



Sistema de Monitoreo On-line de Capacitancia y Tangente Delta de Bushings Condensivos

Marcos E. G. Alves*

Jorge C. da Silva**

* Treetech Sistemas Digitais Ltda.

** Cemig S.A.

RESUMEN

En general, a pesar de que el costo individual de los bushings es relativamente bajo comparado con el costo total del equipamiento donde está aplicada, una falla en la aislación de un bushing puede causar daños severos al equipamiento, como por ejemplo, un transformador de potencia o transformador de corriente, pudiendo llevar hasta incluso a su pérdida total.

La capacitancia y la tangente delta son reconocidas como algunos de los principales parámetros para diagnóstico de condición de la aislación de bushings, ya que estos parámetros son directamente afectados por el deterioro de la aislación. Por ejemplo, capas de aislación en corto-circuito causan aumento de la capacitancia, mientras el ingreso de humedad por falla en el sellado causa aumento en la tangente delta.

Este artículo presentará una metodología para monitoreo on-line de la capacitancia y tangente delta de bushings y de transformadores de corriente, con la filosofía y los principios básicos utilizados, incluyendo los siguientes tópicos:

- Medición de las corrientes de fuga de los bushings directamente en sus taps de prueba o de tensión;
- Tratamiento matemático y estadístico de las mediciones para extraer las informaciones de capacitancia y tangente delta del aislamiento;
- Sensibilidad y precisión de la técnica de monitoreo;
- Alarmas por valores absolutos de capacitancia y tangente delta;
- Alarmas por tendencias de evolución de capacitancia y tangente delta;
- Protecciones contra sobretensiones y sobrecorrientes causadas por fenómenos transitorios en la red (por ejemplo, irrupciones de maniobra e impulsos atmosféricos) y contra apertura accidental del tap del bushing.

Será presentada la experiencia obtenida con la utilización de este sistema en campo, monitoreando simultáneamente 3 bushings de 500kV y 3 de 230kV en un transformador de potencia y 3 transformadores de corriente de línea de 500kV. Con ello pudieron ser verificadas la estabilidad del sistema de monitoreo y su inmunidad a las variaciones normales del sistema de potencia, además de su operación cuando estuvo sujeto a irrupciones de maniobra y otras perturbaciones.

PALABRAS CLAVE

Transformador, TC, Bushing, Monitoreo on-line, Capacitancia, Tangente delta, Intelligent Electronic Device, IED.

1. INTRODUCCIÓN

Los bushings son accesorios aplicados en equipamientos de alta tensión con el objetivo de proveer pasaje a la corriente eléctrica entre el medio externo y el interior del equipamiento, proveyendo también la aislación necesaria en relación a la carcasa del equipamiento. Algunos de los ejemplos de aplicación más comunes son transformadores de potencia, reactores de derivación y disyuntores de alta tensión.

A pesar de tratarse de un accesorio de los diversos equipamientos citados, y de en general su costo individual ser relativamente pequeño cuando es comparado con el costo global del dispositivo, los bushings desempeñan una función esencial para la operación del equipamiento.

Por otro lado, los bushings están sujetos a esfuerzos dieléctricos considerables, y una falla en su aislación puede reflejarse en daños no sólo en el bushing, sino también en el equipamiento a que está asociado. En casos extremos, una falla dieléctrica en un bushing puede llevar a la total destrucción del equipamiento de alta tensión (en el caso de un transformador de potencia, por ejemplo, los perjuicios en un suceso de este porte pueden ser de algunas centenas de veces el costo del bushing que originó el problema).

Entre los diversos tipos de bushing existentes, se destacan para aplicación en equipamientos de alta y extra-alta tensión los bushings del tipo condensivo, en que su cuerpo aislante consiste en diversas capas aislantes cilíndricas concéntricas, intercaladas a capas conductoras también cilíndricas cuya función es uniformizar al máximo el campo eléctrico. La capa conductora más interna puede estar eléctricamente conectada al conductor principal, de forma de aumentar el radio y disminuir el campo eléctrico en esta región (disminuyendo también los intensos campos eléctricos que pueden ser causados por rugosidades en el conductor principal). La capa conductora más externa es conectada al flange del bushing, y este a su vez a tierra. Ya las capas conductoras intermedias permanecen aisladas, con potencial fluctuante. Para aplicación a la intemperie, todo este conjunto estará contenido en un envoltorio impermeable, frecuentemente de porcelana. La conexión de la última capa (o de una de las últimas capas) conductora a tierra es hecha generalmente a través de una conexión removible próxima a la base del bushing, denominada tap de tensión o tap de prueba (figura 1).

El conjunto descrito arriba actúa eléctricamente como diversos capacitores conectados en serie, formando un divisor de tensión capacitivo. De esta forma, la diferencia de potencial total del conductor principal en relación a tierra es dividida igualmente entre los diversos capacitores.

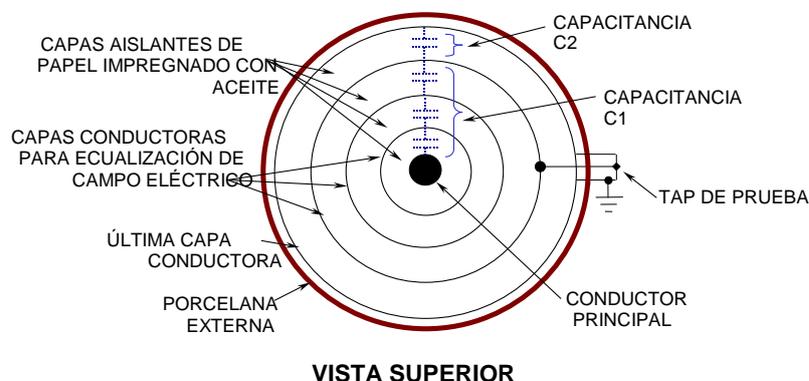


Figura 1 – Forma constructiva de un bushing condensivo

Cuando la tensión de operación es aplicada a un bushing condensivo, una corriente, denominada corriente de fuga, pasa a circular a través de su aislación, debido principalmente a su capacitancia, y en mucha menor proporción debido a sus pérdidas dieléctricas (expresadas por el factor de disipación o tangente delta). La figura 2 ilustra esta situación; en esta figura podemos observar el equivalente eléctrico obtenido con la construcción mostrada en la figura 1, ya con el bushing energizado.

Este es el modelo eléctrico equivalente “serie”. Un modelo eléctrico “paralelo” podría también ser aplicado, con los mismos resultados. Con el modelo adoptado, tenemos la siguiente corriente de fuga resultante:

$$I_{fuga} = \frac{V_f}{Z} = \frac{V_f}{R - jX}$$

Donde “R” representa el componente resistivo de la impedancia de la aislación, que genera la parte resistiva de la corriente de fuga, asociada a las pérdidas dieléctricas, siendo “X” el componente reactivo debido a la capacitancia de la aislación.

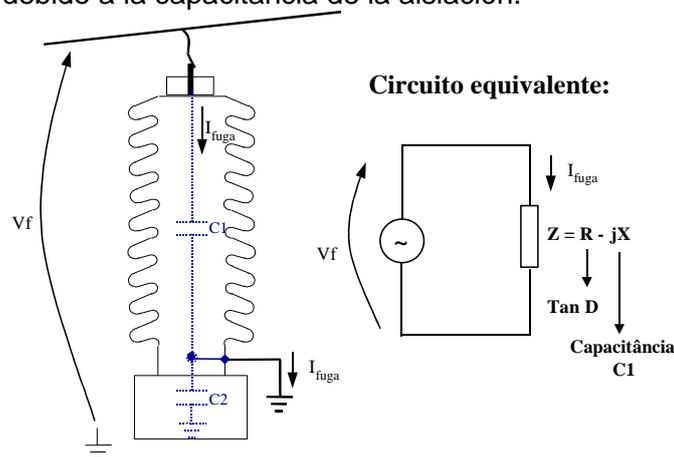


Figura 2 – Circuito equivalente de un bushing condensivo energizado

El objetivo del monitoreo on-line de bushings condensivos es la detección de alteraciones en la aislación del bushing aún en su fase inicial, indicando el desarrollo de condiciones que podrán llevar a la falla dieléctrica del equipamiento. Para esto es necesario detectar, con el bushing energizado, cambios en la capacitancia y en la tangente delta de la aislación, o sea, cambios en la impedancia “Z” de la aislación del bushing.

2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

En cada uno de los bushings la corriente de fuga I_{fuga} fluye a través de la capacitancia $C1$ hacia tierra, pasando por el tap de prueba, siendo esta corriente función de la tensión fase-tierra y de la impedancia de la aislación. De esta forma, cualquier alteración en la impedancia de la aislación (capacitancia o factor de disipación) se reflejará en una alteración correspondiente en la corriente de fuga que, en teoría, se podría utilizar para la detección de la alteración ocurrida en la impedancia.

Mientras tanto, uno de los obstáculos que se encuentra para la detección conforme descrito arriba es el orden de grandeza de las alteraciones que se desea monitorear. Alteraciones tan pequeñas como un incremento algebraico de 0,3% en el factor de disipación de un bushing

pueden representar la diferencia entre un bushing nuevo, en buenas condiciones, y un bushing en el límite de lo aceptable. Resulta evidente que una alteración tan pequeña en el factor de disipación provocará una alteración prácticamente insignificante en la corriente de fuga del bushing, tornando inviable su detección por medio del monitoreo sólo de la corriente de fuga de cada bushing.

Una de las técnicas que permite superar la limitación práctica demostrada es la utilización de la suma vectorial de la corriente de fuga de los tres bushings en un sistema trifásico. En un núcleo como este, las tres corrientes de fuga están desfasadas entre sí en aproximadamente 120°, y normalmente tienen la misma orden de magnitud, ya que los tres bushings tienen capacitancias en principio semejantes y las tensiones de las tres fases están cerca del equilibrio. Con ello, la suma de las tres corrientes de fuga tiende a un valor bastante menor que cada una de las corrientes de fuga tomadas individualmente, como es ilustrado en la figura 3.(a) para una condición inicial dada de capacitancias y factores de disipación.

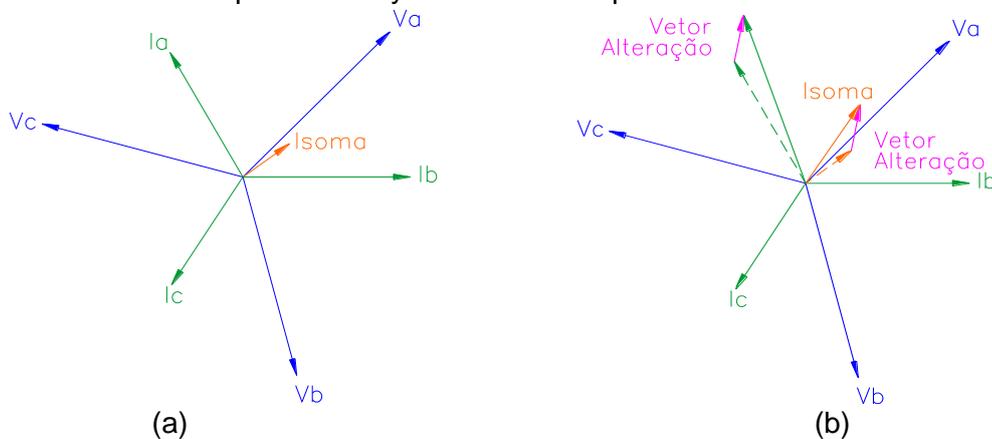


Figura 3 – Corrientes de fuga de tres bushings en un sistema trifásico y su suma; (a) Para una condición inicial dada; (b) con alteración en la capacitancia y factor de disipación del bushing de la fase A.

Suponiendo ahora que ocurra una alteración en la capacitancia y en el factor de disipación del bushing de la fase A, como mostrado en la figura 3.(b), el Vector Alteración ΔI que expresa el desplazamiento de la corriente I_a de su valor inicial hasta su valor final se refleja también en la corriente sumada, que es alterada en relación a su valor inicial según el mismo Vector Alteración ΔI .

$$\Delta I = \frac{I_{a \text{ ACTUAL}} - I_{a \text{ ANTERIOR}}}{I_{a \text{ ANTERIOR}}} = \frac{I_{\text{SUMA ACTUAL}} - I_{\text{SUMA ANTERIOR}}}{I_{\text{SUMA ANTERIOR}}}$$

Por lo arriba expuesto, se observan algunas características intrínsecas al método utilizado:

- Es necesaria la determinación de una referencia inicial de corrientes para el sistema, para en seguida compararlas con las nuevas mediciones on-line, de forma de determinar las alteraciones ocurridas en la capacitancia y en el factor de disipación de los bushings;
- No es efectuada la medición de los valores absolutos de capacitancia y tangente delta de los bushings, pero sí la medición de las variaciones ocurridas en estos parámetros. No obstante ello, una vez que sean conocidos los valores iniciales de capacitancia y tangente delta de cada bushing (valores presentes en el momento en que es

determinada la referencia inicial de corrientes), la medición de las variaciones ocurridas permite conocer los valores actuales de capacitancia y tangente delta;

- En el caso de bushings nuevos, pueden ser utilizados como valores iniciales de capacitancia y tangente delta los valores de placa determinados por el fabricante de los bushings. Sin embargo, para bushings ya en operación es recomendable que, en la instalación del sistema de monitoreo on-line, sea efectuada la medición de estos parámetros a través de métodos convencionales, con los bushings desenergizados. Con eso se garantiza que estén siendo utilizados por el sistema de monitoreo valores iniciales correctos.

Otra cuestión no abordada hasta este punto es que las corrientes de fuga y la corriente sumada son influenciadas no sólo por los cambios en la capacitancia y tangente delta de los bushings, sino también por alteraciones en las tensiones fase-tierra en cada bushing. Esta influencia es eliminada por medio de tratamientos matemáticos y estadísticos realizados en las mediciones, razón por la cual el proceso de determinación de la referencia inicial de corrientes es efectuado en un período de tiempo de 10 días luego del inicio de operación del sistema de monitoreo. Ya el proceso de medición de las alteraciones ocurridas, por las mismas razones, tiene una constante de tiempo de respuesta de aproximadamente 10 días.

Como expuesto arriba en la introducción, la construcción física del bushing da origen a un divisor de tensión capacitivo, siendo la porción inferior de este divisor normalmente cortocircuitada conectando a tierra el tap del bushing, de modo que la tensión de este en relación al tierra es de cero voltios. Para que sea posible la medición de la corriente de fuga del bushing, esta conexión a tierra directa es removida y substituida por el circuito de medición de la corriente de fuga. Debido a la baja impedancia de este circuito, la tensión del tap en relación al tierra permanece cerca de cero. Debe ser observado que, en caso de interrupción accidental de este circuito de medición, el divisor de tensión capacitivo generará una tensión en el tap del bushing que normalmente es superior a la rigidez dieléctrica del tap en relación al tierra, con riesgos de daños al bushing.

Para evitar que esto suceda, el adaptador de conexión al tap del bushing está provisto de un dispositivo limitador de tensión que entra en conducción en caso de abertura del circuito de medición, constituyendo un camino de baja impedancia para la corriente de fuga, de modo que la tensión del tap en relación al tierra permanece en pocos voltios. Este dispositivo limitador no es susceptible de desgastes de naturaleza eléctrica o mecánica, lo que permite que conduzca la corriente de fuga por tiempo indeterminado.

3. EXPERIENCIA EN CAMPO

La figura 4 ilustra la aplicación del monitoreo de bushings en un transformador trifásico de 500/230kV en la subestación Mesquita de Cemig. En esta figura se puede observar la topología típica de un sistema de monitoreo de bushings, constituido por 3 partes básicas:

- Adaptadores para tap – proveen la conexión eléctrica a los taps de los bushings, garantizando también su sellado contra intemperie. Incorpora la protección contra apertura accidental del circuito de medición, evitando que el tap permanezca en abierto;
- Módulo de Medición – recibe las corrientes de fuga de tres bushings de un conjunto trifásico, efectúa las mediciones de estas corrientes y su procesamiento matemático y estadístico, disponibilizando para el módulo de interfase los valores actuales de capacitancia y tangente delta a través de una puerta de comunicación serial;

- Módulo de Interfase – recibe las informaciones del(os) módulo(s) de medición y las disponibiliza de forma local en su display y remotamente a través de contactos de salida para alarma, salidas analógicas (mA) y puertas de comunicación serial. Opcionalmente, el Módulo de Interfase puede ser conectado también a la red Intranet de la empresa para acceso remoto a las mediciones.

Este sistema inició su operación monitoreando la capacitancia y la tangente delta de los bushings de 500kV y 230kV del transformador de potencia. En los gráficos de la figura 5 podemos observar el comportamiento típico de esas variables en un período de 5 meses. En ese intervalo, se observa que el sistema de monitoreo proporcionó mediciones que permanecieron bastante estables, con variaciones inferiores a 0,1% para las capacitancias y 0,05% (en variación absoluta) para las mediciones de tangente delta.

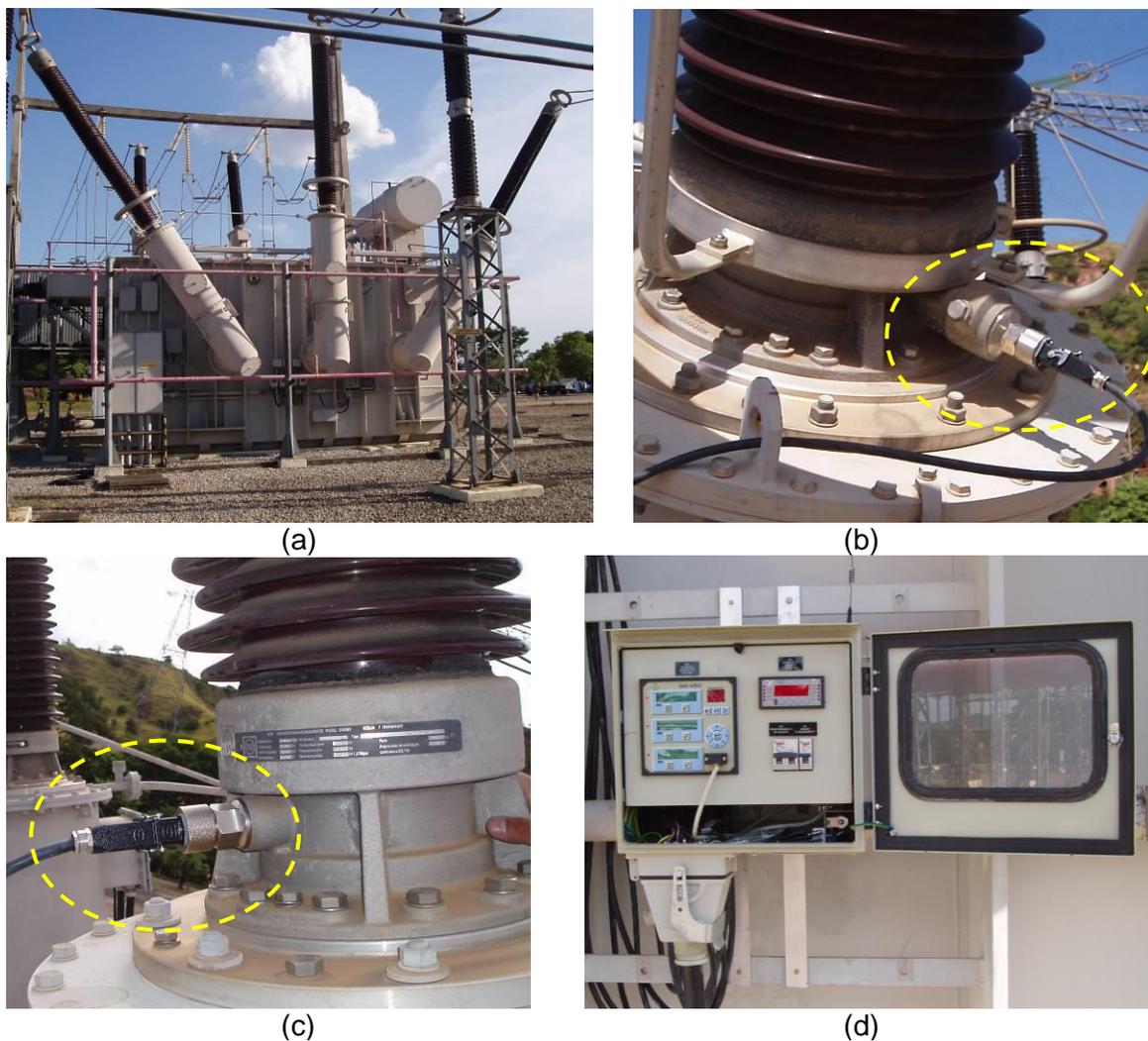


Figura 4 – Monitoreo de bushings en transformador trifásico; (a) Transformador; (b) Adaptador en el tap del bushing 500kV; (c) Adaptador en el bushing 230kV; (d) Panel con Módulos de Medición y de Interfase.

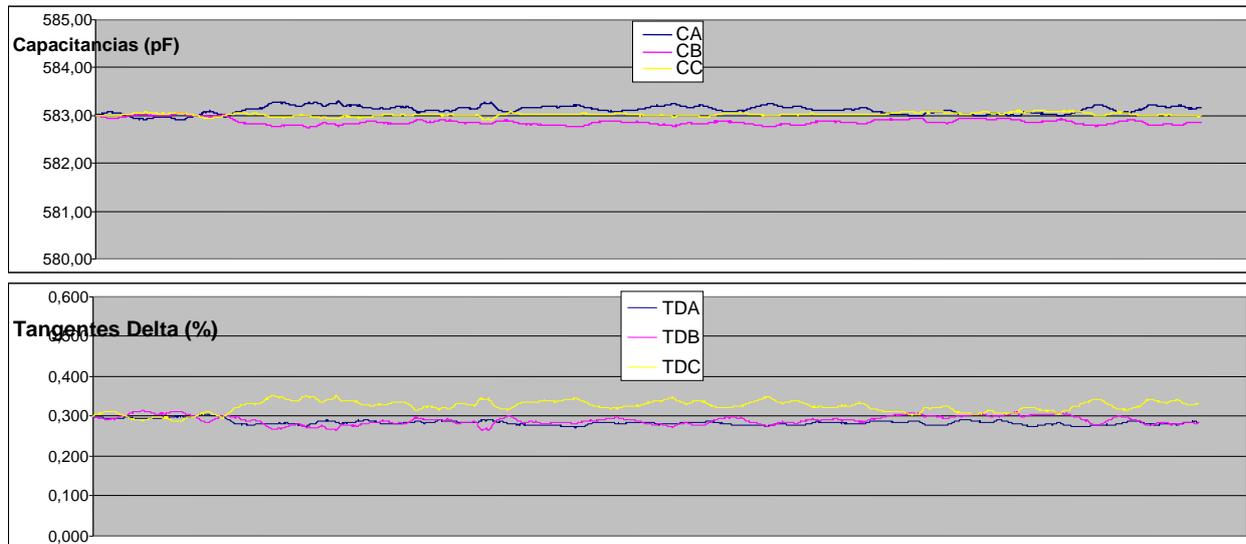


Figura 5 – Oscilaciones típicas en las mediciones de Capacitancia y Tangente Delta. Esos resultados, además de mostrar que la aislación de los bushings no presentó variación en el período, demuestran también la estabilidad de la técnica empleada para el monitoreo on-line y su inmunidad a la interferencia de fenómenos transitorios en las tensiones del sistema de potencia. Tales fenómenos pueden incluir irrupciones de maniobra, oscilaciones en las tensiones fase-tierra y desequilibrios entre fases, como se puede observar indirectamente en el gráfico de la figura 6, donde son presentadas las mediciones típicas de las corrientes de fuga en los taps de los bushings para el mismo período. Como no ocurrieron variaciones en la capacitancia y en la tangente delta de los bushings, todas las variaciones observadas en esas corrientes de fuga son causadas por las oscilaciones normales de las tensiones del sistema eléctrico, que sin embargo no provocaron variaciones indebidas en las mediciones de capacitancia y tangente delta.

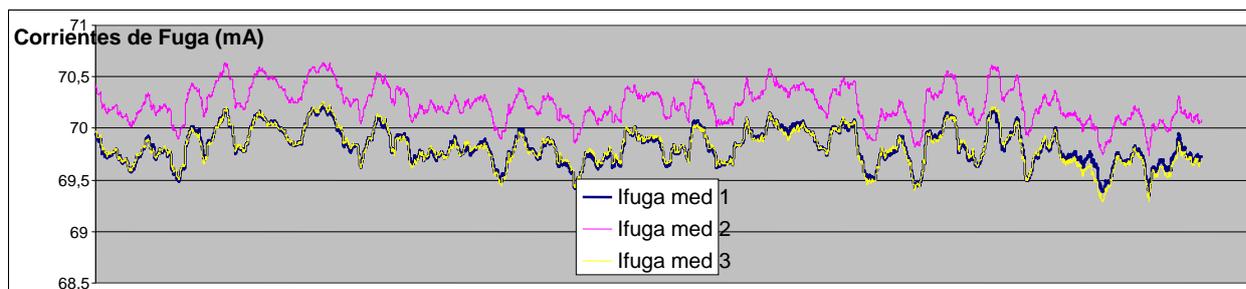


Figura 6 – Mediciones típicas de Corrientes de Fuga

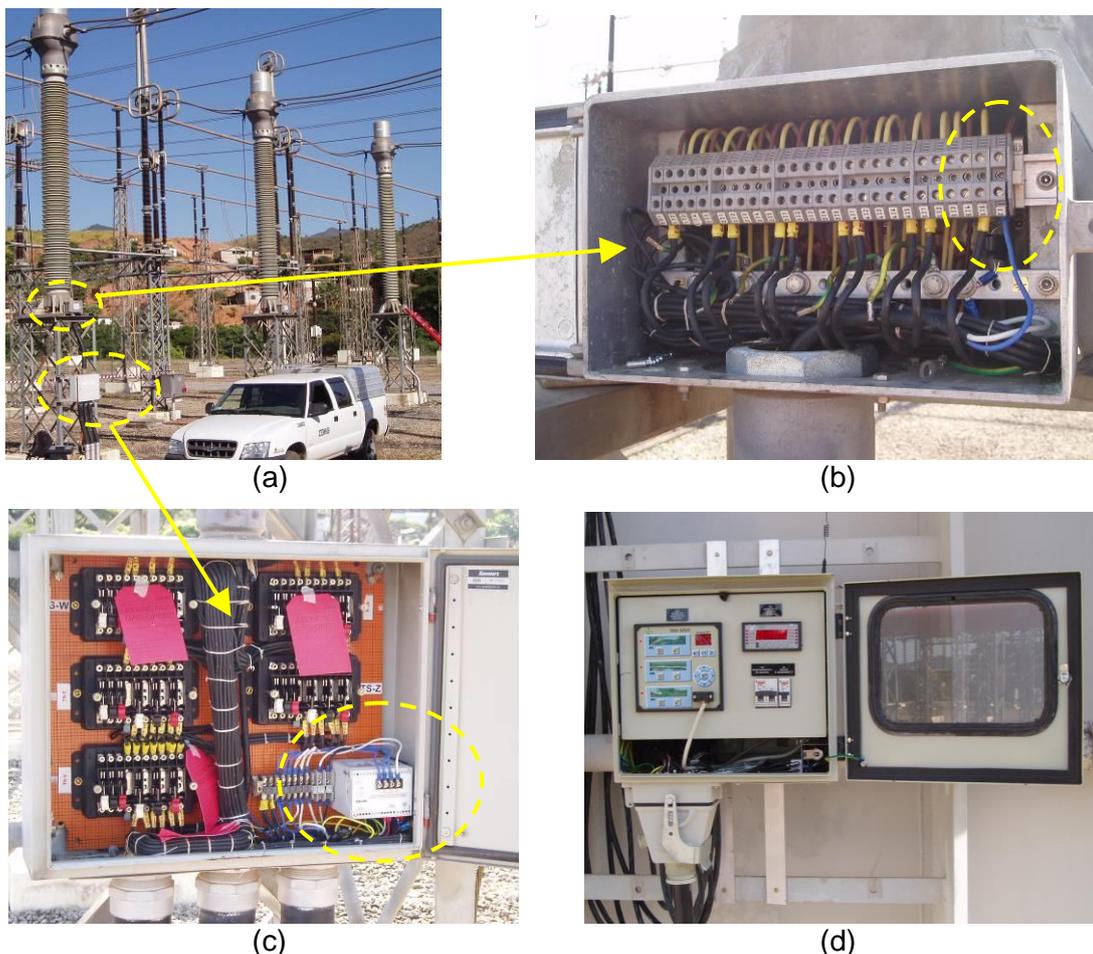


Figura 7 – Monitoreo de Transformadores de Corriente; (a) TCs monofásicos 500kV; (b) Caja secundaria con descarga a tierra del blindaje disponible; (c) Panel Común con Módulo de Medición; (d) Módulo de Interfase en el transformador de potencia.

Posteriormente, en febrero de 2006, el sistema de monitoreo de bushings recibió una expansión para monitorear la capacitancia y la tangente delta de un conjunto de 3 Transformadores de Corriente monofásicos de 500kV. Eso fue posible por el hecho que la descarga a tierra del blindaje de esos TCs está disponible en la caja de conexiones secundarias, como muestra la figura 7, permitiendo su conexión a un nuevo Módulo de Medición del sistema de monitoreo de bushings. Ese Módulo de Medición fue instalado en el panel común de los TCs, efectuando la medición de las corrientes de fuga y de su suma para los tres TCs, y fue interconectado al Módulo de Interfase ya existente en el transformador de potencia, que pasó a monitorear la aislación (capacitancia y tangente delta) tanto de los bushings como de los TCs.

4. CONCLUSIÓN

Los bushings de alta tensión condensivos son un accesorio esencial para la operación segura de diversos equipamientos de alta tensión, tales como transformadores de potencia y disyuntores. Este artículo demostró el principio de funcionamiento que permite el monitoreo on-line de este tipo de bushing, así como la aplicación de ese sistema a los bushings de un transformador trifásico 500/230kV y a tres transformadores de corriente monofásicos 500kV.

A través de la operación de ese sistema durante algunos meses pudieron ser observadas su estabilidad e inmunidad a fenómenos transitorios y oscilaciones del sistema eléctrico de



potencia, que no causaron variaciones indebidas en las mediciones de capacitancia y tangente delta.

Durante el período bajo estudio, las oscilaciones observadas en las mediciones fueron menores que 0,1% para capacitancia y 0,05% (en valor absoluto) para tangente delta, tornando viables ajustes bastante sensibles para las alarmas de primer nivel por elevación en esas variables, de forma que en caso de defecto en la aislación se obtendrían alertas aún en su fase incipiente, pero sin el riesgo de que se produzcan falsas alarmas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alves, Marcos, “Sistema de Monitoração On-Line de Transformadores de Potência”, Revista Eletricidade Moderna, Maio/2004.
- [2] Alves, Marcos, “Sistema de Monitoração On-Line de Bushings Condensivas”, Revista Eletricidade Moderna, Abril/2005.
- [3] Alves, Marcos; Zanetta, Luis, “ Monitoração do Envelhecimento Térmico em Bushings Condensivas Isoladas com Papel Impregnado com Óleo”, X SEPOPE, Maio/2006.
- [4] IEEE Std C57.19.100-1995, “IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings”, Março/1995.