



**XXII SNPTEE
SEMINARIO NACIONAL DE
PRODUCCIÓN Y
TRANSMISIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA**

BR/GTM/33
13 a 16 de octubre de 2013
Brasília - DF

GRUPO – XIII

**GRUPO DE ESTUDIO DE TRANSFORMADORES, REACTORES, MATERIALES Y
TECNOLOGÍAS EMERGENTES - GTM**

**PREVENCIÓN DE FALLA EN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO 525 KV POR MONITOREO
EN LÍNEA DE TANGENTE DELTA DE BUSHINGS**

Daniel C. P. Araujo*
Marcos E. G. Alves
Treetech Sistemas
Digitais Ltda.

Marcos E. G. Alves
Treetech Sistemas
Digitais Ltda.

Romulo M. Teixeira
CEMIG – Companhia
Energética de Minas
Gerais

Cairo R. N. Moreira
CEMIG – Companhia
Energética de Minas
Gerais

RESUMEN

Los bushings capacitivos son parte fundamental en el mecanismo de aislamiento de los equipos de alta tensión. El monitoreo de este componente ayuda a detectar de manera precoz las fallas, haciendo con que el mantenimiento sea más efectivo. Será presentada la experiencia de Cemig con el monitoreo en línea de la capacitancia y de la tangente delta en bushings de 550 kV y 245 kV de un transformador trifásico de la SE Mesquita, además de un TC de pedestal.

Será posible comprobar la eficacia del monitoreo en línea de bushings para prevenir una falla incipiente y cómo el monitoreo de la tangente delta es un factor crucial para anticipar una posible falla.

PALABRAS CLAVE:

Bushings, capacitancia, tangente delta, transformadores, monitoreo.

1.0 – INTRODUCCIÓN

A pesar del relativamente bajo costo individual de los bushings capacitivos comparado al costo total del equipo donde está aplicado, una falla en el aislamiento de un bushing puede causar daños severos al equipo, como, por ejemplo, un transformador de potencia puede iniciar un incendio que ocasione su pérdida total, además del riesgo de daños a equipos vecinos debido a los trozos de porcelana lanzados o caídas de las estructuras de las barras conectoras asociadas. Aún peor, fallas de este tipo pueden ser extremadamente peligrosas en el caso de que haya personas próximas al equipo.

Un estudio de Cigré de 1983 [1] muestra que una gran parcela de las fallas en transformadores de potencia se origina en los bushings capacitivos. A pesar de que no existan estadísticas actuales sobre el tema, el historial reciente de incidentes con bushings [2], de cierta manera, corrobora esta pesquisa. La figura 1 ilustra los datos a que llegaron los estudios de Cigré [1]. Las modificaciones en las prácticas del mantenimiento de los activos, en gran parcela reflejo de las nuevas reglas establecidas para el sector eléctrico, han tomado en cuenta el paradigma del mantenimiento basado en el estado real del componente. Este paradigma estipula que el punto de intervención óptimo debe ser determinado por técnicas y medios precisos, donde una parada desnecesaria no debe ser realizada. De otra forma, el estado del componente precisa

(*) Praça Claudino Alves, 141 – Centro – Atibaia – SP – CEP: 12940-800. Tel.: +55 (11) 4413-5787 x413 / Fax: +55 (11) 4413-5991

E-mail: daniel.carrijo@treetech.com.br

Sitio: <http://www.treetech.com.br>

ser chequeado continuamente para prevenir fallas abruptas, ocasionadas por factores no previstos.

En este contexto, el monitoreo en línea de bushings gana un papel importante, que es el de prevenir posibles fallas que puedan suceder entre los intervalos regulares de mantenimiento y también postergar eventuales mantenimientos para una oportunidad económicamente más conveniente.

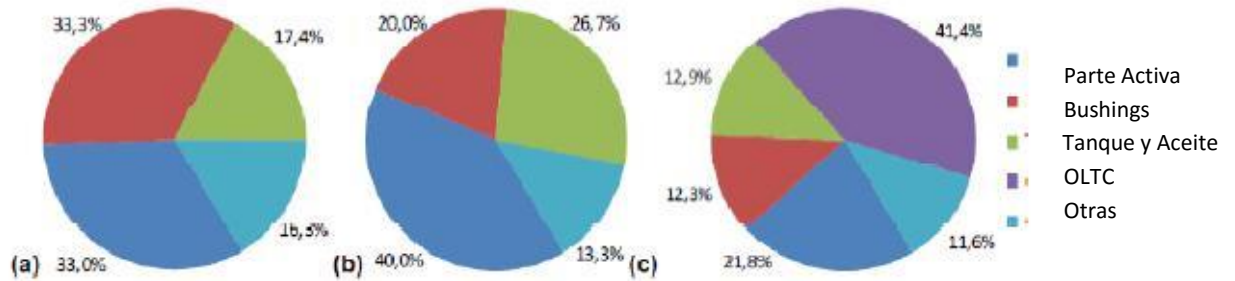


Figura 1: Estadística de las causas para salida de servicio de transformadores; (a) transformadores de usinas, sin OLTC; (b) transformadores de subestaciones, sin OLTC; (c) transformadores de subestaciones, con OLTC [1].

Otro aporte del monitoreo en línea es la obtención de datos antes no conocidos acerca del comportamiento de los bushings bajo reales condiciones de utilización, incluyendo los momentos que anteceden una falla.

El avance alcanzado con el análisis de estos datos es convertido en nuevas técnicas para prevención de estas fallas, como mostrado en [03].

2.0 - CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO EN LA SE MESQUITA

La subestación Mesquita, objeto de este estudio, está localizada en el municipio de Santana do Paraíso, próximo a la ciudad de Ipatinga, en la región este de Minas Gerais. Esta subestación suministra la carga de grandes consumidores del sistema eléctrico de transmisión como USIMINAS, ARCELOR MITTAL y CENIBRA. Empezó a operar comercialmente en junio de 1981. Actualmente la potencia de transformación instalada es de 1.200 MVA, siendo compuesta por tres autotransformadores de 500 / 230 kV con 400 MVA cada, dos líneas de transmisión en 500 kV y cinco en 230 kV. La figura 2 muestra la vista aérea de la SE Mesquita.



Figura 2: Vista aérea de la SE Mesquita, perteneciente a Cemig, situada en la región este de Minas Gerais.

A mediados de 2005, Cemig, de forma pionera, instaló el monitor de bushings capacitivos BM de Treetech en los bushings de 550 kV y 245 kV del Autotransformador T-2 de la SE Mesquita. En esa misma ocasión también fue instalado el sistema en un TC de pedestal de 550 kV que hace parte de la misma barra conectora de este autotransformador.

La elección fue motivada por las sospechas en relación a una determinada familia de bushings con historial de fallas en el sector eléctrico. En la figura 3 podemos observar detalles de la instalación física del monitor de bushings en el autotransformador y en el TC de pedestal.



Figura 3: Detalle de las instalaciones del Sistema de Monitoreo realizadas en la SE Mesquita, de Cemig.

Adicionalmente al monitoreo de bushings, fue instalada en el T-2 de la SE Mesquita el monitoreo de humedad en el aceite aislante y la integración del monitoreo de temperatura del aceite y devanados.

Fue utilizada una red inalámbrica para interconectar los sensores en el patio de la SE al sistema de monitoreo Sigma que había sido instalado. La utilización de la red inalámbrica fue una forma práctica, de bajo costo y segura para la transmisión de los datos de los sensores al sistema de monitoreo.

De esta forma, Cemig tenía fácil acceso a todos los datos y diagnósticos emitidos por estos sensores. Estos datos son utilizados por el mantenimiento de Cemig para perfeccionar el uso del activo y prever posibles fallas entre los mantenimientos y chequeos de rutina.

3.0- METODOLOGÍA PARA MONITOREO EN LÍNEA DE CAPACITANCIA Y TANGENTE DELTA

La capacitancia y la tangente delta son reconocidas como algunos de los principales parámetros para diagnóstico de la condición del aislamiento de bushings, pues estos parámetros son directamente afectados por el deterioro del aislamiento. Por ejemplo, capas de aislamiento en cortocircuito causan aumento de la capacitancia, mientras el ingreso de humedad por falla en la estanqueidad causa aumento en la tangente delta.

La norma IEEE C57.19.100-1995 [4] que fue publicada anteriormente a la popularización del monitoreo en línea sugiere intervalos típicos de 3 a 6 años para la realización de ensayos fuera de línea de capacitancia y tangente delta.

Un estudio comparativo [5] correlacionando los valores obtenidos en las mediciones fuera de línea de capacitancia y tangente delta con los análisis de gases disueltos en el aceite de bushings con sospecha de defectos en evolución comprueba la eficacia de las mediciones de capacitancia y tangente delta para el diagnóstico de defectos en bushings.

El monitoreo en línea es la respuesta a la necesidad de chequeo continuo de estos parámetros, asegurando el estado operacional del bushing y previniendo defectos en el aislamiento en etapa inicial. Pero para que el monitoreo en línea de los bushings suceda con seguridad, precisión y confiabilidad, algunos puntos críticos necesitan ser observados, conforme descrito en los próximos ítems:

3.1 La medición de las corrientes de fuga de los bushings

Para que la medición de las corrientes de fuga provenientes del tap de prueba o del tap de tensión sea realizada de forma segura y eficaz, son necesarios adaptadores que servirán de interfaz eléctrica y mecánica entre el tap y los circuitos eléctricos que conducirán la corriente hasta el local de medición. Los adaptadores de tap utilizados en la aplicación de Cemig poseen todos los requisitos para atender a esta aplicación con desempeño y seguridad. En la figura 4 son mostrados algunos detalles de esta instalación.



Figura 4: Detalle de los adaptadores de tap utilizados en el sistema de monitoreo de bushings BM en la SE Mesquita

Al realizar un análisis simplificado se podría considerar que el adaptador de tap es apenas un enchufe para permitir el contacto eléctrico entre el tap del bushing y la entrada de medición del monitor de bushings. Esta simplificación se muestra tanto errónea cuanto peligrosa, ya que debemos tener en cuenta que el tap del bushing nunca debe permanecer abierto. Entre las características eléctricas que el adaptador debe poseer para atender a los requisitos de seguridad y desempeño del monitoreo se sobresalen su diseño mecánico diferenciado y la protección contra una posible falla en la conexión eléctrica del circuito de medición o en el caso de que ocurra una desconexión accidental.

El adaptador de tap utilizado tiene adentro un circuito de protección con doble función. La primera es la protección redundante contra apertura del tap en caso de desconexión accidental de los cables de conexión entre el adaptador y el módulo de medición del monitor de bushings. Esta protección actúa instantáneamente, entrando en acción y limitando la tensión en cualquier parte del circuito secundario del adaptador de tap en ≈ 15 Vac. Las protecciones utilizadas pueden conducir por tiempo indeterminado y son dimensionadas para ensayo de impulso (BIL)

2.050 kV - bushing 765 kV. Además, cada adaptador posee doble protección, que, actuando paralelamente, brinda protección redundante.

Estas características son aseguradas por un diseño mecánico que hace que estas protecciones se vuelvan inaccesibles durante el manejo e instalación del adaptador. La segunda función es la protección primaria contra sobrecorrientes (varios kA) y sobretensiones asociadas que ocurren en el tap del bushing en el caso de sobretensiones causadas por maniobras de conmutación o impulsos atmosféricos. Esta función es complementada por la protección secundaria existente adentro del propio BM, de tal forma que las protecciones primaria y secundaria actúan en conjunto, de forma coordinada, para evitar daños al BM y al adaptador.

3.2 El tratamiento matemático y estadístico de las mediciones para extraer las informaciones de capacitancia y tangente delta del aislamiento

La medición de grandezas eléctricas del orden de mA y μ A en ambientes electromagnéticamente agresivos, como el de una subestación de alta tensión, ha sido un reto constante en la elaboración de sistemas precisos y confiables para el monitoreo de equipos eléctricos. En el caso específico del monitoreo de bushings, algunas técnicas son utilizadas para abordar este reto.

Treetech adoptó en su monitor de bushings capacitivos la técnica de la suma vectorial de las corrientes de fuga de los bushings de un conjunto trifásico. Esta técnica presenta algunas ventajas, como el monitoreo en línea de modificaciones tanto de la capacitancia cuanto de la tangente delta, además de no demandar la medición de las tensiones fase-tierra aplicadas a los bushings. Algunas técnicas no son capaces de monitorear la tangente delta. Otras tienen como requisito la medición de las tensiones fase-tierra aplicadas a los bushings, siendo que muchas veces no existen transformadores de potencial disponibles en la instalación para proveer esta información.

En cada uno de los bushings, la corriente de fuga fluye a través de la capacitancia C_1 para tierra, pasando por el tap capacitivo, siendo esta corriente función de la tensión fase-tierra y de la impedancia del aislamiento. Una modificación en esta corriente reflejaría una modificación en la impedancia del bushing. En principio, esta corriente podría ser utilizada para mensurar este cambio. Sin embargo, la característica predominantemente capacitiva de la corriente de fuga y el orden de magnitud de las modificaciones que se desea medir llevan al reto de medir cambios del orden de magnitud de 0,6% en el factor de disipación – que puede ser la diferencia entre un bushing nuevo y un bushing en riesgo – siendo que esta modificación prácticamente no cambia la corriente de fuga total que fluye de un bushing.

La técnica de la suma vectorial de las corrientes de fuga, utilizada para contornar esta dificultad, se beneficia de que las tres corrientes de fuga están desfasadas entre sí en aproximadamente 120° , y normalmente tienen el mismo orden de magnitud. Así, la suma vectorial tiende a un valor bastante menor que cada una de las corrientes de fuga tomadas individualmente, como ilustrado en la figura 5(a) para una determinada condición inicial de capacitancias y tangentes deltas.

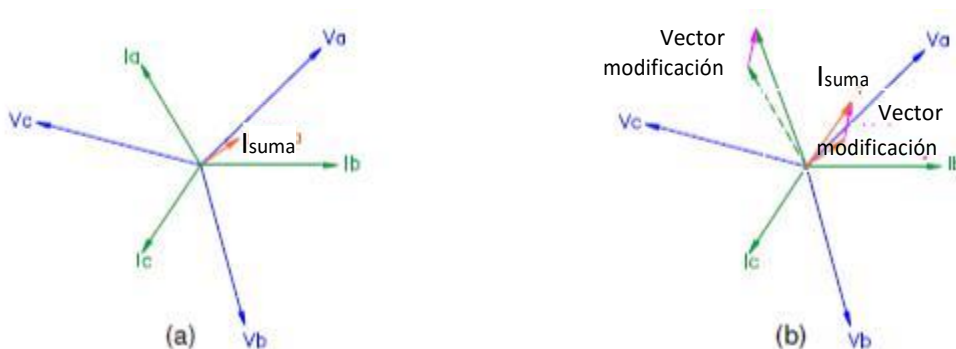


Figura 5: Corrientes de fuga de tres bushings en un sistema trifásico y su suma; (a) Para una determinada condición inicial; (b) Con cambio en la capacitancia y factor de disipación del bushing de la fase A

Suponiendo ahora un cambio en la capacitancia y en el factor de disipación del bushing de la fase A, como mostrado en la figura 5(b), el vector modificación que expresa el desplazamiento

de la corriente I_a de su valor inicial hasta su valor final se refleja también en la corriente suma, que es modificada en relación a su valor inicial según el mismo vector modificación.

Este vector modificación tiene peso prácticamente insignificante cuando comparado a la magnitud de la corriente de fuga de la fase A. Sin embargo, lo mismo no sucede cuando se compara este vector a la corriente suma, lo que permite detectarlo y, como consecuencia, detectar la modificación en la impedancia del bushing en cuestión. De esta forma, la técnica de la suma vectorial de las corrientes de fuga proporciona un aumento de sensibilidad que viabiliza el monitoreo de las modificaciones tanto en la capacitancia cuanto en la tangente delta del aislamiento.

Aun así, las corrientes de fuga de los bushings son función no apenas de sus capacitancias y tangentes deltas, pero también de las tensiones fase-tierra del sistema. Una vez que estas frecuentemente no están disponibles para medición por el sistema de monitoreo, como explicado anteriormente, la posible influencia de variaciones en las tensiones fase-tierra sobre las mediciones de variaciones en la capacitancia y tangente delta es eliminada por técnicas propietarias avanzadas de procesamiento de señales, que incluyen también tratamientos estadísticos de los datos.

Estos tratamientos estadísticos presuponen el uso de una masa de datos, acumulada a lo largo del tiempo de operación del sistema, la cual es actualizada continuamente con las mediciones de corrientes de fuga y corriente suma más recientes. Por este motivo, el sistema de monitoreo en línea posee un tiempo de respuesta a los cambios sucedidos en la capacitancia y en la tangente delta que puede variar de varias horas a algunos días, con la finalidad de confirmar que la modificación de capacitancia y/o tangente delta es real, y no ocasionada por oscilaciones en las tensiones del sistema eléctrico.

Las modificaciones de capacitancia y tangente delta son utilizadas para incrementar los valores iniciales programados en el BM. De esta manera, con el valor inicial y las modificaciones sucedidas posteriormente, el BM indica el valor actual de la capacitancia y tangente delta correspondiente al obtenido en un ensayo fuera de línea del bushing.

2.0 - ESTUDIO DE CASO: INCIDENTE EN LA SE MESQUITA – CEMIG

Durante el periodo de 2005 a 2010, el sistema de monitoreo estuvo en operación continua. No se registró ninguna alarma sobre el estado del bushing, indicando que hasta entonces el bushing había presentado funcionamiento normal. La tabla 1 presenta los parámetros iniciales del monitoreo de bushings del T-2 y del TC de pedestal.

Tabla 1: Valores iniciales del monitoreo de bushings del T-2 y TC de Pedestal

Fase	550 kV		245 kV		550 kV CT	
	Capacitancia	Tg. Delta	Capacitancia	Tg. Delta	Capacitancia	Tg. Delta
A	583.0 pF	0.180%	511.0 pF	0.360%	472.0 pF	0.300%
B	583.0 pF	0.180%	519.0 pF	0.360%	470.0 pF	0.300%
C	583.0 pF	0.180%	511.0 pF	0.360%	475.0 pF	0.300%

Los valores de las alarmas de capacitancia alta y muy alta fueron parametrizados para una variación de 3% y 5% del valor inicial. Los valores de las alarmas de tangente delta alta y muy alta fueron parametrizados para una variación de 100% y 200% del valor inicial. La tabla 2 muestra estos valores en pF y %.

Tabla 2: Parametrización de las alarmas del monitoreo de bushings del T-2 y TC de Pedestal

Fase	550 kV				245 kV				550 kV CT			
	Capacitancia (pF)		Tg. Delta (%)		Capacitancia (pF)		Tg. Delta (%)		Capacitancia (pF)		Tg. Delta (%)	
	Alta	Muy Alta	Alta	Muy Alta	Alta	Muy Alta	Alta	Muy Alta	Alta	Muy Alta	Alta	Muy Alta
A	600.49	612.1	0.360	0.540	526.3	536.5	0.720	1.080	486.2	495.6	0.600	0.900
B	600.49	612.1	0.360	0.540	534.5	544.9	0.720	1.080	484.1	493.5	0.600	0.900
C	600.49	612.1	0.360	0.540	526.3	536.5	0.720	1.080	489.3	498.8	0.600	0.900

El día 20/2/2011, domingo, el monitor de bushings indicó una alarma de tendencia de capacitancia alta en el bushing de 230 kV, fase B. Los operadores de la SE Mesquita notificaron al personal de Ingeniería de Mantenimiento de Cemig sobre esta alarma [6].

El día 22/2/2011, martes, el personal de Ingeniería de Mantenimiento de Cemig contactó a Treotech para que esta alarma fuera chequeada. En esa fecha, la alarma por tendencia de crecimiento de la capacitancia indicaba 9 días restantes para alcanzar el valor programado de alarma de capacitancia alta. El BM también indicaba que el tiempo restante para que la medición alcanzara el valor de alarma de la tangente delta alta era de 63 días. En la tabla 3 son presentados los valores mensurados por el monitor de bushings en el momento del análisis.

Tabla 3: Valores del monitoreo de bushings el día 22/2/2011, en el momento del análisis.

Fase	550 kV		245 kV		550 kV CT	
	Capacitancia	Tg. Delta	Capacitancia	Tg. Delta	Capacitancia	Tg. Delta
A	583.0 pF	0.202%	511.0 pF	0.360%	472.0 pF	0.300%
B	583.0 pF	0.180%	529.8 pF	0.454%	470.0 pF	0.300%
C	583.0 pF	0.180%	511.0 pF	0.360%	475.0 pF	0.300%

Podemos ver que hubo una variación de 2,08% en la capacitancia y 26,11% en la tangente delta del bushing de 245 kV, fase B. Todos los análisis pertinentes fueron realizados y la tendencia de crecimiento tanto de la capacitancia cuanto de la tangente delta fue confirmada. Luego de esta confirmación, el personal de Ingeniería de Cemig programó una desconexión para el día 27/2/2011, domingo, para que fueran realizados ensayos fuera de línea que pudieran comprobar la situación del bushing. Cemig también ya se preparó para sustituir el bushing, en el caso de que se confirmara el problema.

A partir de este punto, tanto Cemig cuanto Treotech movilizaron un cuerpo técnico para acompañar la evolución de las mediciones mostradas por el sistema con el objetivo de mantener la seguridad operacional.

En el gráfico 1 son presentadas las mediciones hasta el día 22/2/2011.

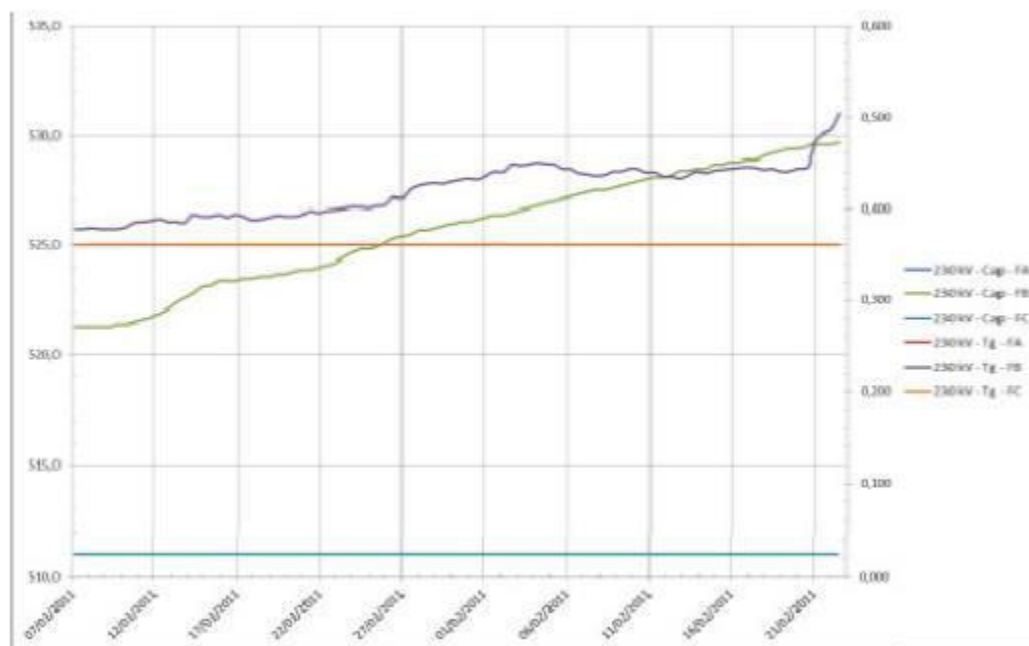


Gráfico 1 – Evolución de los valores de capacitancia y tangente delta del conjunto de 245 kV

Hasta el sábado anterior a la desconexión programada, los valores de capacitancia y tangente delta evolucionaron conforme lo previsto por el monitoreo y no fue necesario reprogramar. Aún el sábado día 26/2/2011, a las 11h55, el monitor de bushings BM acusó un aumento súbito del valor de tangente delta de la fase B del conjunto de 245 kV. El monitor cambió la indicación de tangente delta, en un intervalo de tiempo muy corto, de 0,490% para 1,263%, superando los límites de la alarma muy alta, mientras que la capacitancia medida cambió poco, con el valor de 530,1 pF. El personal de Cemig y Treotech que estaba de guardia en el local realizó análisis basados en las indicaciones del sistema y chequearon la consistencia de la indicación.

El personal de Operación y de Ingeniería de Mantenimiento de Cemig, en un trabajo conjunto, tomó medidas inmediatas e inició las negociaciones para una desconexión de emergencia del transformador. Como se trata de un equipo perteneciente a la Red Básica del Sistema Interconectado Nacional, la desconexión fue negociada con el ONS, que autorizó la retirada de operación del autotransformador T-2 a las 15h13 por el CLM 748/201, ya que la maniobra se dio en tiempo real.

Cemig inmediatamente envió un equipo para realizar las primeras mediciones fuera de línea en el bushing sospechoso, así que el transformador fuera desconectado, para chequear la validez de las indicaciones del monitoreo en línea. Durante esta espera, equipos de ambas empresas acompañaban en línea la evolución de la tangente delta, que pasó a crecer de forma agresiva hasta el momento de la desconexión, alcanzando 3,331% en su momento más crítico. El gráfico 2 muestra la evolución crítica sucedida momentos antes de la desconexión.

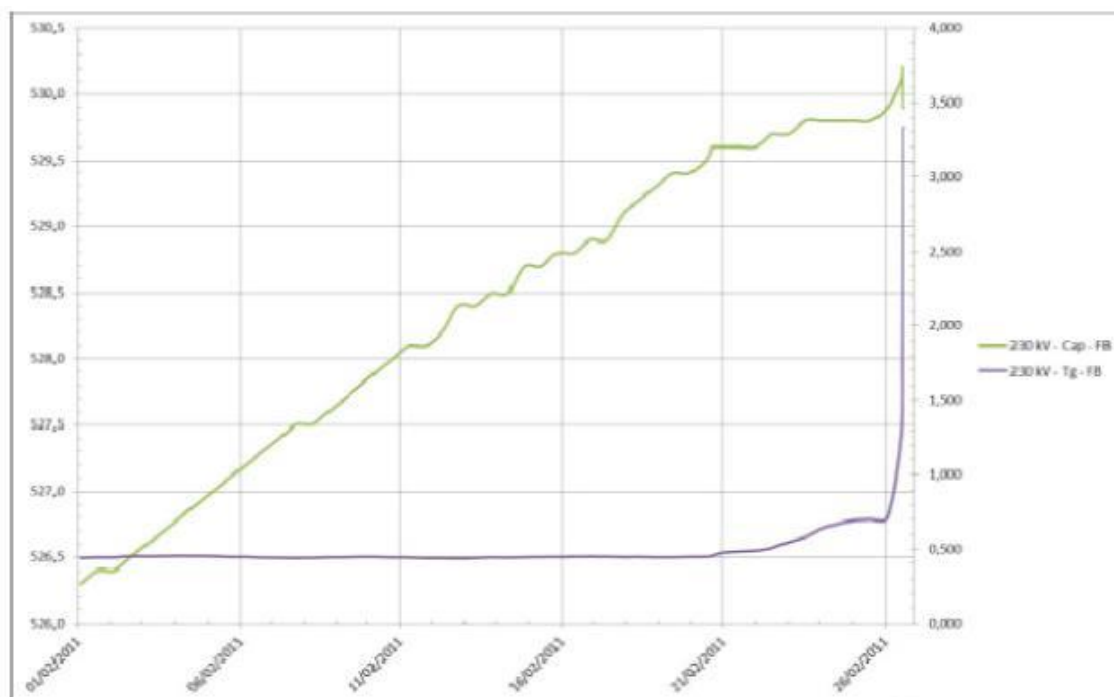


Gráfico 2 – Detalle de la evolución de los valores monitoreados momentos antes de la desconexión.

Alrededor de 15h40, las maniobras necesarias para la desconexión cesaron y el transformador, debidamente aislado, tuvo el bushing sospechoso sometido al ensayo fuera de línea. Siguiendo la recomendación del equipo de Treetech presente, el equipo de Cemig midió los valores de tangente delta así que fue posible, ya que la tangente delta varía con la temperatura. El comportamiento típico es que los valores de tangente delta disminuyan con la temperatura para una misma condición de deterioro del aislamiento. Por esa razón es tan importante hacer esa medición así que posible. En el momento de la desconexión, el monitor de bushings indicaba un valor de capacitancia de 529,9 pF y 3,329% para la tangente delta. La tabla 4 muestra los datos de las mediciones fuera de línea y del sistema de monitoreo en línea.

Tabla 4: Valores de las mediciones fuera de línea y en línea en el bushing sospechoso

Fuente	Capacitancia (pF)	Tangente Delta (%)	Observaciones
Monitor en línea BM	529.90	3.329	-
Medición Off-line	517.28	2.600	Temperatura ambiente: 34°C Temperatura de Tope del Aceite: 61,3 °C
Contraprueba de la Medición Off-Line	517.60	2.440	Temperatura ambiente: 32°C Temperatura de Tope del Aceite: 56,4°C

Así que las mediciones fuera de línea confirmaron las indicaciones del monitoreo en línea, Cemig decidió mantener el transformador desconectado hasta el cambio del bushing defectuoso. El cambio fue programado para el lunes, día 28/2/2011.

El domingo, día 27/2/2011, con la llegada del equipo de Cemig que realizaría el cambio del bushing el día siguiente, fueron realizadas nuevas mediciones fuera de línea con un instrumento de fabricante diferente del utilizado el día anterior, con la intención de corroborar los datos anteriormente obtenidos. La tabla 5 muestra los datos de esta nueva medición.

Tabla 5: Valores del nuevo chequeo fuera de línea realizado.

Fuente	Capacitancia (pF)	Tangente Delta (%)	Notes
Medición Off-line	515,00	0,780	Temperatura ambiente: 31°C Temperatura de Tope del Aceite: 34,8 °C
Contraprueba de la Medición Off-Line	514,10	0,910	Temperatura ambiente: 31°C Temperatura de Tope del Aceite: 34,8°C

Fuente

Con estas nuevas mediciones, se constató que el bushing presentaba significativa modificación en la tangente delta aunque en las condiciones más favorables de temperatura. Las variaciones en las mediciones fueron las esperadas y se mantuvo el plan cambio del bushing.

En esta ocasión también fue realizada una inspección visual en el bushing para intentar determinar una posible causa para el defecto presentado. El equipo de mantenimiento de Cemig detectó un local donde había una pequeña pérdida de aceite en la parte inferior del bushing, próximo al empalme. Esta pérdida podría ser la causa del síntoma presentado. La figura 6 muestra el punto de pérdida detectado.



Figura 6: Punto de pérdida detectado.

El día 28/2/2011 fue realizado el mantenimiento para el cambio del bushing defectuoso. La figura 7 muestra algunas etapas de la operación realizada por el equipo de Cemig.



Figura 7: Equipo de Cemig realizando el cambio del bushing defectuoso.

Para comprender mejor lo que sucedió en el bushing y causó la modificación de sus parámetros dieléctricos, se colectó una muestra del aceite aislante para análisis gas-cromatográfico en el laboratorio de Cemig. Los resultados del análisis son mostrados en la tabla 6.

Tabla 6: Resultados del análisis gas-cromatográfico en el aceite del bushing defectuoso.

Gases Disueltos	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	Total de Gases Combustibles
Concentración en PPM	5,446.0	18,750.0	82,987.0	869.0	130.0	550.0	3.7	325.0	0.0	

Los valores destacados en rojo son los que ultrapasaron los valores típicos indicados en la norma IEC 60599 ed2.1– *Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis* tabla A.9 [7], reproducida en la tabla 6.

**Tabla 6: Valores de referencia, según IEC 60599 ed2.1
Valores típicos de concentración en Bushings**

H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
140	1000	3400	40	70	30	2

Es posible notar que el resultado de este análisis gas-cromatográfico presentó valores elevados de H₂, confirmando la existencia de un defecto. La correlación de los otros gases por el método del Triángulo de Duval, presentado en la figura 8, muestra que este defecto está en estado inicial, tipificado como descargas parciales de baja energía, con indicios de evolución para descargas parciales de mediana energía. No fueron encontrados gases combustibles indicadores de arco y elevado recalentamiento, como el C₂H₄ e C₂H₂, lo que se muestra coherente con el hecho de que no hubo modificación significativa de la capacitancia.

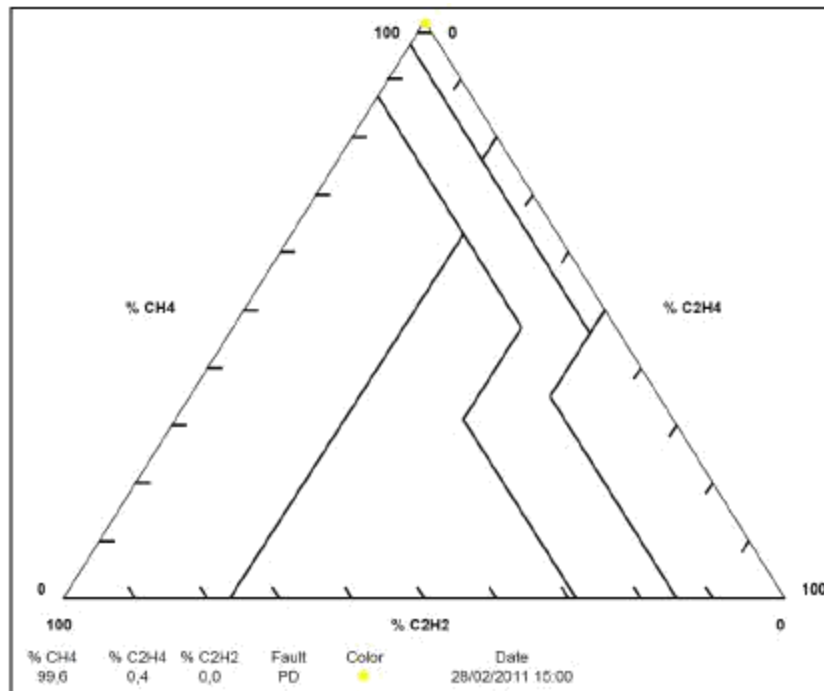


Figura 8: Triángulo de Duval y sus zonas de diagnóstico.

Esto muestra que haber optado por la desconexión fue lo correcto y que el sistema de monitoreo funcionó perfectamente, evitando una probable explosión de bushing y serios daños al transformador.

3.0 – CONCLUSIÓN

En medio de la creciente exigencia por mejores índices de calidad, disponibilidad y confiabilidad, Cemig, motivada por las sospechas en relación a una determinada familia de bushings con historial de fallas en el sector eléctrico, instaló en la SE Mesquita el monitor de bushings capacitivos BM de Treotech en los bushings de 550 kV y 245 kV del autotransformador T-2 y también en un TC de pedestal de 550 kV.

Además de ese factor motivador, es sabido que el monitoreo en línea de bushings puede contribuir para la reducción de los costos de mantenimiento a través de mejoras en el proceso de planificación del mantenimiento y en la utilización intensiva del paradigma del mantenimiento bajo condición, reduciendo las desconexiones para ensayos de rutina.

Adicionalmente, el monitoreo en línea ha provisto datos valiosos sobre la forma y el tiempo de evolución de los defectos en este componente. La instalación del sistema de monitoreo de bushings capacitivos BM proporcionó diversas ventajas, siendo que los objetivos primordiales listados abajo fueron plenamente atendidos:

- La reducción de riesgo de fallas con el diagnóstico de los bushings en tiempo real.
- El aumento de disponibilidad por medio de la realización de mantenimiento predictivo en lugar del mantenimiento preventivo (reducción de desconexiones para mantenimiento).
- La reducción de los costos de mantenimiento al evitar mantenimientos desnecesarios.
- La preservación y mejora de la imagen corporativa con la reducción de desconexiones y de fallas catastróficas.

El artículo mostró la importancia y efectividad del monitoreo en línea de capacitancia y tangente delta de bushings, resaltando la importancia del monitoreo de la tangente delta para detección de defectos en fase inicial, una vez que en la experiencia descrita no hubo modificación significativa de capacitancia, aunque la tangente delta haya aumentado diez veces su valor en relación a los valores iniciales de los ensayos fuera de línea.

Fue mostrado que, de ese modo, las fallas en bushings pueden ser detectadas en tiempo real, evitando así daños severos al equipo por la explosión y posible incendio, reduciendo los perjuicios originados por fallas intempestivas de bushings capacitivos.

4.0 - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ELECTRA, "An International Survey on Failures in Large Power Transformers in Service", Paris, CIGRE, Ref. no. 88, 1983.
- [2] Melo, Marcos A. C., Alves, Marcos, "Experiência com Monitoração On-Line de capacitância e tangente delta de Buchas Condensivas", XIX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [3] Alves, Marcos, Pena, Miguel C Medina, Severino, Cláudio "DEFEITOS DE EVOLUÇÃO RÁPIDA E MUITO RÁPIDA EM BUCHAS DETECTADOS POR MONITORAMENTO ON-LINE", XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Florianópolis, Brasil, 2011.
- [4] The Institute of Electrical and Electronic Engineers, ANSI/IEEE Std C57.19.100-1995, "IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings", Março/1995.
- [5] Melo, Marcos A. C., "Investigação de Ocorrências em Buchas de Transformadores e Reatores Utilizando o Doble M-4000", IV Conferência da Doble Brasil - Cemig. Belo Horizonte, Brasil, 2003.
- [6] Relatório Técnico de Ocorrência - SE Mesquita – 04/2011.
- [7] IEC 60599 ed2.1– Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis.

5.0 - DATOS BIOGRÁFICOS



Daniel Carrijo Polonio Araujo obtuvo el Diploma de Grado en Ingeniería Industrial Eléctrica en 2005 por el Centro Federal de Educación Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, con énfasis en Sistemas Eléctricos Industriales y Sistemas Eléctricos de Telecomunicaciones. Recibió el diploma de Maestro en Ingeniería Eléctrica en 2009 por la UFMG – Universidad Federal de Minas Gerais, en el área de Concentración de Señales y Sistemas con la línea de investigación en Sistemas de Control y Automatización de Procesos. Actualmente es doctorando por esa misma

universidad. Su área de concentración es Ingeniería de Potencia y su línea de investigación es Sistemas de Energía Eléctrica. Trabaja en Treetech Sistemas Digitais Ltda. desde 2007. Actualmente colabora simultáneamente con el departamento de Ingeniería de PD&I e Ingeniería de Producto. Áreas de actuación e interés: sistemas de monitoreo para equipos de alta tensión, investigación de métodos predictivos para el mantenimiento, ensayos y diagnósticos en equipos eléctricos, ingeniería de mantenimiento y métodos de mejoría del proceso de mantenimiento.



Marcos E. Guerra Alves (M'2007) nació en Rio de Janeiro, RJ, el 15 de julio de 1975, trabaja en Treetech Sistemas Digitais desde 1992. Especializado en sistemas de control y monitoreo de transformadores de potencia, coordina el departamento de PD&I. Se graduó como Ingeniero Eléctrico en 2001 por la Universidad Sao Judas Tadeu, Sao Paulo, y en 2005 concluyó su maestría en el área de Energía y Automatización de la Universidad de Sao Paulo (USP). Actualmente cursa el doctorado en Ingeniería por la misma universidad.



Romulo M. Teixeira obtuvo el diploma de Grado en Ingeniería Eléctrica en 2006 por la Universidad Federal de Minas Gerais. En 2010 concluyó su postgrado en Ingeniería de Sistemas Eléctricos de Potencia por la misma universidad. Trabaja en Cemig desde julio de 2006 y actualmente trabaja en la Administración de Planificación e Ingeniería de Mantenimiento de la Transmisión, en el área de equipos de Transformación y Maniobra.



Cairo R. N. Moreira nació en la ciudad de Governador Valadares, el 17 de enero de 1969. Trabaja en CEMIG desde 1987, es especializado en subestaciones de extra alta tensión. Graduado en Electrotécnica en 1997, supervisa las actividades de operación y mantenimiento en la subestación Mesquita.