



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
6 y 7 de Setiembre de 2018

Experiencia del Mantenimiento en Tratamiento Criogénico del Gas Aislante Hexafluoruro de Azufre (SF₆) de la GIS de Itaipu Binacional en condición de descomposición como mecanismo de recuperación y mitigación de desperdicios

Adrián E. Osorio, Douglas Ostroski, Ricardo Quiñónez, Eleceu Barz

Itaipu Binacional

Paraguay

RESUMEN

Es consagrado el uso del gas Hexafluoruro de Azufre (SF₆), como uno de los medios aislantes más utilizado alrededor del mundo en equipos de maniobra de subestaciones convencionales así como en las blindadas y aisladas GIS (*Gas Insulated Switchgear*). En la GIS de Itaipu se utilizan aproximadamente cien toneladas de este gas, los cuáles se encuentran distribuidos en seiscientos setenta y dos compartimientos estancos con gas presurizado para su aislación. El ciclo entre la adquisición y posterior descarte del gas SF₆ cumple varias etapas antes de su efectiva aplicación. El resultado de ensayos trae consigo las condiciones en las cuales el gas se encuentra, siendo los parámetros de referencia los asociados al grado de pureza, punto de rocío y humedad, además de la densidad del cilindro en el cuál se encuentra depositado en el momento de la recepción. Cuando una cantidad de gas nuevo llega a la central, es aprobado conforme criterios de la IEC 60376 para uso en el Área Industria, sólo después pasa a ser reserva disponible de la instalación. En la aplicación, sean por razones de mantenimiento periódico, aperiódico, o por indicación del monitoreo online de gas (SMG), el personal de Mantenimiento completa el gas en los compartimientos y se integra a la instalación. Este ciclo se repite y sólo se altera cuando ocurre un corto circuito interno, o cuando la pureza del gas se presente por debajo de los límites admisibles para uso. En el primer caso citado y considerado el más severo, la reposición del gas contaminado se efectúa posterior a las actividades de restablecimiento del compartimiento como retirada de piezas dañadas y residuos materiales y la efectiva limpieza resultantes de esa descarga. El segundo caso, y más leve, se realiza sustituyendo todo el gas por uno nuevo.

El tratamiento criogénico es un procedimiento complementario posterior a tratamiento con papel, alúmina activa y tamiz molecular, en el cuál el gas SF₆ contaminado es tratado a muy bajas temperaturas para recomponerse. Este método, ya viene siendo aplicado a compartimientos de la GIS desde 1999, pero se tenía como restricciones el bajo rendimiento obtenido (de 25 a 30%), además del uso prolongado de los coches de servicio. Con la introducción de modificaciones en el proceso, fueron posibles recientes experiencias positivas con rendimiento promedio de 77% y con pureza superiores a 99,5 % que indican el camino para el establecimiento de un proceso viable y sostenible para actividades de mantenimiento de rutina.

PALABRAS CLAVES

Subestación Blindada y Aislada a SF₆, Gas Hexafluoruro de Azufre, Tratamiento criogénico, Método de ensayo, Purificación de gas, Mantenimiento.

1. MASA DE GAS SF₆ INSTALADA

La Subestación Blindada y Aislada a Gas SF₆, más conocida por sus siglas en inglés como GIS (*Gas Insulated Switchgear*), cuenta con una cantidad considerable de equipos de maniobra, de protección contra surtos y de instrumentos transformadores para medición, supervisión, protección y monitoreo de la instalación encapsulados con el material aislante Hexafluoruro de Azufre, conocido como gas SF₆ por sus siglas químicas. En términos de cantidad de compartimientos [1, 2], se cuentan con todos aquellos que contienen masa (promedio) del mencionado gas aislante, la que se distribuye de porcentualmente en los siguientes:

- Tipo 1 – Interruptores de potencia (29.20%);
- Tipo 2 - Seccionadores de aislación y transformadores de corriente (2,56%);
- Tipo 3 - Pararrayos de Óxido de Zinc – ZnO (8,24%);
- Tipo 4 – Compartimiento de salida de barra (27,87%)
- Tipo 5 – Conexión con transformadores elevadores (1.52%)
- Tipo 6 – Compartimiento de salida de Línea (3.73%)
- Tipo 8 – Aisladores pasantes de doble densidad (0.16%)
- Tipo 9 – Compartimientos de Acople de Barra (0.6%)
- Tipo 10 – Compartimientos de barras (26.12%)

De acuerdo a los porcentajes citados arriba, es posible tener una idea de la dimensión de la instalación, no obstante, solamente una con una vista aérea, como se muestra en la figura 1, se percibe la envergadura de las instalaciones, ya que se cuentan con dos subestaciones similares, una en la frecuencia de 50 Hz (Paraguay) y otra en la frecuencia de 60 Hz (Brasil)

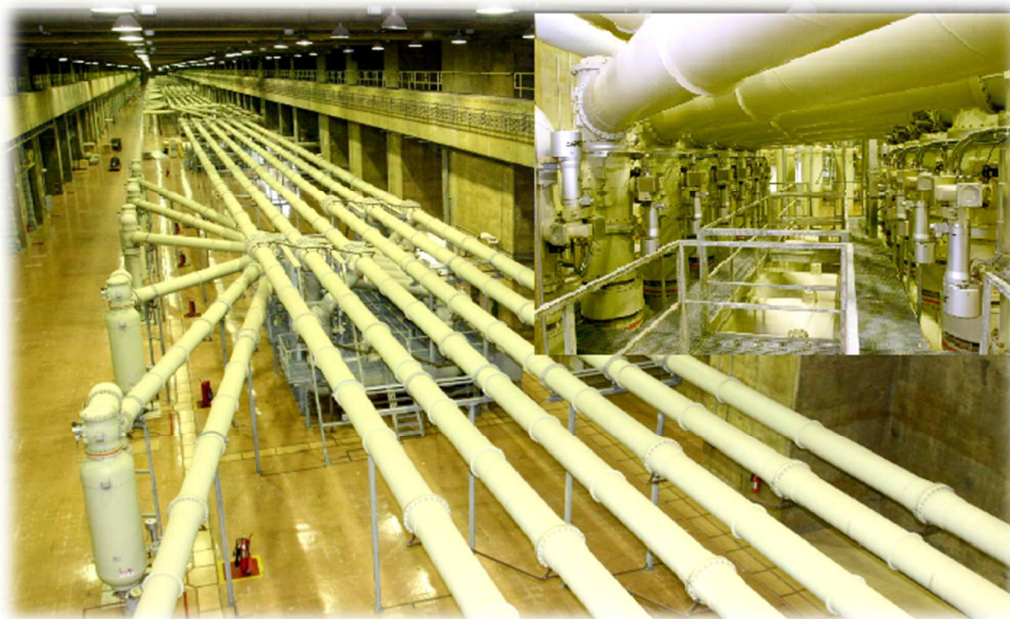


Figura 1: Vista general de la Subestación Blindada y Aislada a Gas SF₆ (GIS) de Itaipu

El personal de Mantenimiento Ejecutivo de la Itaipu Binacional cuenta con tareas periódicas establecidas y relacionadas a parámetros de Inspección y Control del gas Hexafluoruro de Azufre, de forma a garantizar las condiciones mínimas de rigidez dieléctrica requeridas para la operación de la instalación. Los aspectos a ser



XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
6 y 7 de Setiembre de 2018

considerados para establecer criterios de control y mantenibilidad del gas Hexafluoruro de Azufre se fundamentan en dos principales, el primero relacionado a la capacidad de absorción de humedad (higroscopía) y el otro relacionado a la densidad. El tercer aspecto está relacionado a la calidad (pureza) del gas, el cual está siendo registrado en los mantenimientos periódicos preventivos para un mejor control de este activo de la subestación.

Los parámetros de control relacionados a la densidad (pérdida de masa) y humedad en el gas, originaron la adopción por parte del Mantenimiento de un Sistema de Monitoreo online de Gas (SMG), el cual se encuentra en ejecución e implementación con previsión de monitorear grandezas como densidad, presión, temperatura y humedad del gas de los 672 compartimientos que posee la GIS. Adicionalmente, el personal técnico de Mantenimiento cuenta con una cámara basada en tecnología infrarroja para detección de pequeñas pérdidas de masa, con la intuición de evitar al máximo eventuales pérdidas a largo plazo.

2. INTERACCIÓN SF₆ VERSUS MEDIO AMBIENTE

El uso frecuente del gas Hexafluoruro de Azufre (SF₆) en subestaciones eléctricas se debe a sus peculiares y excelentes características dieléctricas [3], que para las empresas generadoras, transmisoras y distribuidoras de energía eléctrica hacen de él un material aislante de relevancia dentro de sus respectivas instalaciones. No obstante, existen alrededor del mundo investigaciones de empresas multinacionales sobre otros posibles materiales sustitutos que cuentan con características similares, pero que no superan aún todos los aspectos relacionados al SF₆, inclusive el factor económico. El perfil favorable al uso de este gas como aislante se fundamenta en sus características, entre ellas se destaca su estabilidad química como gas inerte [3], incoloro e inodoro, no tóxico (condiciones normales de presión y temperatura) y principalmente el hecho de no ser inflamable. Esta característica ignífuga del material hace que se torne en factor relevante en su aplicación en equipos interruptores debido a su capacidad de extinción y refrigeración de un arco eléctrico (*arc quenching*) en procesos de maniobras de aperturas y cierre en condiciones normales (con carga) o en condiciones extremas durante un cortocircuito. En condiciones normales de presión atmosférica y temperatura ambiente, este gas permanece estable, pero en aplicaciones industriales como en la GIS, el mismo está sometido a presiones positivas, y expuesto a las condiciones operativas de la instalación con la consecuente probabilidad de descargas eléctricas parciales y/o totales, los denominados cortocircuitos, o *flashover*, del término en inglés.

De acuerdo a la teoría, el incremento de temperatura interna en los compartimientos sellados y presurizados, el gas SF₆ acompaña las variaciones térmicas del ambiente donde se encuentra, que pueden ser externos (*outdoor*) o internos (*indoor*) como es el caso de la GIS de Itaipu. Una de las características de este gas es la capacidad de recomponerse naturalmente mismo a elevadas temperaturas, y no reaccionar con los demás componentes típicos utilizados en este tipo de instalación. El SF₆ posee una capacidad de soporte térmico de aproximadamente 500 °C, y delante de un aumento de temperatura hasta 150 °C no existe reacciones químicas de este gas con los componentes normalmente utilizados en una GIS, tales como metales, vidrios, resinas, gomas y resinas, y permanecen estables. Con temperaturas superiores a 200 °C algunos de los componentes mencionados pueden descomponerse con el SF₆ con efectos poco significativos, lo que solamente ocurre en temperaturas entre 400 y 600 [°C]. A pesar de la reversibilidad del gas SF₆ impreso de energía, como la térmica y/o electromagnética como es el caso de condiciones de descargas parciales y/o cortocircuitos, generan disociación del gas, además de reacciones secundarias con los componentes internos que pueden resultar en subproductos tales como fluoruros, sulfuros y óxidos metálicos, y algunos de ellos tóxicos en formato de polvo que se depositan en la parte inferior de los compartimientos, que requieren un tratamiento diferenciado para su efectivo descarte conforme premisa de la entidad en relación al trato con el medio ambiente.

Entre otras características, el gas SF₆ es considerado como un elemento de gran potencial en el proceso de calentamiento global, y según el protocolo de KYOTO [4] el uso del gas Hexafluoruro de Azufre es bastante conocido en los sistemas eléctricos y actualmente es el material de aislamiento más utilizado, pero lo considera

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
6 y 7 de Setiembre de 2018

en su Anexo A como parte de un conjunto de gases de efecto invernadero llamado elemento de potencial de calentamiento global (*GWP – Global Warming Potential*, del inglés), aunque su capacidad perjudicial para el medio ambiente considerada en el 3er Informe de Evaluación de la CMNUCC es considerado como GWP 22.200, pero su contribución total, junto con el grupo de los Halocarbonos, es de alrededor del 1% entre la contribución total de los grupos restantes, debido a esto, Itaipu es consciente de las preocupaciones sobre los usos y el manejo de este gas, y una de las herramientas más recientemente implementadas es la implantación de un sistema de monitoreo online del gas aislante con el objetivo de observar y actuar de forma preventiva en las emisiones provenientes de todos los compartimientos de la instalación (GIS), y este proyecto tiene previsión de alcanzar el 100% de la instalación (GIS) en el 2019.

En el ciclo de control del gas Hexafluoruro de Azufre, que abarca desde su recepción hasta el correspondiente descarte, el personal técnico de la Itaipu inicia con la verificación del material cuando entregado en los depósitos de recepción de materiales (Almacenes), y de acuerdo con criterios de control de calidad [4] estimados por norma, el mismo debe poseer parámetros mínimos de aceptación, los cuáles se basan en los siguientes contenidos: Aire, Tetrafluorometano (CF_4), cantidad de agua (H_2O), aceite mineral y acidez total expresada en términos de ácido fluorhídrico (HF) conforme indicado en la tabla abajo extraída de la norma IEC 60376. Y de acuerdo con esta norma, adicionalmente el gas debe cumplir el requisito mínimo de pureza en torno del 99.7% en relación a su peso en un contenedor (valor medido en la fase líquida), existiendo varios métodos para su comprobación. Cabe destacar que existen valores indicados en la IEC 60376 definidos para gas nuevo, y que los parámetros para evaluar un gas usado son diferentes de los indicados por esta norma, y se cuentan con dos normas para recuperación, la IEC 60480, y para el reciclaje y el descarte la IEC 61634.

Para el caso de gas en servicio utilizado en compartimientos energizados, los criterios para controlar las condiciones del gas SF_6 se basan en los siguientes parámetros conforme recomendación del Grupo de Trabajo B3.40 de Cigré [5], y se destacan: Concentración del gas (en % vol SF_6), Humedad del gas en °C del punto de Escarcha/Punto de Rocío, Concentración de SO_2 (en $\mu l/l$ ppmv), presión y temperatura del compartimiento, y la temperatura ambiente para referencia, los cuáles vienen siendo registrados por el personal técnico del Mantenimiento de la Itaipu para la correspondiente evaluación y toma de decisiones conjunta con la Ingeniería de Mantenimiento para las consecuentes acciones correctivas conforme necesidad.

3. MECANISMOS DE CONTAMINACIÓN DEL SF_6

Conforme descripción en [6], a pesar de la complejidad del proceso de descomposición de este gas, son conocidos algunos de los mecanismos más comunes de descomposición del gas SF_6 , y una de las fuentes principales de energía que proporcionan este fenómeno se deben a descargas eléctricas provenientes de arcos eléctricos generados por descargas (*flashover*), ya sean por descargas parciales y/o resultantes de efecto corona. Los principales límites admisibles para el gas son ilustrados en la tabla abajo.

Tabla 1: Límites máximos admisibles de productos de descomposición de SF_6 en uso (IEC 60480)

Impurity	Maximum acceptable levels	
	Rated absolute pressure <200 kPa ^a	Rated absolute pressure >200 kPa ^a
Air and/or CF_4	3 % volume ^b	3 % volume ^b
H_2O	95 mg/kg ^{c,d}	25 mg/kg ^{d,e}
Mineral oil	10 mg/kg ^f	
Total reactive gaseous decomposition products	50 $\mu l/l$ total or 12 $\mu l/l$ for (SO_2+SOF_2) or 25 $\mu l/l$ HF	

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
6 y 7 de Setiembre de 2018

Considerando la peor condición, la de arco eléctrico con las altas temperaturas asociadas, provoca la disociación del SF₆ en SF₄ dando lugar a reacciones químicas todavía en la fase gaseosa con el agua y oxígeno existentes en los compartimientos a pesar de la estanqueidad y las menores proporciones si comparadas a la masa total del gas contenida, y se desencadenan otras reacciones químicas [7] formando subproductos de gas en descomposición en mayor parte formado por fluoruros compuestos de azufre y óxidos de azufre. Obviamente la proporción de las concentraciones de los productos de descomposición será dependiente de la mayor o menor magnitud de la descarga eléctrica, mismo siendo estas del tipo parciales o eventuales chispas.

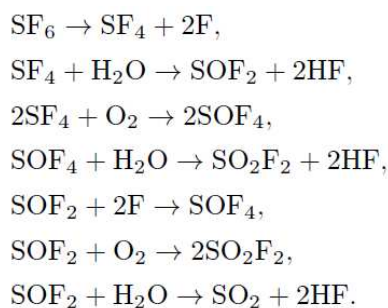


Figura 2: Reacciones químicas del SF₆ debido a descargas parciales (T. Chenafa et al, 2017)

Con el advenimiento de nuevas tecnologías, es posible la verificación de algunos de los subproductos del gas utilizando la ya conocida y convencional cromatografía gaseosa, pero en el área práctica de campo el más utilizado y adoptado por el Mantenimiento de la Itaipu es la del control de calidad del gas con el uso de analizadores portátiles, dotado además de un dispositivo (sensor) para medir la concentración de dióxido de Azufre (SO₂), debido a su perfil oxidante, el cual podría causar internamente a los componentes metálicos en presencia de elevada humedad a largo plazo.

4. PROCEDIMIENTOS Y TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN

El proceso de descomposición del Hexafluoruro de Azufre (SF₆) es considerado de carácter reversible, ya que este gas posee la capacidad de auto regenerarse, solo que de forma limitada y de bajo rendimiento. De acuerdo con lo expresado en [8], la formación de productos de descomposición del gas provienen mayormente de las interrupciones de corriente de maniobras y descargas parciales como parte del proceso natural de desgaste de la calidad del Hexafluoruro como material dieléctrico.

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
 6 y 7 de Setiembre de 2018

 Tabla 2: Reacciones químicas de descomposición del SF₆ de acuerdo a tipo de causas (M.S. Naidu, 2004)

<i>Cause</i>	<i>Compound</i>	<i>State</i>	<i>Rate of production</i>
Partial Discharge	SOF ₂	Gaseous	Low
	SOF ₄	Gaseous	Low
	SO ₂ F ₂	Gaseous	Low
	SO ₂	Gaseous	Low
	HF	Gaseous	Low
Normal circuit breaker arcing WF ₆	CF ₄	Gaseous	Medium
	CuF ₂	Solid	Medium
	Gaseous	Medium	
Arcing due to fault FeF ₃ SF ₄	AlF ₃	Solid	High
	Solid	High	
	Gaseous	High	

Como ya mencionado, para los casos de descargas plenas (*flashover*), una parte del gas se convierte en material sólido (fluoruros sólidos en forma de polvo) que son retirados de los compartimientos por el personal de mantenimiento cuando ocurren eventos de esta naturaleza, y parte del material en estado gaseoso se retira por medio de coches de servicio para su correspondiente almacenamiento e identificación. Adicionalmente, la Ingeniería de Mantenimiento de la Itaipu cuenta con procedimientos y criterios establecidos para el tratamiento y recuperación del gas en descomposición de la Subestación Blindada, basadas en las orientaciones de la norma IEC 60480 [9] para tratamiento, recuperación y descarte del gas SF₆ en servicio, donde se menciona que las impurezas del gas sobrevienen, además de las ya mencionadas por razones de descarga, aquellas oriundas del propio manejo del gas durante servicio y mantenimientos.

Como uno de los procedimientos a mencionar, y parte de las actividades de rutina del mantenimiento de la GIS, se encuentran los denominados Mantenimientos Preventivos Periódicos, que registran de forma periódica el estado de pureza del gas, proporción de humedad del compartimiento (ppm) y proporción de SO₂, y presión compartimiento vía dispositivo portátil. A través de sensores acoplados a los compartimientos se registran la densidad y la humedad online para aquellos compartimientos que ya cuentan con el sistema de monitoreo. Como segunda etapa de control, y cuando la pureza se presenta inferior al límite de referencia (< 97%), son utilizados los ensayos típicos de cromatografía gaseosa (CG) para establecer el método apropiado para reducción de las impurezas encontradas.

Las acciones del mantenimiento se basan en técnicas para la eliminación de las impurezas mencionadas, y para el tratamiento de la humedad se menciona la técnica de circulación a través de filtros (alúmina activa y tamiz molecular) en dos modalidades, con el equipo fuera de servicio (desenergizado) y con el equipo en servicio manteniendo un caudal bajo de circulación por razones de seguridad del proceso. Para las impurezas químicas, son aplicados filtros del tipo tamiz molecular, con el cuál puede ser obtenida una buena reducción de las mismas. No obstante, y conforme experiencia, el resultado final con la cromatografía gaseosa, sólo el aire y el CF₄ no son factibles de eliminar por completo. Para el gas residual mencionado conteniendo esos dos elementos, se utiliza el proceso criogénico, que consiste en el tratamiento del gas a bajas temperaturas para la recomposición del SF₆ separando los elementos contaminantes con cierto rendimiento. Como no es posible recuperar el 100% del gas, un residuo mínimo es destinado para descarte por incineración a altas temperaturas para evitar contacto con el medio ambiente debido al potencial elevado de GWP que este gas posee.

5. EXPERIENCIAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

La GIS de Itaipu ya ha superado los 30 años de operación desde el inicio de su puesta en servicio a inicios de la década de 80, y gracias a la experiencia de los técnicos e ingenieros de esa época, han dejado como legado a la actual generación de profesionales una instalación en condiciones operativas favorables, aptas para recibir mejorías y actualizaciones tecnológicas viables. No obstante, existen muchos desafíos a ser superados a cuenta de la edad avanzada de la instalación y que están siendo evaluadas para Implementación, de forma a dar continuidad a la producción de la energía eléctrica que demandan ambos países condóminos, y la GIS de Itaipu como nexo principal entre la generación y transmisión de la central posee esa misión y objetivos a cumplir. Con esta afirmación, a lo largo de la operación de la subestación, se han analizado y ensayado las posibilidades existentes de viabilizar el reciclado “*in situ*” del gas contaminado acumulado en la instalación y previendo recuperar lo máximo para que pueda ser reutilizado, de forma a que una cantidad mínima (no tratable) sea efectivamente descartada, o sea, destinada para su correspondiente incineración.

Conforme criterios de la norma IEC 60480, el gas Hexafluoruro de Azufre debe poseer ciertos límites de impurezas (valores indicados en la Tabla 1) para ser pasibles de reciclado. Considerando este horizonte, fueron realizados ensayos de tratamientos con gas contaminado utilizando como proceso inicial filtros activos de papel y alúmina con el objetivo de eliminar impurezas con moléculas superiores que estos filtros pudiesen retener.

Se menciona que en primer lugar fue instaurado un proceso base de tratamiento criogénico del gas previamente filtrado en un circuito simple de circulación de gas utilizando un cilindro de 50 Kg pasando por un coche de servicio de gas y destinado a un contenedor, y como primer resultado fue posible retirar contaminantes como CF₄, algunos trazos de fluoruros, pero la práctica en campo quedó inviable debido al bajo rendimiento obtenido, además de los costos elevados.



Figura 3: Resultados de ensayos de proceso base en la GIS de Itaipu

Fueron prospectados en el mercado mundial soluciones aplicando la misma tecnología, pero la relación cantidad de masa para tratar, versus el costo del dispositivo inviabilizaron el proceso de adquisición. De forma paralela fueron realizados ensayos internos con infraestructura propia disponible en la central tales como nitrógeno líquido, freezer horizontal y finalmente un freezer vertical industrial, cuyos resultados se pasan a describir.

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
6 y 7 de Setiembre de 2018

La técnica con nitrógeno líquido trajo consigo que un enfriamiento previo de la masa a ser tratada incide directamente y significativamente en rendimiento del proceso. Como desventajas, y por ser una solución `domestica`, se menciona la falta de uniformidad de la distribución de la temperatura, así como su control efectivo y rigurosas normas y procedimientos a ser cumplidos para la efectiva utilización de tratamiento en campo.



Figura 4: Resultados de ensayos de proceso con nitrógeno líquido

Recientemente fueron realizados ensayos en la instalación utilizando un freezer horizontal con capacidad de abrigar dos pequeños cilindros conteniendo gas contaminado cuyos resultados se muestran en la figura abajo. En este caso fueron superadas las dificultades citadas en el proceso anterior ya que la temperatura y los costos de una posible implementación eran menores, sin embargo presentaba restricciones en relación al rendimiento del refrigerador y restricciones de utilizar cilindros de 50 kg como estimado.

Ensayo	Cilindro	Pureza inicial	Temperatura inicial	Yiempo vacío	Rendimiento	Pureza Final
1	1	<80%	-15°C	3 min	46,5%	99,8%
	2	<80%	-15°C	3 min	33,3%	99,9%
2	1	95,8%	-15°C	3 min	55,2%	100%
	2	95,8%	-15°C	3 min	55,6%	99,9%
3	1	95,8%	-15°C	30 s	70,0%	99,9%
	2	95,8%	-15°C	30 s	70,0%	99,7%



Figura 5: Resultados de ensayos con criogenia en freezer horizontal en la GIS

No obstante, este ensayo generó subsidios para prospección de un refrigerador industrial del tipo vertical, el cual sería adquirido por la Itaipu con base en los resultados favorables del freezer horizontal, desde que pudiese ser adaptado para su utilización en la GIS. Las muestras fotográficas y respectivos resultados se muestran a seguir.

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
6 y 7 de Setiembre de 2018

Tabla 3: Resultados obtenidos con freezer industrial vertical para tratamiento criogénico

Ensayo	Cilindro	Pureza Inicial	Temperatura Inicial	Tempo vacío	Rendimiento	Pureza Final
1	1	<80%	-35°C	2 min	73%	99,40%
	2	<80%	-35°C	2 min	74%	99,80%
2	1	<80%	-35°C	1 min	76%	97,80%
	2	<80%	-35°C	1 min	77%	99,90%
3	1	97,80%	-35°C	2 min	83%	99,80%
	2	<80%	-35°C	2 min	80%	99,60%
4	1	90,70%	-35°C	3 min	83%	99,30%
	2	<80%	-35°C	3 min	82%	99,60%



Figura 6: Resultados de ensayos con criogenia en freezer vertical industrial en la GIS

Por las ventajas de costo, rendimiento, adaptabilidad y principalmente la distribución uniforme de la temperatura en ambos cilindros de forma simultánea, este dispositivo fue adquirido por la Itaipu para la realización periódica de tratamiento de gas de forma periódica y de acuerdo a la demanda no solo de la GIS como de las eventuales demandas de instalaciones adyacentes a la Itaipu como la Subestación Margen Derecha. Como comentario adicional, y para un mejor control de la masa tratada fue adquirida una balanza de precisión de forma que los valores queden debidamente registrados.

6. CONCLUSIONES

Entre los procesos de tratamiento y de recuperación mostrados, el de tratamiento criogénico utilizando el freezer vertical fue el que mejor se ha presentado en términos de rendimiento, masa recuperada, así como la pureza resultante del gas conforme establecido por la IEC 60480, siendo que este proceso reduce a un valor mínimo en masa (por volumen) de la cantidad de gas contaminado (sin rendimiento) para descarte. A seguir se destacan algunos de los números comparativos con los métodos experimentados.

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
6 y 7 de Setiembre de 2018

Ensayos	Pureza Inicial	Temperatura Inicial	Tempo de Vacío	Rendimiento (mf/mi)	Pureza Final
Método Base	95,8%	+29,5°C	3min.	30%	100%
Método con Nitrógeno	95,8%	-50°C	3min.	80%	99,5%
Método con Freezer horizontal	95,8%	-15°C	3 min	55,6%	99,9%
Método com Freezer Industrial	80% - 97%	-35°C	2 – 4 min.	77%	99,6%

Entre los logros de este proceso se encuentra la cantidad total de gas recuperado, ya que el rendimiento que se indica en la cuadro arriba se refiere al proceso en sí, es decir, el porcentaje es relativo a la masa total de cada dos cilindros introducidos en el freezer, siendo que la masa total de gas SF₆ contaminado era 1.163 Kg y al final de varios procesos de tratamiento la masa recuperada fue de 1.018 Kg con pureza superior a los 99,5 %, además de un rendimiento próximo a los 77%. Así también, se menciona que la masa residual es de 145 Kg, y será destinada para el correspondiente descarte.

Cabe destacar que la elección de este método (criogénico con uso de freezer vertical) no supera algunos de los números (*hits*) de los otros métodos, pero el conjunto de resultados, aliados a relativos bajo costo, proceso de bajo riesgo físico y con la facilidad de accesorios para inserción de cilindros utilizados por la GIS que fue aprobado para tornarse en herramienta de apoyo en la reducción de costos para eventuales compras futuras del gas SF₆, sin mencionar los beneficios relacionados al ambiente evitando un costo adicional para el efectivo descarte.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Desenho 6380-DI-19511 – Casa de Força, Extra-Alta Tensão, Subestação Isolada a Gás SF₆, 50 Hz, Equipamentos e Compartimentos de Gás, Revisão Ano 2007.
- [2] Desenho 6380-DI-19512 – Casa de Força, Extra-Alta Tensão, Subestação Isolada a Gás SF₆, 60 Hz, Equipamentos e Compartimentos de Gás, Revisão Ano 2007
- [3] Solvay Special Chemicals, Sulfur Hexafluoride SF₆, Profile, Handling and Management, Ed. 1997.
- [4] IEC 60376, Specification of technical grade sulfur hexafluoride (SF₆) for use in electrical equipment, 2nd. Edition, 2005.
- [5] Cigré SF₆ Measurement Guide, Working Group, B3.40, April 2018
- [6] Byproducts of Sulfur Hexafluoride (SF₆), Use in the Electric Power Industry, U.S. Environmental Protection Agency Office of Air and Radiation, Global Programs Division, 2002.
- [7] T. Chenafa, B. Zeginia, A. Benghia, Diagnostic of the Decomposition of Sulfur Hexafluoride (SF₆) in Gas-Insulated Equipment due to Partial Discharges, ACTA PHYSICA POLONICA A, Vol. 132, No. 3-II, 2017.
- [8] Naidu, M.S., Gas Insulated Substations, Department of High Voltage Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, JK International Publishing House Pvt. Ltd., 2008.
- [9] IEC 60480, Guidelines for the checking and treatment of sulfur hexafluoride (SF₆) taken from electrical equipment and specification for its re-use.