez mas limitado, lo cual imposibilitaba la instalación de una subestación tradicional como era la aislada en aire (AIS).

Basándose en todos estos factores, se creó la subestación encapsulada que conocemos hoy en día y, que se ajustaba a todas las necesidades del momento. El nombre GIS (Gas-Insulated Switchgear) se refiere a una subestación encapsulada de alta tensión, también existen subestaciones encapsuladas de media tensión y reciben el nombre de MV-GIS (Medium Voltaje-Gas-Insulated Switchgear)¹.



Figura 5 Subestación GIS (Fuente: EEP)

El concepto de tecnología encapsulada nace en los años veinte cuando se empezó a utilizar aceite como medio aislante, debido a sus propiedades. Después de esto, muchos gases se estudiaron y se descubrieron las grandes posibilidades que algunos tenían, especialmente el hexafluoruro de azufre. Westinghouse tenía la primera patente del uso de SF₆ como medio aislante, esto, llevó a sus ingenieros a aplicar esta tecnología en interruptores y disyuntores a principios de la década de los cincuenta.



Figura 6 Subestación AIS (Fuente: Grupo Cobra)

En 1966, se instaló el primer prototipo experimental GIS de 245 kV en Plessis-Gassot, Francia. Después de esto, se empezaron a comercializar y fueron evolucionando hasta los equipos que conocemos hoy en día.

En este trabajo trataremos, sobre todo, las subestaciones encapsuladas en gas SF₆ y, en especial el diseño de sus protecciones y de su monitorización. Aun así, con la evolución planteada, vemos que el sector eléctrico va a ir evolucionando para ir dejando a un lado el gas SF₆ y dar paso a otras opciones menos nocivas y más respetuosas para nuestro planeta, como es la mezcla gaseosa de g³ con una base de fluoronitrilo.

Estas próximas evoluciones serán estudiadas más detenidamente en un capítulo más adelante, donde se examinarán las ventajas que esta mezcla gaseosa nos proporciona.

A continuación, se muestra la cronología de la evolución de los GIS hasta el presente², quedando detallado en el cronograma las modificaciones y evolución de la técnica y de los materiales que ha ido sufriendo este instrumento.

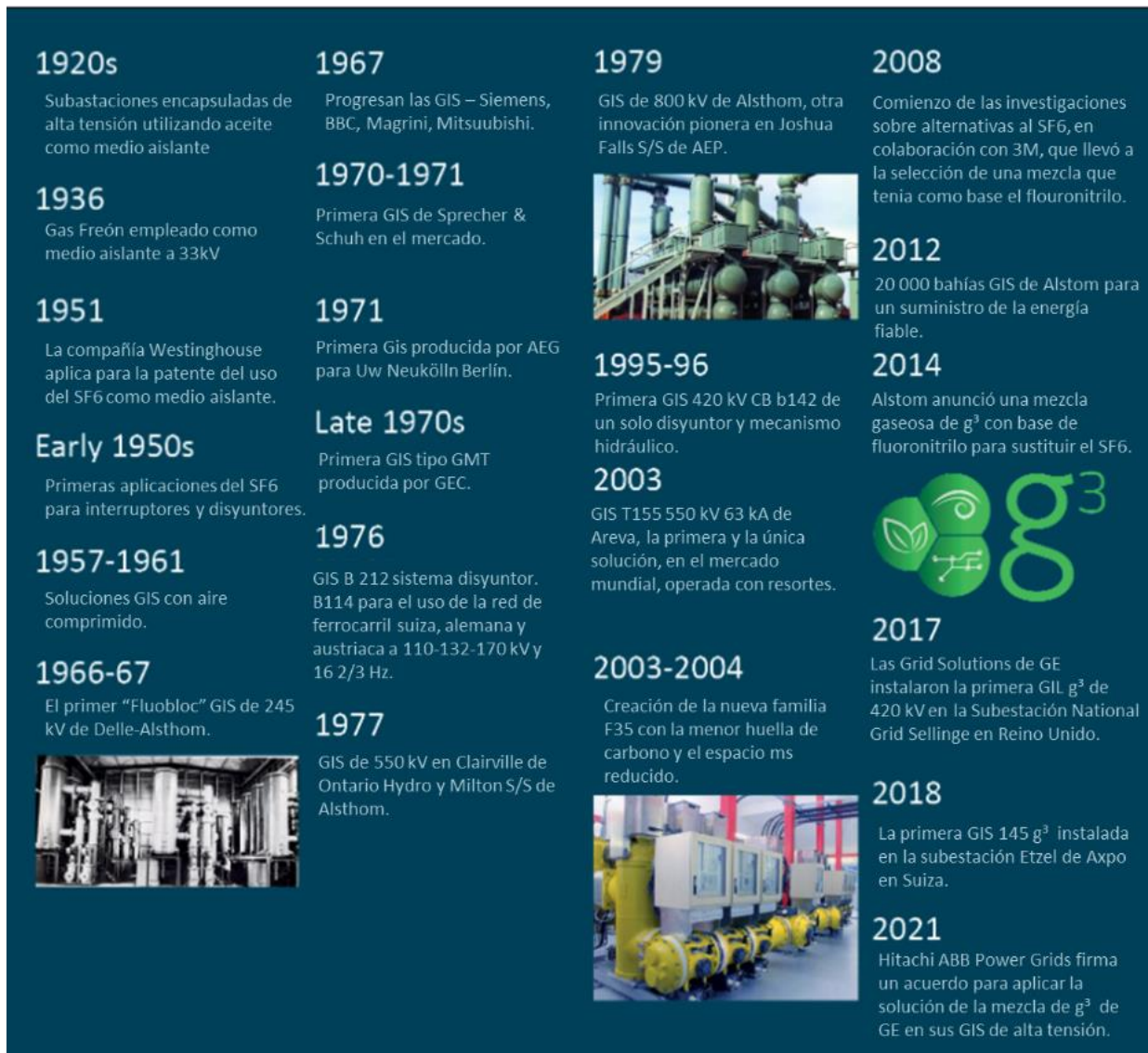


Figura 7 Cronología de la evolución de las GIS, modificado de Think Grid

3.1.2 Concepto de diseño

El sistema de suministro eléctrico está compuesto por tres etapas diferenciadas: la etapa de generación, la etapa de transporte y la etapa de distribución. La primera etapa mencionada, se caracteriza por ser el momento donde se obtiene la energía eléctrica, a través de los distintos métodos que se conocen actualmente, para abastecer la demanda de electricidad de la población.

La segunda etapa, el transporte, es la que acerca la electricidad generada en las centrales eléctricas hasta el punto de comienzo de distribución de la red eléctrica. Esta segunda fase se realiza en alta tensión para reducir pérdida, esto se ve de manera muy simple con las siguientes fórmulas:

$$P = I^2 R \quad P = I V$$

La primera fórmula representa la potencia disipada, demuestra que, a mayor intensidad, mayores pérdidas de potencia; por esta razón, la subestación actúa, en este caso, como elevador de la tensión y, a su vez, reductor de la intensidad para hacer así insignificantes las pérdidas durante el transporte de la energía.

El hecho de que la intensidad se ve reducida, cuando el voltaje se ve aumentado, se ve perfectamente reflejado en la segunda fórmula donde, para la misma potencia, si el voltaje aumenta la intensidad se ve reducida.

La tercera y última etapa, la distribución, es la encargada de transportar esa electricidad, que ha sido generada, hasta su destino final donde será consumida. La etapa de distribución se realiza en media y baja tensión, ahí, es donde entra en juego, nuevamente, el papel de la subestación que se encarga, de transformar la energía, que viene de las centrales de generación en alta tensión, para reducir dicha tensión, entre otras funciones, y, así, hacerla llegar al cliente final.

Las subestaciones se pueden encontrar en la red eléctrica situadas, normalmente y de manera simplificada, junto a las centrales de generación y en el comienzo de las redes de distribución o cerca de las ciudades, como muestra la siguiente figura³. Además, este tipo de subestaciones pueden estar colocadas en el interior de un edificio o, también, se pueden encontrar en el exterior, donde estarían más presentes en el diseño los imprevistos y cambios del tiempo de la zona donde estén situados.

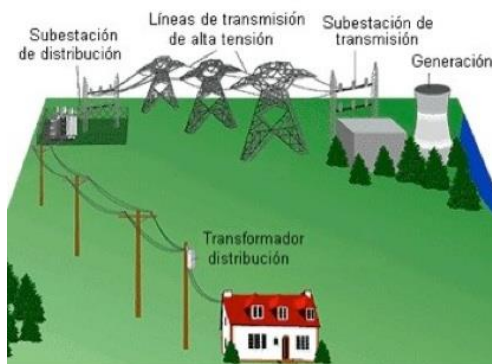


Figura 8 Sistema de generación y consumo de la energía eléctrica

Como ha mencionado existen varias funciones para las subestaciones, por este motivo, existen dos tipos diferenciados de subestaciones: las subestaciones de maniobra y las de transformación⁴. Las subestaciones de maniobra que se encargan de conectar dos o más circuitos y realizan sus maniobras. La particularidad de este tipo es que la tensión no se transforma.

En segundo lugar, tenemos las subestaciones de transformación que, como su propio nombre indica, tienen como objetivo transformar los parámetros de la red: tensión, frecuencia o número de fases; pueden ser subestaciones elevadoras o reductoras.

En este documento se tratará un tipo de subestación de transformación, en concreto la subestación GIS (Gas-Insulated Switchgear) o encapsulada en gas. Este concepto, como hemos explicado anteriormente, surge del rápido crecimiento de las ciudades, del hallazgo de las propiedades del gas SF₆, de la necesidad de abastecer a más población, reducir costes y espacio.

Una subestación GIS se caracteriza por tener y cumplir las mismas funciones que una subestación aislada por aire, pero, además de esto, añade algunas nuevas ventajas y características, en especial si nos fijamos en el equipo cuyas protecciones se van a diseñar en este documento. Algunas de estas nuevas características son:

- **Modularidad:** todos los componentes del equipo se encuentran recubiertos de una carcasa metálica. Con este fin, se evita que existan pérdidas de gas SF₆ al ambiente y, además, se protegen los componentes de las condiciones ambientales exteriores u otros factores como el polvo, pequeños animales o algún contacto accidental con los componentes primarios, dándole a cada elemento un compartimento propio.
- **Espacio reducido:** como el propio nombre indica, el hecho de utilizar un aislante mejor que el aire para la fabricación de las subestaciones y, que cada componente este protegido por una carcasa de metal que lo retenga y que evite las fugas, hace que el espacio entre componentes pueda ser menor sin miedo al cortocircuito de la red.
- **Accesibilidad:** aunque, como se ha mencionado en la característica anterior, cada componente este envuelto por una carcasa metálica, este hecho no reduce la accesibilidad gracias a los armarios de control compactos de la subestación.
- **Uso del gas hexafluoruro de azufre (SF₆) como aislante.** Este gas tiene elevada propiedad dieléctrica, capacidad de regeneración, propiedades ambientales interesante siendo un gas no inflamable y no tóxico y químicamente inerte. Además, no requiere mucho mantenimiento durante la vida útil de los compartimentos, siendo la tasa de fuga inferior al 0,1 % anual⁵.

La densidad del gas en cada celda se monitoriza permanentemente durante el funcionamiento de subestación GIS mediante sensores de presión con compensación de temperatura.

- **Instalación muy simple,** generalmente todas las celdas o compartimentos vienen ya terminados y solo quedaría ensamblarlos, lo cual, simplificaría mucho la instalación y el tiempo de ensamblaje y puesta en marcha se ve reducido.

En este documento se centrará en las subestaciones GIS o encapsuladas en gas SF₆, como ya hemos mencionado, y, particularmente, en el diseño de las protecciones eléctricas de este tipo de subestaciones eléctricas. Estas pueden estar divididas en protecciones internas y externas, como queda reflejado más adelante en el trabajo.

Dentro de las internas podemos encontrar, entre otras, los interruptores, los transformadores de corriente y de tensión, los dispositivos de alivio, el control local, relés de protección, los densostatos y los sistemas de descargas parciales. En cambio, como

protección externa simplemente clasificaríamos el diferencial de barra. Cada protección, contribuye a la seguridad de la instalación mientras se encuentra en activo.



Figura 9 Relé de protección (Fuente: Secoin)



Figura 10 Sistema de monitorización de las descargas parciales

Además de esto, se explicará y se estudiará la monitorización del este componente de la red eléctrica. Esta monitorización también será de gran importancia a la hora de saber el estado y las condiciones de la subestación y ayudará a asegurar la seguridad de la instalación y la de todas las personas que trabajan o viven a su alrededor.

3.1.3 Componentes principales

En ese apartado, se estudiarán los componentes principales de las subestaciones GIS, en particular centrandó la atención en aquellos que tienen especial interés en el tema de este trabajo, es decir, aquellos que forman parte o tienen algún papel en las protecciones internas y externas, y la monitorización de una subestación. El resto de los componentes quedarán también explicados o mencionados brevemente, con el fin de poder tener un mejor entendimiento del funcionamiento general de una subestación y poder entender el papel de cada componente.

- Interruptor automático

El interruptor automático de la GIS analizada es del tipo de mono presión con una cámara de corte por fase. Se aprovecha la energía producida por el arco en el proceso de extinción del mismo. Los tres polos del interruptor tripolar son activados de manera independiente por mandos unipolares a resortes, estos pueden ser activados eléctrica o manualmente. Los accionamientos a resortes y la estructura soporte están unidas a la carcasa metálica del interruptor automático.

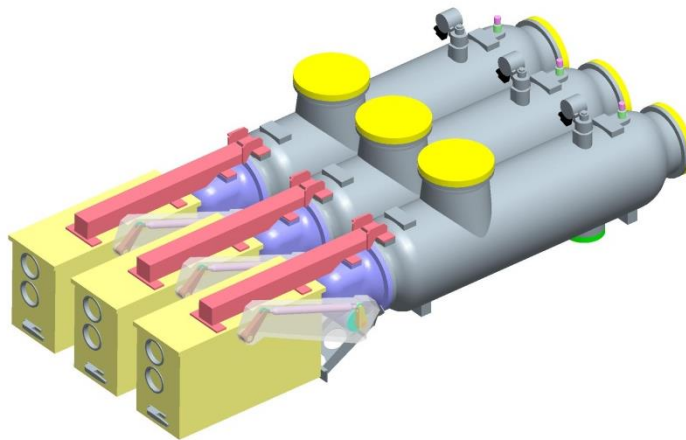


Figura 11 Interruptor automático

- Accionamiento por resorte

Los accionamientos por resorte es una tecnología que lleva mucho tiempo siendo utilizada, se lleva utilizando este mecanismo desde 1934. El interruptor que se ha descrito en el apartado anterior forma una unidad con el mecanismo de accionamiento por resortes. Además, la tecnología actual, permite tiempos reducidos de ralentización y además el mantenimiento que requieren, durante largos periodos de tiempo, es prácticamente inexistente.



Figura 12 Mecanismo de accionamiento por resortes de media tensión

- Seccionadores de puesta a tierra⁶

Con el fin de poder realizar trabajos de operación o de mantenimiento y asegurar la seguridad durante estos, se utilizan los seccionadores. Estos elementos de la subestación tienen como función el poder aislar parte de la subestación. Aunque en este caso estemos tratando las subestaciones eléctricas, los seccionadores tienen presencia en otras industrias como la ferroviaria⁷.

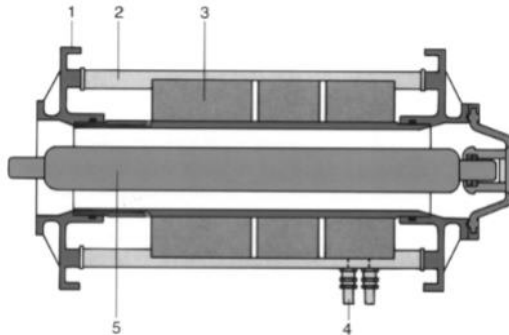
La subestación GIS, que se analizará en este documento, tiene seccionadores de puesta a tierra que pueden ser colocados donde sea necesario. Este tipo de seccionador permite agilizar, de manera segura, la actuación en los casos de emergencia e imprevistos en las subestaciones. Además, este seccionador tiene tres polos y tres modos de operación: con el motor, manual de socorro y bloqueo mecánicos. Estos seccionadores soportan las corrientes de cortocircuito máximas del diseño.



Figura 13 Seccionador de puesta a tierra

- Dispositivo de desconexión de mantenimiento (MID)
- Seccionador combinado con puesta a tierra
- Transformadores de corriente

Los transformadores de corriente, que son inductivos, pueden ser instalados en cualquier punto de la subestación, su primario es siempre el conductor de alta tensión y su secundario son arrollamientos toroidales realizados fuera del compartimento con SF6, esto hace que estén muy accesible en la caja de bornes y se puedan ajustar las relaciones de transformación⁸. Además, los transformadores de corriente, al igual que los de tensión como veremos más adelante, forman parte de las protecciones de las subestaciones GIS. Este tipo de transformadores, al igual que los de tensión permite controlar las sobretensiones transitorias.

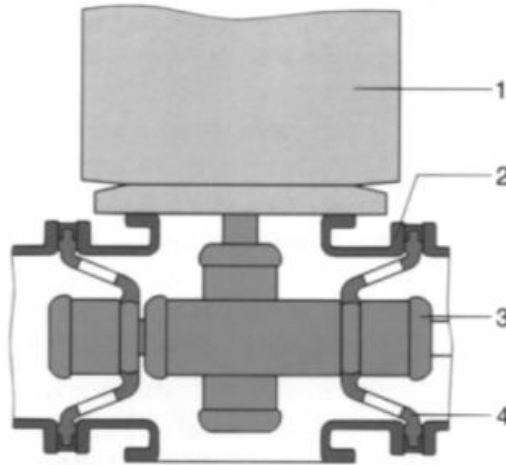


Módulo constructivo de transformador de corriente. (1) envoltura, (2) barra de tracción, (3) núcleos, (4) paso de cables de BT, (5) barra conductora de AT.

Figura 14 Esquema de un transformador de corriente [8]

- Transformadores de tensión

Los transformadores de tensión, al contrario que los de corriente, pueden ser de dos tipos: inductivos o capacitivos. Este transformador, como ya se ha adelantado en el transformador de corriente, también permite controlar las sobretensiones transitorias y forma parte así de los sistemas de protecciones de las subestaciones.



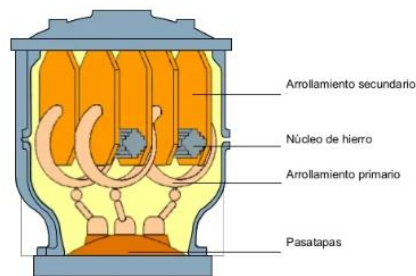
Módulo constructivo de transformador de tensión. (1) transformador, (2) envoltura, (3) barra conductora de AT, (4) aislador cónico.

Figura 15 Esquema de un transformador de tensión [8]

- Terminal de cable según CEI

Otra forma de protección, en este tipo de instalaciones, son las terminales del cable que son la interfaz con el cable de alta tensión. En las subestaciones encapsuladas en gas hexafluoruro de azufre, estos terminales son la conexión de la carcasa con los electrodos.

- Pasatapas aéreo de composite
- Pasatapas del Transformador



Transformador de tensión inductivo
Fuente: Siemens

Figura 16 Esquema de un transformador de tensión [8]

Los pasatapas del transformador son unos aisladores huecos que se encuentran en la tapa del transformador.⁹ La función principal del pasatapas del transformador es compensar las tolerancias y las vibraciones.

- Elementos de conexión

Los elementos que forman parte de este módulo unen o conectan las celdas con otras instalaciones de la red eléctrica como pueden ser líneas o cables subterráneos. Esto implica que son el aislamiento entre el hexafluoruro de azufre con otro medio de aislamiento como el aire. Así mismo, también forman parte de estos elementos la envolvente tubular y los elementos telescópico que conectan módulos de la subestación entre sí. Además, la envolvente telescópica se utiliza para dividir una GIS, de manera simple, cuando se está realizando una ampliación.

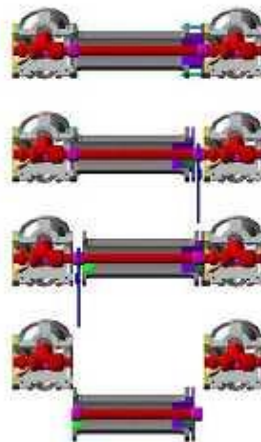


Figura 17 Elementos de conexión

- Envolventes y conductores

Las envolventes están hechas en una aleación de aluminio por su resistencia a la corrosión. Los tubos de conexión están diseñados con tubos de aluminio o cobre. Otra de las funciones

de la envolvente metálica, junto con la puesta a tierra, es minimizar los campos electromagnéticos que crean las corrientes en la subestación.

- Compartimentos de gas

Una subestación encapsulada en gas esta a su vez subdividida en compartimentos monofásicos de gas independientes. Estos compartimentos están aislados entre sí.

Cada uno de estos compartimentos tiene las siguientes características:

- Válvula de llenado en gas de acoplamiento rápido. Impide que entren en el compartimento polvo y contaminantes.
- Dispositivo de alivio de presión para proteger contra las sobrepresiones.
- Filtro para absorber la humedad y productos de descomposición.
- Densímetro estándar es un instrumento mecánico que tiene el papel de monitorizar la presión y compensarla por temperatura.

Los compartimentos de gas también forman parte de las protecciones de la subestación GIS.

- Aisladores estancos

Todos los conductores y elementos que vayan a tener corriente eléctrica se ensamblan sobre aislante de resina epoxi. La combinación de epoxi y aluminio proporciona una gran fuerza mecánica y actúa como método de prevención de un ataque químico de la descomposición de productos con SF₆. Estos aisladores protegen de los arcos internos y de su propagación al siguiente compartimento.



Figura 18 Aisladores estancos

- Dispositivo de alivio

Como ya se ha sido mencionado en el apartado de compartimentos de gas, el dispositivo de alivio protege a la subestación de explosiones en los compartimentos debidas a sobrepresiones. El diseño del dispositivo consiste en un disco de ruptura con una presión de apertura preestablecida.



Figura 19 Dispositivo de alivio de presión

- Gas SF₆

El aspecto fundamental y único de unas subestaciones encapsuladas es el gas que las aísla. Aunque, como se expondrá más adelante, existen varios gases que pueden actuar como aislantes: SF₆, aire o g³; en la subestación que se trata en este documento, emplearemos gas SF₆ o hexafluoruro. En el capítulo sobre el gas SF₆, se expondrán las ventajas de dicho gas.

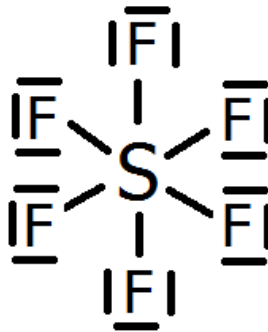


Figura 20 Estructura química del SF₆

- Hermetismo

Con la presencia de gas SF₆ y con el fin de evitar fugas, las subestaciones poseen un sistema que permite que los compartimentos sean herméticos y no se pierda gas.

- Pasarelas de acceso
- Estructuras soporte
- CEM
- Puesta a tierra
- Pintura
- Control local

Cada celda tiene su propio armario de control local. Este armario permite arreglar una subestación muy compacta y acceder fácilmente al armario y a sus mandos.

3.1.4 Puesta en marcha

La puesta en marcha de una subestación GIS está altamente ligada a sus características, debido a estas y, al hecho de que casi todos los elementos de la subestación ya vienen encapsulados y semi montados de fábrica, hace que el montaje de una subestación eléctrica encapsulada sea mucho más sencillo que el proceso que se llevaría a cabo para montar una subestación al aire (AIS).

El ahorro en tiempo calculado, para una subestación encapsulada, esta entre el 20% y el 40%¹⁰. No obstante, hay que seguir un proceso riguroso¹¹ para asegurarse de que la subestación instalada cumple con todas las medidas de seguridad y además es instalada de manera correcta.



Figura 21 Instalación de una subestación encapsulada

Para la correcta instalación de la subestación GIS es necesario empezar con un plan del proyecto de instalación, este proyecto debe tener en cuenta muchos factores como pueden ser: evaluaciones de seguridad, la identificación de lugares que son medioambientalmente sensibles, materiales y equipos a necesitar, los procesos de tratamiento del gas SF₆, el transporte del material y equipos y, el personal requerido para la instalación y su experiencia.

Aparte de esto, también es necesario tener en cuenta las pruebas de seguridad que se han de realizar, de los cuales hablaremos más adelante. Un factor importante durante el montaje de una subestación sería la presencia de un representante de la empresa manufactura de la subestación.

Antes de empezar a montar la instalación eléctrica en cuestión, hay algunas acciones y consideraciones a tener en cuenta previamente. Las primeras cuestiones a tener en cuenta serían cuestiones relacionadas con la seguridad como son: prever cualquier expansión futura de la subestación, para así asegurarse de que tenemos el espacio suficiente de antemano; para ciertas subestaciones GIS cuyos elementos se encuentran bajo tierra, sería necesaria la comprobación de los niveles de oxígeno; asegurarse de que todos los elementos se encuentran apagados o sin corriente o; evitar la fuerza excesiva durante el proceso

El proceso de puesta en marcha de una subestación GIS comienza con las conversaciones y negociaciones entre el cliente y el fabricante, incluyendo en estas también al contratista encargado de la instalación y el montaje.

Los siguientes pasos serían el inicio de las obras, en un lugar previamente escogido teniendo en cuenta la posibilidad, o no, de que la subestación crezca en un futuro y dejando el espacio necesario para dicha expansión claramente disponible para los próximos proyectos, este lugar debe tener ventanillas y puertas que cierran. Incluyendo en este proceso, la limpieza del polvo, la nivelación del terreno la instalación del drenaje, la cimentación y la puesta a tierra de los equipos y los caminos de acceso; y, también, la organización de todos los equipos necesarios para el proceso de instalación.

Después de esto, se realizan las últimas nivelaciones de los cimientos para la correcta instalación de todos los componentes de la GIS y la organización de todos los equipos de la subestación en cuestión. Una vez realizados todos los trabajos de preparación, previos a la instalación de la subestación, es el momento del ensamblaje y montaje en el sitio elegido para la instalación de la subestación.

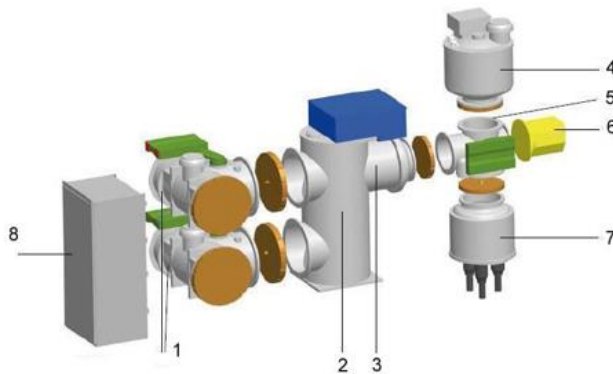


Figura 22 Plano explosionado de subestación encapsulada

Una vez realizado el ensamblaje del equipo, se procede a realizar las pruebas para comprobar que no se van a producir perdidas del gas SF₆, que será el próximo paso para seguir.

Por último, se realizan las pruebas y pruebas de calidad necesarios para comprobar que la subestación funciona de manera correcta y, que la instalación se ha hecho según se debía. Entre estas pruebas de calidad se encuentran pruebas mecánicas y de operación en los interruptores, los transformados, los disyuntores y pruebas sobre las descargas parciales, entre otros. Finalmente, se limpia el sitio donde se ha realizado la instalación y se pone en funcionamiento el equipo.

Este proceso puede resultar peligroso e incluso fatal para algunos trabajadores, si no se llevan a cabo procesos preventivos para asegurar la seguridad de todas las personas que trabajan en la instalación de la subestación. Se deben incluir en estos procesos preventivos unos documentos que incluyan el alcance del trabajo y todas los roles y sus cualificaciones necesarias, también se identificarán y se evaluarán los riesgos, y también se identificaran los potenciales problemas que puede tener el lugar donde se haga la instalación, entre otras informaciones necesarias.

Cabe mencionar que antes de que ese produzca la instalación, se debería verificar el estado de los elementos de la GIS que han sido enviados, para comprobar que no se han producido daños o grietas, durante el transporte, que pudieran causar problemas durante la vida de la subestación encapsulada.

Como pruebas que aseguran el correcto estado y funcionamiento de las piezas habrá que realizar pruebas visuales de verificación de la construcción, control de los cables, test de fugas de gas, pruebas de densímetro y alarmas, prueba de resistencia del circuito primario, verificación de la calidad del has hexafluoruro de azufre, prueba del disyuntor, pruebas de conexión a tierra y interruptores, prueba de transformadores, pruebas de acondicionamiento del equipo y otras.

A continuación, se explican, más en detalle, las pruebas que se pueden realizar durante la puesta en marcha:

Verificación visual e la construcción

Este paso requiere verificar cosas como que todas las conexiones y conexiones a tierra esta instaladas y conectadas correctamente; que el estado de la válvulas de gas es el correcto; verificar la apariencia de la subestación en general para detectar posibles daños en la estructura de la GIS; chequear la limpieza del circuito en general; verificar la existencia de las placas de identificación de los equipos; y, por último, mirar la condición de los aparatos de seguridad como pueden ser los extintores.

Control de los cables

Existen dos tipos de control de cables. El primero se controla la integridad de aislante de los conductores para encontrar algún daño que podría haber en este tipo de cables. El segundo tipo de control es una prueba que sirve para revisar que los conductores están puestos correctamente.

Test de fugas de gas

Como ya se ha mencionado, se lleva a cabo, durante el montaje una prueba para comprobar que no existen fugas; pero, conviene hacer otra prueba una vez se haya terminado el montaje. Esta prueba consiste en recubrir cada parte con plástico y cinta aislante, poniendo un pequeño peso en la parte inferior de la bolsa. Tras 12 o 24 horas, se sitúa un detector de SF6. Si dicho gas está presente, se encontrará en la parte inferior de la bolsa, pues el aire es menos pesado que el SF6, y esto hará que el detector identifique la presencia del hexafluoruro de azufre y quede así identificada la pérdida de gas.

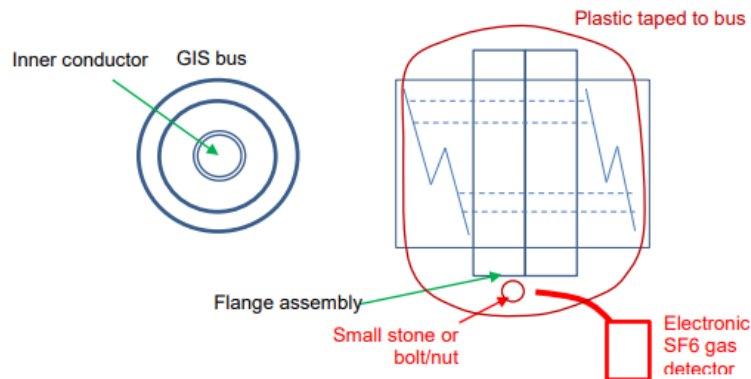


Figura 23 Test de fugas de gas

Verificación de la calidad del gas hexafluoruro de azufre

Una vez se han llenado los compartimentos con la correcta presión, la pureza y la humedad del gas en cuestión se verifica. Los rangos aceptables de humedad son entre 150 ppm y 300 ppm y una pureza que se encuentre en el rango del 99,5%. Algunos de estos rangos pueden

variar dependiendo del proveedor del gas. Estos datos se deben medir y guardar para utilizarlos en el futuro mantenimiento de la subestación.

Pruebas de disyuntores de circuito

Existen varias pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de estos dispositivos. Se suele comprobar que el disyunto no ha sido dañado durante el transporte y se prueba su correcto funcionamiento antes y después del transporte. Se prueba que el disyunto cierra y abre correctamente, evaluando si los indicadores funcionan adecuadamente. Así mismo, se prueba que los tiempos de reacción y tolerancias son las indicadas por el proveedor.

Además de las pruebas ya mencionadas, muchas otras se realizan en fábrica y en el momento de la instalación. De esta manera, se puede asegurar la máxima seguridad posible a la hora de operar este tipo de instalaciones.

En cuando al mantenimiento posterior, tema que se tratará más adelante, estas instalaciones están pensadas para que su mantenimiento sea a largo plazo.

3.1.5 Normativas

Como todos los mecanismos de la actualidad, que se rigen por una normativa internacional, las subestaciones no son ninguna excepción. Estas especificaciones tienen como objetivos principales¹²: garantizar la seguridad de las personas y de las instalaciones eléctricas, asegurar el cumplimiento de las condiciones medioambientales exigidas, asegurar un suministro eléctrico de calidad y garantizar una red de distribución homogénea.

Como también ocurre en otros ámbitos, existen normas nacionales e internacionales para conseguir el objetivo de homogeneizar la red. Estas normas están constituidas por leyes, reales decretos, UNE o cualquier otra normativa nacional o local que se encuentre en vigor y aplique.

Esas normas tratan desde aspectos de diseño, documentación o normativas medioambientales. Algunos de los ejemplos de normas que aplican en las subestaciones que vamos a ver son¹³:

- Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.

- Real Decreto 337/2014, de 9 de mayo, “por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23”
- Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-LAT 01 a 09
- Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.
- Real Decreto 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico (BOE 21-06-01).
- IEC 62271: norma para la aparataje de alta tensión. La norma trata las especificaciones técnicas de dichos documentos. Empleada en algunos de los aspectos y especificaciones de la subestación encapsulada en gas hexafluoruro de azufre que se desarrolla en este documento. Algunos de estos aspectos son los seccionadores de puesta a tierra, los transformadores de corriente y de tensión, los pasa tapas del transformador, las propiedades del gas aislante SF6 y los requisitos de campos electromagnéticos.

3.2 Ventajas e inconvenientes

3.2.1 Ventajas

Las principales razones de la existencia de las subestaciones encapsuladas en gas son todas las ventajas que ofrecen frente a las subestaciones aisladas en gas tradicionales. A continuación, se exponen estas ventajas:

- Espacio: las dimensiones de las subestaciones encapsuladas GIS son muy reducidas comparadas con las de las AIS. La estimación del volumen ocupado por una GIS es entre un 3% y un 8% el volumen de una AIS, teniendo las subestaciones comparadas de cada tipo las mismas funciones y tensiones nominales.

Además, para las mismas condiciones de comparación, el área ocupada por una subestación encapsulada es entre un 3% y un 12% del área ocupada por una subestación aislada con aire.



Figura 24 Comparación real de una subestación AIS con una subestación GIS (Fuente: crushtymks)

Como se mencionó en el apartado sobre la historia del surgimiento de las subestaciones con el crecimiento de las ciudades, el área libre disponible menguó y por eso se crearon este tipo de subestaciones. Además, la expansión de todas las grandes ciudades y la naturaleza del comportamiento de las pérdidas eléctricas ($P=I^2R$ y $P=IV$) hacia muy necesaria la presencia de subestaciones en las ciudades para poder abastecer la demanda y tener una distribución eficiente.

El espacio tan reducido que ocupan las subestaciones encapsuladas en gas SF₆ las convierte en opciones ideales para ciudades; donde el terreno libre donde instalar una subestación es reducido, a veces, haciendo imposible la instalación de una subestación tradicional aislada en aire.

Esta ventaja, también aplica proximidades a centrales hidráulicas, terrenos escarpados o instalaciones cercanas a industrias de alta polución, que también poseen espacios disponibles muy pequeños.

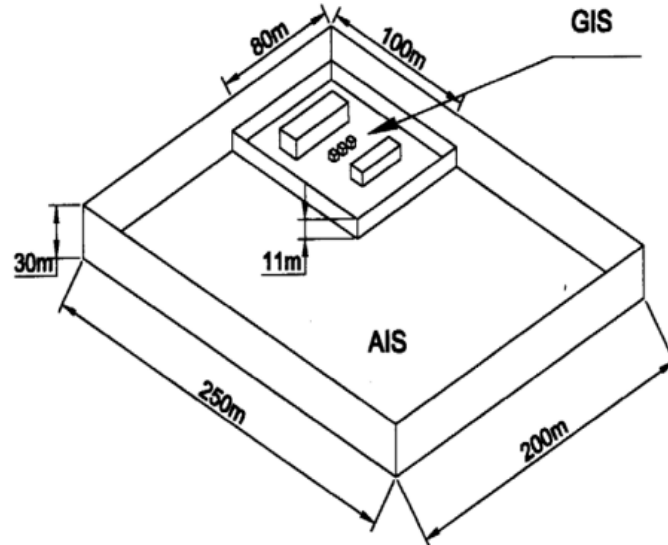


Figura 25 Esquema de comparación de una subestación AIS con una subestación GIS

- Menor coste de terreno: de la mano del punto anterior y con el crecimiento de las ciudades el precio del metro cuadrado también subió; lo cual, implica un mayor coste en terreno para construir subestaciones aisladas con aire. Este inconveniente puede ser resuelto fácilmente si se construye una subestación aislada en gas, que puede resultar más económica en comparación a las otras opciones.
- Montaje más rápido: el aspecto modular de las subestaciones GIS permite que las subestaciones de este tipo (hasta 300KV) puedan ser parcialmente ensambladas, montadas y probadas en fábrica. Este hecho reduce significativamente el tiempo de montaje en el terreno donde se instalan.
- El mantenimiento disminuye: gracias a su diseño modular, las subestaciones encapsuladas en gas están concebidas para tener un mantenimiento mucho menor que el mantenimiento de una subestación aislada en gas o AIS. SE estima que el mantenimiento de la GIS es una cuarta parte que la de la AIS¹⁴.

- Ideales para ambientes con alta polución.
- Menor ruido producido por los interruptores de las subestaciones encapsuladas GIS, que resulta muy conveniente si se trata de instalarlas en centros urbanos.
- Mayor vida útil.
- Menor contaminación visual de las GIS.
- Menor tasa de fallos de las subestaciones encapsuladas.
- Aislamiento de la intemperie
- Apta para condiciones medioambientales extremas
- Mayor seguridad al no estar expuestos los elementos de la subestación encapsulada.
- En algunos casos, solución más barata que las AIS, si nos encontramos en una ciudad donde el coste de terreno es extremadamente elevado, puede darse el caso de que las subestaciones encapsuladas lleguen a ser más económicas.

3.2.2 Inconvenientes

Las subestaciones encapsuladas tienen muchas ventajas que las convierten en soluciones ideales y, a veces, únicas. En este apartado, se estudiarán algunas de las razones por las cuales se podría dificultar la elección de las subestaciones como solución para algunos proyectos¹⁵:

- Coste: la principal desventaja de las subestaciones encapsuladas es su elevado coste. El coste de los materiales es mucho mayor que el de una subestación convencional, como era de esperar. Esto hace que, en la mayoría de los casos, allí donde se pueda instalar una subestación aislada por aire, se elija esta opción como la más óptima.

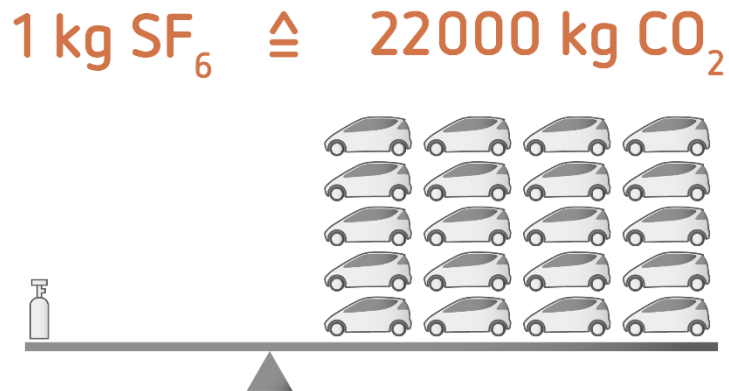


Figura 26 Comparación de los efectos del SF6 y el CO2

- Es verdad que, en algunos casos, y debido al precio del terreno, las GIS pueden resultar más económica, pero esto no es así por regla general. No obstante, cabe pensar que este coste podría llegar a no suponer una desventaja ya que desde la creación el precio de este tipo de subestaciones se ha visto reducido de manera significativa.
- Impacto medioambiental: junto con la desventaja del coste, esta sería la mayor desventaja de las subestaciones. Como quedará explicado en el siguiente apartado, las subestaciones están aisladas en SF₆ que está probado como un gas contaminante y de efecto invernadero, que contribuye al calentamiento global y, por lo tanto, supone un factor de riesgo para tener en cuenta para nuestro planeta.
- Este gas supone una amenaza mucho mayor para el planeta al tener mucho más impacto que le CO₂. Además, hay que sumarle costes adicionales que existen como impuesto por usa este tipo de gases nocivos para la Tierra.
- Mayor tiempo de parada: aunque la tasa de fallo es mucho menor para las subestaciones encapsuladas en hexafluoruro de azufre que para las tradicionales encapsuladas en gas,

cabe desatacar que el tiempo de parada para las subestaciones GIS es mayor debido a su naturaleza.

Aunque esto no es una desventaja tan importante como las anteriores también debe ser algo a tener en cuenta cuando se elige entre una opción u otra.

- Monitoreo continuo del hexafluoruro de azufre: también debido a su diseño y para el correcto funcionamiento de estas, garantizando la seguridad de las personas que se encuentran a su alrededor, es necesario medir continuamente los niveles de gas y asegurarse de que las fugas del gas aislante no lleguen a niveles tales que se pueda poner en peligro la seguridad de aquellos que se encuentren cerca de ella.

Esta desventaja no está presente, como cabía esperar, en las subestaciones tradicionales que no están aisladas más que por aire.

Con el fin de mantener controlados los niveles de gas hexafluoruro de azufre existen varios aparatos y elementos dentro de las instalaciones por los cuales se pueden comprobar si se ha producido alguna fuga en la instalación encapsulada.

Densímetro con compensación por temperatura: es un instrumento mecánico que tiene el papel de monitorizar la presión y compensarla por temperatura.

Dispositivo de alivio de presión para proteger contra las sobrepresiones. El dispositivo de alivio protege a la subestación de explosiones en los compartimentos debidas a sobrepresiones.

El diseño del dispositivo consiste en un disco de ruptura con una presión de apertura preestablecida.

Detectores de fugas de gas: existen también, en el mercado, instrumentos de medida que son capaces de detectar fugas de gas, incluso emisiones muy pequeñas.

Estos instrumentos son instrumentos rápidos y fiables que nos permiten saber cuánto gas pierde la subestación encapsulada.



Figura 27 Detector de fugas para SF6 (Fuente: [ALQ](#))

3.3 Gas SF6

3.3.1 Características y usos

El SF6 o hexafluoruro de azufre es gas estable, sintético, incoloro, inodoro, soluble en agua, no inflamable, no tóxico, no supone un riesgo directo para los seres vivos, pero tampoco sustenta la vida.

Tiene una excelente resistencia dieléctrica, gracias a sus propiedades físicas y químicas, lo cual lo hace de él una opción ideal para el aislamiento eléctrico de equipos. A continuación, se muestran las siguientes propiedades¹⁶:

Peso molecular: 146,06 g/mol

Contenido de azufre: 21,95%

Contenido de flúor: 78,05%

Presión vapor (20 °C) : 22,77 atm

Temperatura crítica : 45,5 °C

Presión crítica : 37,1 atmósferas

Densidad gas (20°C, 1 atm) : 6,16 g/l

Densidad líquida (p.sat.-50 °C) : 1,91 kg/l

Densidad líquida (21°C) : 1,371 g/ml

Grado estabilidad térmica : hasta 800 ° C

Solubilidad en agua (10°C, 1 atm) : 0,0076 m/ml H₂O

Calor latente de vaporización: 38,6 cal/g

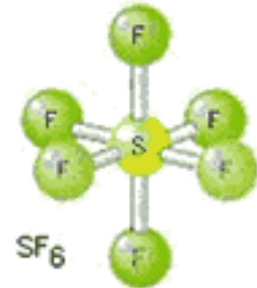


Figura 28 Estructura del SF₆

Este gas ofrece una gran ventaja cuando se trata de aislamiento, tiene una rigidez dieléctrica 2,5 veces mayor que el aire¹⁷ lo que facilita que la subestación sea más compacta. Además, el hexafluoruro de azufre es cinco veces más pesado que el gas, lo cual hace que se acumule en los puntos bajos. Su estructura es la siguiente:

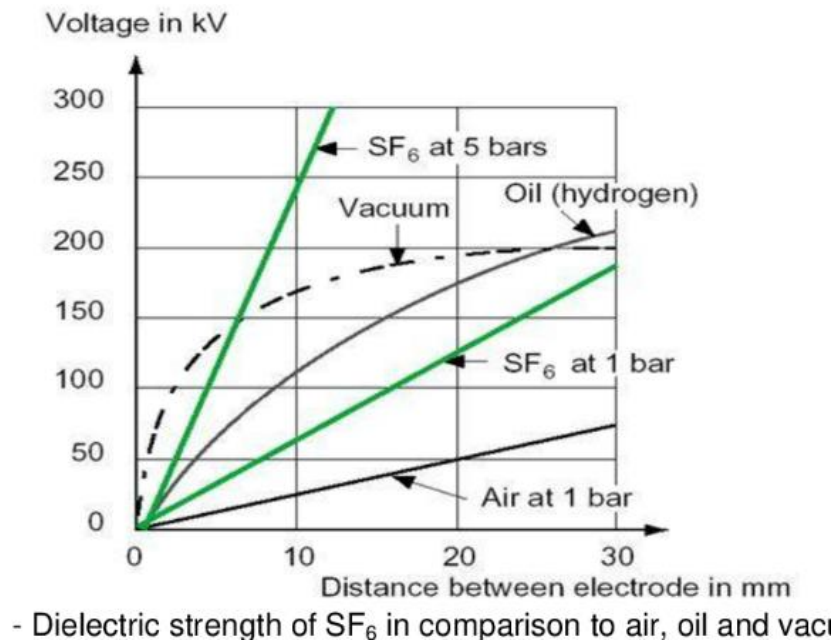


Figura 29 Comparación del SF₆ con otros medios aislantes

La primera vez que descubrió la sinterización este gas fue en 1901, en la Facultad de París, por el premio nobel de química, Henri Moissan. Fue en 1937, cuando General Electric empezó a hacer investigaciones para utilizar este gas en aplicaciones industriales debido a su rigidez.

En la siguiente tabla se muestran algunas de las regulaciones cuando se trata de trabajar con SF₆:








	Gas SF ₆ nuevo	Gas SF ₆ usado	SF ₆ usado con propiedades tóxicas
Botella/contenedor	Verde: 	Verde: 	Amarillo: 
Clasificación de sustancias peligrosas para el transporte	ONU 1080 clase 2.2	ONU 3163 clase 2.2 N.A.G	ONU 3308 clase 2.3 + clase 8 N.A.G
Valor límite SO₂	0 ppm _v + no hay otros productos de descomposición	< 250 ppm _v	≥ 250 ppm _v
Etiquetado adicional para el transporte			 
Plan de seguridad	No	No	Si

Tabla 1 Regulaciones del tratamiento de SF₆ (Fuente: dilo)

3.3.2 Desventaja de los impactos medioambientales

Una causa del cambio climático es el efecto invernadero, el efecto invernadero que se define según Oxford languages¹⁸ como “Subida de la temperatura de la atmósfera que se produce como resultado de la concentración en la atmósfera de gases, principalmente dióxido de carbono”.

El efecto invernadero tiene como consecuencias¹⁹: el deshielo de los glaciares, inundaciones en costas e islas, huracanes, migraciones de animales, desertificación, consecuencias en agricultura y ganadería, falta de alimentos o, propagación de enfermedades, entre otras. Uno de los gases causantes, de los que habla la definición, es el hexafluoruro de azufre que sirve como medio aislante para la subestación GIS.

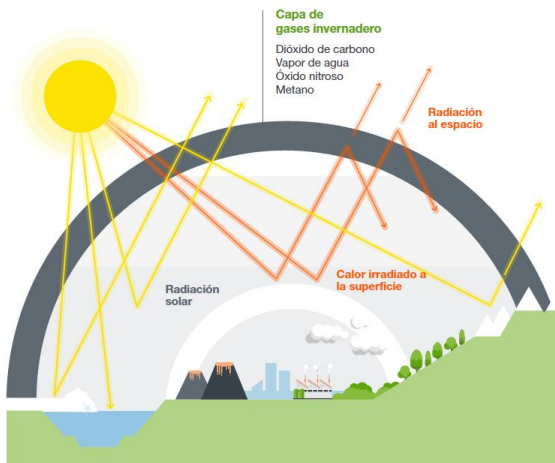


Figura 30 Esquema del Efecto invernadero
(Fuente: Iberdrola)

Como ya se ha mencionado en el apartado anterior, una de las mayores desventajas de las subestaciones GIS es el riesgo que suponen las subestaciones para nuestro planeta. El gas SF₆ es un gas de efecto invernadero es 23500 veces más potente que el dióxido de carbono (CO₂), convirtiéndolo así en uno de los gases más potentes conocidos hasta ahora.

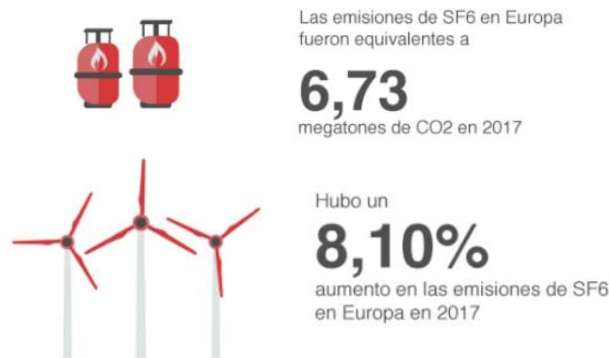


Figura 31 Impactos del Hexafluoruro de azufre
(Fuente: BBC)

Además, sus niveles de emisiones se han visto incrementadas de manera significativa. Las emisiones de este gas en 2017, solo por parte de la Unión Europea tuvieron los mismos efectos que 1,3 millones de coches extras ese año²⁰. Además, cabe resaltar que la vida del SF₆ en la atmosfera es de al menos 1000 años.



Figura 32 Comparación del impacto del SF₆ y el CO₂ (Fuente: BBC)

El crecimiento de las energías renovables han traigo consigo muchas ventajas para nuestro planeta. Pero todo tiene sus inconvenientes y, en este caso, este crecimiento también ha causado un aumento en las emisiones de este gas de efecto invernadero.

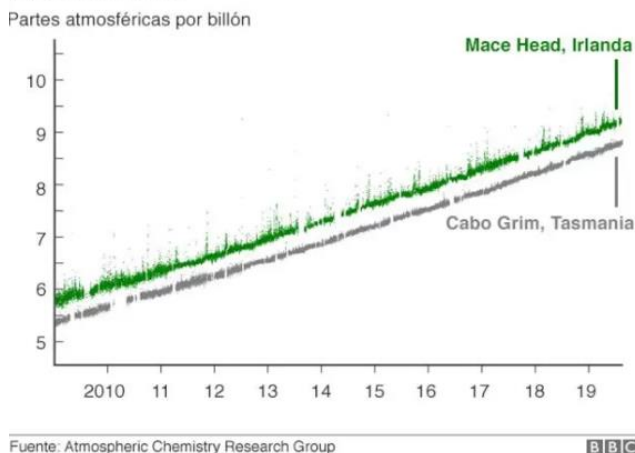
Aunque en la actualidad, se están desarrollando otras alternativas a este gas, sus ventajas de precios o accesibilidad, confiabilidad y poco mantenimiento, hacen de él, la opción más atractiva para las empresas.

Es verdad que, las concentraciones de SF₆ en la atmosfera son todavía muy pequeñas, pero se espera que las instalaciones que empleas SF₆ aumente y, con ello, los niveles de este gas en la atmosfera.

Otro problema que presenta este gas es su origen y su absorción. Al ser de origen sintético, es necesario que sea destruido de manera expresa, para reducir sus efectos sobre la Tierra

y la atmósfera. Además, los países han de reportar el consumo de este gas cada año a Naciones Unidas, sin existir restricciones de uso.

Cómo aumentó la concentración de SF6 en la atmósfera



*Figura 33 Aumento del SF6 en Irlanda y Tasmania
(Fuente: BBC)*

Cabe resaltar el esfuerzo que se está realizando con el fin de que más compañías adopten este gas. Estos esfuerzos tienen forma de beneficios fiscales e incentivos que se están dando relacionados con la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero²¹.

En España, en particular, existe un impuesto sobre Gases Fluorados de Efecto Invernadero²², que entró en vigor el 1 de enero de 2014. Este, es un impuesto indirecto que recae sobre el consumo de aquellos productos que necesiten alguno de los siguientes gases: los hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF6); atendiendo al potencial de calentamiento atmosférico.

La tarifa de dicho impuesto depende del potencial de calentamiento atmosférico o PCA, definido como el potencial de calentamiento climático de un gas fluorado en relación con el del CO₂ sobre un periodo de 100 años.

En la siguiente tabla se exponen las tasas para el hexafluoruro de azufre, el más caro y barato de los hidrofluorocarburos y de los perfluorocarburos, remarcando que el SF6 es el que posee el PCA más alto y, por lo tanto, tiene el impuesto máximo de 100 €/kg.

Gas fluorado de efecto invernadero	PCA	Tipo €/kg
Hexafluoruro de azufre.	22.200	100
HFC - 236fa	9.400	100
HFC - 143.	330	6,6
Perfluoroetano.	11.900	100
Perfluorometano	5.700	100

Tabla 2 Tarifas del Impuesto sobre Gases Fluorados de Efecto Invernadero

Además, el importe recaudado por este impuesto se encarecerá a partir del 1 de septiembre de 2022, cuando entre en vigor la nueva reforma del impuesto sobre Gases Fluorados de Efecto Invernadero²³. Donde se gravará también la tenencia de dichos gases, y ya no solo el consumo, o se eliminará la exención del impuesto a las escuelas de formación, entre otros. Esto puede suponer un incremento de los precios finales de los productos que utilicen este tipo de gases, instalaciones más caras o, desincentiva en la renovación de equipos al gravar también el gas de los nuevos equipos.

Se calcula que la medida podría encarecer en torno a un 5 % las nuevas instalaciones de productos con estos gases, que no solo se usan en la industria eléctrica, sino que también están presentes en la refrigeración o la climatización, afectando así a muchas otras industrias, como la hostelería, la industria alimentaria, la logística, la automoción o el transporte refrigerado.

Como quedará explicado más adelante, en la actualidad se están desarrollando otras alternativas con una mezcla gaseosa llamada g³ (pronunciado en inglés “g-cubed”), que resulta mucho más respetuosa con el medio ambiente. Esta mezcla es un 98% menos nociva que le SF₆²⁴.

El único problema es que todavía no puede ser empleada para muy altos voltajes, pero esto podría cambiar ya que poco a poco las instalaciones que usan este gas han ido aumentando su voltaje.

4 La subestación objeto de diseño de protecciones y monitorización

4.1 Características

Para que sea más ilustrativo este trabajo, se ha elegido un modelo de subestación eléctrica que ilustrará la elección de las protecciones que necesiten parametrizarse como son, por ejemplo, algunas de las protecciones internas.

El modelo de subestación elegida es el equipo encapsulado (GIS). Tipo B105, 230 kV de Alstom Grid. Su descripción y datos nominales han sido aportador por el director de este trabajo²⁵.

4.2 Protecciones

Las protecciones son dispositivos que, generalmente, son activados en caso de fallo y protegen a la subestación de los imprevistos y problemas que pueden surgir. Su papel principal es minimizar los daños causados, cuando se produce un fallo en una instalación de este tipo. Debido a la naturaleza de algunas de las subestaciones, como es la subestación en cuestión, se trabaja con voltajes muy altos que pueden llevar a explosiones de la instalación que, producen accidentes muy graves e incluso fatales.

Según su tipo localización las podemos clasificar en internas y externas:

4.2.1 Internas

Como protecciones internas nos centraremos en las más cruciales, que se encargan de garantizar que los impactos de un fallo en la instalación no supongan un peligro mayor: la compartimentación, los densostatos, y las válvulas de sobrepresión. Estos elementos, que ya fueron explicados brevemente en el capítulo de componentes principales, quedarán explicados con más detalle ahora.

- **Compartimentación:**

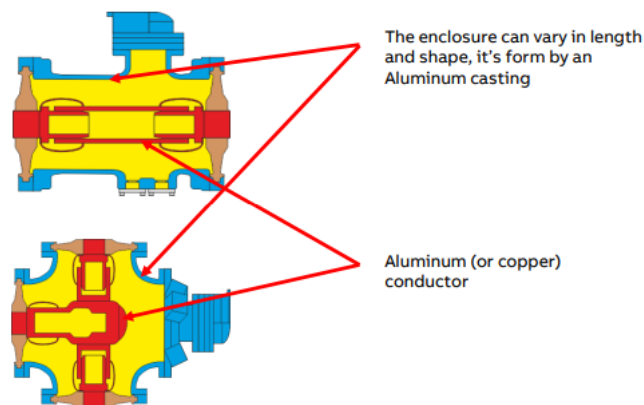
Uno de los aspectos fundamentales de las subestaciones eléctricas encapsuladas en gas SF₆ es la característica de la compartimentación. Esto supone que cada parte de la instalación está separada de aquellas partes que están contiguas y próximas a ella. Como es evidente, esto permite que los posibles fallos que surjan en un compartimento no se vean trasladados a los adyacentes, es decir, un compartimento no depende del contiguo y no se afectan entre sí; y así, protegen y minimizan las consecuencias de los posibles accidentes.

Esta compartimentación es el aspecto fundamental de las subestaciones eléctricas encapsuladas ya que es la que permite que el gas hexafluoruro de azufre quede alrededor de los elementos de la subestación y actúe como aislante. Los compartimentos de gas quedan separados por los aisladores estancos, y el gas no puede pasar el módulo adyacente.

Otro aspecto importante de este método de protección interna es que cada compartimento tiene su propia vigilancia, permitiendo así su monitorización independiente del resto de compartimentos. Lo cual ayuda a identificar exactamente dónde está el fallo en la subestación y permite repararlo de manera más eficiente y ahorrando tiempo.

Los compartimentos de gas tienen los siguientes componentes²⁶:

- Conductores y recubrimiento: los conductores pueden ser de aluminio o cobre y los recubrimientos son variados y con formas muy distintas.



*Figura 34 Conductores y recubrimientos del compartimento
(Fuente: ABB)*

- Aislamiento de barrera de gas: impiden que el gas circule entre compartimentos.

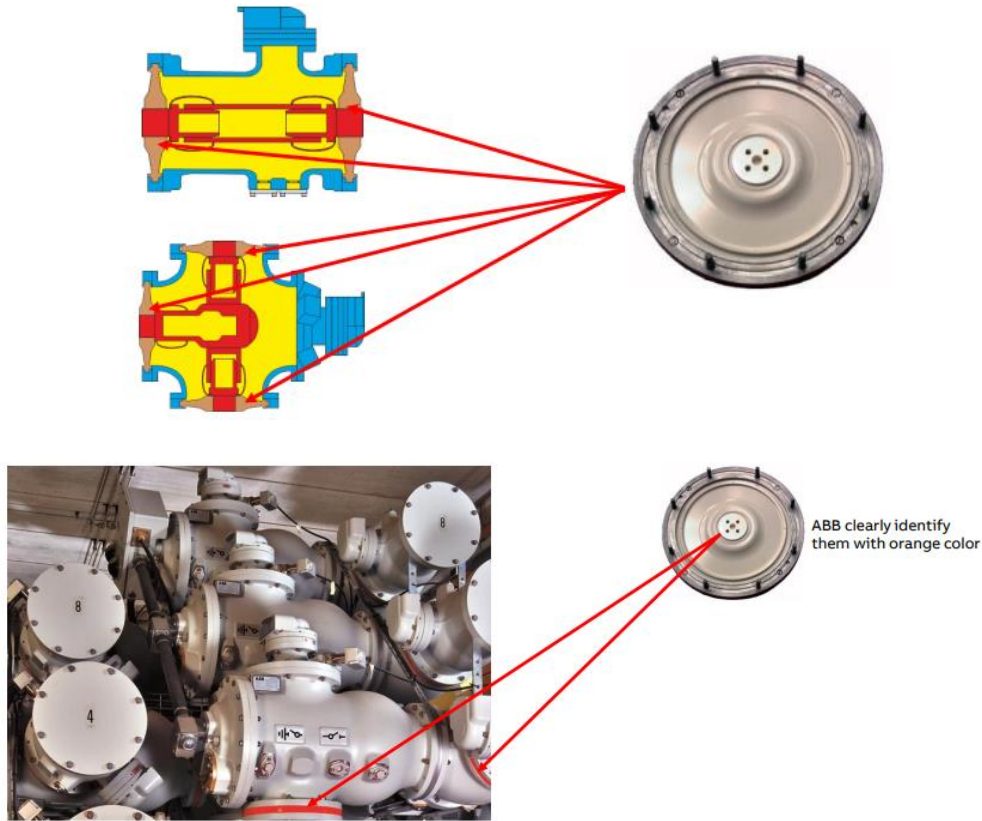
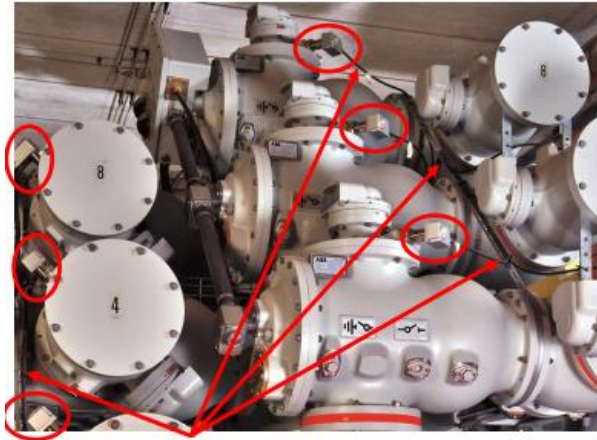


Figura 35 Posición de aislamiento de barrera de gas (Fuente:ABB)

- Densímetro: aunque más adelante se proporciona una descripción más detallada, el densímetro es un dispositivo particular de cada compartimento que mide los niveles de gas de cada uno de ellos con el fin de controlar el gas.

De esta manera, si los niveles de gas en un compartimento son inferiores o superiores a los deseados, esta protección hace que se disparen las alarmas y se ponga solución de manera inmediata sin necesidad de estar midiendo de manera manual el nivel del gas y que exista un riesgo de dejar escapar el gas en el compartimento.



Note the cabling to the Local control cubicle



In every gas compartment (in every closed space between orange marks) you must find one. We only show some of them here

Figura 36 Posición de densímetro (Fuente:ABB)

- Válvula de sobrepresión o disco de ruptura: aunque quedará explicado más adelante, tiene la función de liberar al compartimento de sobrepresiones de gas que puedan poner en peligro el funcionamiento normal de la subestacion.



In every gas compartment (in every closed space between orange marks) you must find one. We only show some of them here

Figura 37 Posición de válvula de sobrepresión (Fuente:ABB)

- Válvula de llenado: particular de cada compartimento y facilita la manipulación del gas en el compartimento.



*Figura 38 Posición de válvula de llenado
(Fuente:ABB)*

- Filtro de humedad y productos en descomposición provenientes del gas



Adsorber (Circuit-breaker)



Adsorber (Other compartments)

*Figura 39 Filtros de los compartimentos
(Fuente:ABB)*

Cada compartimento tiene sus propios filtros para absorber la humedad y los productos de descomposición provenientes del gas.

Este aspecto de compartimentación y modularidad es común a todas las subestaciones encapsuladas en gas. La subestación elegida cuenta, según su manual con una subdivisión en compartimentos monofásicos de gas independientes. Los compartimentos de cada fase son independientes entre sí. Aislados con aisladores cónicos estancos. Cada compartimento de la subestación elegida tiene, según su manual de descripción: válvula de llenado, dispositivo de alivio de presión, filtro y densímetro con compensación por temperatura.

- **Densímetro de Agujas:**

Como ya se ha explicado, el aspecto fundamental de una subestación aislada en gas es su característica compacta que la convierte en una opción ideal para espacios muy reducidos. Esta característica se consigue mediante los compartimentos de gas aislante hexafluoruro de azufre.

Estos compartimentos, como hemos visto antes, tienen que mantener unos niveles de gas que para que la subestación funcione correctamente y no se produzcan descargas. Para tener controlados estos niveles, se han provisto a cada compartimento de densímetros de agujas.

El papel fundamental de los densímetros de agujas es vigilar la presión y detectar ausencia de gas en el compartimento donde se encuentran situados. Existen muchos tipos de densímetros en el mercado actualmente: densímetros digitales y analógicos.

En general, poseen dos umbrales de presión, aunque también existen algunos con tres umbrales capaces de detectar, no solo presiones bajas, sino también sobrepresiones.

En el caso de la subestación elegida, escogeremos el modelo GDM-100 de Wika²⁷ por su característica analógica y su disponibilidad y especificaciones disponibles al público. También tiene la característica de la válvula de sobrepresión, si se elige como en este caso, que evita fugas de gas durante el mantenimiento del aparato de medida y así se convierte en una opción un poco más sostenible para el Planeta. Además, es una opción compatible con la subestación de ALSTOM | GRID, sirviendo para media y alta tensión.

En particular este densímetro, cuenta con una alarma si se alcanzan unos valores determinados, una compensación por temperatura, posibilidad de recalibración sin la necesidad de desmontar y conexión soldada. La posibilidad de calibración sin ser necesario el desmontar se debe a la válvula de calibración fija, lo cual reduce el tiempo de mantenimiento y evita fugas de SF₆.

Esta recalibración se realiza con un instrumento de recalibración que hace que el aparato de medida se desconecte automáticamente de la subestación y, una vez recalibrado y retirado el instrumento para ello, este vuelve a conectar automáticamente.

Otra de las ventajas de este modelo es que no requiere mantenimiento, aunque se recomienda comprobarlo una o dos veces al año.

Este densímetro es un del tipo de dos umbrales ya que no es capaz de detecta sobrepresiones. Al tener dos umbrales posee 3 zonas repartidas entre los dos umbrales que son:

Umbral 1: Cuando el densímetro mide la presión de llenado, indicando que hace falta que se haga un complemento de llenado. Enviando una alarma al armario de control.

Umbral 2: Cuando se alcanza la presión a la cual las prestaciones dieléctricas no están aseguradas.

Además, estos umbrales delimitan tres zonas, como se puede ver en la imagen que se encuentra a continuación, donde se muestra el modelo en sus versiones:

Zona verde: cuando la presión del compartimento medida es mayor a la presión del umbral 1 y menor que la de servicio.

Zona amarilla: cuando la presión medida en el compartimento está entre el umbral 1 y el umbral 2

Zona roja: cuando la presión medida en el compartimento está por debajo del umbral 2.

Como es de esperar la zona deseada es la verde.

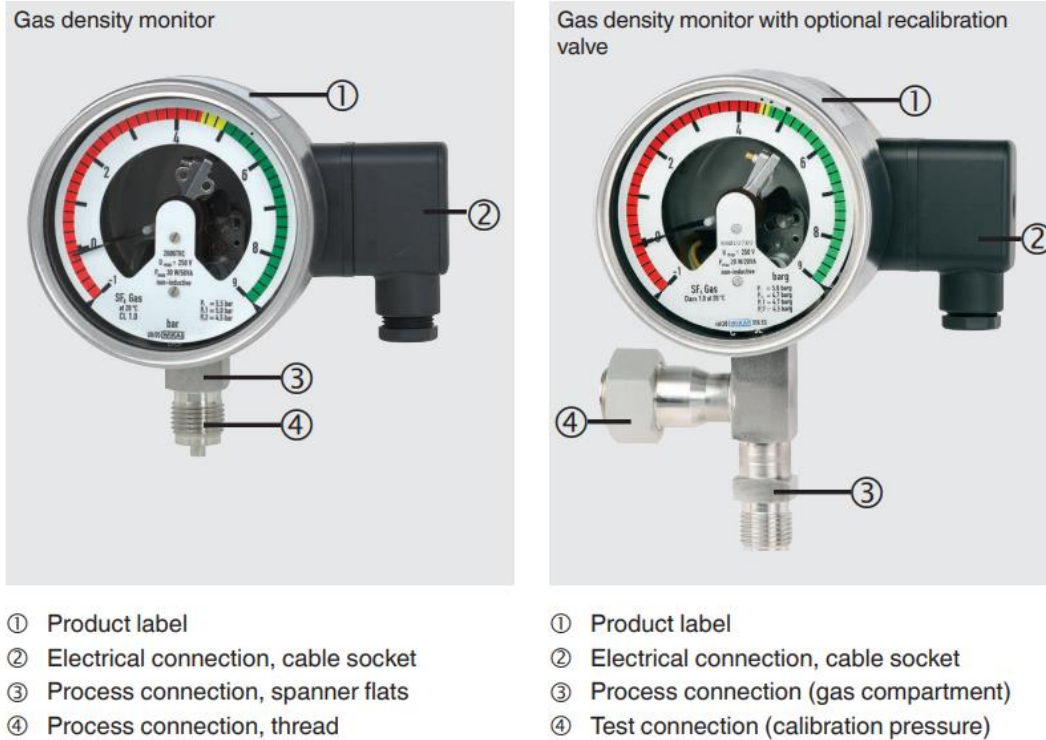


Figura 40 Modelo GDM-100 con y sin válvula de recalibración
(fuente WIKA)

Para este densímetro hace falta especificar las siguientes opciones (Fuente GDM-100 WIKA) que conformarán la opción final elegida:

Caja

Versiones disponibles

Opción 1	Acero inoxidable, con relleno de gas
Opción 2	Acero inoxidable, con líquido de relleno

Mirilla

Versiones disponibles

Opción 1	Cristal de seguridad laminado
Opción 2	Cristal acrílico

En cuanto a las características exteriores se elegirá la opción de acero inoxidable relleno con líquido, para evitar vibración, daños en el sistema mecánico y el empañamiento de la mirilla. Además, para la mirilla se escogerá la opción con cristal acrílico para una opción más resistente a los rayos UVA, ante la posibilidad de que la subestación pueda ser instalada a la intemperie y en el interior.

Número de contactos eléctricos

Versiones disponibles	
Opción 1	1 contacto magnético de ruptura brusca
Opción 2	2 contactos magnéticos de ruptura brusca
Opción 3	3 contactos magnéticos de ruptura brusca

Sentidos de conmutación

Versiones disponibles	
Opción 1	Presión bajando
Opción 2	Presión subiendo

Funciones de conmutación

Versiones disponibles	
Opción 1	Contacto normalmente abierto
Opción 2	Contacto normalmente cerrado
Opción 3	Conmutador (max.2 puntos de conmutación)

Circuitos eléctricos

Versiones disponibles	
Opción 1	Conectados galvánicamente (no para conmutadores)
Opción 2	Separados galvánicamente

Cuando se trata de las versiones de uso, en primer lugar, escogeremos 3 contactos magnéticos de ruptura brusca, para una mayor seguridad. Además, conmutación se dará bajando pues es como los niveles de gas pueden causar riesgos potenciales. Las funciones serán conmutadores y el circuito separado galvánicamente.

Como todos los densímetros el nuestro necesita de la definición de sus parámetros. Por ello, se extrae, de las especificaciones de la subestación encapsulada, las tablas de las presiones, expuesta a continuación:

Presión relativa de llenado del SF6 a 20°C		
- Interruptor	bar _{rel.}	6.3
- Celda	bar _{rel.}	6.3
Presión relativa del SF6 alarma de relleno		
- Interruptor	bar _{rel.}	5.8
- Celda	bar _{rel.}	5.8
Presión relativa del SF6 mínima		
- Interruptor	bar _{rel.}	5.5
- Celda	bar _{rel.}	5.5
Presión de diseño de envolvente		
- Interruptor	bar	9.0
- Celda	bar	9.0

Tabla 3 Presiones relativas de la subestación elegida

Según las presiones relativas expuestas en la tabla se podría llevar a cabo la asignación de los umbrales en presión nominal o de servicio 6.3 bar, la presión de umbral 1 sería la presión de llenado, que es 5,8 bar, y, por último, 5,5 bar sería el umbral 2 para la presión a partir de la cual se dejan de garantizar las prestaciones dieléctricas.

- Válvulas de sobrepresión o discos de ruptura

Los dispositivos de alivio o válvula de sobrepresión son unos dispositivos incorporados en el diseño básico de los compartimentos y que sirven como medida de protección contra las explosiones que pueden sufrir los compartimentos. Explosiones que se dan debido a sobre presiones.

Estos dispositivos, en la subestación elegida, son un disco de ruptura que tienen una presión preestablecida que permite que el disco se rompa, para reducir la presión de dentro del compartimento.

En el caso de la subestación, la presión preestablecida sería, según la tabla de arriba, 9 bar para que no se produzcan explosiones en la envolvente.

Con esta información quedan definidos los límites de ruptura de las válvulas²⁸ en el 95% de la presión de diseño como el límite mínimo y en el 105 % de la presión de diseño como límite máximo. Haciendo estos cálculos el límite mínimo sería de 8,55 y el máximo de 9,45.



*Figura 41 Disco de ruptura activado y original
(Fuente: BS&B)*

Estos discos de ruptura los proporciona, el proveedor de la subestación que en este caso es Alstom | GRID.

4.2.2 Externas

Las protecciones externas constan los transformadores de corriente y de tensión y de la protección diferencial de barras.

- Transformadores de corriente y de tensión

Los transformadores de corriente y de tensión tienen un papel fundamental en las subestaciones encapsuladas, no solo porque constan como uno de los elementos más importantes de esta instalación de la red eléctrica; sino porque también suponen una medida de protección para las subestaciones.

Esta medida de protección supone que los transformadores de corriente y tensión adaptan la señal a lo admitido por los relés de protección. Esto se debe a los transformadores permiten el control de las sobretensiones transitorias.

Como su función indica, los transformadores de corriente y tensiones transforman las grandes corrientes y tensiones para adaptarlas al resto de instrumentos, garantizando así la seguridad de las personas que operan a su alrededor.

Por ejemplo, la intensidad de salida de un transformador de intensidad se utiliza como entrada a los relés de protección²⁹, que aislarán de manera automática la parte del circuito que sea necesaria en caso de una situación fuera de lo normal. Cabe destacar que, el relé de protección permitirá que, el resto de la subestación siga funcionando normalmente. Lo mismo ocurre con el de tensión.

- Protección diferencial de barras

La protección diferencial parte de un principio de comparación de corriente entre dos puntos. Su principio de funcionamiento, basado en la ley de Kirchhoff³⁰, es el de medir una corriente que entra en un objeto y a la salida de dicho objeto su valor de medida ha de ser igual que la de entrada.

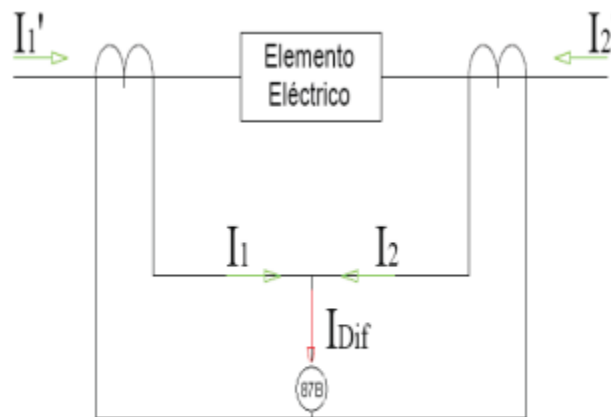


Fig. 1 Relé diferencial

Figura 42 Principio de la protección diferencial de barras [29]

La protección diferencial de barra es, en este caso, la de la subestación encapsulada en gas hexafluoruro de azufre. En este tipo de protección³¹, se compara la corriente total que entra en la zona que bajo la influencia de la protección diferencial de

barras con la corriente que sale de dicha zona protegida. Esto supone, que la protección protege a todos los circuitos que están conectados a la barra.

Las barras son empleadas para conectar entre si varios circuitos del mismo nivel de voltaje, estos pueden ser transformadores, líneas, etc.

Cuando se produce un fallo en la barra, se muestran corrientes de cortocircuito altas que llevan a grandes sobreesfuerzos en los equipos que están conectados a dicha barra. Además, cabe destacar que esta protección es capaz de detectar cuando se está desconectando un circuito, de cuando existe realmente un fallo en la instalación.

Por todo ello, conviene que las barras tengan protecciones que actúen de manera rápida y automática para proteger todos los circuitos conectados a ellas de dichos sobreesfuerzos.

Existen varios esquemas de protección diferencial de barras [29]:

1. Mediante relé de sobre corriente

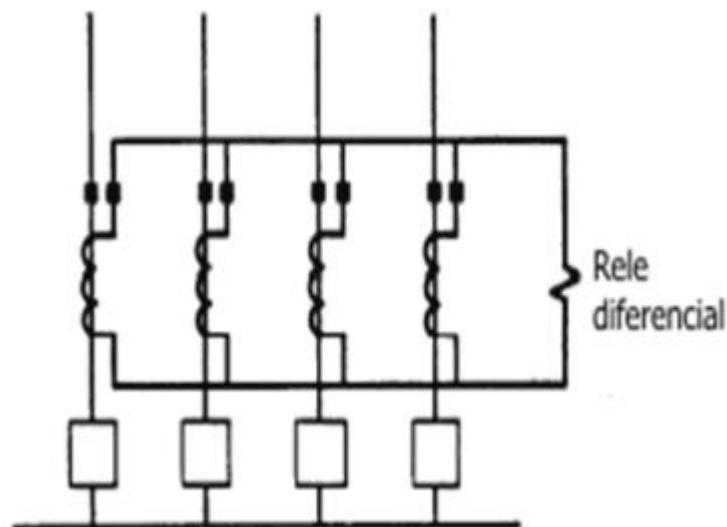


Figura 43 Esquema de protección de barras mediante relé de sobre corriente [29]

2. De voltaje con “acopladores lineales”

4. De alta impedancia

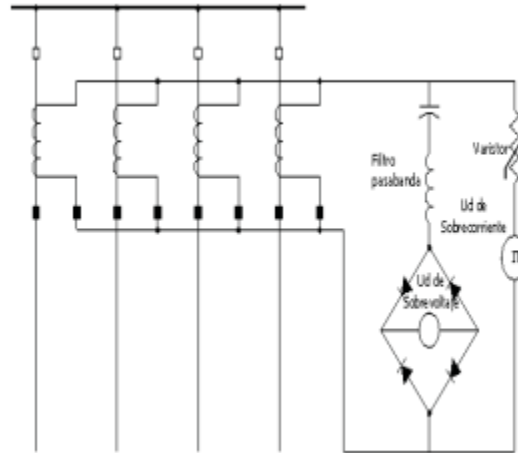


Figura 46 Esquema de protección de alta impedancia [29]

5. De baja impedancia

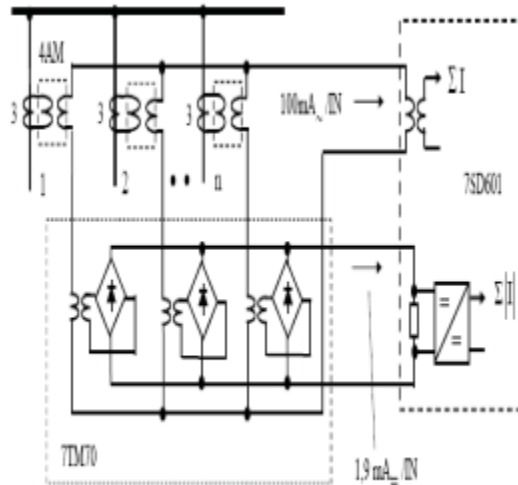


Figura 47 Esquema de protección de baja impedancia [29]

En las figuras superiores se ven los distintos esquemas de protección diferencial de barras y la conexión para cada uno.

En concreto, para el diseño de la protección diferencial de barras de la subestación elegida se ha elegido un modelo de ABB. Para estas diseñar estas protecciones se pueden utilizar estos criterios: el cálculo de la corriente diferencial, el análisis de corrientes del segundo y quinto armónico.

En el cálculo de corriente diferencial se realiza un disparo y se comprueba de manera menos precisa los fallos. Mediante un algoritmo que calcula la corriente diferencial como la suma de los módulos y la corriente de restricción como el máximo de las corrientes. Existen unas graficas en función de la corriente diferencial y la corriente de destrucción que va a ayudar a determinar un fallo.

El segundo criterio para el diseño de la protección diferencial de barras es según el análisis de armónicos. En esta protección, se bloqueará si aparecen niveles de armónico superiores al valor preestablecido. Se toman el segundo y quinto armónico como referencia para el disparo.

4.3 Monitorización

La monitorización consiste en la vigilancia de parámetros mediante aparatos especificaos para detectar posibles comportamientos que se salen del funcionamiento normal. Según esta definición, la monitorización puede ayudarnos detectar posibles fallos, incluso antes de que se produzcan.

Con esto, se pretende llevar un mejor mantenimiento de la subestación y así proteger a las personas que están a su alrededor de posibles riesgos que puedan aparecer. El sistema de monitorización esencial de una subestación encapsulada en gas, y el cual quedará explicado, es el sistema de monitorización de descargas parciales.

Comprobar y monitorear las descargas parciales nos permite conocer como y en que lugares puede quedar comprometido el correcto funcionamiento de la subestación GIS. Además, una buena monitorización y mantenimiento puede llevar a una reducción de fallos y por lo tanto costes.

Las imperfecciones en el aislamiento pueden causar fallos, en un principio menores, en las prestaciones dieléctricas. Estos producen lo que se llaman descargas parciales, que son descargas en un principio inofensivas pero que si no se controlan podrían llevar a un fallo mayor en el sistema, ocasionado riesgos muy graves.

Algunas de las imperfecciones en el aislamiento pueden ser:

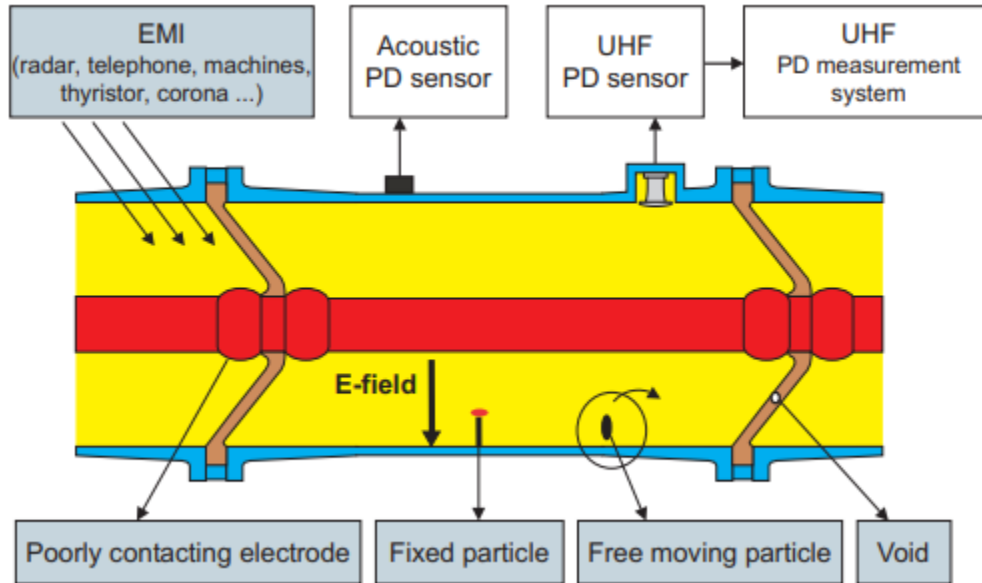


Figura 48 Fuentes típicas de descargas parciales (Fuente: ABB)

- **Partículas móviles en la carcasa**

Es verdad que se hace todo lo posible porque el gas en el interior del compartimento sea lo más puro posible, pero pueden aun así llegar algunas partículas móviles que se ven afectadas por el campo electromagnético del alto voltaje de estas carcasa en este tipo de instalaciones. Esto hace que las partículas queden circulando por la envoltura y a veces en suspensión. Esto, depende de su tamaño, carga inducida, frecuencia, polaridad, etc.

Las partículas que se encuentran en movimiento producen pequeños destellos al chocar con otros objetos o partículas. Y esto es lo que se llaman descargas parciales y se monitorean.

- **Protrusiones fijas en los electrodos**

Estas protrusiones promueven los campos electromagnéticos y pueden dar lugar a descargas parciales. Algunos diseños de subestaciones están específicamente calculados para minimizar este factor.

- **Partículas flotantes y componentes**

Cualquier objeto que no esté conectado galvánicamente a la carcasa o a los conductores interiores van a adquirir una carga. Este objeto se va a cargar y descargar según cambie la corriente.

A estas partículas le ocurre lo mismo que las partículas móviles, y por eso se pueden dar descargas parciales. Lo cual puede llegar a causar una más alta probabilidad de daño en la superficie de la carcasa.

La aparición de estas partículas también depende del diseño de la subestación encapsulada en gas y de sus envolturas.

- **Huecos en espaciadores y casquillos**

Normalmente, estos espacios están rellenos con gas. Aunque se pueden dar situaciones en las cuales estos espacios causen descargas parciales.

En cuanto a cómo medir estas descargas, existen varios métodos para ello. A continuación, se exponen algunos:

- **Medida con un acoplador capacitivo según IEC 60270**

El objeto a analizar, en este caso la GIS, puede tener descargas parciales en cualquier parte de el aislamiento y esto produce un pulso de corriente que se detecta con un acoplador capacitivo y la impedancia medida del circuito.

La corriente que pasa por la impedancia medida del circuito se llama la carga aparente. También hay que tener en cuenta que la impedancia medida tiene características de paso alto. El dispositivo que mide las descargas parciales tendrá características de paso alto y otro dispositivo de paso bajo.

El dispositivo de medida de las descargas parciales muestra la corriente que pasa por la impedancia y la carga aparente. Esto requiere, como es evidente, una calibración previa para poder cuantificar los factores.

Este método de medición de las corrientes parciales esta muy limitado con el ruido eléctrico del aparato.

- **Medidas de las descargas parciales con sensores de campos eléctricos**

Como se ha mencionado las descargas parciales provocan señales eléctricas y acústicas. Las palabras “descarga parcial” se refiere a la ruptura del aislamiento, a

nivel microscópico. Estas descargas parciales son eventos aislados que dependen de una serie de parámetros completos.

Cada descarga parcial produce un pulso que se propaga desde el lugar del defecto por toda la subestación encapsulada. Este método de medida se basa en la detección de estos impulsos mediante sensores.



Figura 49 Sensor para descargas parciales (Fuente: ABB)

Este sensor está formado por una placa metálica y aislada conectada a un conector de tipo 'N' 50 Ohmios RF. Estos sensores se colocan en la subestación en base a la experiencia y a la topología de cada subestación encapsulada.

Cabe destacar que, al no ser tan directa como el método anterior descrito, este método hace que la calibración directa no sea posible.

- **Medida acústica de las descargas parciales**

Este método está basado en la medición de las señales acústicas producidas por la onda expansiva de las descargas en el gas. Estas ondas se trasladan fácilmente a la envoltura metálica y otras partes y se pueden registrar utilizando micrófonos ultrasónicos. Estos micrófonos están fijos a la carcasa de la GIS o a la cabeza de algún tornillo que lo admita.

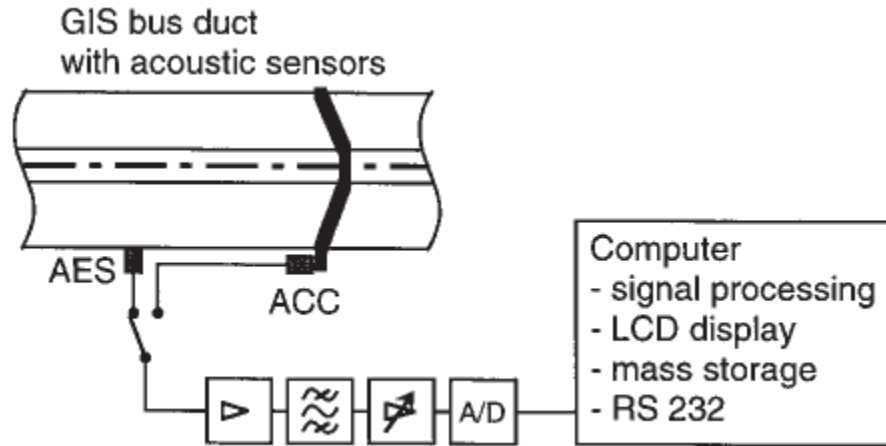


Figura 50 Sistema acústico de medida (Fuente: ABB)

Las señales de interés son los pulsos acústicos que producen las descargas de gas, las partículas en movimiento y los componentes que vibran.

Además, el ruido del ambiente puede ser reducido con filtros y procesando la señal. Los instrumentos de medida típicamente incluyen el procesamiento de esta señal, su almacenamiento y una manera de mostrarlo.

Los diferentes defectos se localizan de manera bastante precisa con este método, debido a la alta atenuación de las ondas de sonido en la carcasa.

- Métodos químicos de medición de descargas parciales

Las descargas parciales pueden tener como consecuencia la descomposición del gas aislante SF₆. Estos productos de descomposición pueden ser detectados empleando un método químico con tubos sensores. Este método proporciona una medida acumulativa de los productos de descomposición.

Aunque la sensibilidad de este producto puede ser muy baja para la detección real de las descargas parciales, este método puede ser muy útil para localizar que compartimentos tienen daños en el gas debido a este tipo de descargas.

Los métodos de medida de las descargas parciales tienen varias aplicaciones a lo largo de la producción de la subestación encapsulada. A continuación, se muestran para cada fase

de producción cuando se emplean los métodos de medida de las descargas parciales empleados:

- **Diseño y desarrollo**

Inicialmente, las descargas parciales se miden para la verificación del diseño y para las pruebas tipo, que se llevan a cabo más tarde. Se llevan a cabo pruebas en laboratorios con herramientas y máquinas sofisticadas que pueden medir estas descargas parciales.

- **Pruebas de fábrica**

El objetivo de las pruebas de fábrica es detectar todos los defectos posibles, para reducir los costes de pruebas y reparación de fases posteriores.

Aunque las pruebas de fábrica no son tan intensas como las de la fase anterior, pueden ser llevadas a cabo bajo las mismas condiciones. En el caso de ABB, se realizan medida de descargas parciales según IEC 60270 para cada subestación enviada.

Aunque la localización de los defectos no es un problema, también se lleva a cabo, ocasionalmente, la medición de las señales acústicas para poder localizar más concretamente estos defectos.

- **Pruebas de puesta en marcha**

Estas pruebas se llevan a cabo con la finalidad de confirmar que no hay defectos producidos durante el transporte y montaje. Las vibraciones, golpes y polución durante el transporte pueden tener un impacto sobre el sistema de aislamiento. Después de la instalación se llevan a cabo estas pruebas según demanda del cliente.

Durante esta fase se llevan a cabo la medida de las descargas parciales con sensores de campos eléctricos y, para una mayor precisión, la medida de las señales acústicas para comprobar la localización de los defectos.

- **Durante el mantenimiento periódico y la monitorización.**

La experiencia muestra que las subestaciones encapsuladas muestran muy pocos fallos y el mantenimiento que necesita es casi nulo.

Además, la eficacia de los sistemas de monitorización de descargas parciales durante la ida de la subestación es algo que todavía parece ponerse en duda. Esto se debe a que si, mientras una subestación se encuentra en funcionamiento, se produce un fallo, la actividad de las descargas parciales que podrá aparecer aumentará tan rápido que no sería posible proteger de un riesgo grave.

Aun así, existen métodos, en desarrollo, muy sofisticados que requieren personal muy cualificado para controlar las descargas parciales. Estas soluciones van desde solución portátiles hasta instrumentos fijo.

Para la subestación elegida, y en base a lo especificado por ABB, se recomienda un dispositivo móvil de tipo acústico para medir las descargas parciales. El dispositivo seleccionado es el FLUKE ii910 Acoustic Imager³².

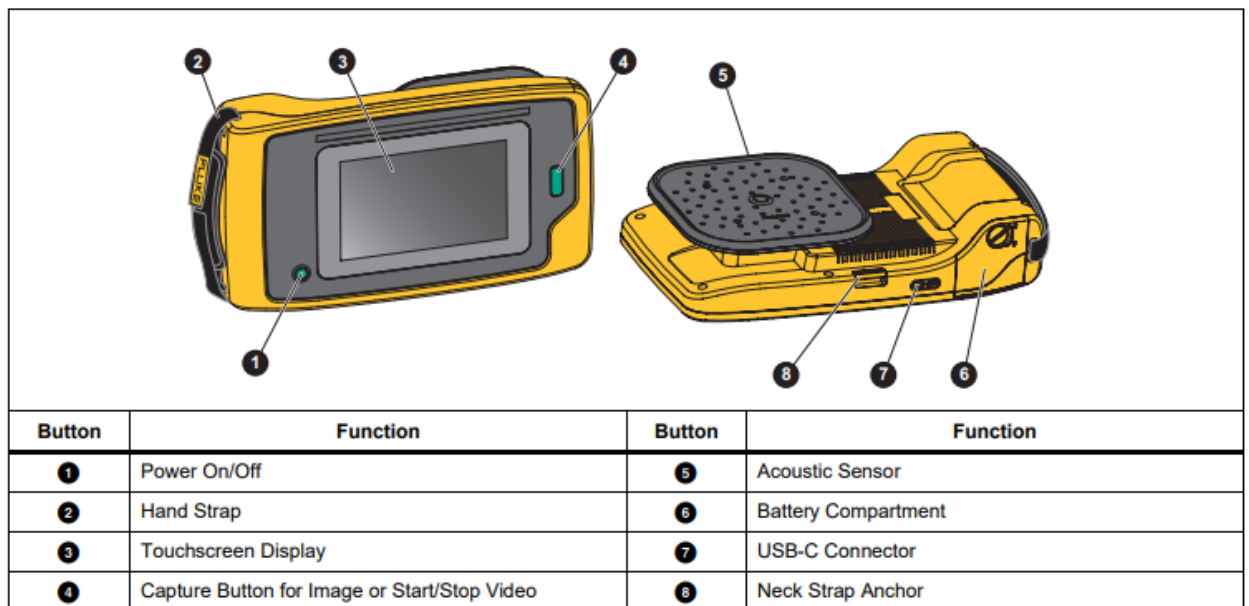


Figura 51 ii910 Acoustic Imager [31]

Este instrumento permite medir las descargas parciales donde se desee, de una manera cómoda y precisa y, por ello, consta una opción ideal para el caso dado.

5 El futuro de las subestaciones encapsuladas

Como ha sido mencionado en el primer apartado, el futuro de las subestaciones encapsuladas se ve claramente encaminado hacia el desarrollo de este tipo de subestaciones con otro gas menos nocivo para la atmósfera y que mantenga las mismas propiedades. Este, es el caso del g^3 , un gas con una base de fluoronitrilo. Estas soluciones, se han empezado a investigar y desarrollar, por los potenciales efectos nocivos y de gas invernadero que tiene el SF6.

En este factor, tiene mucho que ver el hecho de que el protocolo de Kioto, que entró en vigor en 2005, se propuso reducir los gases de efecto invernadero de origen antropogénico y listo el hexafluoruro de azufre como un gas de efecto invernadero, equivalente a 23.500 veces el efecto de calentamiento global del CO₂ y una vida de 3.200 años en la atmósfera³³.

Cabe mencionar que, el g^3 es no tóxico y no inflamable, con lo cual en esos aspectos es igual de seguro que la alternativa más utilizada hoy en día. Los productos que utilizan el g^3 (pronunciado en inglés como g cubed) tienen las mismas características y cualidades que los que utilizan el SF6 como medio aislante, con la ventaja de que su efecto invernadero se ve reducido en un 99% en comparación con el gas SF6.

Además, los productos con gas g^3 mantienen las mismas dimensiones, de manera que no se produce otro tipo de contaminación por la extracción de más materia prima u otros. A su vez, los productos que operan con este nuevo gas no tienen ninguna restricción de operación adicional a los que operan con el SF6 en el mismo rango de temperaturas (hasta -30°C).

Estas soluciones, las ofrecen ya compañías como General Electric, con su línea de productos g^3 (Gas-Insulated Lines 420 kV, Gas-Insulated Substations 145 kV y AIS Circuit-breakers 145 kV).

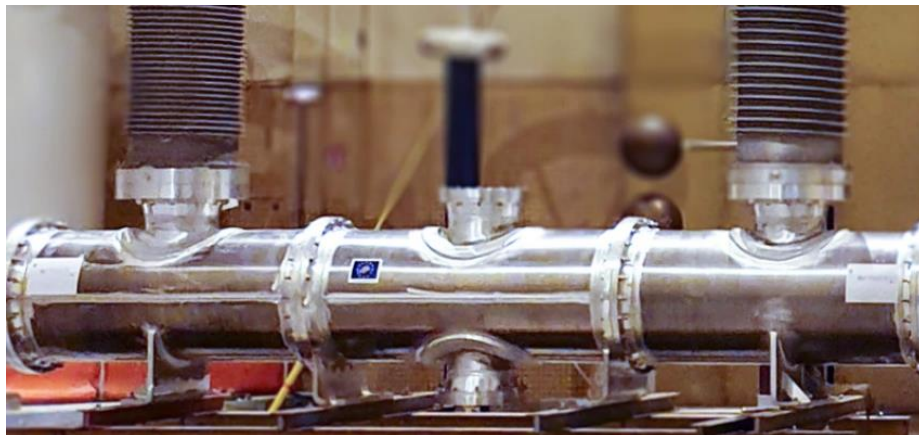


Figura 52 Primer disyuntor de g^3 de 420 kV de General Electric

La única desventaja es que, todavía, no existen subestaciones encapsuladas en gas g^3 de mayor voltaje que 145 kV, aunque este hecho va a cambiar en el futuro. Prueba de ello es que, recientemente, el 30 de marzo de 2022, General Electric presentó el primer disyuntor de 420 kV, 63 kA que funcionaba sin el gas SF6 y utiliza g^3 como medio aislante.

Además de esto, la compañía anuncio que tiene intención de poder desarrollar una subestación insulada en gas g^3 de 420 kV, que incluya el disyuntor que lanzaron, y que además este en el mercado en 2023³⁴.

6 Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

El desarrollo y los avances son importantes, imprescindible y necesarios siempre y cuando tengan un beneficio para la humanidad y las comunidades, sin dañar el medio ambiente. Por ello se hará una revisión de cómo y con qué objetivos de desarrollo sostenible, se alinea el tema del trabajo.

En primer lugar, las subestaciones son un elemento fundamental del sistema eléctrico y este es factor fundamental en la vida cotidiana contemporánea, ya que la humanidad depende mucho de ellas; como tal, las subestaciones y, especial, las GIS son un claro ejemplo del **objetivo de desarrollo sostenible 9 (Industria, innovación e infraestructura)**. Este tipo de subestaciones permiten hacer llegar la electricidad a las ciudades de una manera más cómoda y respetuosa con el medio ambiente.

Debido al surgimiento de las ciudades y la necesidad de estas de ser abastecidas, de manera eficiente, con electricidad; nacieron las subestaciones encapsuladas en gas, o subestaciones GIS, que como se ha mencionado anteriormente reducen notablemente el espacio que ocupan, las subestaciones GIS son entre un 3 y un 8% del volumen y entre un 3 y un 12% del área que ocupa una subestación AIS para la misma tensión nominal y las mismas funciones.

Esta reducción de volumen y espacio, combinado con el hecho de que casi todos los compartimentos vienen ya montados, hacen de las subestaciones GIS una solución ideal que nos permite ahorrar en tiempo y dinero, además de contaminar menos debido a su fácil y accesible montaje, consiguiendo así, una alternativa más sostenible a las subestaciones tradicionales. Por estas razones, el trabajo se alinea con el **Objetivo de desarrollo sostenible 11 (Ciudades y comunidades sostenibles)**.

Por último, el hecho de que estas subestaciones ahorren en tantos aspectos, también las hace alinearse con el **Objetivo de desarrollo sostenible 12 (Producción y consumo responsables)**. Estas subestaciones hacen uso de la red eléctrica de una manera más eficiente y por lo tanto más responsable.

7 BIBLIOGRAFÍA

- ¹ Sosa Escalada, J., (2022, octubre). *SUBESTACIONES ELECTRICAS DE ALTA TENSION AISLADAS EN GAS* recuperado de:
https://catedra.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/sispot/Libros%202007/libros/sosaesca/GIS%20DE%20ALTA%20TENSION_AAR.pdf
- ² Mikes, E. (2012, junio). *The history of gas-insulated substations* recuperado de
<https://www.think-grid.org/history-gas-insulated-substations>
- ³ Botero García, J. (2013). *CONCEPTOS BASICOS DE SUBESTACIONES ELECTRICAS* recuperado de: https://www.javierbotero.com/Javier_Botero/SUBESTACIONES.html
- ⁴ Endesa. Subestaciones eléctricas recuperado de:
<https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/subestaciones-electricas>
- ⁵ Quintana, C. (2017, abril) ABB. Soluciones Celdas GIS, recuperado de:
<https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/eventos/jjts-2017/presentaciones-chile/gis-solutions-cristian-quintana.pdf?sfvrsn=2>
- ⁶ *MODULO II - 4 SECCIONADORES Y CUCHILLAS DE TIERRA* recuperado de:
<http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/tydee/seccionadores.pdf>
- ⁷ Logytel. Seccionador de Puesta a Tierra (SPT) recuperado de:
<http://logytel.es/soluciones/ferrocarriles/electrificacion/seccionador-de-puesta-a-tierra/#:~:text=DESCRIPCION%20DEL%20SECCIONADOR%20DE%20PUESTA,a%20tierra%20realizada%20y%20supervisada.>
- ⁸ Sosa Escalada, J., (2022, octubre). *SUBESTACIONES ELECTRICAS DE ALTA TENSION AISLADAS EN GAS* recuperado de:
https://catedra.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/sispot/Libros%202007/libros/sosaesca/GIS%20DE%20ALTA%20TENSION_AAR.pdf
- ⁹ Glosario Técnico Multimedia. Pasatapas recuperado de:
http://ares.cnice.mec.es/gtm/web/index_es_resultado_final.php?num=238743%7C&Buscar=Pasatapas%7C&volver=Pasatapas&cual=0>m=3c6adbf5f00b6b99797b4acf83c83265#:~:text=Se%20trata%20de%20unos%20aisladores,con%20los%20conductores%20de%201%C3%ADnea.
- ¹⁰ Electricidad. La revista energética de Chile. (2018, junio) *Tecnología de subestaciones GIS puede generar ahorros de hasta 40% en montaje* recuperado de:
<https://www.revistaei.cl/informes-tecnicos/tecnologia-subestaciones-gis-puede-generar-ahorros-40-montaje/#>

-
- ¹¹ Velimir Lackovic, Char. CED engineering. *Gas Insulated Substation Installation* recuperado de: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Gas%20Insulated%20Substation%20Installation%20R1.pdf>
- ¹² Endesa (1ª edición). (2019, mayo) *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARTICULARES DE SUBESTACIONES AT/MT* recuperado de: <https://industria.gob.es/Calidad-Industrial/seguridadindustrial/instalacionesindustriales/instalaciones-alta-tension/Documents/reglamento-alta-tension/endesa/SRZ001-.pdf>
- ¹³ Boletín oficial del estado recuperado de: <https://www.boe.es/>
- ¹⁴ Crusthymks. *Subestación aislada en gas (GIS) versus subestación aislada en aire (AIS)* recuperado de: <https://crushtymks.com/es/energy-and-power/505-gas-insulated-substation-gis-versus-air-insulated-substation-ais.html>
- ¹⁵ Rodriguez, F. *Subestaciones eléctricas encapsuladas (GIS)* recuperada de: https://www.academia.edu/33224391/Subestaciones_Electricas_Encapsuladas
- ¹⁶ RPTR España. *Hexafluoruro de Azufre* recuperado de: <https://prtr-es.es/SF6-Hexafluoruro-de-azufre,15597,11,2007.html>
- ¹⁷ Glaubitz, P., Rodriguez, C. (2011, junio). SIEMENS, Cigré. *Subestaciones aisladas en gas SF6* recuperada de: <https://www.cigre.cl/wp-content/uploads/2017/03/SIEMENS.pdf>
- ¹⁸ Oxford Language recuperado de: <https://languages.oup.com/google-dictionary-es/>
- ¹⁹ Iberdrola. *Las consecuencias del efecto invernadero: desde la desertificación a las inundaciones* recuperado de: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/consecuencias-efecto-invernadero>
- ²⁰ McGrath, M. (2019, septiembre). BBC. *El gas con efecto invernadero 23.500 veces más potente que el dióxido de carbono y del que muchos jamás han oído hablar* recuperado de: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-49717228>
- ²¹ GE. *g3 green gas for grid* recuperado de: https://www.gegridsolutions.com/products/brochures/sf6-alternativa_g3-flyer-sp-2019-12-grid-gs-1672.pdf

- ²² Gobierno de España. (2013, octubre) Ley 16/2013 recuperado de: https://www.hacienda.gob.es/Documentacion/Publico/NormativaDoctrina/Tributaria/Impuesto%20sobre%20los%20Gases%20Fluorados%20de%20Efecto%20Invernadero/Ley_16-2013.pdf
- ²³ Arnabat, I., (2022, agosto). Calor y frio. *Claves del nuevo impuesto sobre gases fluorados de efecto invernadero - Preguntas Frecuentes* recuperado de: <https://www.caloryfrio.com/noticias/actualidad/nuevo-impuesto-gases-fluorados-efecto-invernadero.html#:~:text=El%20nuevo%20impuesto%20entrar%C3%A1%20as%C3%AD,de%20refrigerantes%20en%20instalaciones%20nuevas.>
- ²⁴ Pomerantz, D. (2017, enero). GE Reports. *Ce gaz qui pourrait éventuellement éliminer un puissant contributeur à effet de serre particulièrement néfaste* recuperado de : <https://gereports.fr/post/156306462069/ce-gaz-qui-pourrait-%C3%A9ventuellement-%C3%A9liminer-un>
- ²⁵ Documentación aportada por el director.
- ²⁶ Fuente ABB: Ponce de Leon, J. (2017, abril). ABB. *Safety and availability in GIS* recuperado de: <https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/eventos/jjts-2017/presentaciones-peru/%28jessica-poncedeleon%29-consideraciones-de-seguridad-y-disponibilidad-en-el-dise%C3%B1o-de-equipos-gis.pdf?sfvrsn=2>
- ²⁷ Wika, Hoja técnica GDM-100 recuperado de: https://www.wika.es/upload/DS_SP6002_es_es_100107.pdf
- ²⁸ Rovira Pascual, J. Aurais. *Dimensionado del disco de ruptura* recuperado de: <https://aurais.com/wp-content/uploads/2020/05/Dimensionado-del-disco-de-ruptura.pdf>
- ²⁹ Areatecnologia. *Transformador de corriente* recuperado de: <https://areatecnologia.com/electricidad/transformador-de-corriente.html>
- ³⁰ Andrade Sánchez, R., Antonio Fonseca A., *Modelación y análisis de la protección diferencial de barras de baja impedancia. Aplicación a la barra de 69 kV de la S/E Machala* recuperado de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17121/1/2014AJIEE-2.pdf>
- ³¹ Chinchilla Contreras, L., (2021, noviembre). *¿En qué consiste la Protección Diferencial?* recuperado de: <https://www.linkedin.com/pulse/en-qu%C3%A9-consiste-la-protecci%C3%B3n-diferencial-leiry-chinchilla-contreras/?originalSubdomain=es>
- ³² FLUKE. Manual de ii910 Acoustic Imager recuperado de: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/ii900_umeng0100.pdf?BMtktlup16frFqfetWZfO1qXLD4OSNAx

³³ GE. *g3 G3- SF6 SF6Alternative For High Voltage Applications* recuperado de: https://www.gegridsolutions.com/hvmv_equipment/catalog/g3/

³⁴ GE. (2022, marzo). *GE unveils world's 1st 420 kV SF6-free g3 circuit-breaker for gas-insulated substations* recuperado de: <https://www.gegridsolutions.com/press/gepress/ge-unveils-world-1st-420-kv-sf6-free-g3-circuit-breaker-for-gas-insulated-substations.htm>