



Aspectos Relevantes del Mantenimiento Predictivo del Gas Aislante Hexafluoruro de Azufre (SF₆) de la GIS de Itaipu Binacional

Adrián E. Osorio, Ariel Guerrero, Diego Gamarra, Víctor Franco, Sergio Morel, Jorge Duré

Itaipu Binacional, Fundación Parque Tecnológico Itaipu Paraguay

Paraguay

RESUMEN

El gas Hexafluoruro de Azufre (SF₆), es uno de los materiales aislantes más utilizados en equipos de maniobra de subestaciones aisladas, tal es el caso de la GIS (*Gas Insulated Switchgear*) de la Itaipu Binacional, así implementado también en determinados equipos de subestaciones convencionales. Como la edad de esta instalación supera los 30 años, la división de Ingeniería de Mantenimiento Eléctrico se avocó en la búsqueda de un sensor que pudiese informar de forma periódica (*online*) los principales parámetros del gas y monitorear su condición dieléctrica de forma a que el Mantenimiento Ejecutivo pase a actuar predictivamente, reduciendo intervenciones no programadas, o en el peor de los casos, mantenimientos correctivos. El factor que aceleró esta búsqueda fue el programa de cierre hermético de las sesenta celdas de los transformadores elevadores (cota 108), que impediría físicamente la medición de presión de los compartimientos presurizados conectados a los bujes de 500kV de estos equipos, siendo el seleccionado uno que extraía del gas las siguientes grandezas: densidad, temperatura y presión. Posteriormente, el fabricante anunció el lanzamiento de un nuevo sensor que además de obtener las mismas grandezas citadas mediría además la humedad del gas, que era más interesante desde el punto de vista de la Ingeniería de Mantenimiento.

Una vez comprobada la eficiencia y precisión de las mediciones de este sensor a través de ensayos y comparaciones con instrumentos de campo utilizados por el personal de Mantenimiento Ejecutivo, era necesario superar un segundo obstáculo, ya que este sensor poseía salida a 4 hilos, un par para alimentación y otro para comunicación, lo que implicaba en lanzamiento de nuevos ductos y cables en una instalación próxima de la saturación, incurriendo en elevación de costos del proyecto. Este inconveniente fue presentado al personal del CIAC (Centro de Innovación, Automatización y Control, de la Fundación PTI Paraguay), y fueron propuestas dos soluciones que podrían evitar el lanzamiento de nueva infraestructura, una de ellas inalámbrica, y otra más atractiva que utiliza la tecnología PLC (*Power Line Communication*) basada en el uso de transmisión de datos por el mismo par de cables de alimentación. Esta solución fue la escogida para el sistema de monitoreo debido a la existencia de un par de cables de reserva localizado en los Relés de Densidad de Gas (RDG) destinados a la protección de cada compartimiento estanco, y próximo al punto destinado a utilizar este sensor, evitando sobrecostos.

La solución desarrollada por el CIAC, compuesta de hardware y software, se inicia en nodos electrónicos acoplados mecánicamente a los sensores permitiendo la comunicación de los datos hasta el servidor. En este trayecto, las informaciones pasan por nodos esclavos y concentradores, siendo que cada sensor posee un nodo esclavo, el cuál se encarga de la lectura de datos. Los nodos esclavos de un mismo vano se conectan a un nodo concentrador, y éste se encarga de retransmitir los datos leídos al servidor.



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

**XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016**

La parte relacionada a la supervisión desarrollada en software libre, consiste en firmware de los nodos, y dos programas independientes se ejecutan en el servidor, el primero se encarga de la adquisición e interpretación de datos, almacenamiento en gestor de base de datos, activación de alarmas, y otras tareas. El segundo programa brinda al usuario una interfaz para configuración del sistema y visualización de datos en forma de gráficos, tablas y alarmas.

Los aspectos relevantes de los resultados y beneficios obtenidos del despliegue de este sistema para el mantenimiento de la instalación serán detallados en el artículo y podrán ser explyados en la presentación.

PALABRAS CLAVES

Subestación Blindada y Aislada a Gas SF₆, *Gas Insulated Switchgear*, Mantenimiento Predictivo, Gas Hexafluoruro de Azufre, Equipos de maniobra, Mantenimiento Periódico, Mantenimiento Correctivo, Monitoreo Online, Sensor de gas SF₆, *Power Line Communication*, Software Libre.

1. PERFIL DE LA INSTALACIÓN

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 no sólo de equipos de maniobra y de surtos, así como de instrumentos transformadores para medición, supervisión, protección y monitoreo. Entre los cuáles se listan los siguientes equipos: Interruptores trifásicos de potencia con accionamiento monopolar (54), Seccionadores de aislación (128), Seccionadores de puesta a tierra (154), Transformadores de corriente (414), Transformadores de potencial (24), Pararrayos de Óxido de Zinc – ZnO (132), cuenta con más de 7.500 metros de barras, y aproximadas 110 toneladas de gas Hexafluoruro de Azufre (SF₆).

Con los números notables citados arriba, es posible tener una idea de la dimensión (Figura 1), así como de la importancia que esta instalación posee dentro de la central, y que cuenta con la doble atribución de maniobrar máquinas y líneas con el objetivo de interconectar generación y transmisión para el suministro de la energía eléctrica a ambos países condóminos, Brasil y Paraguay.



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

Conforme visto, los números relacionados a la aislación de los compartimientos con el gas SF₆ son considerables, además de ello, este material requiere un control periódico a respecto de su condición dieléctrica, característica relacionada a niveles de humedad y densidad. Para ello, el personal técnico del Mantenimiento realiza actividades periódicas preventivas y correctivas desde la puesta en servicio de la instalación en la década de los 80, y con tecnologías de la época para la medición de puntos de rocío y control indirecto de la densidad, parámetros que definen las condiciones operacionales aceptables de rigidez dieléctrica de un determinado compartimiento. A lo largo de los años estos instrumentos fueron evolucionando conforme avance de las tecnologías, y en la actualidad siguen siendo utilizados por el personal de Mantenimiento.

El Punto de Rocío (del inglés *Dew Point*) es definida como la temperatura a la que el vapor de agua (estado gaseoso) presente en el aire ambiente, o en este caso en el ambiente estanco del compartimiento presurizado con el gas SF₆, pasa al estado líquido a través de gotas. El instrumento registra la temperatura (por lo general negativa en grados centígrados) y estima la cantidad en ppm (partes por millón) existente en el compartimiento.

Por otro lado, el parámetro relacionado a la densidad del gas en el compartimiento se reviste con la misma importancia debido a que existe una densidad asociada a la rigidez dieléctrica estimada para la presión de trabajo estimada para la clase de tensión en 500 kV. El Mantenimiento se utiliza de una tabla de referencia para estimar si la densidad definida para el determinado compartimiento se encuentra dentro de los parámetros de operación, caso contrario, se procede al correspondiente llenado restableciendo su condición operativa [1].

2. ÁMBITO DE LA PROBLEMÁTICA

El área de instalación distribuida de la GIS se inicia desde la salida de los aisladores pasantes de los transformadores elevadores instalados en la cota 108 (Figura 2), pasando por los vanos de equipos de maniobra de la cota 128, y culmina con los vanos de salida de línea de la cota 144 en los aisladores pasantes de SF₆/Aire en conexión con las líneas aéreas convencionales direccionadas hacia ambas márgenes del río Paraná para la correspondiente transmisión.



Figura 2: Galería de los transformadores elevadores con paredes corta-fuego herméticas – Cota 108

Debido al evento de falla con explosión de un aislador de alta tensión de uno de los sesenta transformadores elevadores en el año 2006 (de público conocimiento), la Itaipu adoptó el cierre hermético de las celdas de estos transformadores (conforme figura 3) como solución definitiva por cuestiones de seguridad física del personal. Anteriormente a este problema suscitado, estas celdas contaban con puertas corta-fuego móviles que permitían el acceso del personal técnico para inspección visual, específicamente para verificación de la presión en el compartimiento tipo 5 que realiza la aislación estanco en SF₆ del aislador en 500kV de cada transformador.

Con estas restricciones físicas de acceso se impide la realización de lecturas de la presión del gas SF₆ en los compartimientos tipo 5 que conectan los transformadores elevadores a la GIS. Surge así, la necesidad de obtener esa medición de forma remota, haciendo que la Ingeniería de Mantenimiento realice una prospección de mercado para realizar las correspondientes mediciones de este compartimiento en las actuales condiciones, y fueron consultados varios fabricantes de subestaciones blindadas tales como ABB, SIEMENS, TOSHIBA y ALSTOM, así también fueron consultados fabricantes de sensores, tales como: TRAFAG, WIKA, ENDRESS+HAUSER,

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

HONEYWELL y MICHELL, para la obtención de informaciones a respecto de una solución plausible y viable tanto técnica como financiera para esta demanda.

Entre los fabricantes de blindadas consultados no hubo un consenso relacionado a una solución a corto plazo por las particularidades del asunto. Por otro lado, surgió del sector de los fabricantes de sensores, específicamente de la empresa WIKA, el lanzamiento al mercado (año 2013/2014) de un sensor similar al existente en la GIS (ver figura 3), que podría extraer del gas encapsulado 4 grandezas en un único sensor, tales como densidad, temperatura, presión y humedad. Esta última grandezza fue el diferencial de opción por la que la Ingeniería de Mantenimiento inició el contacto para realizar una experiencia en las instalaciones de la ITAIPU, la cual fue considerada satisfactoria desde el punto de vista técnico por su performance y estabilidad, y posteriormente a modificaciones en el proyecto de encapsulado para adecuar la conexión entre el sensor y el compartimiento a ser monitoreado[2].



Figura 3: Sensor seleccionado para monitoreo de compartimiento presurizado en la GIS Itaipu

Además de las modificaciones citadas, se presentaron otras condiciones de contorno en relación a las mediciones a ser obtenidas de los compartimientos tipo 5 de las celdas de los transformadores, entre ellas se mencionan: posibilidad de lanzamiento de nuevos cables para alimentación y comunicación de los sensores, blindaje mínimo para el sensor y respectivo sistema de comunicación IP67 (condiciones ambientales y de ensayos), capacidad de resistir a interferencias electromagnéticas, temperaturas variadas y agua (ensayos de sistema contra incendios de los transformadores), y adicionalmente todo el sistema debía poseer como cualidades mínimas: Transmisión de datos y configuración remotas sin necesidad de acceder físicamente a la celda con el transformador energizado; Estabilidad de las informaciones a ser emitidas por el sensor, reducida necesidad de intervención en el sistema de sensores por parte del Mantenimiento y medir por los menos las mismas grandezas que el RDG existente (densidad del gas compensada por temperatura ambiente).

De acuerdo a la existencia de otros dos sistemas ya instalados en la GIS en asociación con la Fundación PTI-BR, y con la característica de esta demanda, fue formulada a la Fundación PTI-PY la elaboración de una posible solución de comunicación juntamente con un sistema de supervisión de la función Monitoreo del Gas SF₆ de los compartimientos tipo 5 de las blindadas en las celdas de los transformadores en la cota 108, y se presentaron dos propuestas: una utilizando comunicación vía sistema *Zig-Bee* (inalámbrico), y una otra utilizando la tecnología PLC (*Power Line Communication*). Luego de algunas reuniones y recaudo de informaciones, fue posible saber de la existencia de un par de cables que estaban de reserva en todos los dispositivos RDG de toda la

instalación, lo que evitaría el lanzamiento de más un par de cables para comunicación con el uso de la tecnología PLC mencionada que utiliza un par de cables para efectuar la doble función de alimentación y comunicación [3].

Basados en esta propuesta, el personal técnico de campo realizó un levantamiento de la instalación, y constató la posibilidad de disponer de un par de cables en cada uno de todos los RDGs de los compartimientos de la instalación, haciendo que la decisión por la tecnología PLC tendría un impacto más favorable en los costes de implementación si comparada a la tecnología inalámbrica. Con la toma de decisión, fue iniciado el proceso de prototipado del nodo de comunicación a ser acoplado al sensor GDHT 20 para la transmisión de los datos, así como el dimensionamiento de la base de datos y sistema de supervisión, a ser detallados en los próximos dos tópicos.

3. INFRAESTRUCTURA DE HARDWARE & COMUNICACIÓN

El flujo de las informaciones que cada sensor recorre, desde el respectivo compartimiento hasta la interfaz visual del sistema de monitoreo, pasa por una infraestructura de hardware y software tal como puede ser apreciada en la figura a seguir.

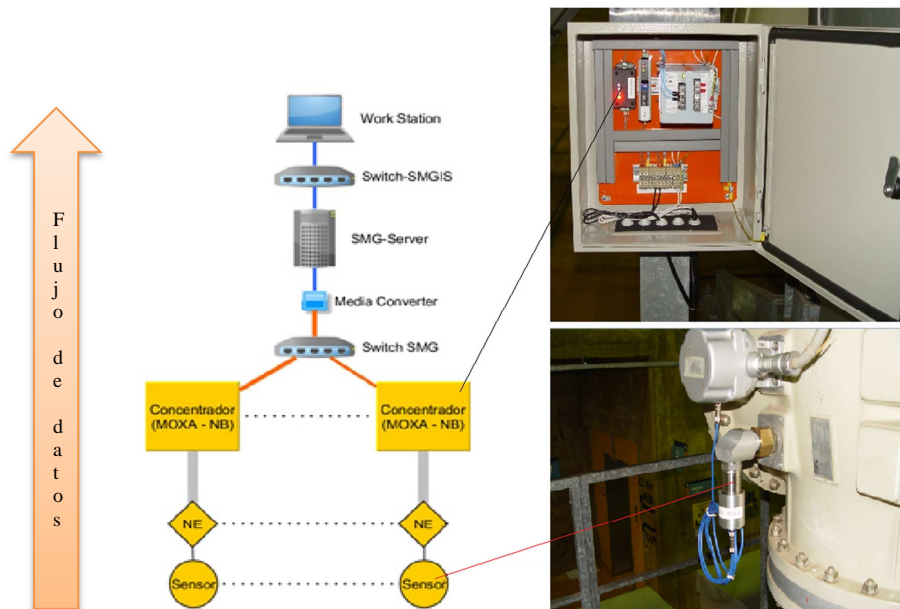


Figura 4: Infraestructura básica del sistema de monitoreo de gas SF₆ de la GIS Itaipu

Basado en la figura 4, los sensores instalados en los compartimientos tipo 5, proveen las siguientes grandezas mensuradas y calculadas: densidad, humedad, presión y temperatura del gas SF₆, y la comunicación utiliza el protocolo RS-485, a través de 4 hilos, dos para la alimentación (24 Vdc) y dos para la comunicación (Tx – Rx). El Nodo Esclavo (NE) asociado realiza el pedido y adquisición de los datos enviados por el sensor de gas, lo trasmite al Nodo Base (NB) utilizando la tecnología Power Line Communication (PLC), que está basada en 2 hilos, tanto para la

alimentación como para la comunicación, y disponibles en cada sensor RDG existente de la instalación.

Una vez que el Nodo Base concentra los pedidos y mediciones de varios nodos esclavos, todos los datos son enviados vía protocolo TCP/IP a una base de datos del servidor localizado en la Sala de Monitoreo de la cota 128. El nodo base se encuentra en un tablero concentrador (cota 128) junto con una fuente de alimentación de 24 Vdc que alimenta los todos los nodos (base y esclavos) además de los sensores. Cada tablero concentrador (total de 22) se comunica vía fibra óptica a la estación de trabajo, esta fibra óptica forma parte del cableado existente, simplemente reutilizado para este proyecto. Por su vez, el switch óptico interconecta los concentradores con el servidor, y éste el software para la adquisición, procesamiento, análisis, almacenamiento y visualización de los datos de los sensores. El switch SMG conecta el servidor del sistema a la red interna de Itaipu, para que el sistema ser accedido de forma remota por otras estaciones de trabajo, además de la estación de trabajo local situada en la sala de monitoreo (cota 128), a modo de acceso local.

4. ESTRUCTURA DE PRESENTACIÓN DE LA INFORMACION

Una vez que los datos se encuentran almacenados en el servidor, las grandezas son organizadas en el software de presentación de forma tal a que puedan ser visualizadas tanto de forma numérica como gráfica, basándose en una estructura presentada en la figura 5 abajo.

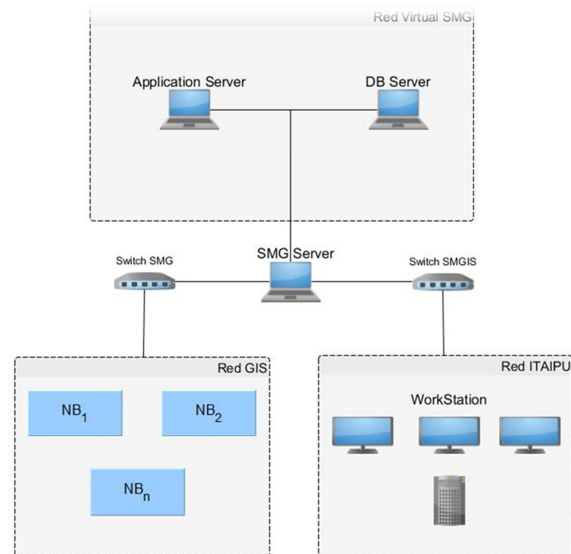


Figura 5: Estructura informatizada de acceso al sistema de monitoreo de gas SF₆ de la GIS Itaipu

El SMG Server está instalado en la computadora principal del sistema, y está compuesto de dos máquinas virtuales, cada una con un propósito específico, la primera denominada de *Application Server*, donde reside toda la parte lógica del software, contiene el *Daemon* del sistema (*SMG_DAEMON*), que se encarga de coleccionar, analizar y almacenar los datos de los sensores. El servidor web (*SMG_WEB*), dispone de una interfaz de usuario a través de un navegador web, permitiendo la visualización y análisis de los datos coleccionados. En la otra máquina virtual se

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

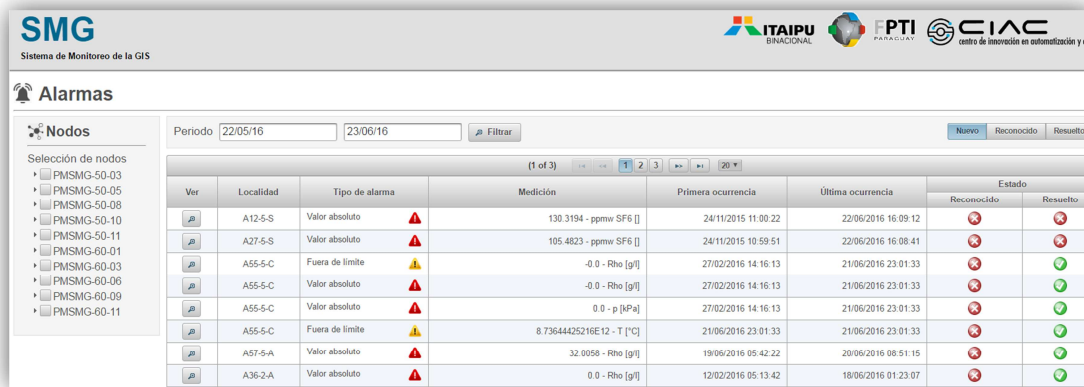
encuentra el DB Server, que posee el servidor de base de datos y donde se almacenan los datos del sistema, junto con los datos colectados de los sensores.

El sistema cuenta con algunas redes, la red Virtual SMG donde se comunican las máquinas virtuales del SMG Server. La red GIS es la red utilizada por el sistema para comunicación con los nodos base, esclavos y sensores a través del switch SMG. La red ITAIPU es la red utilizada por las estaciones de trabajo de Itaipu, mediante el cual se puede acceder al sistema desde las mismas, a través del switch SMGIS. Y finalmente, la estación de trabajo (*workstation*) es una máquina dedicada para el acceso local al sistema. Además, se utiliza para acceder a los demás sistemas de la GIS. Esta máquina está en la sala de monitoreo de la GIS y conectada a la red Itaipu, mediante el switch SMGIS [4].

5. RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL MANTENIMIENTO

La instalación de los primeros módulos sensores en sesenta (60) compartimientos tipo 5 para medir las grandezas mencionadas (densidad, humedad, temperatura y presión) del material aislante Hexafluoruro de Azufre (SF6), además de facilitar el registro de estas mediciones en una base de datos, el sistema se mostró en poco tiempo de interacción en un fuerte aliado en las actividades de mantenimiento predictivo de la instalación, dado el porte y la importancia de esta subestación.

Algunos de los resultados son los avisos de alerta que el sistema emite, y que están relacionados a parámetros definidos por el Mantenimiento para pérdidas de densidad de los compartimientos que cuentan con estos sensores, debido a que el software está preparado con las configuraciones de las posibles contingencias, que fueron totalmente moldados por el personal de campo en conjunto con la Ingeniería de Mantenimiento e implementados por el personal técnico del CIAC, con las inherentes modificaciones que ello implica.



The screenshot shows the 'Alarmas' (Alarms) section of the SMG monitoring system. It includes a sidebar for node selection, a filter for the period from 22/05/16 to 23/06/16, and a table of active alarms. The table columns are: Ver, Localidad, Tipo de alarma, Medición, Primera ocurrencia, Última ocurrencia, and Estado (Reconocido, Resuelto). The table shows several alarms related to SF6 humidity (Rho) and pressure (p) in various compartments.

Ver	Localidad	Tipo de alarma	Medición	Primera ocurrencia	Última ocurrencia	Estado	
						Reconocido	Resuelto
	A12-S	Valor absoluto	130.3194 - ppmv SF6 []	24/11/2015 11:00:22	22/06/2016 16:09:12		
	A27-S	Valor absoluto	105.4823 - ppmv SF6 []	24/11/2015 10:59:51	22/06/2016 16:08:41		
	A55-S-C	Fuera de limite	-0.0 - Rho [g/l]	27/02/2016 14:16:13	21/06/2016 23:01:33		
	A55-S-C	Valor absoluto	-0.0 - Rho [g/l]	27/02/2016 14:16:13	21/06/2016 23:01:33		
	A55-S-C	Valor absoluto	0.0 - p [kPa]	27/02/2016 14:16:13	21/06/2016 23:01:33		
	A55-S-C	Fuera de limite	8.73644425216E-12 - T [°C]	21/06/2016 23:01:33	21/06/2016 23:01:33		
	A57-S-A	Valor absoluto	32.0058 - Rho [g/l]	19/06/2016 05:42:22	20/06/2016 08:51:15		
	A36-2-A	Valor absoluto	0.0 - Rho [g/l]	12/02/2016 05:13:42	18/06/2016 01:23:07		

Figura 6: Página del sistema indicando compartimientos presurizados con niveles anormales de humedad en el gas SF6

De acuerdo al tipo de anomalía que se presente en el compartimiento, sea por pérdida de masa (con consecuente incidencia en la presión del compartimiento), o por aumento del nivel de humedad

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

en ppm, el sistema avisa que el mismo alcanzó o supero un determinado nivel de alarma, haciendo que el personal de campo pueda programar las intervenciones sin perjuicio de la generación en la producción de energía eléctrica minimizando posibles salidas no programadas por razones de mantenimiento correctivo.

Entre los resultados se cuentan entre las anomalías aquellos compartimientos que presentan elevación de humedad superior al determinado para su tipo y de acuerdo a la presión de trabajo, necesita ser tratado con el uso de coches de servicio para restablecer el nivel de humedad admisible.

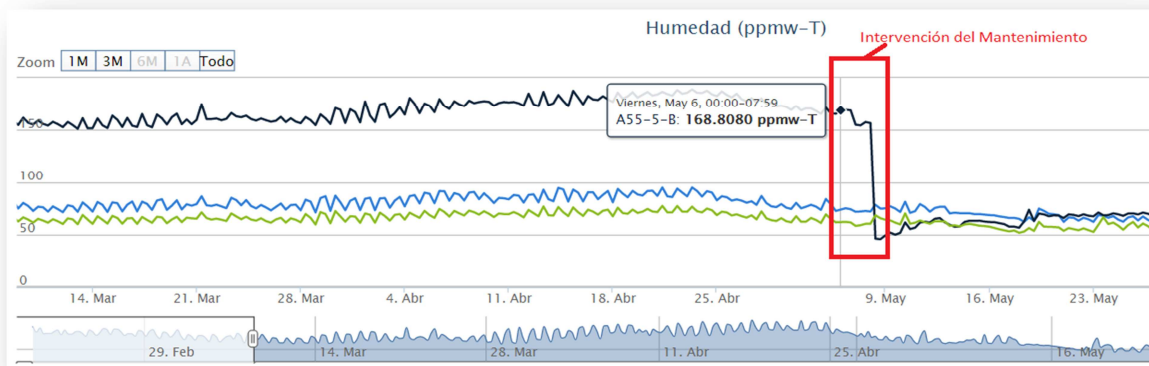


Figura 7: Gráfica de un compartimiento presurizado con indicación de humedad excedente del gas SF₆ con muestra de la intervención del Mantenimiento

Entre otros resultados obtenidos se puede contar las intervenciones programadas en compartimientos por pérdida de masa del gas SF₆, que requieren la localización de la fuente de pérdida, y que son auxiliadas por otras herramientas como detectores del gas SF₆ basadas en tecnologías de infrarrojo que no son objetivo y no hacen parte de este sistema. Por lo general las pérdidas están relacionadas a vedaciones anormales ya que los compartimientos estancos son de aluminio fundido, pero no se encuentran libres de sufrir pequeñas fisuras.

6. CONCLUSIONES

Conforme expuesto en los tópicos anteriores, se ha demostrado la suficiente capacidad de colecta de datos, análisis para predicción y detección de las anomalías en compartimientos de la instalación GIS por parte del sistema, y éstas surgen cuando superan los parámetros considerados normales para la presión y densidades establecidas que puedan poner en riesgo su respectiva rigidez dieléctrica.

El sistema supo superar las expectativas de esta primera etapa, y se proyecta como una de las herramientas, juntamente con otros sistemas ya implementados, que conformará una plataforma de Mantenimiento Predictivo. Esta plataforma cuenta con el perfil para uno de los pilares en la toma de



decisiones por parte del Mantenimiento, entre otros aspectos a ser considerados para estos equipos de alta tensión.

No obstante, considerando que se trata de un sistema en etapa inicial de desarrollo, y se proyecta la inclusión de los restantes seiscientos treinta (630) compartimientos estancos de la instalación, naturalmente traerán consigo eventuales correcciones en términos de software, así también modificaciones o adaptaciones que sean favorables a la mejoría contante del sistema así como aumento de su performance que redunden en beneficios prácticos para las actividades de mantenimiento.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] ABB. Estación de Maniobra Encapsuladas e aislada por gas SF₆. Descripción de la instalación, Publicación código CHA-A 561 316 S / AB02, 2001.

[2] Itaipu Binacional. Informe Técnico 6380.50.19598.P – Relatório de Ensaios em Campo sob condições operativas nominais e simulações para avaliação de desempenho do sensor GDHT 20, Rev. R0, Janeiro 2013.

[3] Itaipu Binacional. Informe Técnico 6380.50.19599.E – Perfil Técnico – Sistema Piloto de Monitoreo del Gas Aislante SF₆, Rev. R0, Mayo 2013.

[4] Itaipu Binacional. MCM Manual de Configuración y Mantenimiento del Sistema de Monitoreo del Gas Aislante SF₆, Rev. R1, Enero 2016.