

# Interferencias eléctricas en las mediciones SFRA – Cómo superar los efectos no deseados

Michael Rädler, OMICRON electronics GmbH, Klaus/Austria  
Stephanie Uhrig, OMICRON electronics GmbH, Klaus/Austria  
Juan L. Velásquez Contreras, Hubert Göbel GmbH Böhnen/Germany

## Índice

Desde la introducción de la norma IEC 60076-18 (Edición 1.0) en 2012, el método de análisis de respuesta en barrido de frecuencia (SFRA) se ha convertido en una de las pruebas eléctricas más comunes para transformadores de potencia. Ofrece una completa información sobre la integridad mecánica y eléctrica de la parte activa de los transformadores de potencia. A diferencia de los métodos de diagnóstico tradicionales, el análisis SFRA es sensible a las interferencias eléctricas externas que pueden limitar la comparabilidad y, en consecuencia, pueden conducir a una interpretación errónea de los resultados de las mediciones. En este artículo se trata la teoría de las diferentes fuentes de ruido y las técnicas de supresión de ruido. Diferentes casos de estudio muestran la eficacia de las mediciones incluso en condiciones adversas.

## 1 Introducción

Desde la introducción de la norma IEC 60076-18 (Edición 1.0) en 2012, ha aumentado la aceptación por parte del mercado del método de análisis de respuesta en barrido de frecuencia (SFRA) y se ha convertido en una de las pruebas eléctricas más comunes para transformadores de potencia. Se trata de una prueba de diagnóstico de baja tensión no invasiva, que ofrece una completa información sobre el estado mecánico y eléctrico de la parte activa de los transformadores de potencia. Las sacudidas causadas por el transporte, la actividad sísmica, las fallas de alimentación eléctrica de la red, etc. pueden causar problemas en los devanados, los contactos o el núcleo del transformador. La medición SFRA ha resultado ser el método más sensible para detectar tales defectos mecánicos y eléctricos.

Para realizar mediciones SFRA, por lo general se utiliza una tensión baja de salida entre 0,1 V y 10 V, a veces incluso en condiciones difíciles. Por tanto, los resultados obtenidos pueden verse distorsionados por la influencia del ruido. En estos casos esto puede dar lugar a acciones innecesarias de mantenimiento o reparación, provocadas por interpretaciones erróneas de los resultados. Este artículo, además de permitir incluso a los no expertos distinguir entre las desviaciones de trazos causadas por problemas mecánicos o eléctricos, así como por el ruido, se centra en la influencia del ruido en las mediciones SFRA.

## 2 Método de análisis de respuesta en barrido de frecuencia

El método de Análisis de respuesta en frecuencia (FRA) se clasifica en Análisis de respuesta en frecuencia mediante impulso (IFRA) y Análisis de respuesta en barrido de frecuencia (SFRA). En ambos métodos se compara la respuesta en frecuencia de un transformador de potencia con una medición de referencia. El análisis IFRA utiliza, como su nombre indica, un impulso en el dominio del tiempo, mientras que el SFRA evalúa un barrido de frecuencia. Como el análisis IFRA es más propenso al ruido, el análisis SFRA se ha convertido en el más utilizado y, por lo tanto, este artículo se centra en esta técnica.

Los transformadores de potencia pueden considerarse una compleja red eléctrica de capacitancias, inductancias y resistencias como se muestra en la figura 1. Cada red eléctrica tiene su exclusiva respuesta en frecuencia. Por tanto, las desviaciones entre la medición de la corriente y la de referencia pueden indicar cambios en los componentes internos. Estas desviaciones pueden estar directamente relacionadas con diferentes secciones del rango de frecuencias y pueden distinguirse unas de otras.

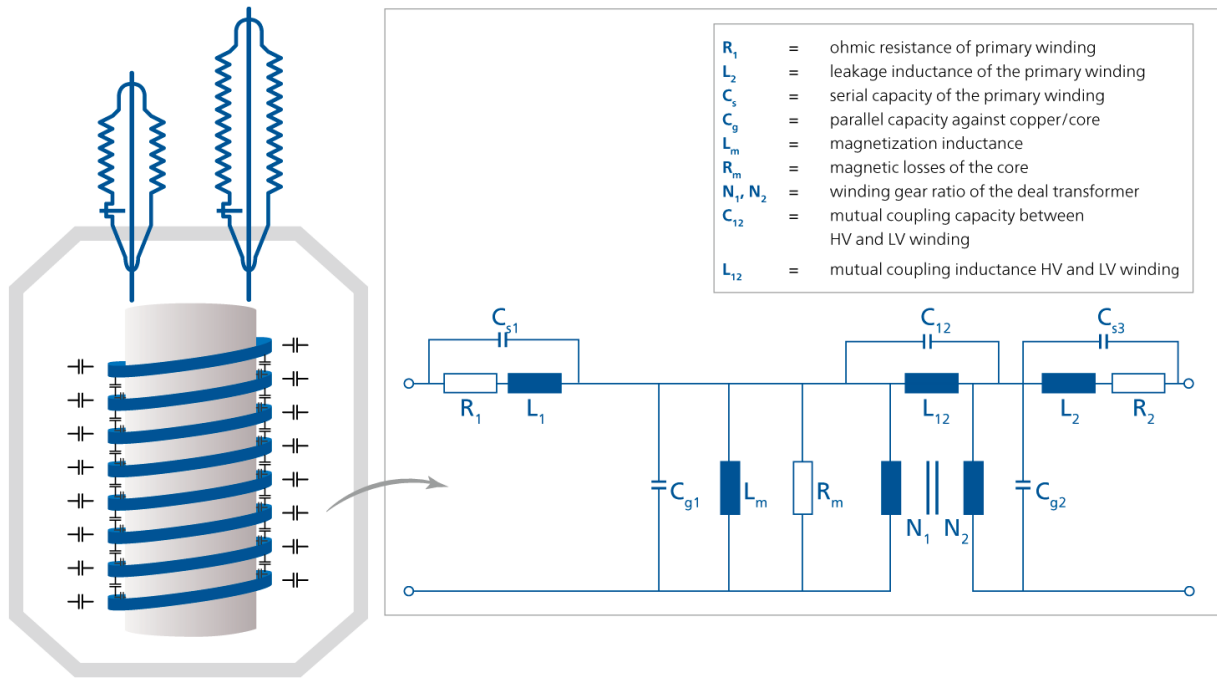


Figura 1: Circuito equivalente R-L-C simplificado de un transformador de potencia

Para realizar una medición SFRA, se aplica una señal sinusoidal de baja tensión de frecuencia variable entre 0,1 V y 10 V en un extremo de un devanado como se ilustra en Figura 2.. Para conocer exactamente la amplitud, fase y frecuencia de la señal inyectada, se conecta un canal de medición de referencia ( $U_1$ ) al mismo punto de inyección. Simultáneamente, se mide la señal de respuesta en el otro extremo del devanado ( $U_2$ ). Esto permite el subsiguiente cálculo de la función de transferencia  $H(f)$  de acuerdo con la ecuación (1). Como el análisis SFRA es una medición directa en el dominio de la frecuencia, no se requiere procesamiento adicional de datos.

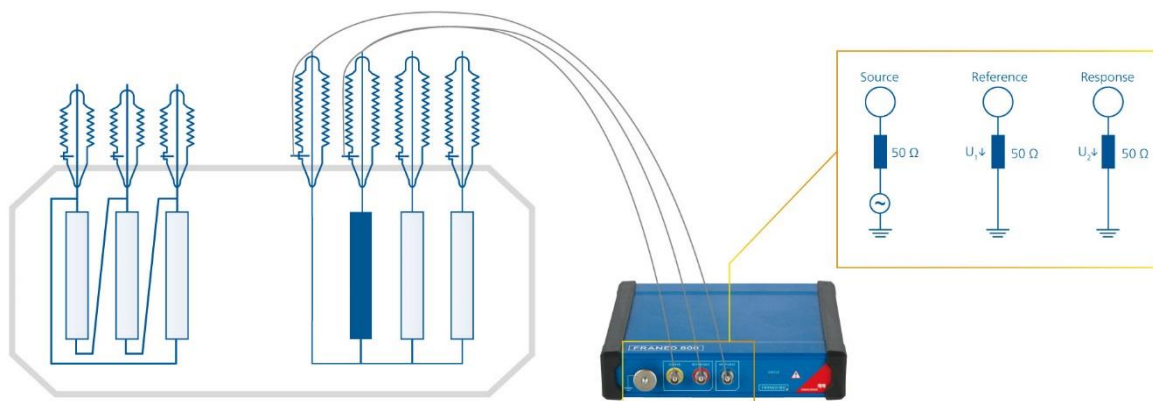


Figura 2: Configuración típica de una medición de la función de transferencia en el dominio de la frecuencia

Los resultados obtenidos de la medición se representan en forma de un diagrama de Bode donde la magnitud  $k$  y la fase  $\phi$  se calculan mediante dos fórmulas simples 2 y 3. En este sentido, la función de transferencia  $H(f)$  se calcula utilizando la fórmula 1. La magnitud  $k$ , medida por el equipo SFRA, se define mediante la fórmula 2. La fase  $\phi$ , medida por el equipo SFRA, se define utilizando la fórmula 3.

El análisis SFRA se realiza típicamente en una gama de frecuencias de 20 Hz a 2 MHz y se utilizan tensiones de salida entre 0,1 y 10 V. En este rango de frecuencias, la técnica SFRA es la prueba más confiable y eficaz para detectar defectos mecánicos y algunas fallas eléctricas de la parte activa de transformadores de potencia. Las fallas detectadas pueden confirmarse con otras mediciones de diagnóstico, tales como las mediciones de la reactancia de dispersión, corriente de excitación o resistencia del devanado.

Usando el análisis SFRA se pueden detectar los siguientes problemas en una base comparativa:

- Deformación axial y radial del devanado
- Desplazamientos entre devanados de alta y baja tensión
- Colapso parcial del devanado
- Espiras cortocircuitadas o abiertas
- Conexión a tierra defectuosa de núcleo o pantallas
- Movimiento del núcleo
- Estructuras de sujeción rotas
- Conexiones internas problemáticas

En transformadores en buen estado, el trazo medido coincide con el trazo SFRA de referencia en todo el rango de frecuencias. De este modo, el trazo de referencia podría ser una huella digital del mismo transformador obtenida anteriormente o un trazo SFRA de un transformador hermano con las mismas especificaciones. Una comparación basada en la fase requiere más experiencia ya que las desviaciones podrían estar relacionadas con el diseño de los transformadores y no con los daños mecánicos. En el caso de defectos debidos, por ejemplo, a fuerzas mecánicas extraordinariamente altas, sacudidas durante el transporte, actividades sísmicas o fallas de alimentación eléctrica, tales como corrientes de cortocircuito elevadas, el trazo muestra desviaciones en determinados rangos de frecuencia (Error! Reference source not found.). Como se trata de un análisis comparativo, el ruido no debe afectar significativamente a la magnitud y la fase de la respuesta en frecuencia. Esto se tratará detalladamente en las siguientes secciones.

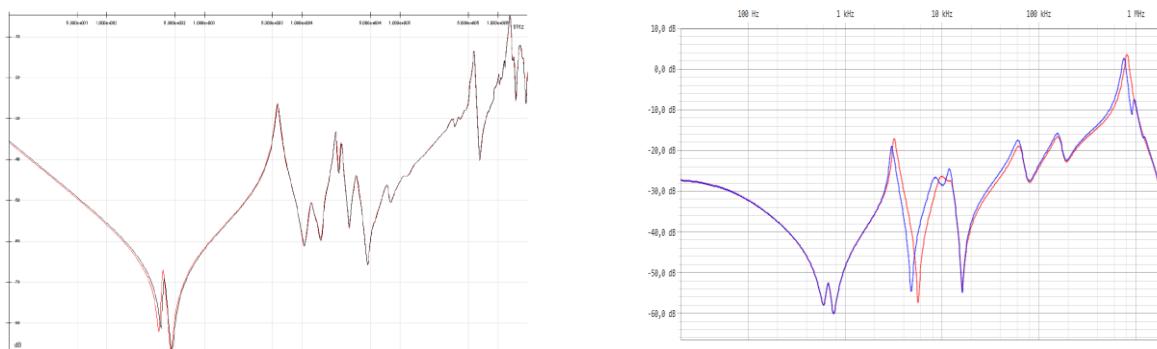


Figura 3: Respuestas en frecuencia típicas de los transformadores de potencia  
 izquierda: transformador en buen estado, trazo real casi idéntico al de referencia basado en el tiempo  
 derecha: Movimiento masivo, el trazo real muestra desviaciones significativas respecto a la referencia basada en el tiempo

<p><i>Formula 1:</i> <math>H(f) = \frac{U_2(f)}{U_1(f)} = \frac{50 \Omega}{50 \Omega + Z_{\text{test}}}</math></p> <p><i>Formula 2:</i> <math>k = 20 \log \frac{U_2}{U_1}</math></p> <p><i>Formula 3:</i> <math>\varphi = \tan^{-1} \frac{\angle U_2}{\angle U_1}</math></p> <p><i>Formula 4:</i> <math>L_M = \frac{N^2}{R_m}</math></p> <p><i>Formula 5:</i> <math>R_m = \frac{\Theta}{\varphi} = \frac{N * I}{\frac{\mu * (N * I) * A}{l}} = \frac{l}{\mu * A}</math></p> <p><i>Formula 6:</i> <math>\mu = \frac{B}{H}</math></p>	<p><math>R_m</math> = magnetic reluctance</p> <p><math>L_m</math> = main inductance of the transformer</p> <p><math>N</math> = number of turns</p> <p><math>l</math> = length</p> <p><math>A</math> = cross-sectional area refers to the geometry of the magnetic core</p> <p><math>B</math> = magnetic flux density</p> <p><math>H</math> = magnetic field strength</p> <p><math>\mu</math> = magnetic permeability</p>
---	--

### 3 Fuentes de ruido

Existen varios tipos de ruido, especialmente en entornos de subestaciones, que pueden influir en las mediciones SFRA. Las fuentes de ruido pueden dividirse, de manera simplificada, en ruidos de banda angosta y de banda ancha.

#### 3.1 Ruido de banda angosta

Un ruido de banda angosta típico está representado por el ruido a la frecuencia de la red y sus armónicos. Estos últimos son un múltiplo de la frecuencia de la red, que se utiliza dentro del sistema de red eléctrica general.

En general, el ruido de banda angosta afecta a las gráficas de SFRA en el área de baja frecuencia entre 30 Hz y 100 Hz. Por encima de 300 Hz, los efectos de este ruido de banda angosta son muy inusuales. En subestaciones con alta contaminación de armónicos se observa también algún ruido de banda angosta. Los efectos del ruido son significativos de 3 Hz a 100 Hz, mientras que en las frecuencias de los armónicos los efectos son más pequeños, pero siguen presentes. Afortunadamente, los efectos del ruido solo se producen durante las mediciones en un entorno con una alta intensidad de campo electromagnético, como típicamente se puede encontrar en subestaciones con tensiones nominales por encima de 380 kV.

El tipo de activo, es decir, el tamaño de los devanados del transformador es un elemento crucial en la influencia sobre los resultados de la respuesta en frecuencia: La atenuación de señal aumenta con la inductancia y, por tanto, la señal de respuesta se vuelve más sensible al ruido. Los efectos del ruido solo tienen lugar en el área de frecuencia muy baja donde la inductancia de magnetización lineal domina en general la respuesta en frecuencia.

La interpretación del estado mecánico de la parte activa de un transformador de potencia no se ve influida por la presencia de ruido de banda angosta ya que los primeros puntos de resonancia aparecen típicamente por encima de 130 Hz.

Sin embargo, las fallas eléctricas de un transformador de potencia tales como cortocircuitos entre espiras, circuitos abiertos o laminados de núcleo en cortocircuito pueden identificarse analizando el área de baja frecuencia. A modo de ejemplo, la figura 4 ilustra las gráficas de SFRA medidas en los devanados de 500 kV de un transformador de potencia donde se pueden observar los efectos antes mencionados.

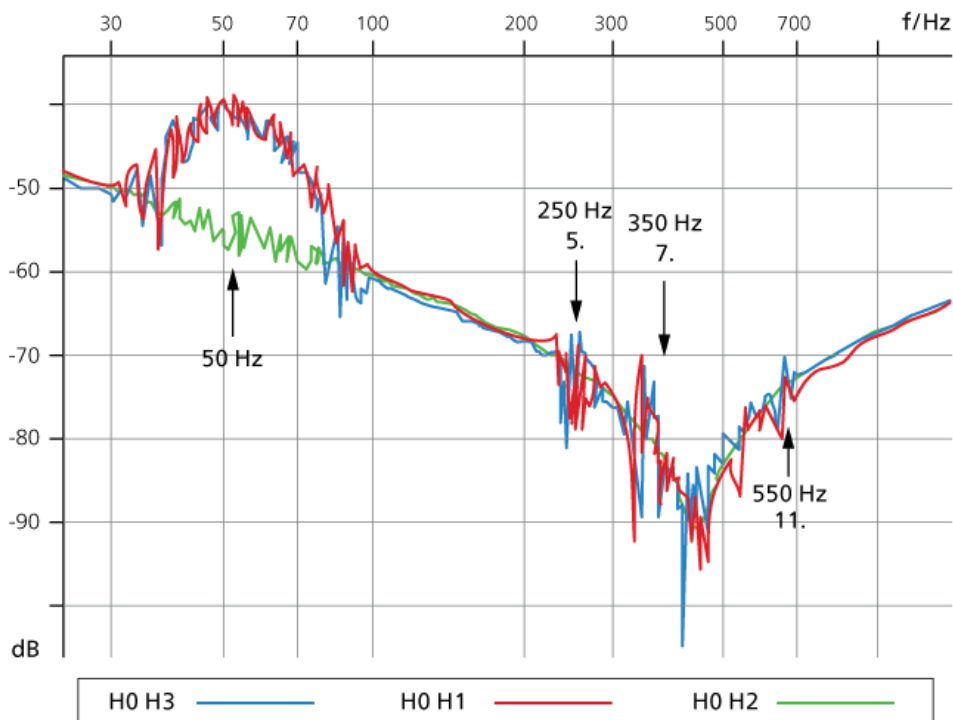


Figura 4: Respuesta en barrido de frecuencia de tres fases de un devanado de 500 kV, con ruido de banda angosta a la frecuencia de la red y sus armónicos

### 3.2 Ruido de banda ancha

Durante las mediciones de SFRA, habrá siempre un piso de ruido que afecte a las gráficas SFRA. Este tipo específico de ruido interno se clasifica como ruido de banda ancha y es causado por el dispositivo de prueba SFRA conectado. El nivel de ruido depende del rango dinámico del instrumento de prueba SFRA que se esté utilizando.

La teoría de señales define el nivel de ruido como la medición de la señal creada a partir de la suma de todas las fuentes de ruido y las señales no deseadas dentro de un sistema de medición. Se utiliza como un indicador de la intensidad mínima de una señal para que sea medible. El piso de ruido de un instrumento FRA se define por su rango dinámico. La norma IEC 60076-18 define como rango dinámico un requisito mínimo específico del dispositivo de -90 dB a +10 dB. Además de este hecho y basado en la experiencia adquirida en los últimos años, tiene la ventaja de calcular el rango dinámico como valor absoluto del rango de medición negativo más 20 dB. Esto se ilustra gráficamente en la figura 5.

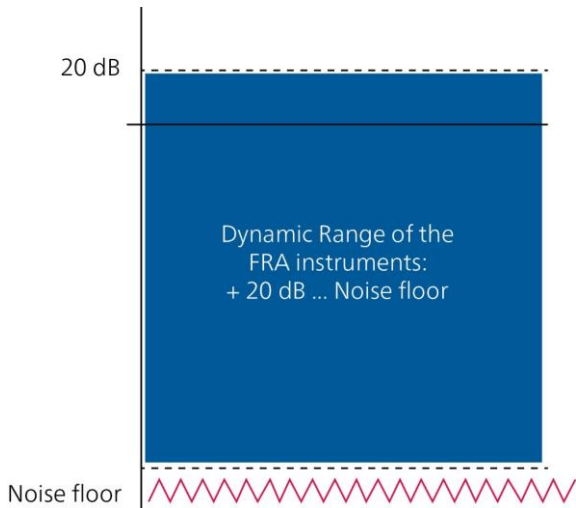


Figura 5: Ilustración del suelo de ruido y el rango dinámico

En comparación con los efectos debidos al ruido de banda angosta, los efectos debidos al nivel de ruido se evalúan como altamente críticos. Este tipo de ruido suele estar presente en las gráficas de SFRA para transformadores de potencia con una inductancia de magnetización alta, devanados conectados en una configuración delta o para mediciones capacitivas entre devanados. El piso de ruido dificulta mucho la evaluación de los resultados ya que pueden verse afectados por este tipo de ruido varios de los puntos de resonancia, que constituyen una información importante relativa a los activos,.

La figura 6 muestra un ejemplo de la influencia del piso de ruido: Se midió un transformador de potencia con un devanado delta usando un instrumento SFRA con un nivel de ruido de -80 dB. En este ejemplo se puede observar que por debajo de -80 dB la respuesta en frecuencia se ve muy afectada por el nivel de ruido. Esto es debido al rango dinámico limitado del instrumento SFRA que se está utilizando. Por lo tanto, se recomienda seleccionar un instrumento de prueba SFRA con un rango dinámico superior a 100 dB. Los modernos dispositivos SFRA ofrecen, por ejemplo, un rango dinámico de hasta 150 dB.

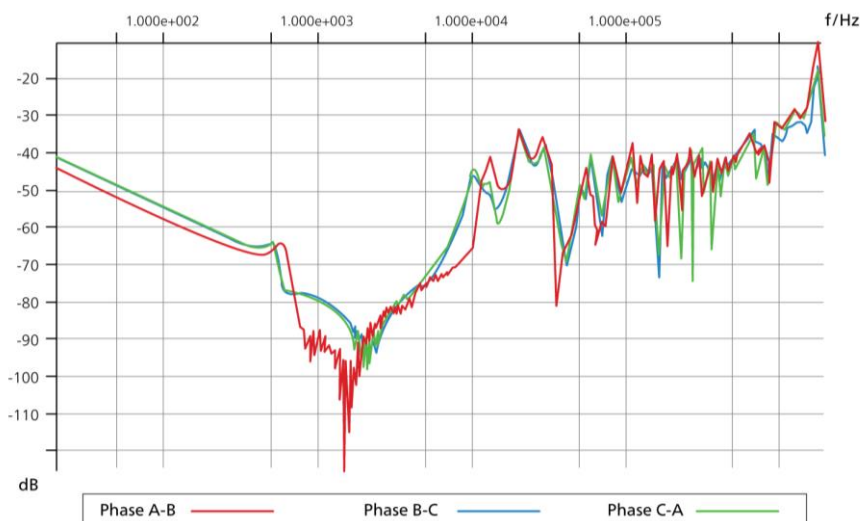


Figura 6: Ejemplo del efecto del piso de ruido en mediciones SFRA en devanados conectados en delta

## 4 Técnicas de mitigación de ruido

Existen varios métodos que pueden utilizarse para mitigar la influencia de las perturbaciones externas en los trazos SFRA. Estos métodos se pueden dividir en dos grupos: técnicas de hardware y métodos de software.

### 4.1 Técnicas de hardware

Existen diferentes posibilidades en el hardware de los instrumentos SFRA para minimizar la presencia de ruido durante las mediciones, tales como la técnica de conexión, el filtro de entrada y la tensión de salida aplicada.

#### 4.1.1 Técnica de conexión confiable

Una técnica de conexión adecuada puede ayudar a reducir la influencia de las interferencias externas. En la norma IEC 60076-18 se describe detalladamente el procedimiento recomendado para una configuración de medición adecuada y reproducible.

Garantizando la relación señal/ruido disponible más alta, la norma recomienda para las mediciones SFRA el uso de cables coaxiales dobles apantallados, que deben conectarse a tierra mediante trenzados de aluminio anchos y planos. Este concepto de puesta a tierra proporciona una gran superficie, la inductancia más baja y es menos sensible a las interferencias.

Con objeto de eliminar cualquier influencia del sistema de puesta a tierra en los resultados de la medición SFRA, los trenzados de puesta a tierra siempre deben tenderse ajustados a lo largo del cuerpo de las bornas (concepto de trenzado más corto) como se ilustra en las figuras 7 y 8. La técnica de conexión utilizada es esencial para garantizar un alto grado de reproducibilidad, especialmente en el rango de altas frecuencias, por ejemplo, superior a 500 kHz.



Figura 7: Ejemplo del concepto de conexión de trenzado más corto

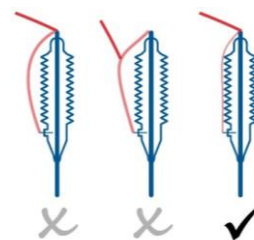


Figura 8: Configuración recomendada según la norma IEC 60076-18

En comparación con una técnica de conexión mediante cables sencillos, un trenzado de aluminio puede reducir significativamente la influencia del ruido tal como se visualiza en la figura 9.

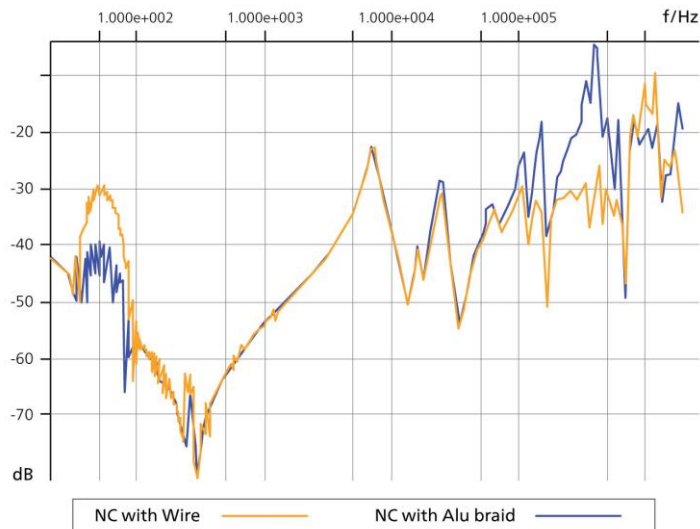


Figura 9: Efecto de dos técnicas de conexión diferentes, utilizando un cable para clavijas de punta cónica (4 mm) y un trenzado de aluminio

Los mejores resultados se obtendrían conectando dos trenzados de aluminio con un ángulo de 180° entre los conductores centrales, ya que los efectos del ruido externo se extinguirán electromagnéticamente. Sin embargo, la norma no contempla este método específico de conexión de dos trenzados de aluminio y, por lo tanto, no se profundizará en ello.

#### 4.1.2 Filtros de entrada avanzados

La mayoría de los instrumentos de prueba SFRA están equipados con filtros de entrada capaces de suprimir el ruido de banda estrecha hasta un determinado nivel. Estas capacidades de supresión de ruido pueden controlarse adaptando el ancho de banda de la medición. El ajuste del ancho de banda es siempre un compromiso entre las capacidades de supresión de ruido y el tiempo de medición necesario. También se puede obtener un ajuste óptimo del ancho de banda adaptando automáticamente el ancho de banda del receptor en función de la atenuación de la señal. La resolución mínima de la anchura de banda de medición basada en la norma IEC 60076-18 requiere para mediciones inferiores a 100 Hz una resolución máxima de ancho de banda de 10 Hz. Para mediciones superiores a 100 Hz debe ser inferior al 10 % de la frecuencia de medición o la mitad del intervalo entre frecuencias de medición adyacentes. Para reducir el tiempo total de medición sin el riesgo de trazos de medición distorsionados, se integran algoritmos inteligentes de ancho de banda en sofisticados instrumentos SFRA.

Estos instrumentos SFRA seleccionan automáticamente el ancho de banda ideal durante las mediciones. Primero se realiza una medición de banda ancha para identificar las áreas críticas de frecuencia. A continuación, solo se realizará una medición de banda angosta en las áreas identificadas/distorsionadas teniendo en cuenta los requisitos principales estipulados por la norma IEC. Este concepto se ilustra de manera simplificada en la figura 10. Si se tiene que medir una muestra a la frecuencia "If", el dispositivo SFRA solo medirá señales cuyas frecuencias estén dentro del rango del ancho de banda. No se medirá ninguna perturbación por frecuencias fuera del rango del ancho de banda. De acuerdo con este método, las capacidades globales de supresión de ruido se pueden mejorar simplemente reduciendo el ancho de banda del receptor.



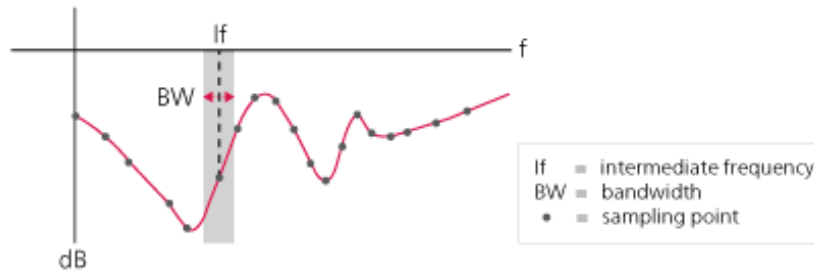


Figura 10: Ilustración del concepto de ancho de banda adaptable

### 4.1.3 Tensión de salida ajustable

La medición de la función de transferencia  $H(f)$  es independiente del nivel de tensión de salida de un instrumento de prueba SFRA, ya que un devanado del transformador de potencia puede considerarse un sistema lineal. Sin embargo, la tensión de salida está directamente correlacionada con la relación señal-ruido. Especialmente a la frecuencia de la red (50/60 Hz), un nivel de tensión de salida más alto puede ayudar a aumentar la inmunidad a las interferencias del ruido de banda estrecha a la frecuencia de la red.

Otra consecuencia del sistema lineal es que, en el rango de frecuencias bajas, la respuesta en frecuencia está dominada por la inductancia de magnetización del núcleo y depende, por lo tanto, de la tensión. Esto se puede explicar porque la inductancia de magnetización depende de la tensión de prueba aplicada y de las espiras de los devanados. Las fórmulas simplificadas 4, 5 y 6 describen este efecto.

En general, la tensión de prueba aplicada del equipo de prueba SFRA usado, cambiará la permeabilidad magnética  $\mu$  de acuerdo con la curva de histéresis del material de núcleo seleccionado. Esto provoca un cambio de la reluctancia magnética, que también cambiará la inductancia del núcleo. Las siguientes imágenes, figura 11, ilustran la influencia de las diferentes tensiones de salida y los cambios asociados de las gráficas de SFRA (izquierda) y la mayor inmunidad a interferencias de ruido de banda estrecha debido a una tensión de salida más alta (derecha).

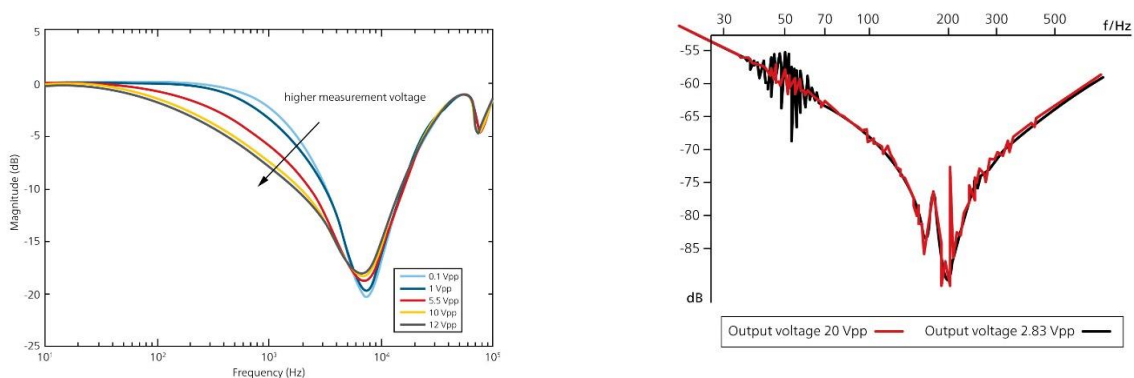


Figura 11. Efecto de las tensiones de salida seleccionadas  
 izquierda: influencia de las diferentes tensiones de salida en la inductancia de magnetización  $L_m$   
 derecha: influencia en las capacidades de supresión de ruido de banda estrecha utilizando diferentes tensiones de salida

## 4.2 Métodos de software

Los métodos de software se basan principalmente en el procesamiento posterior de los datos, incluyendo por ejemplo algoritmos de suavizado o filtros de promedio.

Los métodos de software consisten en técnicas de filtrado que eliminan el ruido de un trazo SFRA ya medido con métodos de procesamiento de señales. Otros métodos de software se basan en el análisis de la varianza. Se han desarrollado para detectar y cuantificar las distorsiones no lineales y el ruido perturbador en las mediciones SFRA.

También son aplicables otros métodos tales como la transformación Wavelet, que se utiliza principalmente para suprimir el ruido en las mediciones en el dominio del tiempo, o los filtros de Kalman. Además, también hay una variedad de algoritmos simples tales como los filtros de promedio, filtros de media móvil, filtros de media móvil ponderada exponencialmente, etc., que pueden usarse para reconstruir trazos de medición de SFRA distorsionados. Algunos instrumentos SFRA tienen herramientas de procesamiento de señales ya implementadas como parte del paquete básico de software para mejorar los datos de medición obtenidos. La figura 12 muestra la reconstrucción de un trazo de medición distorsionado debido al ruido de banda angosta, usando un filtro de promedio.

Las técnicas de filtrado ayudan a aumentar la calidad general para la interpretación de los trazos SFRA. Los expertos de SFRA utilizan herramientas como esta, ya que se pueden eliminar muy fácilmente resonancias que podrían conducir a una evaluación equivocada del estado del activo. Además, los trazos de medición originales, es decir, los trazos sin ningún procesamiento de señales, también deben estar disponibles.

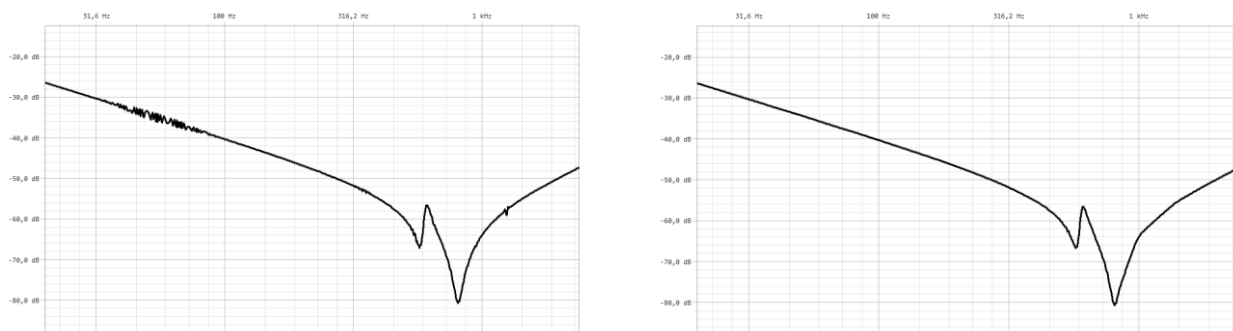


Figura 12. Comparación del trazo SFRA antes (izquierda) y después de la eliminación de ruido (derecha)

## 5 Casos de estudio

Se ha realizado una medición SFRA en un transformador de potencia trifásico de 70 MVA. El devanado primario tiene una tensión nominal de 240 kV y el devanado secundario de 10,5 kVA. El objetivo principal de la medición SFRA era obtener una huella digital adecuada para futuros diagnósticos, por lo que este caso de estudio específico no se centra en la evaluación general del estado mecánico.

La medición se realizó en campo junto a una línea aérea activa de 240 kV. Se utilizaron dos instrumentos SFRA diferentes con diferentes algoritmos para la adaptación del ancho de banda del receptor para comprobar sus capacidades de supresión de ruido (figura 13). Como ya se ha descrito en este artículo, el ruido de banda angosta y de banda ancha pueden influir en varios puntos de resonancia, lo que puede esconder información importante relacionada con los activos. Esto hace que la evaluación de los resultados de SFRA obtenidos a veces sea muy difícil, especialmente para usuarios con menos experiencia.

Los trazos SFRA de la fase U del devanado de 240 kV muestran que el trazo SFRA obtenido con el instrumento SFRA 1 se ve influido por la banda estrecha de 50 Hz y sus armónicos. Debido a los algoritmos estáticos de la adaptación automática del ancho de banda, la medición global (a partir de 20 Hz hasta 2 MHz) duró 56 segundos. También se puede observar que el segundo punto de resonancia creado por la capacitancia paralela ( $C_g$ ) y la inductancia de magnetización ( $L_m$ ) está ligeramente distorsionado (imagen izquierda).

La segunda medición se realizó utilizando un instrumento SFRA más sofisticado con capacidades de filtrado de ruido basadas en hardware mejoradas (en este artículo designado como Instrumento SFRA 2). Debido a la adaptación inteligente del ancho de banda, en frecuencias bajas los trazos de medición no se ven influidos por ningún efecto de ruido externo.

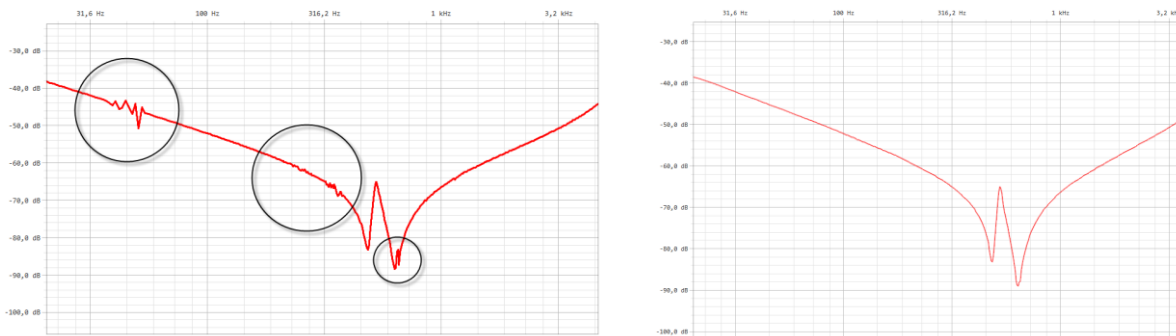


Figura 13: Circuito abierto de extremo a extremo en el devanado de AT realizado con el Instrumento SFRA 1 (izquierda) y el Instrumento SFRA 2 (derecha)

En particular, las mediciones capacitivas entre devanados pueden verse seriamente influidas por el piso de ruido y el ruido de frecuencia de la red debido a una relación señal-ruido más baja. Por lo tanto, un rango dinámico más alto, una tensión de salida más alta y una adaptación inteligente del ancho de banda del receptor ayudan a mejorar los resultados globales de la medición. Los resultados de la medición capacitiva entre devanados se ilustran en la figura 14. Los resultados del Instrumento SFRA 1 muestran una fuerte distorsión por el ruido de banda angosta. En comparación, los resultados del Instrumento SFRA 2 no muestran casi ninguna distorsión debido a la adaptación inteligente del ancho de banda del receptor.

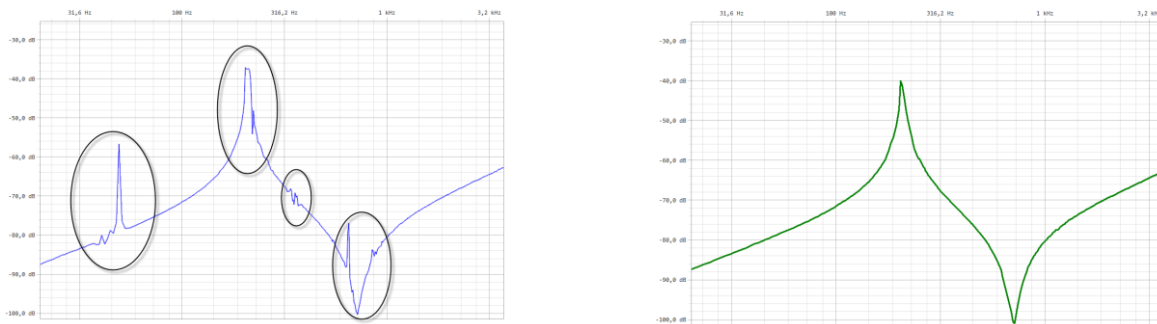


Figura 14: Medición capacitiva entre devanados en el devanado de AT realizado con el Instrumento SFRA 1 (izquierda) y el Instrumento SFRA 2 (derecha)

Un enfoque alternativo para reducir la influencia del ruido de banda angosta a la frecuencia de red es realizar una medición de cortocircuito de extremo a extremo, mediante la cual se cortocircuita el lado de baja tensión. Basándose en este método, la impedancia del devanado se aislará de las propiedades del núcleo especialmente en torno a la frecuencia de la red. Resumiendo, la inductancia de magnetización de transformadores  $L_m$  se vuelve inactiva y solo se medirá la reactancia de dispersión dentro del área de baja frecuencia. La mayor desventaja de este método específico es que la información del estado eléctrico ya no puede evaluarse y, por lo tanto, este método debe realizarse además de la medición recomendada de circuito abierto de extremo a extremo. Como se ilustra en la figura 15, ambos resultados de medición no muestran distorsiones a la frecuencia nominal de la red y sus armónicos.

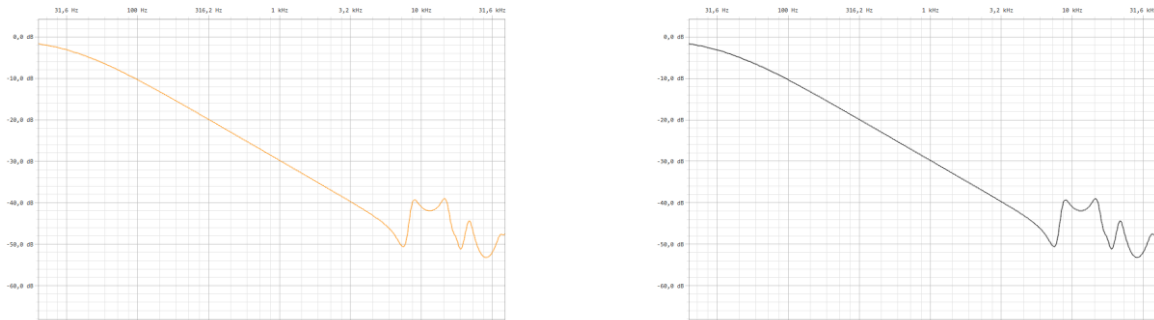


Figura 15: Cortocircuito de extremo a extremo en el devanado de AT realizado con el Instrumento SFRA 1 (izquierda) y el Instrumento SFRA 2 (derecha)

## 6 Resumen

El ruido proveniente del entorno en una subestación siempre puede influir en las mediciones SFRA. Se puede dividir en ruido de banda estrecha y de banda ancha. Existen diferentes posibilidades para una mitigación eficaz de la influencia del ruido, que pueden dividirse en técnicas de hardware y en métodos de software.

Especialmente el rango dinámico específico del dispositivo influye de manera importante en la interpretación de los resultados. Una tensión de salida ajustable y una adaptación inteligente del ancho de banda del receptor son las técnicas más comunes para mejorar la calidad de los trazos SFRA obtenidos. Las soluciones de software con, por ejemplo, algoritmos de suavizado o filtros de promedio, son independientes del hardware aplicado. Por lo tanto, pueden utilizarse incluso después de realizadas las mediciones solo para la evaluación de resultados.

En el caso de curvas de medición distorsionadas, los no expertos en SFRA pueden dudar en cómo evaluar la integridad mecánica del transformador de potencia. Utilizando una combinación de las técnicas mencionadas de hardware y software, los trazos resultantes pueden analizarse en la mayoría de los casos sin influencia significativa del ruido. Los casos de estudio presentados muestran cómo los efectos del ruido de baja frecuencia pueden reducirse eficazmente mediante una adaptación inteligente del ancho de banda del receptor y un aumento de la tensión de salida. Hay que tener en cuenta que para una reproducibilidad adecuada de las mediciones SFRA en el rango de frecuencias bajas, se recomienda realizar las mediciones a la misma tensión de salida con la que se realizó la medición de referencia.

Como puede verse, los modernos dispositivos de prueba SFRA y un software adecuado pueden proporcionar una medición SFRA confiable incluso en condiciones adversas y ayudar a mejorar la evaluación del estado del transformador de potencia.

## 7 Referencias

- The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China, „Frequency Response Analysis of Winding Deformation of Power Transformers“, China 2005, DL 911/2004
- Cigré WG A2/26, „Mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA)“, Brochure 342, Paris 2008
- Cigré WG A2/26, „Mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA)“, Electra N°228, Paris 2006
- TC 14 – Power transformers, IEC 60076 – 18 „Measurement of frequency response“, 2012
- IEEE Std C57.149, „IEEE Std 62-1995“ – 2012
- J. Christian, K. Feser, Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, Januar 2004, pp.214-220
- T. Leibfried, K. Feser, Monitoring of Power Transformers using the Transfer Function Method, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, Oktober 1999, S.1333-1341
- S. Tenbohlen, R. Wimmer, K. Feser, A. Kraetge, M. Krüger, J. Christian, The influence of grounding and connection technique on the repeatability of FRA-results, Proceedings of the XVth International Symposium on High Voltage Engineering, University of Ljubljana, Slowenien, August 27-31 2007
- Feser K., J. Christian, C. Neumann, U. Sundermann, T. Leibfried, A. Kachler and M. Loppacher, „The Transfer Function Method for Detection of Winding Displacements on Power Transformers After Transport, Short Circuit or 30 Years of Service“. CIGRE paper 12/33-04, 2000
- Juan L. Velásquez, et al., „Noise in FRA Measurements: Sources, Effects and Suppression“, OMICRON DMPT Workshop 2009
- S. Ryder, S. Tenbohlen, A comparison of the swept frequency and impulse response methods for making frequency response analysis measurements, Doble Conference, 2003

## Authors



Michael Rädleres Dipl. Ing. (FH) en ingeniería industrial por la Universidad de Ciencias Aplicadas en Mittweida, Alemania. Tras de graduarse la HTL (escuela técnica de ingeniería de grado medio) de Bregenz, Austria, en 2007, comenzó su carrera profesional como ingeniero de aplicaciones en OMICRON electronics, donde se centró en los transformadores de potencia. Desde septiembre de 2013 es Product Manager del sistema de pruebas primarias multifuncionales de OMICRON para la puesta en servicio y mantenimiento de subestaciones (CPC100). Ha publicado varios artículos sobre mediciones eléctricas en transformadores de potencia y es miembro del Cigré y es miembro del grupo de trabajo de SFRA.



Stephanie Uhrig (de soltera Raetzke) se unió a OMICRON electronics en 2010 como Product Manager y desde entonces ha sido responsable de varios sistemas de prueba de transformadores de potencia. Actualmente su labor se centra en los sistemas de análisis de respuesta en frecuencia (FRANEO 800). Stephanie estudió Ingeniería Eléctrica y obtuvo su grado Dipl. Ing. en la Universidad Técnica de Munich en 2003. Luego trabajó en el Laboratorio de Ingeniería de Alta Tensión de la universidad, donde obtuvo su doctorado en 2009, centrándose en materiales para la ingeniería de alta tensión.



Juan L. Velásquez Contreras nació en Venezuela. Se licenció en Ingeniería Eléctrica en la UNEXPO (Universidad Nacional Experimental Politécnica) en Venezuela en 2002. Luego se unió a CVG Venalum en Venezuela, donde trabajó como ingeniero de mantenimiento y proyectos para activos de alta tensión. En 2006, Juan se incorporó al CITCEA (Centro de Innovación Tecnológica) en España. Como ingeniero de proyectos, trabajó en la implementación de sistemas de monitoreo del estado de transformadores de potencia. Desde 2008 hasta 2011 trabajó como Product Manager para instrumentos de diagnóstico en OMICRON electronics. En 2011 completó su doctorado en el área de Gestión de Activos de Transformadores de Potencia en la Universidad Politécnica de Cataluña, en Barcelona, España. De 2011 hasta 2016, Juan trabajó como ingeniero de tecnología HVDC en Amprion GmbH. En agosto de 2016 comenzó a trabajar como ingeniero de desarrollo y servicio en Hubert Göbel GmbH.

OMICRON es una compañía internacional que presta servicio a la industria de la energía eléctrica con innovadoras soluciones de prueba y diagnóstico. La aplicación de los productos de OMICRON brinda a los usuarios el más alto nivel de confianza en la evaluación de las condiciones de los equipos primarios y secundarios de sus sistemas. Los servicios ofrecidos en el área de asesoramiento, puesta en servicio, prueba, diagnóstico y formación hacen que la nuestra sea una gama de productos completa.

Nuestros clientes de más de 150 países confían en la capacidad de la compañía para brindar tecnología de punta de excelente calidad. Los Service Centers en todos los continentes proporcionan una amplia base de conocimientos y un extraordinario servicio al cliente. Todo esto, unido a nuestra sólida red de distribuidores y representantes, es lo que ha hecho de nuestra empresa un líder del mercado en la industria eléctrica.

Para obtener más información, documentación adicional e información de contacto detallada de nuestras oficinas en todo el mundo visite nuestro sitio web.