

# Monitoreo On-Line de Bushings Condensativos

Marcos Eduardo Guerra Alves

Treetech Sistemas Digitais

## 1. Introducción

Los bushings son accesorios aplicados a equipos de alta tensión con el objetivo de proveer paso a la corriente eléctrica entre el medio externo y el interior del equipo, proporcionando también el aislamiento necesario en relación al cuerpo del equipo. Algunos de los ejemplos de aplicación más comunes son transformadores de potencia, reactores de derivación e interruptores de alta tensión.

A pesar de tratarse de un accesorio de los diversos equipos citados y de en general su costo individual ser relativamente pequeño cuando comparado al costo global del dispositivo, los bushings desempeñan una función esencial a la operación del equipo.

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

De entre los diversos tipos de bushing existentes, se destacan para aplicación en equipos de alta y extra-alta tensión los bushings del tipo condensativo, cuyo cuerpo aislante consiste de 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 que aumente el rayo y disminuya 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 empalme del bushing y éste por su vez al cable tierra. Ya las capas conductoras intermedias permanecen aisladas, con potencial flotante. Para aplicación a la intemperie, todo este conjunto estará recubierto en

un involucro impermeable, frecuentemente de porcelana. La conexión de la última capa (o de una de las últimas capas) conductora al cable tierra es hecha generalmente a través de una ligación removible próxima a la base del bushing, denominada tap de tensión o tap de test. Ver figura 1.

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



Figura 1 – Forma constructiva de un bushing condensativo

Cuando la tensión de operación es aplicada a un bushing condensativo, una corriente, denominada corriente de fuga, pasa a circular a través de su aislamiento, debido principalmente a su capacitancia y en mucha menor proporción debido a sus pérdidas dieléctricas (expresas por el factor de disipación o tangente delta). La figura 2 de más abajo ilustra esta situación; en esa 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 la componente resistiva de la impedancia del aislamiento, que genera la parte resistiva de la corriente de fuga, asociada a las pérdidas dieléctricas, siendo “X” la componente reactiva debido a la capacitancia del aislamiento.

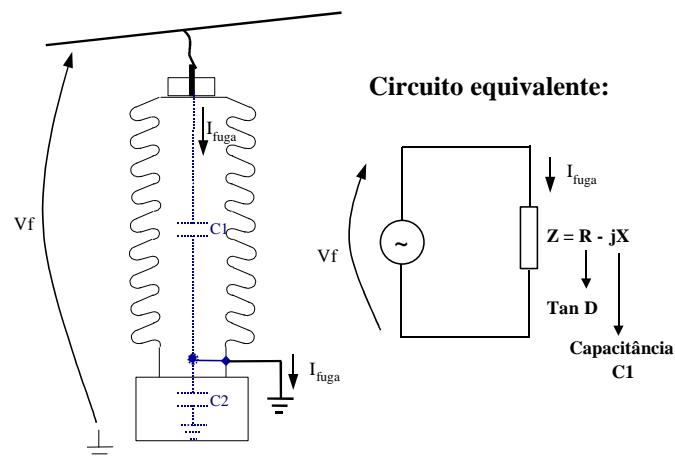


Figura 2 – Circuito equivalente de un bushing condensativo energizado

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

## 2. Metodología

En cada uno de los bushings la corriente de fuga  $I_{fuga}$  fluye a través de la capacitancia  $C_1$  para el cable tierra, pasando por el tap de test, siendo esta corriente función de la tensión fase-tierra y de la impedancia del aislamiento. De esta forma, cualquier alteración en la impedancia del aislamiento (capacitancia o factor de disipación) se reflejará en una alteración correspondiente en la corriente de fuga que, teóricamente, se podría utilizar para la detección de la alteración ocurrida en la impedancia.

Entretanto, uno de los obstáculos que se encuentra para la detección conforme descrito arriba es la medida de magnitud de las alteraciones que se desea monitorear. Alteraciones tan pequeñas quanto un incremento algébrico del 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 del aceptable. Queda 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 apena 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 arreglo como éste, las tres corrientes de fuga están desfasadas entre sí en aproximadamente  $120^\circ$  y normalmente tienen la misma medida de magnitud, pues los tres bushings tienen capacitancias en principio semejantes y las tensiones de las tres fases están próximas del equilibrio. Con eso, la suma de las tres corrientes de fuga tiende a un valor bastante menor que cada una das corrientes de fuga tomadas individualmente, como ilustrado en la figura 3(a) para una dada condición inicial de capacitancias y factores de disipación.

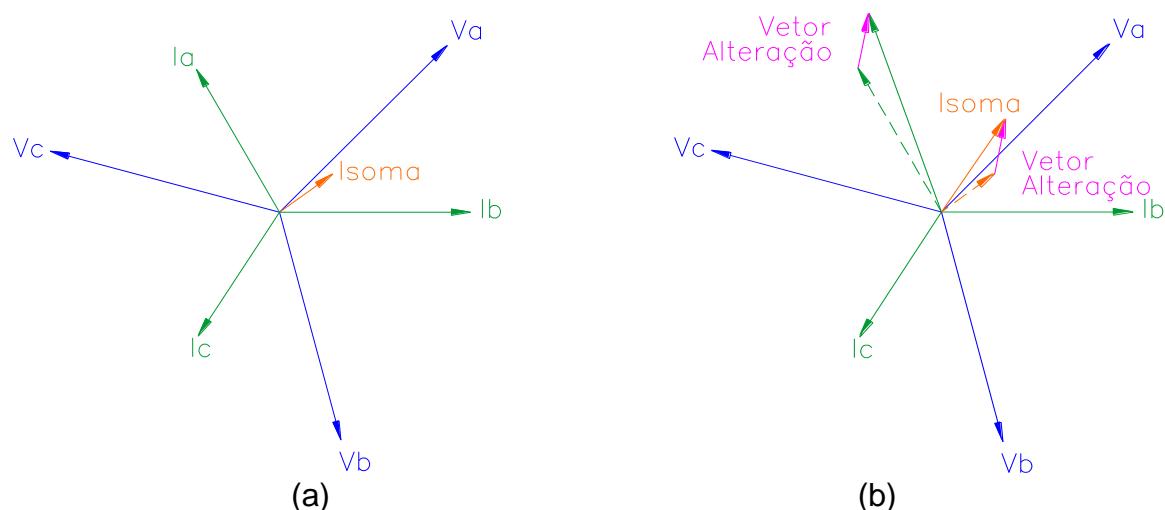


Figura 3 – Corrientes de fuga de tres bushings en un sistema trifásico y su suma total; (a) para una dada condición inicial; (b) con alteración en la capacitancia y factor de disipación del bushing de la fase A.

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  $\Delta I$  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 segundo el mismo Vector Alteración  $\Delta I$ .

$$\Delta I = I_a \text{ ACTUAL} - I_a \text{ ANTERIOR} = I \text{ SUMA ACTUAL} - I \text{ SUMA ANTERIOR}$$

Este Vector Alteración tiene peso prácticamente insignificante cuando comparado a la magnitud de la corriente de fuga de la fase A. Pero lo mismo no ocurre cuando este vector es comparado a la corriente sumada, lo que permite su detección y, por lo tanto, la detección de la alteración ocurrida en la impedancia del respectivo bushing.

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

- Es necesaria la determinación de una referencia inicial de corrientes para el sistema, para en seguida compararla a las nuevas mediciones on-line, de forma que determine 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 y sí la medición de las variaciones ocurridas en estos parámetros. Sin embargo, 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 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. Entretanto, 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 no energizados. Así se garantiza que están siendo utilizados por el sistema de monitoreo valores iniciales correctos.

Una otra cosa no abordada hasta este punto es que las corrientes de fuga y la corriente sumada son influenciadas no apenas 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 diez días después de la puesta en marcha 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 diez días.

Como referida anteriormente en la introducción, la construcción física del bushing da origen a un divisor de tensión condensativo, siendo la porción inferior de este divisor normalmente cortocircuitada aterrizando el tap del bushing, de modo que la tensión de éste en relación al cable tierra es de cero volt. Para que sea posible la medición de la corriente de fuga del bushing, este aterramiento directo es removido y sustituido 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 cable tierra permanece próxima de cero. Debe ser observado que, en caso de interrupción accidental de este circuito de medición, el divisor de tensión condensativo generará una tensión en el tap del bushing que normalmente es superior a la rigidez dieléctrica del tap en relación al cable tierra, con riesgos de daños al bushing.

Para evitar esta ocurrencia, 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 forma que la tensión del tap en relación al cable tierra permanece en pocos volt. Este dispositivo limitador no está susceptible a desgastes de naturaleza eléctrica o mecánica, lo que permite que conduzca la corriente de fuga por tiempo indeterminado.

### 3. Ejemplos de aplicación

Las figuras 4 y 5 ilustran la aplicación del monitoreo de bushings en dos instalaciones. En estas figuras se puede observar la topología típica de un sistema de monitoreo de bushings, constituido de 3 partes básicas:

- Adaptador para tap – provee la conexión eléctrica al tap del bushing, garantizando también su vedamiento contra intemperies. 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 un primer nivel de procesamiento de las informaciones, disponiéndolas para el módulo de interfaz a través de una puerta de comunicación serial;
- Módulo de Interfaz – recibe las informaciones del módulo o de los módulos de medición y efectúa su procesamiento matemático y estadístico, disponiendo como resultado los valores actuales de capacitancia y tangente delta en las pantallas frontales. Típicamente, este módulo proporciona salidas analógicas (mA), contactos de alarma y puertas de comunicación serial.

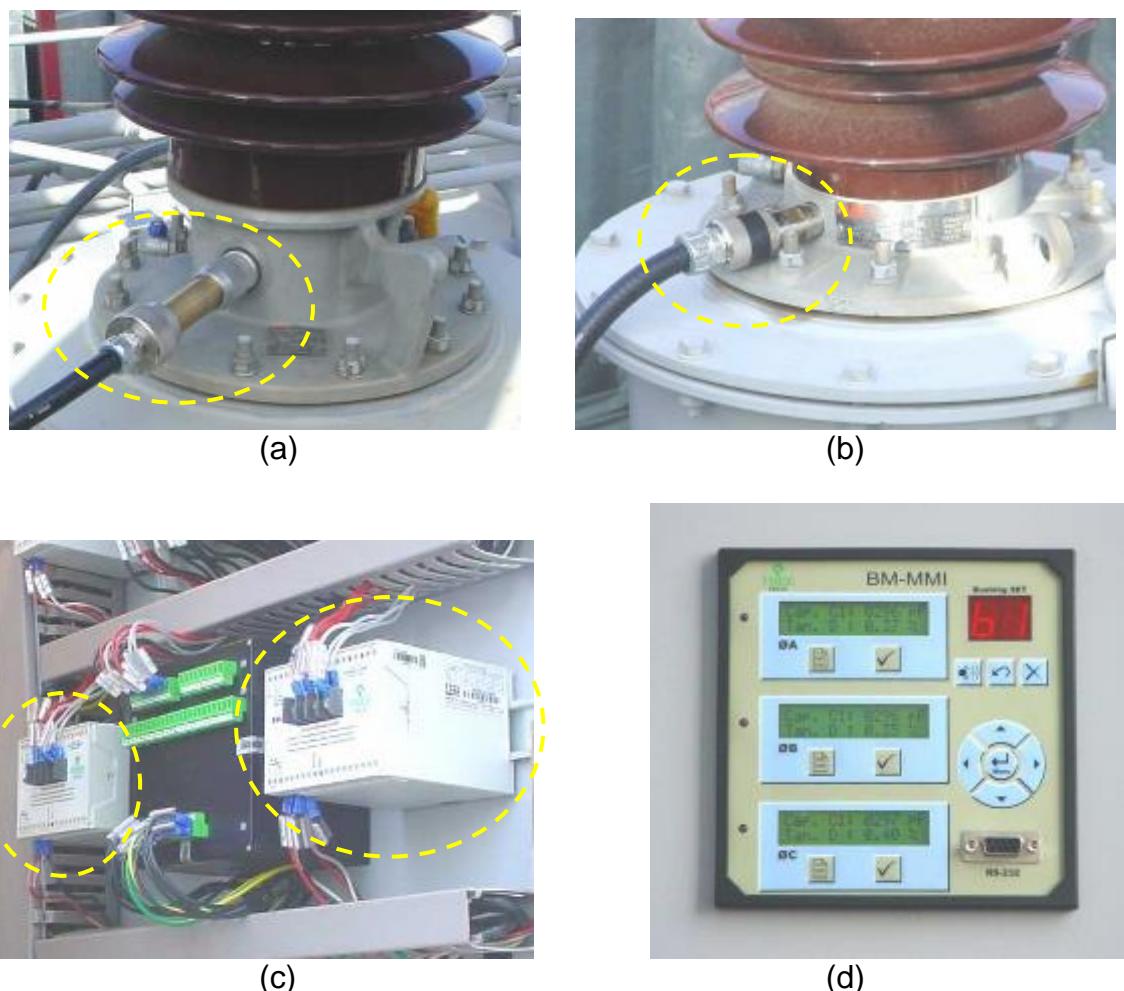


Figura 4 – Monitoreo de bushings en transformadores trifásicos

En la figura 4 son monitoreados los bushings del primario y del secundario de dos transformadores trifásicos 230/138kV 150MVA, en operación en el sur de Brasil: (a) Adaptador de tap en uno de los bushings del primario; (b) Adaptador de tap en uno de los bushings del secundario; (c) Módulos de medición para los bushings del primario y del secundario; (d) Módulo de interfaz.

En la figura 5 son monitoreados los bushings del primario y del secundario de dos bancos de transformadores monofásicos 525/230kV 1000MVA, en operación en San Diego, California, EEUU: (a) Adaptador de tap en uno de los bushings del primario; (b) Adaptador de tap en uno de los bushings del secundario; (c) Panel centralizador para uno de los bancos de transformadores con los módulos de medición para los bushings del primario y del secundario; (d) Módulo de interfaz instalado en la sala de control de la subestación.

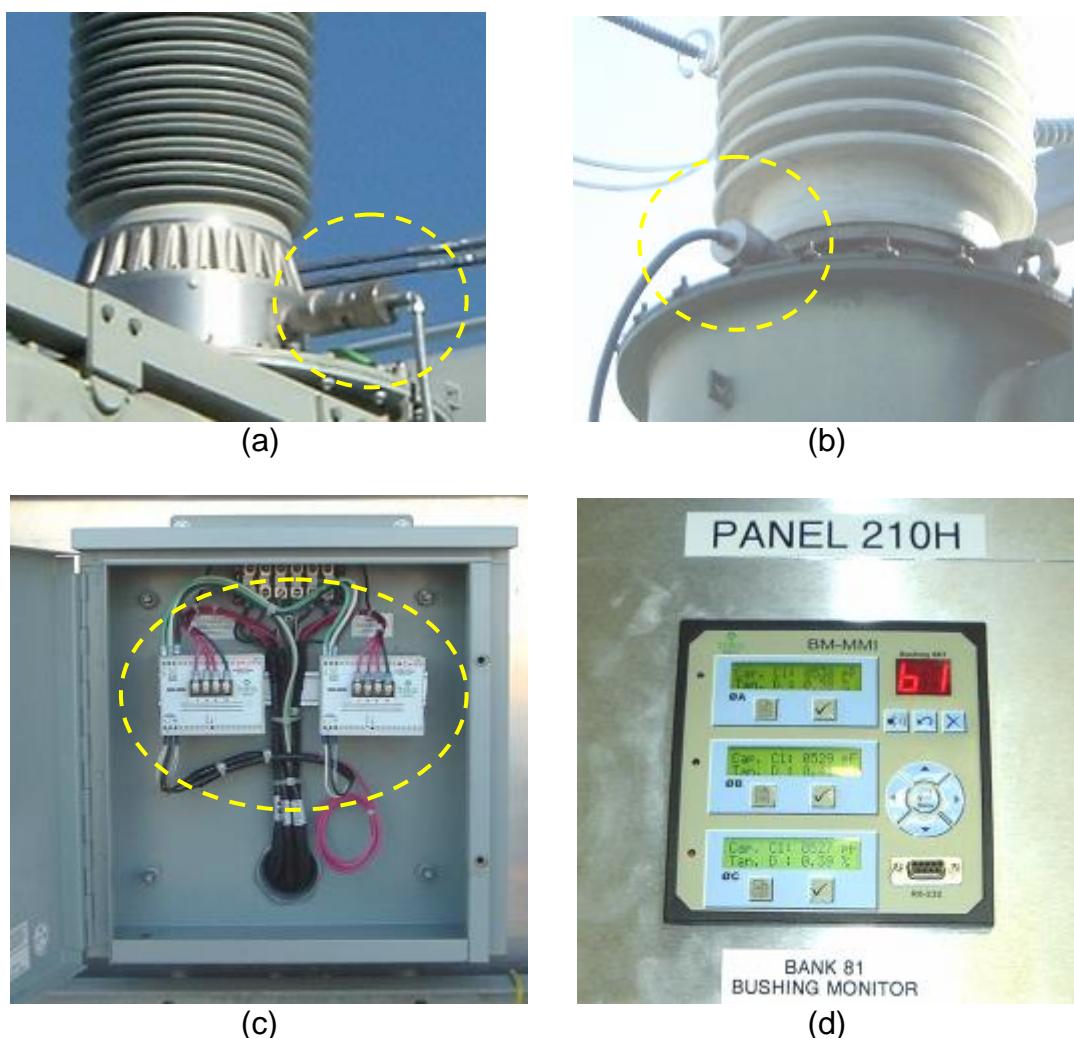


Figura 5 – Monitoreo de bushings en transformadores monofásicos

#### 4. Conclusión

Los bushings condensativos de alta tensión son un accesorio esencial para la operación segura de diversos equipos de alta tensión, tales como transformadores de potencia e interruptores. Este artículo demostró el principio de funcionamiento que permite el monitoreo on-line de este tipo de bushing, así como algunos ejemplos de aplicaciones y la topología típica de un sistema de monitoreo.

Con eso, pueden ser reducidas o incluso eliminadas las desconexiones periódicas para testes con el bushing no energizado, sustituyendo el mantenimiento preventivo por el mantenimiento basado en el estado. Además del ahorro obtenido al eliminar desconexiones y procedimientos de

mantenimiento que se revelan innecesarios en la mayoría de las veces, el monitoreo on-line de los bushings reduce el riesgo de fallas catastróficas que puedan ocurrir en el intervalo de los mantenimientos preventivos, que generalmente tienen periodicidad de años.

Marcos E. Guerra Alves trabaja con Treetech Sistemas Digitais desde el 1992. Especialista en sistemas de control y monitoreo de transformadores de potencia, es gerente del Departamento de Pesquisas e Desenvolvimentos. Se graduó como Ingeniero Eléctrico por la Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, y en el 2005 concluyó su Maestría en el área de Energía y Automación de la Universidad de São Paulo (USP), Brasil.

### Implementado no artigo

#### Ejemplos de aplicación

Las figuras 4 y 5 ilustran la aplicación del monitoreo de aisladores en dos instalaciones.

En estas figuras se puede observar la topología típica de un sistema de monitoreo de bujes, sustituido por tres partes básicas:

-Adaptador para tap – provee la conexión eléctrica al tap del aislador, garantizando también su sellado contra intemperie. Incorpora la protección contra abertura accidental del circuito de medición, evitando que el tap permanezca abierto;

-Módulo de medición – recibe las corrientes de fuga de tres aisladores en conjunto trifásico, efectuar las mediciones de esas corrientes y un primer nivel de procesamiento de las informaciones, disponibilizándolas para el módulo de interfase a través de una puerta de comunicación en serie; y

- módulo de interfase – recibe las informaciones del/os módulo/s de medición y efectúa su procesamiento matemático y estadístico, disponibilizando como resultado los valores actuales de capacitancia y tangente delta en los displays frontales. Ese módulo proporciona salidas analógicas (mA), contactos de alarma y puertas de comunicación en serie.

La figura 4 muestra el monitoreo de los aisladores del primario y del secundario de dos transformadores trifásicos de 230.138 kV, 150 MVA, en operación en el Sur de Brasil. En él se ve: A) adaptador de tap en uno de los aisladores del primario; b) adaptador de tap en uno de los aisladores del secundario; c) módulos de medición para los aisladores del primario y del secundario; y d) módulo de interfase.

La figura 5 ilustra el monitoreo de los aisladores del primario y del secundario de dos bancos de transformadores monofásicos de 525/230 kV, 1000 MVA, en operación en San Diego, California, EE.UU., mostrando: a) adaptador de tap en uno de los aisladores del primario. B) adaptador de tap en uno de los aisladores del secundario; c) panel del secundario; y d) módulo de interfase instalado en la sala de control de la subestación.

### Conclusión

Los aisladores 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 aislador, así como algunos ejemplos de aplicaciones y la topología típica de un sistema de monitoreo. Con ello, pueden ser reducidos o incluso eliminadas las interrupciones y los procedimientos de mantenimiento que se revelan innecesarios en la mayoría de las veces, el monitoreo on-line de los aisladores reduce el riesgo de fallas catastróficas que podrían ocurrir en el intervalo de los mantenimientos preventivos, que generalmente tiene periodicidad en el orden de años.