



**XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil**

Fouad Brikci
ZENSOL AUTOMATION INC
zensol@zensol.com

Pruebas vibro acústicas aplicadas a Cambiadores de Tomas

Palavras-chave

Analizador de Cambiador
TAP-4
Teste vibros acústico
Transformadores de Alta Tensão

Resumo

El método vibro acústico es capaz de detectar diversas anomalías mecánicas en los Cambiadores de Tomas bajo Carga (OLTC) de Transformadores de Alta Tensión.

Este artículo describirá los aspectos teóricos, los métodos de medición y casos exitosos reales de los métodos de prueba vibro acústicos. Mostraremos cómo interpretar las firmas vibro acústicas de manera sencilla.

1. Introdução

Entre 40 y 50% de las fallas (reporte CIGRE) en los cambiadores de tomas de transformadores de alta tensión son de origen mecánico.

Una de las varias ventajas de esta tecnología es que el transformador está en línea y no se requiere una paralización, y que puede detectar tanto los movimientos del cambio de la toma y la tensión de la línea al mismo tiempo.

Luego de una breve descripción del método de medición vibro acústico, se presentará un enfoque sistemático para preparar y para ejecutar las pruebas. Le mostrará como interpretar las firmas vibro acústicas obtenidas durante las pruebas reales. También presentará algunas dificultades encontradas durante las pruebas reales y cómo resolverlas.

En los ejemplos de casos de cambiadores de tomas, mostrará cómo los problemas de sincronismo y de

desgaste de contactos son fácilmente detectados EN LÍNEA o FUERA DE LÍNEA.

Luego de una serie de pruebas reales realizadas en diferentes subestaciones eléctricas en todo el mundo, se evaluará la eficiencia de la prueba vibro acústica en un programa de mantenimiento y en un programa de control de calidad.

2. Desarrollo

1) Vibro Acústica Aplicada a los Cambiadores de Tomas

Este nuevo método permite una detección temprana de los desperfectos tales como el desgaste por contactos, arco en el desviador y el selector, problemas de sincronismo, problemas en el mecanismo de accionamiento y fallas en el freno.

Los métodos y herramientas existentes para reducir las fallas del OLTC son principalmente:

- Análisis Termográfico
- Análisis de Gas Disuelto (DGA)
- Análisis de Resistencia Dinámica (fuera de línea)
- Análisis de la Corriente del Motor

Todos estos métodos son comparados en la Figura 1, y notamos que el método vibro acústico puede evitar la mayoría de estas fallas de OLTC. De hecho, el método vibro acústico descrito aquí combina las ventajas del análisis vibro acústico con las ventajas del análisis de la corriente del motor.

Problemas con:	Termografía		Análisis Disuelto en Gas		Resistencia Dinámica		Corriente del Motor		Acústica y Corriente del Motor (Tap-4)	
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
Conexión / Engranajes					☐	☐	√	√	√ M	√ M
Sincronización / Secuencia					√	√			√ E	√ E
Controles / Relés							√	√	√ G	√ G
Motor							√	√	√ M	√ M
Freno							√	√	√ G	√ G
Lubricación							√	√	√ G	√ G
Alineamiento							√	√	√ G	√ G
Arco			√	√					√ E	√ G
Sobrecalentamiento / Coquificación	√	√	√	√					√ M	√ M
Desgaste de Contactos					√		☐		√ G	√ G
Transición					√	√	☐	☐	√ E	N/A

R: OLTC Tipo Resistivo L: OLTC Tipo Reactivo
 E - Excelente G - Bueno M - Moderado

Figura 1
 Comparación de los Métodos de Diagnóstico

1.1 Principio del Diagnóstico

Notamos que cada operación de cualquier Cambiador de Tomas Bajo Carga (OLTC) produce un patrón (o firma, o huella) de onda vibro acústica que se transmite a través de los elementos estructurales.

Con un sensor vibro acústico (un acelerómetro), podemos grabar esta señal (de la misma manera como un estetoscopio capta el latido de una persona). Un OLTC estable siempre muestra firmas consistentes. Cualquier degradación del OLTC induce cambios en la firma vibro acústica que nuestro "ojo humano" puede captar fácilmente. De hecho, podemos observar cuidadosamente estas firmas, para analizarlas en gran detalle, y para comparar las firmas entre ellas. También somos capaces de considerar solamente las "formas" de las firmas para deducir cualquier similitud o diferencia.

El paso siguiente es hallar las herramientas matemáticas adecuadas para procesar las señales de los datos en bruto (sin procesar) y mantener sólo la información pertinente tal como "la forma típica" o la firma típica de cada OLTC.

Basado en las observaciones previas, sería una buena idea construir una base de datos de las firmas saludables y no saludables (buenas y malas) únicas a cada OLTC. Las saludables podrían ser nuestras referencias. Las firmas no saludables podrían clasificar e identificar diversos problemas de cambiadores de tomas (como desgaste de contactos, etc.).

Luego, usando las firmas de referencia, es fácil comparar los OLTC de tipos similares, para observar la evolución (tendencias) de la firma de un OLTC en particular sobre el tiempo. Si la firma se desvía de la referencia, se puede abrir el OLTC para completar el análisis.

El reto de Hydro-Québec, los últimos 15 años, ha sido la de suministrar a sus usuarios un sistema que combine un instrumento y un software que contenga todas las herramientas necesarias, así como la de suministrar una base de datos que contenga todas las firmas (buenas y malas) de sus OLTC.

Esta herramienta, luego de 5 años de uso dentro de Hydro-Québec, ha demostrado su capacidad de reducir los costos de mantenimiento asociados con las fallas de transformadores. Estos alentadores resultados han llevado al siguiente paso, el cual es crear una prueba rápida, anual, vibro acústica y al mismo tiempo una prueba de Análisis de Gas Disuelto (DGA).

En estos momentos, la base de datos de fácil acceso contiene las firmas de varios OLTC:

- Modelos MR Reinhausen: C, D, E, F, G, M, T
- Modelos ABB UC: B, C, D, G, L
- Modelos ABB UZ: B, C, D, E, F
- Federal Pioneer: tipo resistivo.

Esta base de datos está creciendo continuamente, con los OLTC usados por las empresas eléctricas de Norte América y de Europa y por los fabricantes de Transformadores en todo el mundo.

1.2 Instrumento de Grabación de Datos

Todas las mediciones reportadas se realizan con un sistema de adquisición de datos controlado por software, de alta performance y computarizado fácilmente disponible en estos tiempos. Las principales características de este sistema son cuatro entradas analógicas paralelas (una para el sensor de corriente y tres para los

acelerómetros), una frecuencia de muestreo de 100 KHz (100 Kilo muestras/s o tiempo de muestreo de 10 microsegundos), una resolución de 16 bits para los conversores de entradas analógica/digital y una capacidad ilimitada de grabación. La “capacidad ilimitada de grabación” es debida al hecho que usualmente el tiempo de grabación es de unos pocos segundos hasta 30 segundos, y el tiempo de muestreo de 10 microsegundos es debido al rico contenido de frecuencias de la señal vibro acústica a ser analizado. La grabación empieza y se detiene automáticamente por la corriente del accionamiento del motor. Otros modos de grabación también están disponibles para cambiadores de tomas inusuales o para flexibilidad de la medición.

Nosotros, por supuesto, no recomendamos sistemas de prueba de adquisición de datos de menor performance debido a que ello afectará los resultados de los análisis y las firmas de la base de datos de referencia no pueden ser usadas para propósitos de comparación.

Los sensores usados constan típicamente de más de 80% de casos de dos transductores: un sensor abierto de una pinza amperimétrica y un acelerómetro. Podríamos usar más de un acelerómetro por cada tanque de cambiadores de tomas separado, o para detectar fácilmente los problemas de sincronismo.



Figura 2
El TAP-4



Figura 2
Transformador

1.3 Medición, Instalación, Ubicación, Métodos de Grabación Vibro Acústica

La medición vibro acústica se realiza con un acelerómetro piezoeléctrico. Tiene una amplia frecuencia y una buena linealidad en todos los rangos. Es relativamente robusto y confiable de modo que sus características se mantienen estables sobre un largo período de tiempo. La sensibilidad típica de los acelerómetros usados en los cambiadores de tomas es de 100 mV/g, el rango de medición de +/- 50 g, el rango de frecuencia es de más de 15 kHz con una no linealidad por debajo de 1%, la frecuencia de resonancia es de más de 45 kHz y el límite de sobrecarga es de +/- 5000 g.



Figura 3
Pasadores-a



Figura 3
Pasadores-b

Se recomienda montar el acelerómetro sobre una base de montaje (vea las figuras 2,3 e 4). Se puede instalar fácilmente la base de montaje con "súper pegamento", una vez que se limpia la superficie de montaje de toda la suciedad y la grasa. La base de montaje se coloca permanentemente al transformador, lo cual tiene la ventaja de hacer todas las mediciones subsecuentes en la misma ubicación, haciendo de esa manera más fácil comparar las firmas en un cambiador de tomas en particular.

También es posible usar cera de abejas para mediciones rápidas sin afectar la respuesta de la frecuencia de la señal vibro acústica. Evite usar bases de montaje magnéticas debido a que estos reducen la respuesta de frecuencia de la señal. Para entender esto, una señal con un ancho de banda de 31 kHz se corta hasta 7 kHz.



Figura 4
Instalación de los Pasadores (Studs)

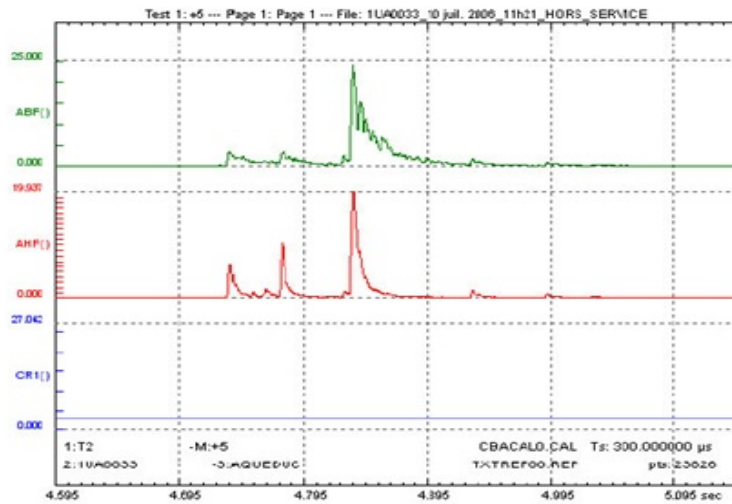


Figura 15 - Visualización del Rastro Amplificado antes de la Inspección

La selección del punto de montaje es una decisión importante que afectará todas las campañas subsecuentes de mediciones. Varios parámetros deben considerarse:

- Si el transformador está en línea, debe considerar mantenerse a una distancia segura. Debe tomarse en cuenta las recomendaciones para la posición de los sensores.

- Si el transformador está fuera de línea, entonces mantener una distancia segura ya no es un problema.
- Se recomienda instalar las bases cerca a los elementos rígidos estructurales como vigas de refuerzo o abrazaderas, o más precisamente cerca de 15 cm por debajo del borde de la placa de la cubierta (ver la Figura 5).
- Evite las áreas llenas de gas y busque ubicaciones por debajo del nivel del aceite.
- Se recomienda evitar el medio de placas grandes o puertas de compartimiento. Estas superficies generan sus propias vibraciones, las cuales afectan la sensibilidad de las firmas vibro acústicas.
- Si no está seguro cuál es el mejor lugar para instalar los acelerómetros, a pesar de la documentación disponible, el mejor consejo es la de obtener dos o tres acelerómetros idénticos, seleccionar un tap (cambiador) específico, seleccionar dos o tres ubicaciones de acuerdo al mejor criterio de cada uno, luego opere el cambiador de tomas siempre en el mismo tap de referencia, y compare las grabaciones (amplitudes y envolventes).

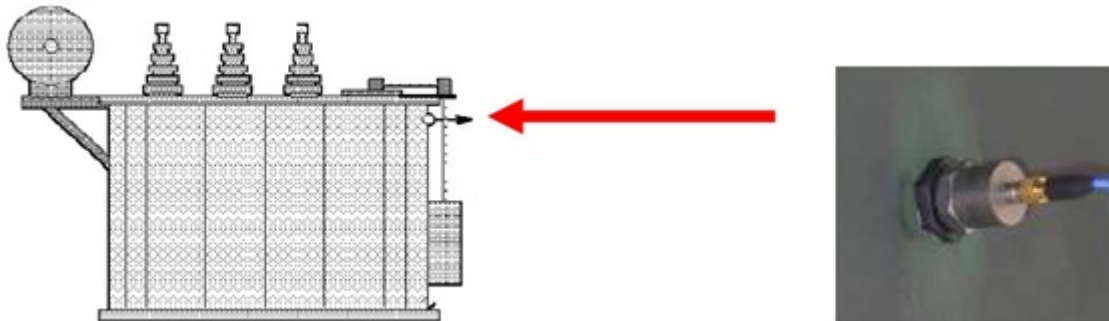


Figura 5 - Instalación del Acelerómetro

1.4 Medición de Corriente del Mecanismo del Accionamiento del Motor

Este motor permite al cambiador de tomas moverse de una posición a otro. Medimos la corriente (CA o CC) de este motor por medio de un transductor de corriente de núcleo abierto. (figura 6)



Figura 6
Accionamiento del Motor



Figura 6
Pinza Amperimétrica

La corriente complementa el diagnóstico indicando la condición del motor y las fluctuaciones del torque mecánico.

1.5 Método de Grabación Vibro Acústica

Si el transformador está en línea, se recomienda elevar o reducir la posición en sólo un tap para mantenerse dentro un rango aceptable de regulación de voltaje.

Si el transformador está fuera de línea, el sistema de medición es capaz de grabar hasta 70 pruebas para cubrir los rangos completos de taps de todos los posibles tipos de cambiadores de tomas usados en todo el mundo.

Como regla, deben hacerse las grabaciones bajo condiciones que se asemejen a las condiciones de operaciones reales tanto como sea posible. Por ejemplo, no se debe intentar hacer mediciones si los tanques de aceite están vacíos.

Una vez que las pruebas hayan culminado, es fácil probar varios transformadores en un sólo día. De esta manera, la persona en cargo del planeamiento del mantenimiento puede priorizar el trabajo de mantenimiento gracias a los resultados de la interpretación de la firma.

1.6 Procesamiento Vibro Acústico

Para ayudar a analizar e interpretar las señales vibro acústicas sin procesar, Hydro-Québec ha desarrollado un método matemático patentado que transforma los datos de la señal sin procesar en envolventes de señal más estables, coherentes e intuitivas que son más fácilmente comparadas.

Se puede notar que este procesamiento (Figura 7) incluye el filtrado y la extracción de las envolventes de alta y de baja frecuencia. Este procesamiento ayuda a reducir el tamaño de las grabaciones. Así son fáciles de detectar, por ejemplo, los picos de impacto de un cambiador de tomas dentro de estas envolventes.

La experiencia ha mostrado que los fenómenos mecánicos tienden a aparecer en la envolvente de baja frecuencia (entre 2 y 10 kHz) mientras que los eventos eléctricos (arcos) se muestran en la envolvente de alta frecuencia (entre 10 y 20 kHz).

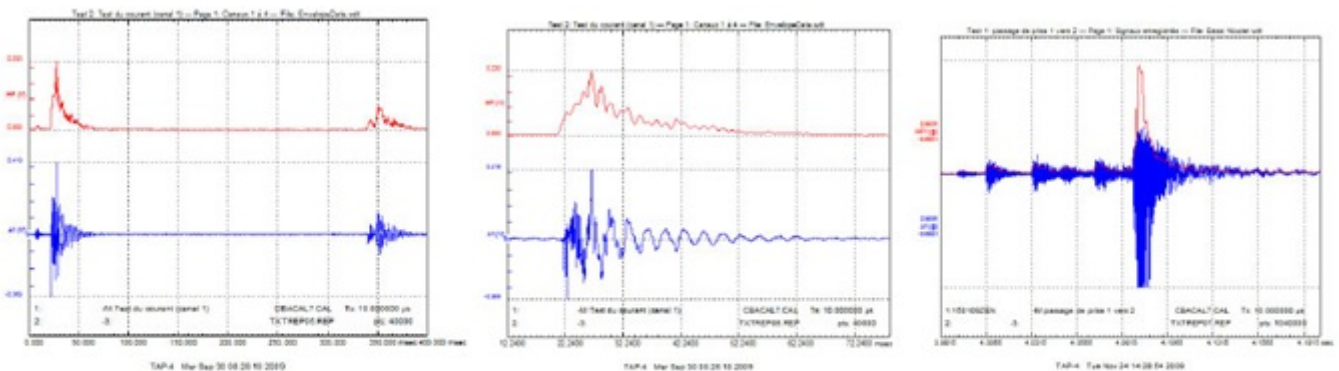


Figura 7 - Extracción de la Envolvente Vibro Acústica, Envolvente Vibro Acústica vs. Datos sin Procesar

Por ejemplo, si un determinado tipo de cambiador de tomas no tiene anomalías, las envolventes de AF y de BF tendrán amplitudes similares y serán virtualmente idénticas. Se puede revelar el desgaste de contactos superponiendo estas envolventes. Estas envolventes, junto con la firma de la corriente, constituyen las firmas de referencia que luego son almacenadas en una base de datos de firmas típicas.

1.7 Procesamiento de la Corriente

Un procesamiento similar se aplicó a la corriente del motor. En vez de observar las oscilaciones a 60 Hz, es

más fácil enfatizar sólo las variaciones de la amplitud asociadas directamente al mecanismo de accionamiento y fluctuar con el torque del motor. La corriente complementa el diagnóstico con la condición del motor y las fluctuaciones del torque mecánico. (ver figura 8)

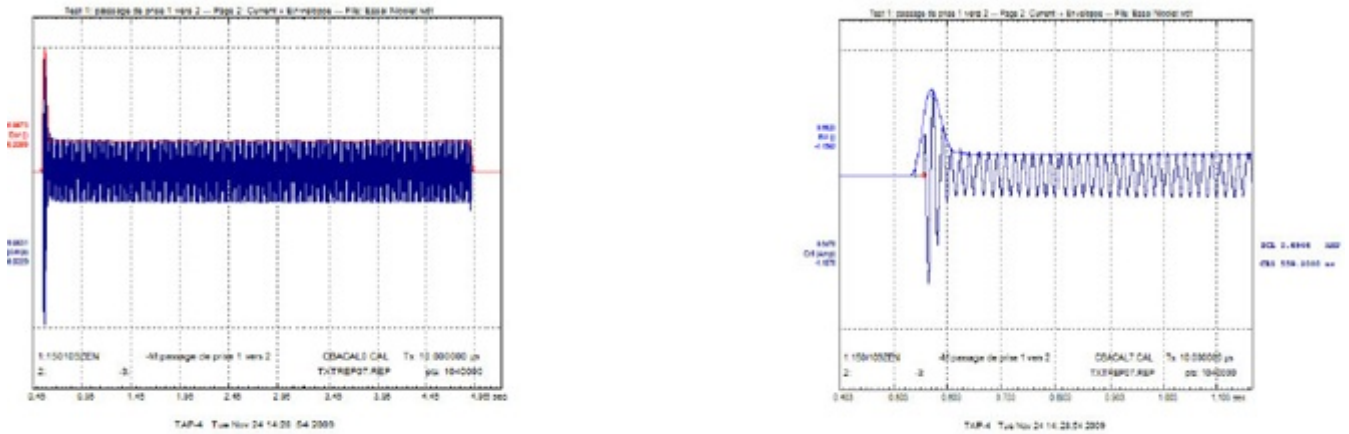


Figura 08 - Extracción de la Envolvente de la Corriente, Envolvente de la Corriente vs. Datos sin Procesar

1.8 Interpretación de las Firmas

La base del análisis es la de entender la secuencia de los eventos mecánicos durante una operación de cambio de tomas. Los impactos registrados se asocian luego con eventos mecánicos reales. El método de análisis vibro acústico, a pesar de su aparente complejidad de interpretación, contiene pasos extremadamente simples, algunos de los cuales son descritos aquí.

1.9 Ejemplo de la Medición del Tiempo de Transición

Las Figuras 09 hasta 13 muestran un claro ejemplo de la secuencia de la operación de un cambiador de tomas con el tiempo (cortesía de ABB). Las instantáneas sucesivas fueron tomadas por una cámara de alta velocidad. Se puede ver el segundo impacto de la apertura del contacto principal, en la parte superior derecha, y el cuarto impacto del contacto auxiliar en la parte inferior derecha. El tiempo de transición entre los impactos 2 y 5 es de típicamente 40 milisegundos para el ABB UCB y de 70 milisegundos para el ABB UCC, con contactos en buenas condiciones. Resultados diferentes podrían ser causa de preocupación acerca del estado de los contactos.

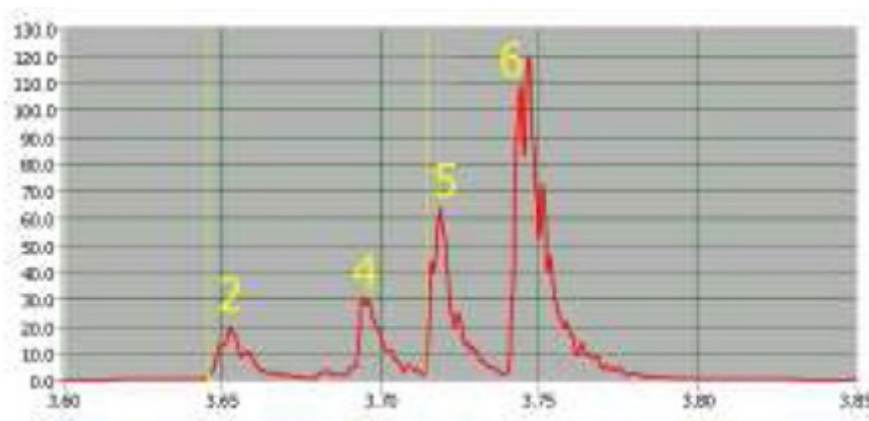


Figura 09 - Interpretación Vibro Acústica

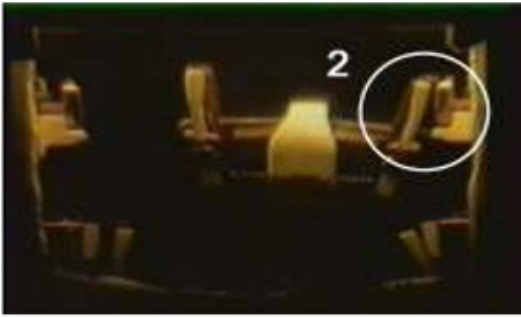


Figura 10
Pico 2

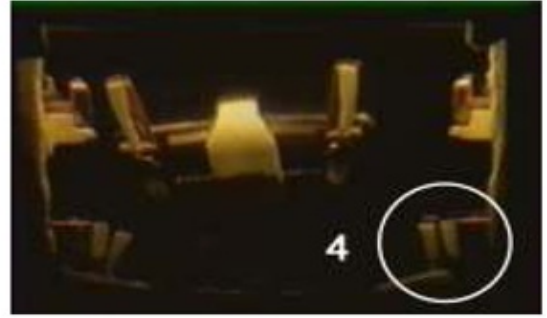


Figura 11
Pico 4

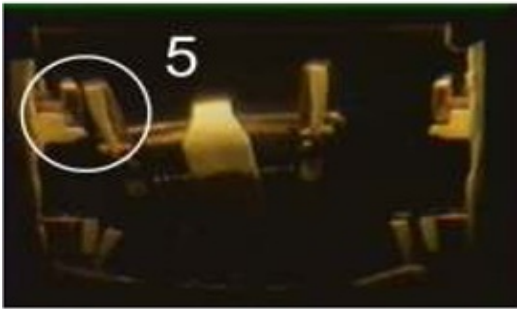


Figura 12
Pico 5

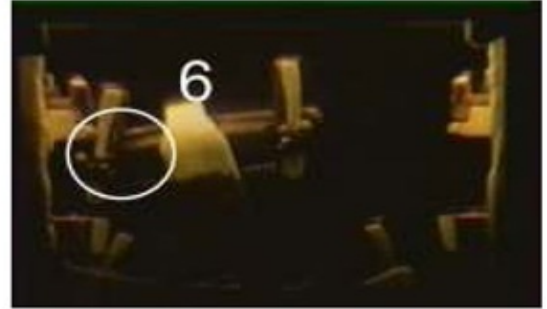


Figura 13
Pico 6

1.10 Ejemplo del Desgaste de Contactos por los Impactos Perdidos

En este caso, se confirma el desgaste de contactos abriendo el cambiador de tomas ABB UCCRN y reemplazando los contactos de arcos, resaltados por los rastros abajo. La Figura 14 muestra las firmas de la corriente en azul, la firma de AF (Alta Frecuencia) en rojo, y la firma de BF (baja frecuencia) en verde antes de su reparación.

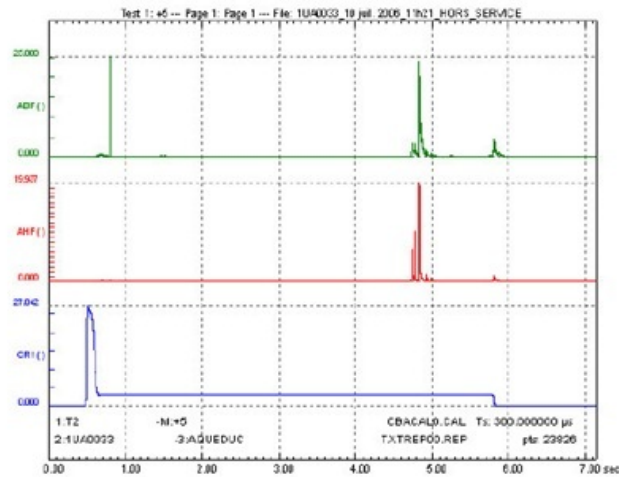


Figura 14 - Visualización del Rastro Acústico antes de la Inspección

La señal expandida en el tiempo (Figura 14) en la Figura 15 muestra tres impactos en el cambiador de tomas antes de la reparación.

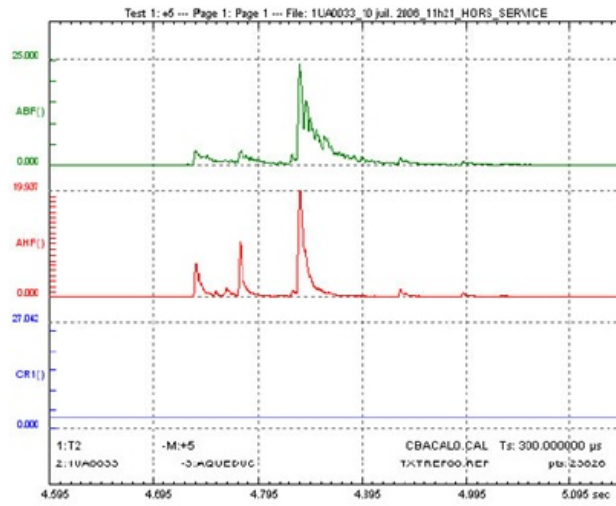


Figura 15 - Visualización del Rastro Amplificado antes de la Inspección

La Figura 16 muestra cinco impactos, luego de la reparación, que concuerda con la firma de referencia

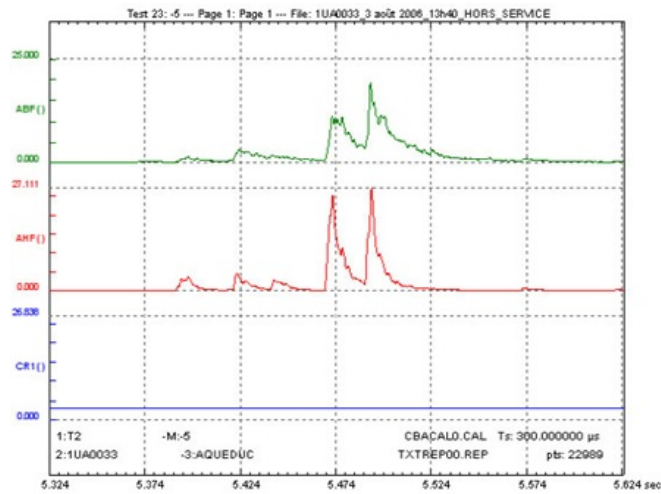


Figura 16 - Visualización del Rastro Acústico luego de la Reparación

La Figura 17 muestra las firmas viejas y las nuevas en el mismo gráfico. Con el tiempo, la firma acústica de un cambiador de tomas debería mantenerse bastante estable. De hecho, cuando se superpone la firma del mismo OLTC tomado en diferentes momentos, debería ser casi idéntico. En nuestro caso, la Figura 17 muestra que las firmas difieren en gran medida, por lo que esto indica un desgaste de los contactos.

Las Figuras 18 y 19 muestran los contactos nuevos mientras que la Figura 20 muestra el contacto gastado.



Figura 18
Contacto Nuevo ABB UCCRN



Figura 19
Contacto Nuevo ABB UCCRN



Figura 20
Contacto Gastado

3. Conclusões

Con este metodo se puede realizar un análisis más detallado por parte del personal de soporte. Un ejemplo a seguir es el de los radiólogos médicos que reciben entrenamiento especializado en interpretar imágenes de rayos x y que luego son capaces de emitir diagnósticos válidos. De la misma manera, grupos de electricistas aseguran la calidad, la cual luego es interpretada por el personal de soporte especializado, entrenado en análisis vibro acústico. El monitoreo periódico con el método vibro acústico permite una evaluación frecuente de la salud del cambiador de tomas. A medida que el nivel de confianza aumenta con la experiencia, la práctica de mantenimiento podría mejorar del mantenimiento en función del tiempo al mantenimiento en función de las condiciones.

4. Referências bibliográficas

Referencias

1. CEATI REPORT No. T063700-3038 -"*Vibro-acoustic tap changer diagnostic demonstration: Final Report*" (Demostración del diagnóstico de cambiadores de tomas por medios vibro acústicos) - Preparado por Hydro-Québec – IREQ Varennes, Québec, Canadá.
2. Fiches Diagnostiques – ABB UC – modèles B, C, D, G et L (Fichas de Diagnóstico – ABB UC – modelos B, C, D, G y L) – Hydro-Québec - 17 de Diciembre de 2009.

3. Hydro-Québec - References Signatures Database (Base de Datos de Firmas de Referencia) – 17 de Diciembre de 2009.
4. "*Diagnostics vibro-acoustiques pour disjoncteurs à haute tension*" (Diagnósticos vibro acústicos para interruptores de alta tensión) – presentación PPT de Enero de 2009 – Hydro Quebec - Michel Landry.
5. "*On-line Testing of On-Load Tap Changers with a Portable Acoustic System*" (Prueba En Línea de Cambiadores de Tomas Bajo Carga con un Sistema Acústico Portátil) – Por M. Foata, R. Beauchemin y C. Rajotte – ESMO Proceedings, 2001

Biografía

El Dr. Fouad Brikci es el presidente de Zensol Automation Inc. Él fue el primero en introducir el concepto de equipos de pruebas verdaderamente computarizados en el campo de los analizadores de interruptores.

Fue profesor universitario en Ecole Polytechnique (Argelia) e investigador del CNRS-LAAS en Francia, el Dr. Brikci ha desarrollado su experiencia en los campos de la electrónica, la automatización y la ciencia de la computación. La mayoría de sus actividades se dirigen a la aplicación industrial de las computadoras. Entre sus logros está el desarrollo de sistemas de medición completamente computarizado para el control de calidad en la fabricación de interruptores, laboratorios, y servicios de mantenimiento de empresas eléctricas.

El Dr. Brikci tiene un PhD en Electrónica y una Maestría en Ciencia en EEA (Electrónica, Electrotécnica y Automatización) de la Universidad de Bordeaux, Francia.
