

Aplicaciones del SF₆ en la Industria Eléctrica y su Impacto en el Medio Ambiente

Flores R.¹, Delgado F.¹, Romero V.²

Fecha de recepción 13 de agosto de 2012 – Fecha de aprobación 28 de noviembre de 2012

RESUMEN

El hexafluoruro de azufre (SF₆) es el gas de efecto invernadero con el mayor potencial de calentamiento de la Tierra registrado ante el Panel Intergubernamental de Cambio Climático, por lo que pequeñas emisiones de dicho gas contribuyen notablemente al calentamiento global. No obstante, el SF₆ es el medio de extinción de arco eléctrico más utilizado a nivel mundial en las subestaciones eléctricas para los equipos de potencia, tales como interruptores, transformadores y subestaciones encapsuladas. Debido a esto, su uso continuo se mantendrá en los próximos años, con el riesgo de emisiones que contribuyan al aumento de la temperatura ambiental. Por este motivo, en el presente trabajo se describen las principales características del SF₆ tales como el método de obtención, sus propiedades físicas, químicas y eléctricas, áreas de aplicación, ventajas y desventajas al utilizarlo en equipos eléctricos, los factores de degradación al utilizarlo como medio de extinción del arco eléctrico, así como sus efectos a la salud en el ambiente laboral y medio ambiente. Asimismo, se hacen recomendaciones para reducir las fugas de dicho gas durante su operación normal, y los cuidados que deben tenerse para evitar el deterioro de sus propiedades dieléctricas, y emisiones mayores al medio ambiente.

Palabras clave: hexafluoruro de azufre, calentamiento global, gases de efecto invernadero, Protocolo de Kyoto, arco eléctrico, gas dieléctrico, interruptores de potencia, fallas de interruptores

Applications of SF₆ in the Electrical Industry and its Impact on the Environment

ABSTRACT

Sulfur hexafluoride is the greenhouse gas with the highest global warming potential according to the Intergovernmental Panel about Climate Change; therefore, minimal emissions to the environment notably contribute to the global warming. Nevertheless, sulfur hexafluoride is the arc-extinguisher media most employed worldwide in high voltage installations in equipments as circuit breakers, switches and gas insulated switchgears. Consequently, sulfur hexafluoride will be continuously used in the following years, and the risk of fugitive and major emissions, which contribute to the global warming, will persist. For that reason, in the present work, the main characteristics of sulfur hexafluoride are described, such as synthesis method, physicochemical and electrical properties, service areas, advantages and disadvantages of using in electrical equipments, degradation factors when is used as arc-extinguisher media, and the health and environmental effects. Furthermore, some recommendations are given in order to reduce the sulfur hexafluoride leaks during normal operation, and how to handle it to keep its dielectrical properties, and to prevent major leaks to the environment.

Keywords: sulfur hexafluoride, global warming, greenhouse gases, Kyoto Protocol, electrical arc, dielectric gas, power circuit breaker, circuit breaker failure

¹Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Materiales y Procesos Químicos, Reforma 113, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, 62490, México. Tel.: +52-777-362-3811 ext. 7028. Correo electrónico: rfv@iie.org.mx.

²Comisión Federal de Electricidad, Don Manuelito 32, Col. Olivar de los Padres, Cd. de México, D.F. México
Nota: El periodo de discusión está abierto hasta el 1° de julio de 2013. Este artículo de divulgación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 16, No.3, 2012, ISSN 1665-529-X.

1. Introducción

Debido a la contaminación atmosférica, la Tierra absorbe mayor radiación solar y se está calentando en exceso. De acuerdo a diversos estudios, durante el siglo XX la temperatura promedio de la atmósfera se incrementó entre 0.4 y 0.8°C; lo que se ha atribuido a la presencia de ciertos gases que impiden que se disipe el calor que la Tierra recibe del Sol, igual que sucede en un invernadero al quedar atrapado el aire caliente (PNUMA 2003, Trenmerth 2004). Por tal motivo, a estos gases se les conoce como gases de efecto invernadero (GEI's). Una forma de referenciar las capacidades de absorción de radiación de los GEI's es a través del **Potencial de Calentamiento de la Tierra** (PCT) (IPCC 2001). Por definición, el PCT, es una medida del efecto radiativo relativo de una sustancia dada en comparación con el CO₂, integrado en un período de tiempo elegido. En la Tabla 1 se presentan diferentes valores del PCT para los GEI's más importantes propuestos por el **Panel Intergubernamental de Cambio Climático** (IPCC, del inglés *Intergovernmental Panel on Climate Change*). En esta Tabla se puede observar que el gas con el valor más alto de PCT es el hexafluoruro de azufre (SF₆), por lo que pequeñas emanaciones de dicho gas a la atmósfera, así como de los gases perfluorocarbonados, incrementa notablemente el riesgo del calentamiento global del planeta (Fenhann 2000, Niemeyer y Chu 1992). Por ejemplo, en México existe un proyecto registrado ante el Programa de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) relacionado con la reducción de emisiones de un gas perfluorocarbonado; el cual por sí solo contribuye con el 29% del total de reducción de emisiones de GEI's a través del Programa de MDL de

los proyectos registrados hasta el 2008 (Flores y Muñoz-Ledo 2009).

El SF₆ se utiliza en el sector eléctrico como medio aislante y de extinción de arco eléctrico debido a sus características eléctricas y térmicas (O'Connell 2002, Permain y Haddad 2003). Además, dadas sus propiedades térmicas, en la industria metalúrgica se emplea en los procesos de desgasificación del aluminio, de purificación del magnesio y en la fusión de magnesio con sus aleaciones (Ricketts y Cashion 2004). Asimismo, en la industria electrónica se usa en el proceso de plasma en la manufactura de semiconductores (Meshri 2000). Finalmente, se utiliza como trazador en estudios ambientales (Yee *et al.* 2008, Zhang *et al.* 2009), y en el ramo de la medicina para detectar ciertos problemas de salud (Heijmink y Barentsz 2007, Kalantarinia y Okusa 2007). De acuerdo a la Figura 1, la industria eléctrica utiliza el 80% de la producción mundial de SF₆ para la fabricación, puesta en marcha, y operación de equipos de potencia como interruptores de corriente, líneas de transmisión, transformadores y subestaciones encapsuladas (Smythe 2004).

Por otra parte, las emisiones de SF₆ reportadas por los países industrializados, algunas de las cuales se indican en la Figura 2, muestran que en años recientes se han desarrollado esfuerzos notables con el propósito de disminuir las emisiones de dicho gas. Los países con las mayores emisiones de SF₆ en los últimos años han sido Japón y EUA. No obstante, dichas emisiones han disminuido drásticamente; para el caso de Japón cerca del 90% de 1992 a 2004, y para EUA alrededor del 50% de 1990 a 2004.

Tabla 1. Valores del potencial calentamiento de la tierra de los principales GEI's.

Especie	Tiempo de vida (años)	Potencial de Calentamiento Global		
		20 años	100 años	500 años
CO ₂	variable	1	1	1
CH ₄	12±3	56	21	6.5
N ₂ O	120	280	310	170
HFC-23	264	9,100	11,700	9,800
HFC-32	5.6	2,100	650	200
SF₆	3200	16,300	23,900	3,4900
Perfluorometano	50000	4,400	6,500	10,000
Perfluoroetano	10000	6,200	9,200	14,000
Perfluorohexano	3200	5,000	7,400	10,700

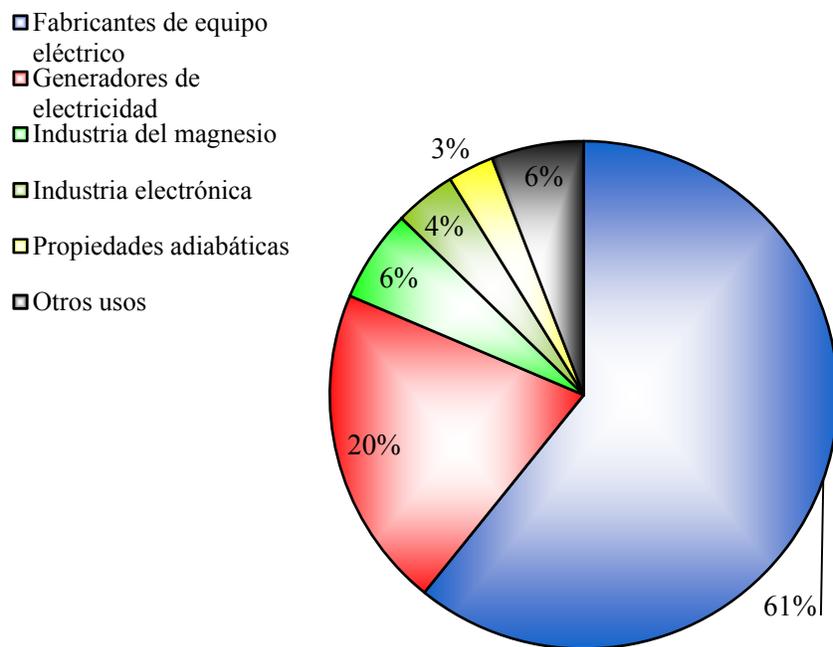


Figura 1. Principales industriales aplicaciones del gas SF₆.

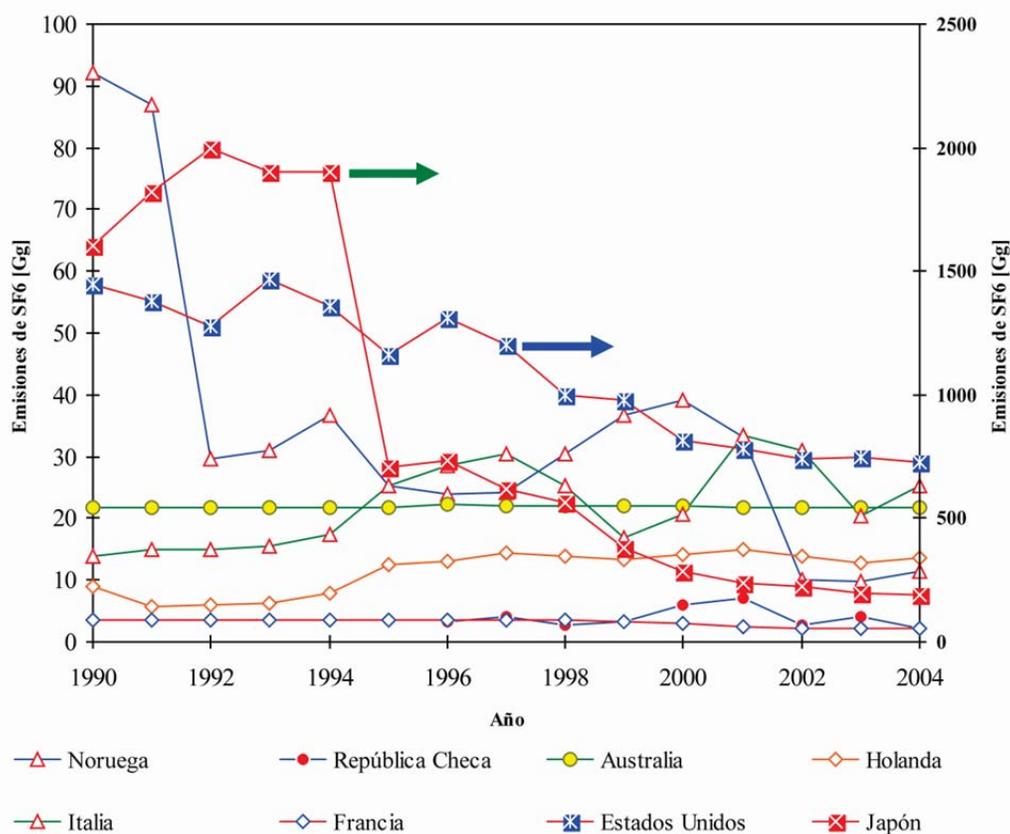


Figura 2. Emisiones anuales de gas SF₆ en países industrializados.

Los programas implementados en países como Japón y EUA para disminuir emisiones de SF₆, consisten básicamente en capacitación del personal para un mejor manejo del gas, detección oportuna de fugas en equipos que se encuentran en operación, y verificación frecuente de la calidad del gas, mediante técnicas analíticas modernas, para evitar fallas catastróficas de los equipos que libere todo el gas contenido (Sugimura y Aoyama 2004, Lauzon 2004). El establecimiento de dichos programas en países no industrializados adheridos al Protocolo de Kyoto puede abrir la posibilidad de obtener certificados de carbono a través del Programa de MDL. De hecho, se ha aprobado un proyecto ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático que permitirá reducir las emisiones de SF₆ en Nigeria y obtener certificados de carbono por ello. El proyecto está basado en la metodología establecida **AM0035** “SF₆ Emission Reductions in Electrical Grids”, y se proyecta reducir 2.709 Tg CO_{2eq} de emisiones en un tiempo 21 años. Cabe remarcar, que si se considera un precio de los certificados de carbono de US\$11.00/Gg CO_{2eq}, se podrían obtener hasta USD 29,800,000.00 para financiar parcialmente las actividades del proyecto durante el tiempo establecido.

Por todo lo anterior, en el presente trabajo se describen las principales características físicas, químicas y eléctricas del SF₆, las aplicaciones en el sector eléctrico, los principales problemas que se presentan durante su operación normal, y los medios adecuados para reducir dichos problemas y, por consiguiente, las emisiones del GEI más potente que existe en la actualidad.

2. Características físicas, químicas, y eléctricas del SF₆

El SF₆ es un compuesto sintético, producido electrolíticamente haciendo burbujear flúor gaseoso a través de azufre fundido, químicamente muy estable, de alta densidad, y no biodegradable. Su gran estabilidad química se basa en el arreglo simétrico

perfecto de sus 6 átomos de flúor en torno al átomo de azufre central. La sección eficaz de colisión de la molécula de SF₆ es de 4,77 Å. Los 6 enlaces son covalentes, lo que explica la estabilidad excepcional de este compuesto. La Figura 3, muestra la estructura molecular del SF₆. El SF₆ es químicamente compatible con la mayoría de los materiales aislantes y conductores usados en equipos eléctricos, no produce polimerización, carbón u otros depósitos conductores durante arqueo y es químicamente estable (Fihman 1997).

A presión atmosférica, el SF₆ tiene una rigidez dieléctrica 2.5 veces mejor que la del aire. Usualmente la presión de trabajo es mayor a 500 kPa, en cuyo caso la rigidez dieléctrica alcanza a ser 10 veces mayor que la del aire. Por otra parte, al ser fuertemente electronegativo, es un excelente aislante eléctrico, ya que las moléculas del gas atrapan los electrones libres formando iones negativos muy fuertes y que no tienen mucha movilidad, lo cual es muy efectivo contra las avalanchas de los electrones que pueden causar la apertura de un circuito. Asimismo, es útil para la extinción del arco eléctrico dentro de la cámara de un interruptor, ya que durante este fenómeno, el SF₆ se disocia absorbiendo cantidades considerables de energía (Boggs 1989, Christophorou y Dale 2001).

3. Aplicaciones del SF₆ en la industria eléctrica

El origen de las aplicaciones del SF₆ en la industria eléctrica se remonta a 1937, cuando la **General Electric Company** realizó las primeras investigaciones para la aplicación industrial del SF₆ y propuso su empleo en la fabricación de equipos eléctricos debido a su mayor rigidez dieléctrica con respecto al aire. En 1967, salieron al mercado los primeros interruptores de SF₆ para media y alta tensión. Estos nuevos interruptores comenzaron a sustituir progresivamente a los interruptores de aire comprimido.

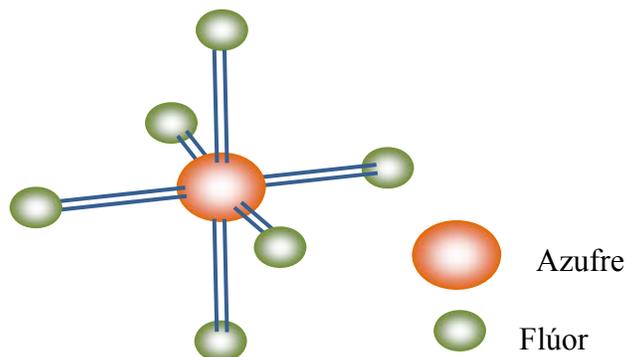


Figura 3. Estructura molecular del SF₆.

Dependiendo de la función particular del equipo aislado con gas, las propiedades del SF₆ pueden variar significativamente (Agrawal 2001, Pearmain y Haddad 2003). En los interruptores de potencia, el SF₆ se utiliza como medio aislante y de extinción del arco, debido a su alto esfuerzo dieléctrico y baja conductividad térmica. Los interruptores de alta tensión llenos con SF₆ son capaces de cortar energía, lo que es imposible de igualar con cualquier otro medio. En las subestaciones encapsuladas en SF₆ toda la unidad (interruptores, conectores, boquillas, transformadores, etc., los cuales se encuentran interconectados) está aislada con el gas. Las subestaciones encapsuladas se utilizan donde las restricciones de espacio son importantes, y son prácticamente libres de mantenimiento, por lo que se encuentran generalmente en zonas urbanas. Estas subestaciones reducen el campo magnético en forma considerable y eliminan por completo el campo eléctrico.

Existen normas internacionales, como la IEC-376 y la ASTM D-2472-00, que establecen los requisitos del gas nuevo o regenerado para su utilización como aislamiento de equipos de potencia (Campbell 2000). Dichos requisitos se muestran en la Tabla 2.

El SF₆ al ser utilizado en los equipos eléctricos de potencia también presenta la desventaja de la descomposición parcial cuando se somete a esfuerzos eléctricos (chispas, arcos, efecto corona, entre otros), en presencia de contaminantes (como aire y humedad), lo que origina subproductos altamente tóxicos y corrosivos, los cuales pueden afectar la salud del operario durante labores cotidianas de mantenimiento. Asimismo, estos subproductos no tienen las mismas características dieléctricas y térmicas del SF₆, con lo cual disminuye la capacidad de aislamiento y extinción de arco, lo cual puede provocar una falla catastrófica del interruptor (una

explosión) provocando que el gas SF₆, así como los subproductos tóxicos, se liberen al medio ambiente, incrementando de esta manera los riesgos del calentamiento global. Asimismo, dicha falla, también origina problemas en la red de transmisión y distribución de la energía eléctrica, provocando, en un momento dado, apagones, tanto en comunidades pequeñas como en ciudades. Por consiguiente, en la siguiente sección se describen los motivos, así como las condiciones, que provocan la descomposición del gas SF₆ durante su operación normal en equipos de potencia (Bessede *et al.* 2004, Boggs 1989, Christophorou *et al.* 1997, Christophorou y Dale 2001).

4. Descomposición del SF₆ por descargas eléctricas

En un equipo aislado con gas, la descomposición del SF₆ por descargas eléctricas es el modo más común de su disociación. Al estar en operación el SF₆ en los equipos eléctricos, éste se ve afectado en su funcionalidad y se descompone parcialmente en varios subproductos al estar expuesto a los fenómenos eléctricos: corona, descargas parciales, chisporroteo, y arcos.

La energía media de los electrones en cualquiera de los fenómenos eléctricos previamente mencionados oscila entre 5 a 10 eV. Esta energía excede la energía del enlace SF₅-F de 3.5 a 4.0 eV, por lo que un impacto del electrón dominará el proceso de descomposición. La formación de iones negativos de SF₄ y otras moléculas con menor cantidad de F, origina la formación de diferentes moléculas neutras. El proceso de disociación por impacto de electrones conduce a las siguientes reacciones:

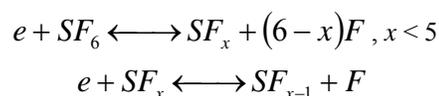


Tabla 2. Impurezas máximas permitidas en el gas SF₆ utilizado en equipos de potencia.

Contaminante	Nivel máximo permitido por IEC 376	Nivel máximo permitido por ASTM D-2472-00	Método de prueba
CF ₄ [% peso]	0.05	0.05	ASTM D- 2685 IEC 376
Aire expresado como O ₂ + N ₂ [% peso]	0.05	0.05	ASTM D- 2685 IEC 376
Contenido de agua [ppm]	15	8	ASTM D- 2029 IEC 376
Acidez máxima [Expresada como ppm HF]	0.3	0.3	ASTM D- 2284 IEC 376
Pureza mínima [% peso]	-----	99.8	ASTM D- 2685 IEC 376

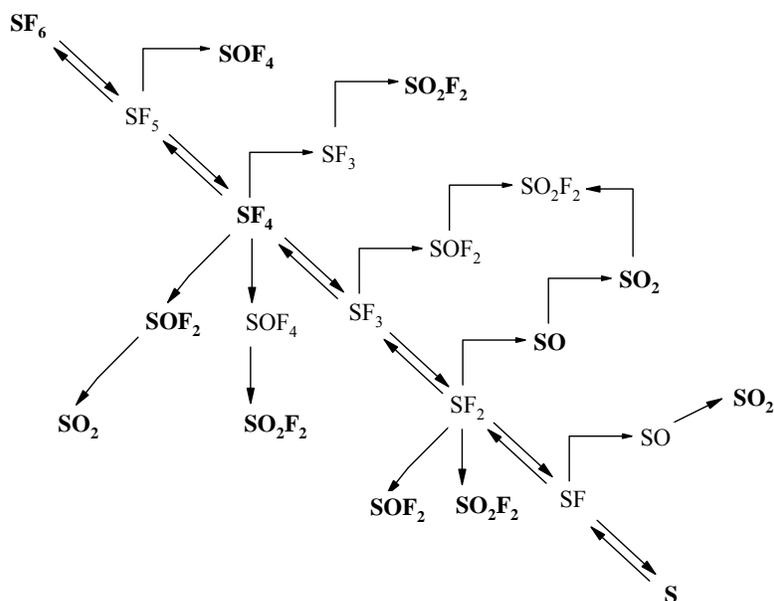


Figura 4. Esquema del mecanismo de descomposición del SF₆.

La disociación en varios pasos también contribuye a la formación de moléculas como SF₄ y SF₃. Una vez que se extingue el fenómeno eléctrico, y en ausencia de contaminantes en el gas o en la superficie, los productos de descomposición del SF₆ se recombinan rápidamente para formar otra vez SF₆. Asimismo, también se puede producir S₂F₁₀ compuesto altamente tóxico, pero muy inestable. En presencia de oxígeno o vapor de agua, los procesos de recombinación y formación de S₂F₁₀ se interfieren por reacciones secundarias para formar oxifluoruros de azufre, HF, y fluoruros metálicos (Casanovas y Casanovas 2005, Pepi *et al.* 2003, Suehiro *et al.* 2005). Se ha observado también la formación de otros iones y especies neutras, tales como SOF₃⁺, S₂O₂F₃⁺, SF₅O₂, SF₅O, los cuales pueden actuar como intermediarios para la producción de los oxifluoruros observados (Fress *et al.* 1981). La Figura 4, muestra un esquema general del mecanismo de descomposición del SF₆.

Además, existe otra serie de reacciones que forman subproductos sólidos. Debido a las drásticas condiciones que ocurren en las inmediaciones del arco eléctrico, se generan vapores metálicos a partir de los electrodos. Estos vapores reaccionan inmediatamente con los átomos de flúor libres para formar fluoruros metálicos, los cuales se precipitan en forma de polvos finos (Dervos *et al.* 2007).

Por otra parte, se usan resinas epóxicas y fenólicas, polietileno y teflón como aisladores sólidos dentro de los interruptores aislados con SF₆, y cuando se genera un arco eléctrico cerca de éstos se forman subproductos tales como CF₄, CO₂, SO₂F₂, SOF₂, CS₂ y productos de descomposición del polietileno y la

resina epóxica. En un primer paso, el material polimérico se piroliza durante el arco eléctrico, liberando productos tales como CH₄, CO₂, etc. Después, ocurre una reacción en fase gaseosa entre el SF₆, así como sus subproductos, y los productos orgánicos volátiles generados durante la degradación del polímero durante el arco eléctrico. Debido a que los materiales poliméricos absorben humedad, los productos volátiles contienen cantidades significativas de H₂O que puede influir en las reacciones que se desarrollan en la fase gaseosa. Resultados experimentales indican que el CF₄ es el producto predominante durante el arco eléctrico; sin embargo, los productos gaseosos de la degradación térmica de los polímeros favorecen las reacciones de hidrólisis de las especies formadas durante la descomposición del SF₆, lo cual resulta en la formación de HF y SOF₂, dos de los productos más abundantes y corrosivos. En la Tabla 3 se resumen el origen y cantidad de los principales subproductos de descomposición del SF₆ generados durante su operación normal en equipos de potencia debido a los fenómenos eléctricos ordinarios que se presentan dentro de los mismos (Task Force 23.10.01 1997).

Cabe resaltar que el gas SF₆ parcialmente descompuesto puede seguir conservando sus propiedades dieléctricas; sin embargo, por arriba de las concentraciones de los subproductos indicadas en la Tabla 4, el gas debe someterse a un tratamiento de purificación, para eliminar los subproductos formados, o bien, remplazarse con gas nuevo, en caso de no contar con la infraestructura necesaria para el tratamiento del gas contaminado.

Tabla 3. Productos de descomposición del SF₆.

Fuente de descomposición	Fórmula	Estado	Cantidad generada
Contactos calientes	SOF ₂	Gas	Baja
	SO ₂ F ₂	Gas	Baja
	SO ₂	Gas	Baja
Descargas parciales	HF	Gas	Baja
	SO ₂	Gas	Baja
	SOF ₄	Gas	Baja
	SO ₂ F ₂	Gas	Baja
	SOF ₂	Gas	Baja
	SF ₄	Gas	Baja
Arcos de maniobra sin carga	S ₂ F ₁₀	Gas	Baja
	SOF ₂	Gas	Baja
	SOF ₄	Gas	Baja
Arcos fuertes de maniobra	SO ₂ F ₂	Gas	Baja
	SF ₄	Gas	Media
	WF ₆	Gas	Media
	SOF ₂	Gas	Media
	CF ₄	Gas	Media
	HF	Gas	Baja
	CuF ₂	Sólido	Media
WO ₃	Sólido	Media	
Arcos internos	HF	Gas	Media
	SF ₄	Gas	Alta
	CF ₄	Gas	Media
	AlF ₃	Sólido	Alta
	FeF ₃	Sólido	Alta

Tabla 4. Valores máximos totales para los gases contaminantes en equipos eléctricos.

Contaminante	Nivel máximo tolerable	Nivel para SF ₆ regenerado
Aire y CH ₄	3% vol	2% vol
Humedad	200 ppm _v a 2 MPa	120 ppm _v comprimido
	800 ppm _v a 500 kPa	320 ppm _v a 500 kPa
	4000 ppm _v a 100 kPa	1600 ppm _v a 100 kPa
SF ₄ , WF ₆ , SOF ₄ , SOF ₂ , SO ₂ , HF, SO ₂ F ₂	100 ppm _v (arqueos) 2000 ppm _v (reacc. sec)	50 ppm _v total
CuF ₂ , WO ₃ , WO ₂ F ₂ , WOF ₄ , AlF ₃	No crítico	Sin valor
Carbón, partículas	Bajo	Sin valor
Aceites	Bajo	Sin valor

Tabla 5. Reactividad y toxicidad de los principales subproductos del SF₆.

Subproducto	Estabilidad química en la atmósfera	Producto final estable	Toxicidad TLV ⁽¹⁾ [ppm _v]	Toxicidad LC50 ⁽²⁾ [ppm _v]	Umbral de detección de olor ⁽³⁾ [ppm _v]	Tipo de aroma
S ₂ F ₂	D.R.	S, HF, SO ₂	0.5	0.8		Picante Corrosivo
SF ₂	D.R.	S, HF, SO ₂	5	---	---	Picante Corrosivo
SF ₄	D.R.	HF, SO ₂	0.1	---	---	Picante Corrosivo
SOF ₂	D.L.	HF, SO ₂	0.6 a 1.0	100	1.0 - 5	A huevo podrido
SOF ₄	D.R.	HF, SO ₂ F ₂	0.5	---	----	Como HF
SO ₂ F ₂	Estable	SO ₂ F ₂	5.0	2000-4000	---	Ninguno
SO ₂	Estable	SO ₂	2.0	100	0.3 - 1	Picante
S ₂ F ₁₀	---	---	0.01	---	---	---
HF	Estable	HF	1.8 a 3	50-100	2.0 - 3	Corrosivo
WF ₆	D.R.	WO ₃ , HF	0.1	50-100	---	Como HF
SiF ₄	D.R.	SiO ₂ , HF	0.5	50-100	---	Como HF
CF ₄	Estable	CF ₄	25 mg/m ³	---	---	Ninguno

D.R.: descomposición rápida.

D.L.: descomposición lenta.

¹TLV: valor límite de gas no degradado para 8 horas de exposición diaria.

²LC50: 50% de la concentración letal para ratones después de 60 min de exposición.

³Características del aroma referidas a los gases.

5. Efectos a la Salud del SF₆

Estudios realizados por compañías de la industria eléctrica han mostrado que no existen daños a la salud de la población asociados con las fugas “normales” de este gas de los interruptores en funcionamiento, y solo a elevadas concentraciones puede causar asfixia en sitios cerrados debido a su alta densidad (desplazo de oxígeno), corriendo el riesgo únicamente los trabajadores. No obstante, se ha comprobado que los subproductos de descomposición son altamente tóxicos y peligrosos al contacto con los operadores (Tsai 2007). Los subproductos gaseosos inhalados por periodos largos pueden causar edema agudo en laringe y pulmones llegando a provocar fallas cardíacas y de circulación sanguínea. Los subproductos sólidos son menos tóxicos que los gaseosos, pero debido a que son higroscópicos, absorben humedad formando compuestos ácidos altamente irritantes; por lo que si el subproducto sólido se pone en contacto con la piel o pulmones su puede producir una reacción de hidrólisis formar compuestos ácidos (HF principalmente) que causan fuerte irritación a los tejidos orgánicos. En la Tabla 5 se resume la reactividad y toxicidad de los principales subproductos de descomposición del gas SF₆.

6. Fuentes de contaminación del SF₆

Para que el gas SF₆ se descomponga, provocando los

problemas sociales, ambientales y toxicológicos descritos previamente, es necesario que existan trazas de oxígeno y vapor de agua. Una de las formas en que el gas SF₆ contenido en equipos eléctricos de potencia se contamina es durante el llenado y vaciado de los equipos, por la presencia de aire que puede encontrarse como residuo en las tuberías y válvulas, por fugas a través de sellos de las partes móviles mecánicas y en el sistema de sellado, por presión de aire residual en los compartimientos después de vaciado y antes de llenado con SF₆, y por errores de manejo. Para minimizar la contaminación por aire se requiere:

- Diseño apropiado de tuberías y válvulas.
- Procedimientos adecuados de manejo.
- Evacuación cuidadosa del aire de los compartimientos o tanques antes del llenado con SF₆ (se recomienda una presión residual de aire de < 100 Pa).

Por otra parte, también puede existir contaminación debido a que varios gases, tales como vapor de agua y agentes de limpieza, se absorben en la superficie de los componentes del equipo antes de su ensamble. Los materiales poliméricos contienen cantidades substanciales de humedad en su estructura, y es otra fuente importante de humedad dentro del sistema.

Estos contaminantes se liberan durante el llenado del equipo con SF₆ o cuando las condiciones de operación alcanzan temperaturas elevadas. La cantidad de sustancia liberadas es difícil de cuantificar ya que depende del tipo de material empleado, de los procedimientos de control de calidad, del ensamble y de los procedimientos de mantenimiento. Para el caso de la humedad, las muestras en campo de los equipos de operación indican que la concentración es típicamente unos cuantos cientos en partes por millón en volumen (ppm_v) y es principalmente determinada por el equilibrio de absorción con materiales poliméricos.

7. Caracterización del SF₆ y sus subproductos

La caracterización del SF₆ en laboratorio se realiza por cromatografía de gases o mediante espectroscopía de absorción en la región de infrarrojo, ya sea convencional o por transformada de Fourier. Un ejemplo de un análisis cromatográfico del SF₆ se presenta en la Tabla 6. Se observa que los subproductos pueden separarse apreciablemente bajo las condiciones de operación estipuladas con la excepción de los compuestos SOF₂ y SF₄ que tienen el mismo tiempo de retención (Bruno *et al.* 1979).

Por otra parte, la espectroscopia de absorción de infrarrojo muestra un enorme potencial para el

análisis de los subproductos generados de la descomposición del SF₆, ya que revela información acerca de la estructura molecular de un compuesto, y grupo funcional o átomos del compuesto presentan características de absorción bien definidas [Heise *et al.* 1997, Heise y Kurte 2003]. En la Figura 5, se presentan las bandas de absorción características para el SF₆ y diversos subproductos. De esta forma, una vez obtenido el espectro de infrarrojo de la mezcla gaseosa, y mediante técnicas analíticas y matemáticas (i. e. deconvolución) se puede establecer un análisis cualitativo y cuantitativo.

8. Regulaciones ambientales

En la actualidad, en México no existe ninguna regulación ambiental respecto al control de emisiones de SF₆. El único documento que menciona al SF₆ es el “*Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes*” (RETC), publicado el 3 de junio de 2004, y en él se definen y establecen las bases para la integración de la información de emisiones y transferencia de contaminantes. Sin embargo, en dicho documento únicamente se indica que para el caso del SF₆ se deben reportar las emisiones a partir de cualquier cantidad, sin fijar límites máximos de emisión.

Tabla 6. Condiciones de operación y resultados de un análisis cromatográfico del SF₆ con sus subproductos de descomposición.

Columna: Porapak Q Temperatura: 100°C Longitud: 3.048 m Gas de arrastre: Helio a 60 mL/min Diámetro: 0.97 cm Detector de Conductividad Térmica		
Componentes gaseoso	Tiempo de retención [min]	Límites de detección [% volumen]
Aire	2.6	1×10 ⁻³
CF ₄	3.1	1×10 ⁻³
CO ₂	4.6	2×10 ⁻³
SF ₆	5.7	3×10 ⁻³
SO ₂ F ₄	7.6	3×10 ⁻³
SOF ₄	8.2	3×10 ⁻³
SOF ₂	11.2	3×10 ⁻³
SF ₄	11.2	3×10 ⁻³
HF	16.5	3×10 ⁻³
SO ₂	24.5	4×10 ⁻³
S ₂ F ₁₀	60	5×10 ⁻³

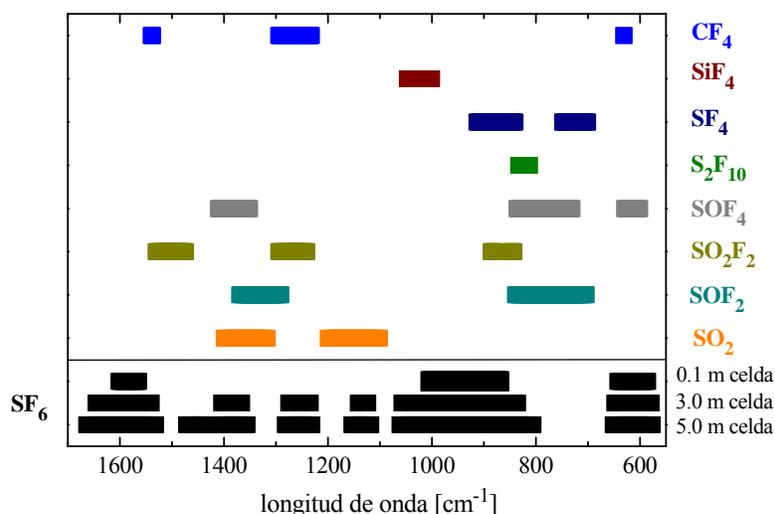


Figura 5. Longitudes de onda características para la absorción de energía IR del SF₆ y sus subproductos de descomposición.

Por otra parte, se ha sugerido, más no es obligatorio, que al final de su vida útil los equipos de potencia se envíen a compañías competentes para su confinamiento y disposición final. Algunas compañías y organizaciones inter-profesionales de la Industria Eléctrica; tales como EURELECTRIC, CAPIEL y CIGRE, han desarrollado procedimientos adecuados para el manejo, distribución, uso y reciclado del SF₆ y de los componentes que contienen SF₆ en los equipos, esto con la finalidad de disminuir las emisiones a la atmósfera.

9. Detección de fugas de SF₆

En la actualidad existen 2 principales fuentes de emisiones fugitivas de SF₆:

- Escape del gas durante el manejo, reciclaje, etc. Esto incluye derrames y venteo (se estima un 80% del total de fugas por este motivo).
- Fuga gradual de SF₆ de los transformadores y distribuidores de corriente. Esto se puede deber a tuercas y tornillos flojos, formación de grietas en los empaques, oxidación de cubiertas, etc.

La detección de una fuga de equipos eléctricos en operación es difícil debido a que este gas es incoloro e inodoro, y la mayoría de estos equipos son capaces de operar efectivamente hasta con un 10% de pérdidas de SF₆. En general, la fuga es muy lenta, del 1 al 3% anual, por lo que una vez formada, ésta puede continuar sin detectarse durante mucho tiempo, y cuando las pérdidas se notan (por fallas o bajo rendimiento del equipo), el equipo simplemente se recarga, ocasionando mayores emisiones durante el

manejo del SF₆ (Van der Zel 2002). Además, una vez recargado el equipo, y debido a que lo fuga pudo no haberse detectado, y por lo mismo no reparado, las emisiones de SF₆ continúan. El tamaño de los interruptores de potencia es variable, ya que depende de su voltaje, modelo y marca; sin embargo, la masa de SF₆ generalmente oscila entre 18 y 60 kg, por lo que fugas de SF₆ no detectadas, y por consiguiente no controladas, pueden ser de 1.8 – 6.0 kg antes de que el equipo comience a presentar problemas; esto representa emisiones de 43.0 – 143.4 Gg de CO_{2eq}. Por consiguiente, es muy importante desarrollar la habilidad de identificar oportunamente fugas como parte de las tareas de mantenimiento de los equipos, ya que esto reduciría las emisiones no controladas de SF₆, así como el riesgo de emisiones por pérdidas subsecuentes durante el manejo del gas cuando los equipos fueran recargados. El método de detección de fugas de SF₆ en equipos de potencia en operación más actualizado consiste en el uso de una cámara infrarroja. El principio de operación de la cámara se basa en que el SF₆ absorbe la luz infrarroja, pero no la emite. La fuente de radiación de la cámara se ajusta a una longitud de onda entre 9 y 11 μm, intervalo característico de absorción de luz infrarroja del SF₆. En la cámara se observa una pluma negra, la cual contrasta con un fondo claro en una imagen en blanco y negro.

CONCLUSIONES

El SF₆ es el gas con el mayor PTC de todos los GEI's, por lo que debe manejarse con cuidado en sus aplicaciones, de tal forma que se eviten sus emisiones a la atmósfera y disminuya el riesgo del

calentamiento global, ya que pequeñas cantidades en el ambiente contribuyen notoriamente a este fenómeno. La mayor aplicación de este gas es en la industria eléctrica debido a sus propiedades físicas, químicas y eléctricas, ya que es una molécula muy estable químicamente, su conductividad térmica es baja, por lo que amortigua los procesos térmicos que ocurren dentro de los equipos de potencia, y una excelente rigidez dieléctrica, por lo que es capaz de disipar los fenómenos eléctricos que se presentan durante la operación normal, tales como chisporroteo, descargas parciales, arco eléctrico, entre otros. Para una operación adecuada del gas dentro de los equipos de potencia, se debe evitar la presencia de aire y humedad, ya que éstos provocan una degradación del SF₆ produciendo compuestos tóxicos y con malas propiedades dieléctricas, con lo cual se puede producir una falla catastrófica en los equipos, y con esto liberar al gas y subproductos al medio ambiente,

con lo cual se incrementa el riesgo del calentamiento global y de la salud de los trabajadores, además de producir cortes en el suministro de la energía eléctrica. Por lo anterior, se debe monitorear la calidad del gas frecuentemente para evitar acumulación de subproductos que provoquen una falla, y detectar oportunamente operaciones anormales dentro del equipo de potencia. Asimismo, se deben evitar fugas no controladas durante la operación de los equipos usando técnicas y equipos comerciales para una detección oportuna de las fugas, siendo la más actual y efectiva la cámara de luz infrarroja. Finalmente, se deben establecer procedimientos seguros durante el manejo del gas, principalmente en las actividades de carga y descarga en los equipos de potencia, ya que aquí es donde se origina la mayor cantidad de emisiones, y es mayor el riesgo de contaminación con aire y humedad del ambiente,

REFERENCIAS

- Agrawal K. C. (2001). "Industrial Power Engineering Handbook". Butterworth-Heinemann, Woburn, MA.
- Bessede J. L., Huet I., Montillet G., Barbier E. y Micozzi J. (2004). Implementation of treatment & recovery of the SF₆ gas containing a high amount of decomposition products due to high voltage electrical interruptions. En "Memorias. 3rd International Conference on SF₆ and the Environment". Scottsdale, Arizona.
- Boggs S. A. (1989). Sulphur hexafluoride: Introduction to the material and dielectric. IEEE "Electrical Insulation Magazine". 5, 18 – 21.
- Bruno, G., Capezzuto, P y Cramarossa, F. (1979). Inorganic volatile fluorides obtained from electrical decomposition of sulfur hexafluoride in a quartz tube. "Journal of Fluorine Chemistry". 14, 115 – 129.
- Campbell, E. (2000). SF₆ Maintenance equipment fundamentals. En: "Memorias. 1st International Conference on SF₆ and the Environment". San Diego, California.
- Casanovas, A. M. y Casanovas, J. (2005). Decomposition of high-pressure (400 kPa) SF₆-CO₂, SF₆-CO, SF₆-N₂-CO₂ and SF₆-N₂-CO mixtures under negative dc coronas. "Journal of Physics D: Applied Physics". 38, 1556 - 1564.
- Christophorou, L. G., Olthoff, J. K. y Green D. S. (1997). "Gases for electrical insulation and arc interruption: Possible present and futures alternatives to pure SF₆". NIST Technical Note 1425. U. S. Government Printing Office, Washigton, D. C.
- Christophorou, L. G. y Dale, S. J. (2001). "Dielectric Gases". En: Encyclopedia of Physical Science and Technology (R. M. Meyers, Ed.). 3a ed. Academic Press, San Diego, CA,
- Dervos, C. T., Vassiliou, P. y Mergos, J. A. (2007). Thermal stability of SF₆ associated with metallic conductors incorporated in gas insulated switchgear power substations. "Journal of Physics D: Applied Physics". 40, 6942 – 6952.
- Fenhann, J. (2000). Industrial non-energy, non-CO₂ greenhouse gas emissions. "Technol. Forecasting and Social Change" 63, 313-334.
- Fihman, A. (1997). "El SF₆: características físicas y químicas". Cuaderno Técnico Schneider Electric No. 79, Francia.

Flores, R., y Muñoz-Ledo, R. (2009). El Programa de Mecanismo de Desarrollo Limpio como una alternativa para resolver el problema de cambio climático. "Ingeniería Química". 466, 160-168.

Heijmink, S. W., y Barentsz, J. O. (2007). Contrast-enhanced versus systematic transrectal ultrasound-guided prostate cancer detection: An overview of techniques and a systematic review. "European Journal of Radiology". 63, 310-316.

Heise, H. M., Kurte, R. y Fisher, P. (1997). Gas analysis by infrared spectroscopy as a tool for electrical fault diagnostics in SF₆ insulated equipment. Fresenius. "Journal of Analytical Chemistry". 358, 793-799.

Heise H. M., y Kurte R. (2003). Fourier-transform infrared spectroscopy for quantification of hydrogen fluoride in sulfur hexafluoride decomposed by partial discharges and sparks. Journal of molecular structure. "Journal of Molecular Structure". 651-653, 555-559.

IPCC (2001). "Climate Change". The Scientific Basis. (J. T. Houghton et al., eds.); Cambridge Univ. Press; Cambridge, UK.

IEC 376 (1974): "Specification and Acceptance of New Sulphur Hexafluoride" First Edition; (Supplement A-1973) (Supplement B-1974).

Kalantarinia, K., y Okusa, M. D. (2007). Ultrasound contrast agents in the study of kidney function in health and disease. "Drug Discovery Today: Disease Mechanisms" 4, 153-158.

Lauzon, D.C. (2004). A Novel Purification Process for Used SF₆ from Electrical Installations. En "Proceedings for the 3rd International Conference on SF₆ and the Environment". Scottsdale, Arizona.

Meshri, D. T. (2000). "Industrial applications of inorganic fluorides". En: Advanced Inorganic Fluorides. Synthesis, Characterization and Applications, (Nakajima, T., Žemva, B. y Tressaud, A., eds.). Elsevier Inc., Amsterdam.

O'Connell, P., Heil, F., Henriot, J., Mauthe, G., Morrison, H., Niemeyer, L., Pittroff, M., Probst, R., y Taillebois, J. P. (2002). SF₆ in the electric industry, status 2000. "Electra" 200, 16 – 25.

Pepi, F., Ricci, A., Di Stefano, M. y Rosi, M. (2003). Sulfur hexafluoride corona discharge decomposition: gas-phase ion chemistry of SOF_x⁺ (x=1-3) ions. "Chemical Physics Letters". 381, 168 - 176.

Pearmain, A. J., y Haddad, A. (2003). "Insulation". En: Electrical Engineer's Reference Book (16th ed.), (Laughton, A., y Warne, D. J., eds.). Elsevier Inc., Burlington, MA.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (2003). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC). Cambio Climático. Carpeta de información.

Ricketts, N. J. y Cashion, S. P. (2004). Hydrofluorocarbons as a replacement for sulphur hexafluoride in magnesium processing. En "Proceedings for the 3rd International Conference on SF₆ and the Environment". Scottsdale, Arizona.

Smythe, K. (2004). Trends in SF₆ sales and end-use applications: 1961-2003. En: "Proceedings for the 3rd International Conference on SF₆ and the Environment". Scottsdale, Arizona.

Suehiro, J., Zhou, G., y Hara, M. (2005). Detection of partial discharge in SF₆ gas using a carbon nanotube-based gas sensor. "Sens. Actuators" B 105.

Task Force 01 of Working Group 23.10. (1996). SF₆ and the global atmosphere. "Electra" 164, 121-131.

Task Force 23.10.01. (1997). SF₆ recycling guide: Re-use of SF₆ in electrical power equipment and final disposal. "Electra" 173, 43-71.

Trenmerth, K. E. (2004). "Encyclopedia of Energy". (Cleveland, C. J., ed.), Elsevier.

Tsai, W. T. (2007). The decomposition products of sulfur hexafluoride (SF₆): Reviews of environmental and health risk analysis. "Journal of Fluorine Chemistry" 128, 1345-1352.

Van der Zel, L. (2002). EPRI SF₆ Research past highlights and future plans. En "Proceedings for the 2nd International Conference on SF₆ and the Environment" San Antonio, Texas, USA.

Zhang, Z., Chen, X., Mazumdar, S., Zhang, T., y Chen, Q. (2009). Experimental and numerical investigation of airflow and contaminant transport in an airliner cabin mockup. Building and Environment. 44, 85-94.