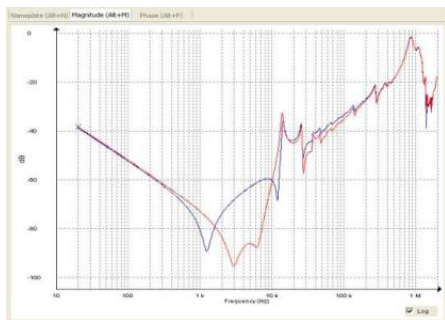


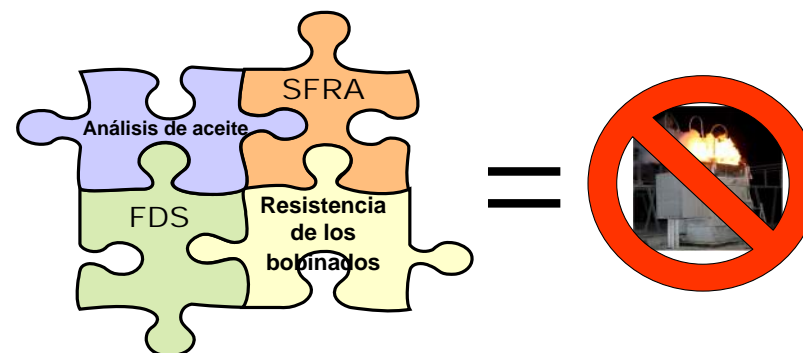
## Análisis de Respuesta en Frecuencia (FRA) para Evaluación de Desplazamientos y Deformaciones de Devanados en Transformadores de Potencia

Ing. Sergio Alejandro Chedid



## Diagnóstico de transformadores

- El diagnóstico consiste en la recolección de información confiable para poder tomar las decisiones correctas
- Tomando las decisiones correctas se ahorra dinero



## Conceptos básicos de la metodología SFRA

## Historia del SFRA(1)

- 1960: Método de impulso en baja tensión. Propuesto por primera vez por W. Lech & L. Tyminski en Polonia para la detección de deformaciones en los bobinados de los transformadores
- 1966: Se publican los resultados; "Detecting Transformer Winding Damage - The Low Voltage Impulse Method", Lech & Tyminsk, The Electric Review, ERA, UK
- 1976: "Frequency Domain Analysis of Responses From L.V.I. Testing of Power Transformers", A.G. Richenbacher, Conferencia 43<sup>ava</sup> de Doble
- 1978: "Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis", E.P. Dick & C.C. Erven, Ontario Hydro, IEEE Transactions of Power Delivery.

## Historia del SFRA(2)

- 1978: Ensayo FRA desarrollado en Ontario Hydro, Canada
- 1980's: Se llevan a cabo investigaciones más profundas a cargo de la Central Electricity Generating Board en UK
- 1988 - 1990's : Se realizan ensayos de prueba por empresas de energía Europeas, la tecnología se expande internacionalmente via CIGRE, EuroDoble y demás conferencias y jornadas técnicas
- 2004: La primera norma SFRA, "Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers", DL/T 911-2004, se publica por la Electric Power Industry Standard of People's Republic of China
- 2008: Se publica el reporte 342 del CIGRE, "Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA)"

## Mecánica básica de transformadores

- Un transformador está diseñado para soportar ciertos esfuerzos mecánicos
- Sin embargo, esos esfuerzos pueden excederse muy fácilmente
  - Durante el transporte
  - Corto circuitos cerca del transformador
- La resistencia mecánica del transformador se debilita a medida que este envejece
  - Menor capacidad para soportar el estrés mecánico
  - Mayor riesgo de problemas mecánicos
  - Mayor riesgo de problemas con la aislación

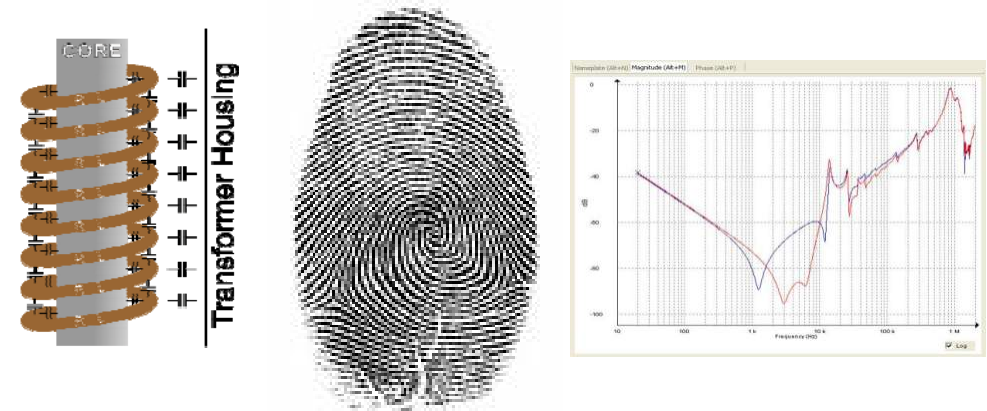


## Detección de fallas con SFRA

- Movimientos del núcleo
- Deformación de los bobinados
- Desplazamiento de los bobinados
- Colapso parcial de los bobinados
- "Hoop buckling" o abollamiento
- Estructuras rotas
- Espiras en corto o bobinados abiertos
- Etc.

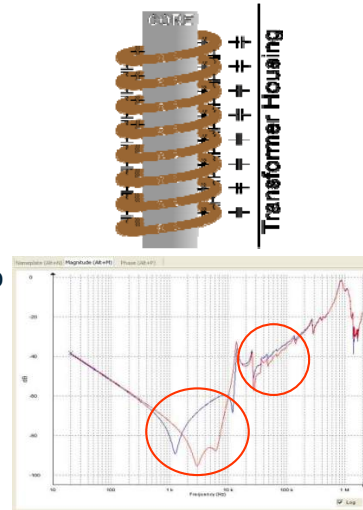


## SFRA = Huella dactilar



## Introducción a ensayos mediante SFRA

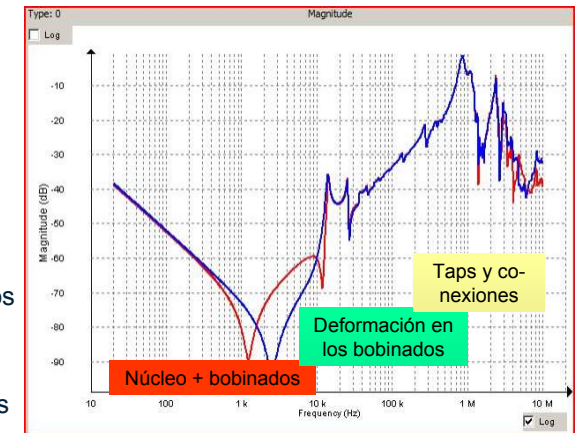
- Ensayo Off-line
- El Transformador es un complejo circuito filtro RLC
- Los cambios en este circuito se pueden detectar y graficar como una curva de respuesta cuando se aplican a los bobinados señales de ensayo a diferentes frecuencias
- Los cambios se pueden comparar a lo largo del tiempo, entre diferentes objetos de ensayo o entre el mismo
- El método es único es su capacidad de detección de problemas en los núcleos, problemas mecánicos en los bobinados y otras fallas eléctricas en un solo ensayo



## Resultado de los ensayos

### - siempre mediante comparación -

- En diferentes partes de la curva se pueden apreciar diferentes problemas
- El análisis por Software facilita la detección de desviaciones
- Bajas frecuencias
  - Problemas en el núcleo y bobinas en corto o abiertas
- Frecuencias medias
  - Deformación de los bobinados
- Altas frecuencias
  - Conexión de los taps y otros problemas de conexión de los bobinados



## Ensayos comparativos

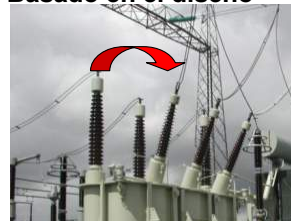
Transformador A



Basado en el tiempo



Basado en el diseño



Transformador A



Basado en el tipo

Transformador B



## Comparaciones

- **Basado en el tiempo** (Ensayos realizados sobre el mismo transformador a lo largo del tiempo)
  - Es el ensayo mas confiable
  - Las desviaciones entre curvas son fáciles de detectar
- **Basado en el tipo** (Ensayos realizados en transformadores con el mismo diseño)
  - Requiere conocimientos sobre las versiones y el objeto a ensayar
  - Las desviaciones pequeñas no son necesariamente indicación de problemas
- **Basado en el diseño** (Ensayos realizados en bobinados y bushings de diseño idéntico)
  - Requiere conocimientos sobre las versiones y el objeto a ensayar
  - Las desviaciones pequeñas no son necesariamente indicación de problemas

## Filosofía de medición

Medición nueva = Medición de referencia

De vuelta en servicio



Medición nueva  $\neq$  Medición de referencia

Se requiere mayor investigación



## Mediciones de referencia

- Cuando el transformador es nuevo
  - Adquiera los datos de referencia antes de la puesta en marcha de transformadores nuevos
- Cuando el transformador se encuentra en buena condición
  - Adquiera los datos de referencia durante los ensayos de rutina programados (si no se encuentran problemas)
- Guárdelos para futuras referencias
- ¡Comience a generar sus mediciones de referencia!

## Mediciones SFRA – ¿Cuándo?

- Ensayos de fabricación
- Ensayos de puesta en marcha
- Ensayos luego de transporte
- Ensayos por incidentes – Luego de incidentes cuando sospeche que se han producido cambios electromecánicos
  - Luego del transporte
  - Corto circuitos
- Eventos catastróficos
  - Terremotos
  - Huracanes, tornados
- Ensayos por indicaciones de alarma
  - Vibración
  - DGA
  - Alta temperatura



## Métodos FRA

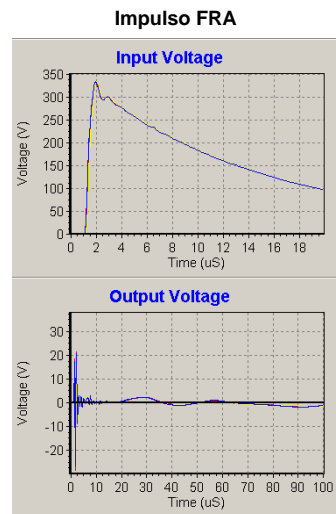
# Impulso FRA vs. Barrido FRA

## Impulso FRA

- Inyecta una señal de impulso y mide la respuesta
- Convierte el dominio en el tiempo en dominio en la frecuencia usando la transformada rápida de Fourier
- Baja resolución en bajas frecuencias

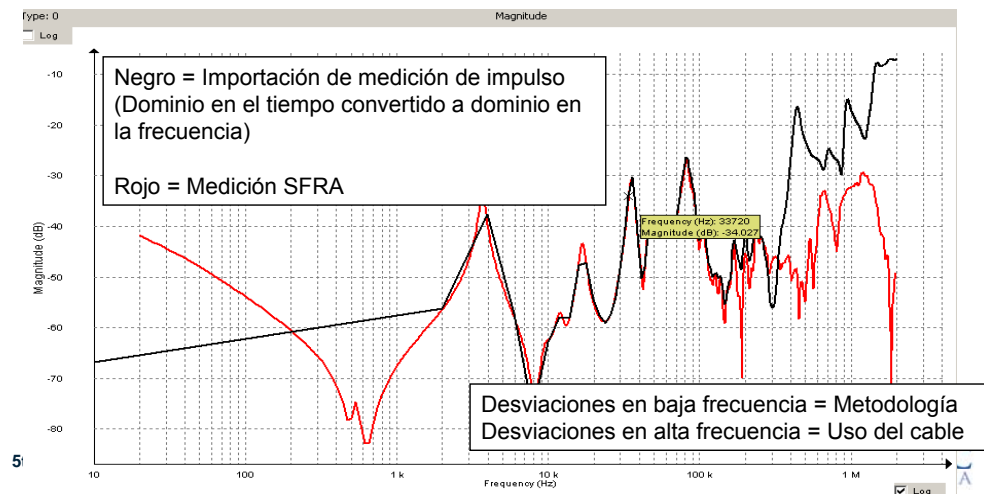
## Barrido SFRA

- Inyecta una única señal de frecuencia
- Mide la respuesta de la misma frecuencia
- No hay conversión
- Alta resolución en todas las frecuencias

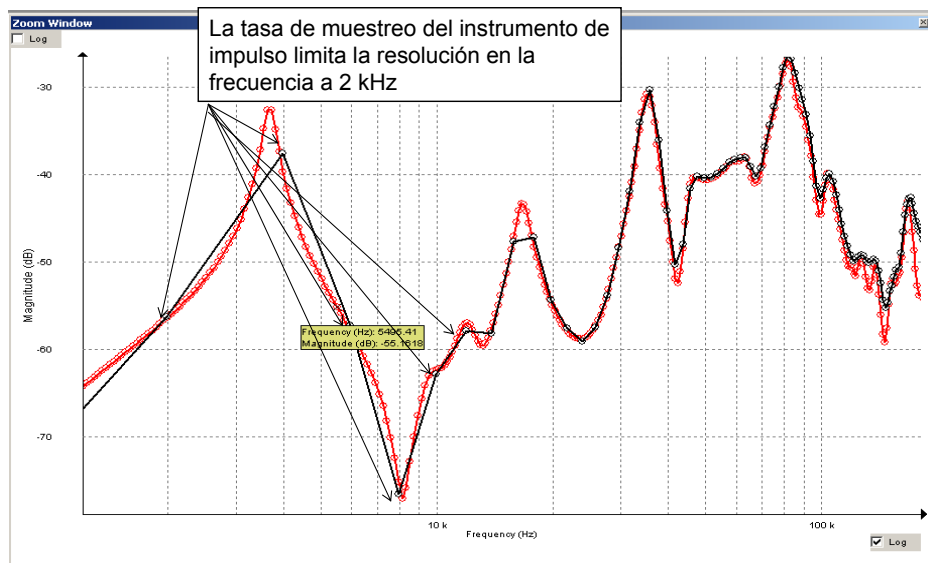


# Comparación de Impulso & Barrido FRA

- SFRA (Sweep frequency response analysis) ofrece datos con buen nivel de detalle en todas las frecuencias

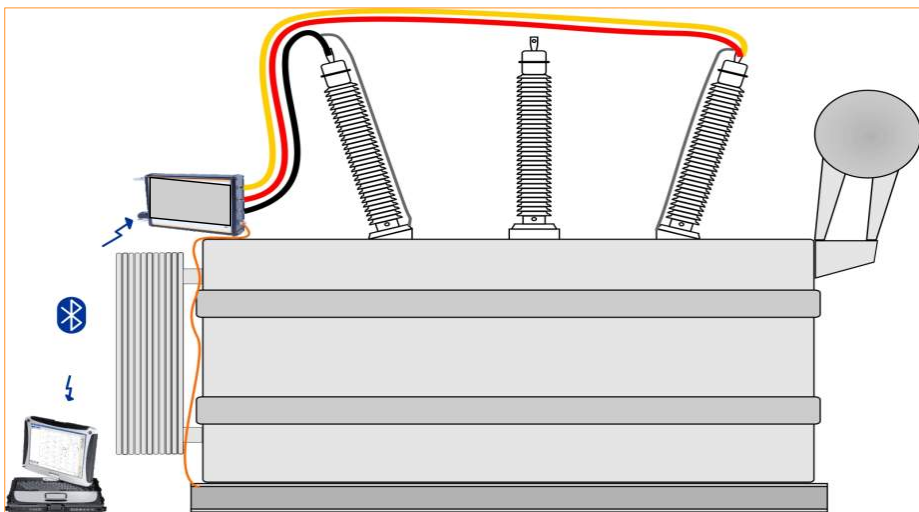


# Zoom en Impulso vs. SFRA



# Mediciones SFRA

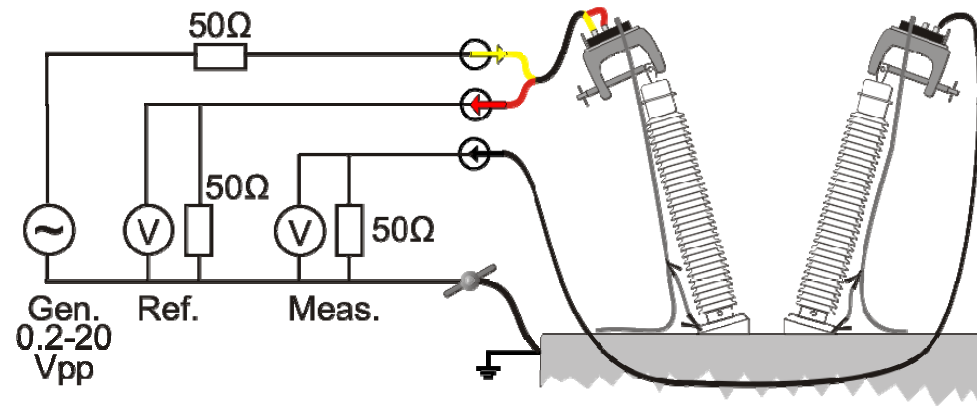
## Preparacion de ensayo SFRA



5to Congreso Uruguayo de Mantenimiento,  
Gestión de Activos y Confiabilidad  
URUMAN 2008 - Montevideo – Uruguay



## Circuito de medición



5to Congreso Uruguayo de Mantenimiento,  
Gestión de Activos y Confiabilidad  
URUMAN 2008 - Montevideo – Uruguay



## Huellas dactilares por SFRA con buena definición

¿Como maximizo mi inversión en tiempo y dinero cuando realizo mediciones SFRA?



5to Congreso Uruguayo de Mantenimiento,  
Gestión de Activos y Confiabilidad  
URUMAN 2008 - Montevideo – Uruguay



## Resultado de los ensayos - siempre mediante comparación -



¡La reproducibilidad es de suma importancia!

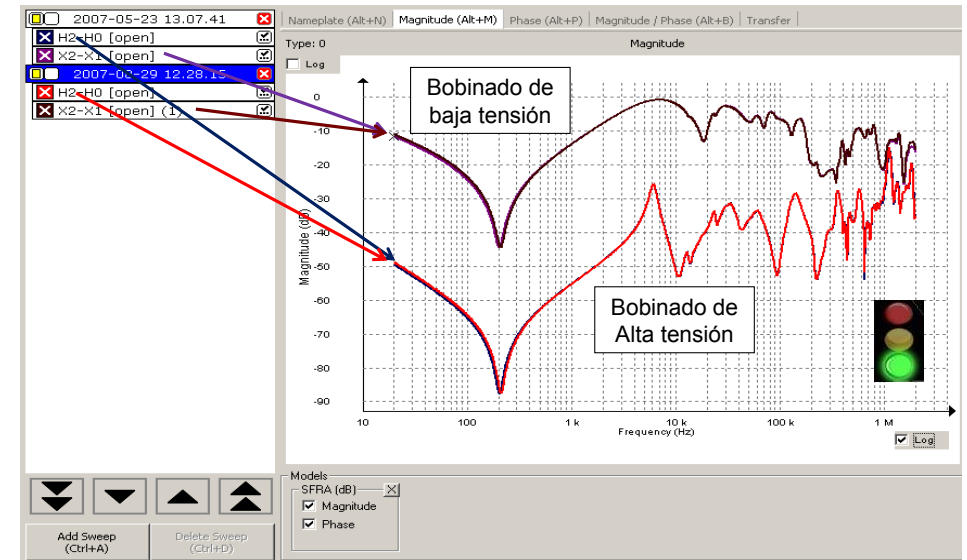
5to Congreso Uruguayo de Mantenimiento,  
Gestión de Activos y Confiabilidad  
URUMAN 2008 - Montevideo – Uruguay



## Ejemplos de resultados reproducibles

- Transformador monofásico elevador de 105 MVA a la salida de un generador
- Medición SFRA antes y después de un corto circuito severo en el generador
  - Dos unidades distintas de ensayo
  - Ensayos realizados por dos personas distintas
  - Ensayos realizados en distintas fechas

## Antes (23-05-2007) y después de la falla (29-08-2007)



## Transformador monofásico elevador de 105 MVA

- Las mediciones antes y después eran virtualmente iguales
- Muy buena correlación entre la referencia y el post falla
- Conclusión:
  - No hay indicación de cambios mecánicos en el transformador
  - Se puede, con seguridad, poner el transformador en servicio nuevamente

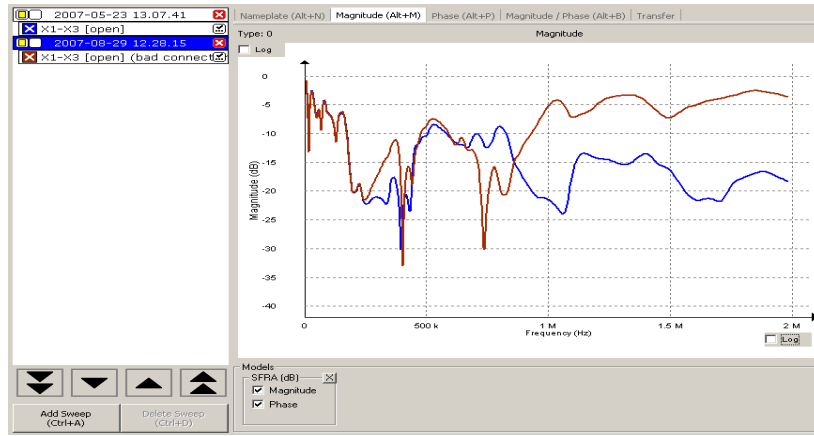


## Factores potenciales de compromiso

- Calidad de conexiones
- Buenas conexiones a tierra
- Rango dinámico del instrumento/ruido interno
- Entender la influencia de las propiedades en bajas frecuencias a circuito abierto mediante mediciones SFRA

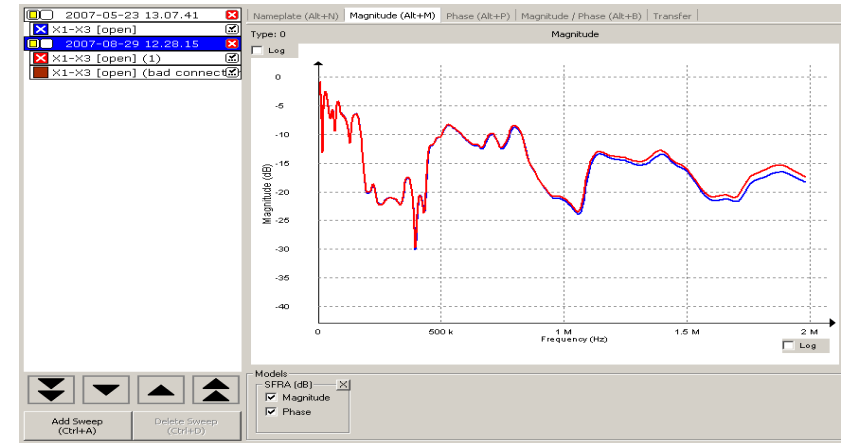
## Malas conexiones

- Las malas conexiones pueden afectar la curva en altas frecuencias



## Buenas conexiones

- Luego de un conexionado adecuado

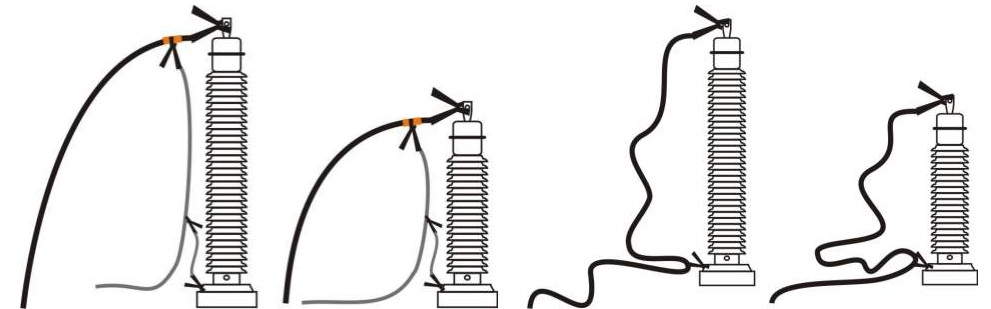


## Abrazaderas

- Estas abrazaderas aseguran un buen contacto
- Penetran las capas no conductoras
- Conexiones sólidas en barras circulares o planas
- Provee un alivio en la tensión para el cable
- Separa las conexiones para realizar puestas a tierra simples o múltiples



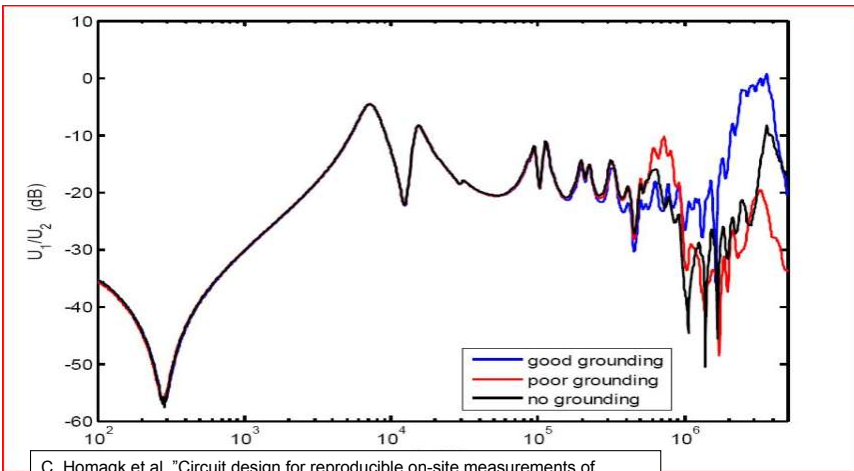
## Adecuadas conexiones a tierra aseguran repetibilidad a altas frecuencias



Buena conexión a tierra;  
utilice la menor longitud  
posible desde la pantalla del  
cable a la base del bushing

Mala conexión a tierra

## Influencia de la puesta a tierra



C. Homagk et al, "Circuit design for reproducible on-site measurements of transfer function on large power transformers using the SFRA method", ISH2007

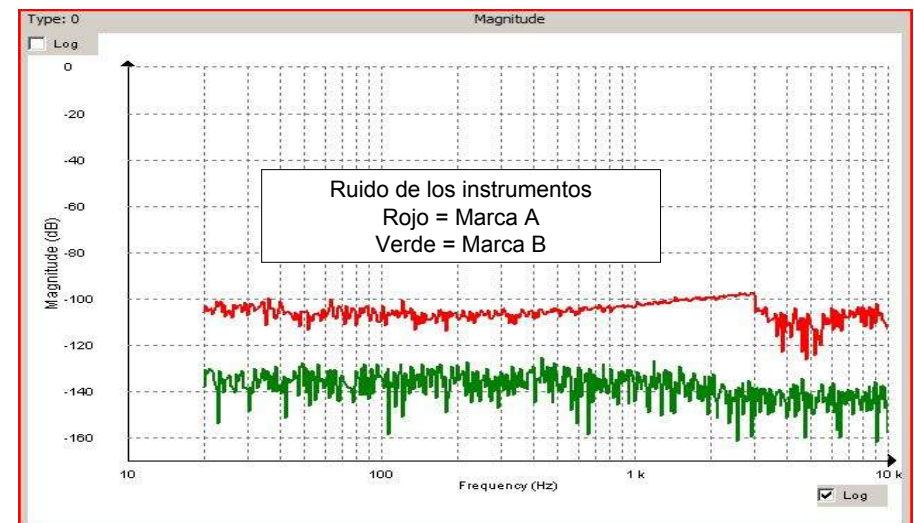
## Set de cables y puesta a tierra



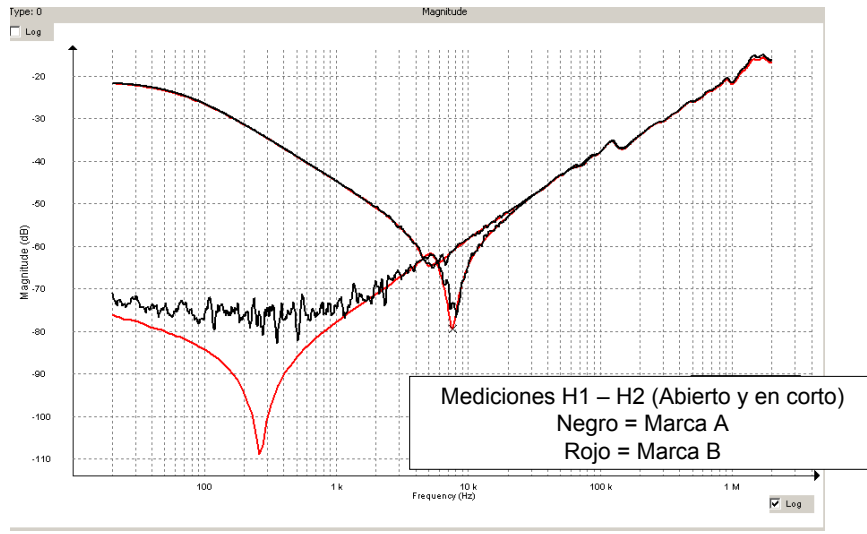
## Performance del instrumento

- Los transformadores pequeños tienen una mayor atenuación a la primer resonancia
- El ruido inherente del instrumento es a menudo la fuente de limitación principal, no necesariamente la estática de la subestación
- Ensaye el ruido de sus instrumentos realizando un barrido con los "cables abiertos" (Sin las abrazaderas conectadas al transformador)

## Nivel de ruido interno



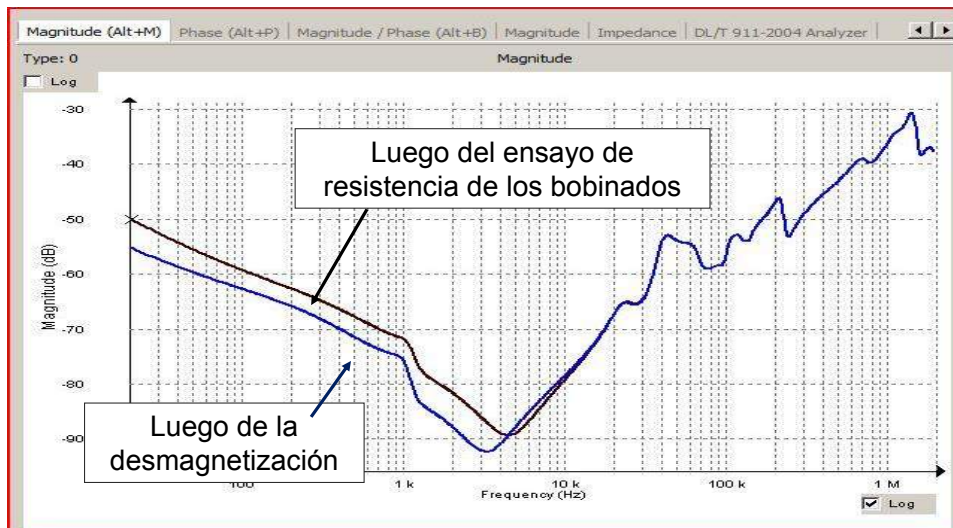
## Ejemplo de problema debido a ruido



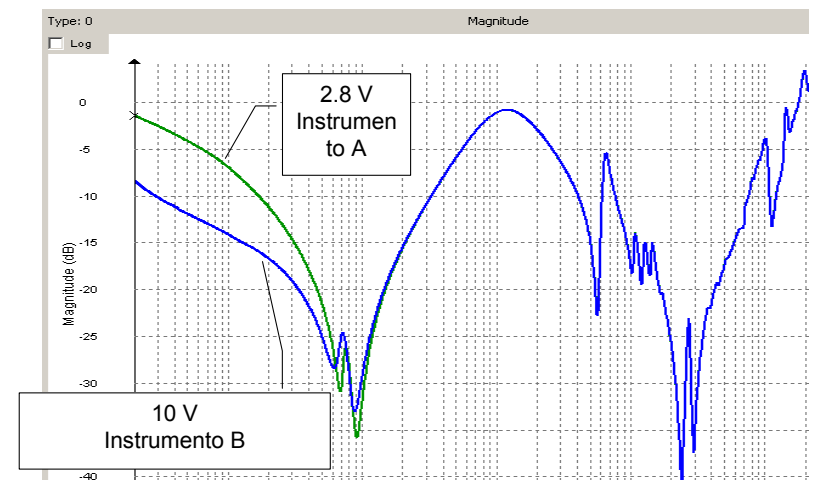
## Influencia del núcleo

- Trate de minimizar el efecto, sin embargo, es de esperar tener ciertas diferencias que deben aceptarse
- Preferentemente:
  - Realice las mediciones SFRA antes de las mediciones de resistencia de los bobinados (o desmagnetice el núcleo antes de las mediciones SFRA)
  - Utilice la misma tensión de medición en todas las mediciones SFRA

## ¡Realice el ensayo de resistencia de bobinados después del ensayo SFRA!



## Efecto de la aplicación de la tensión de medición



## Resumen

- El concepto de las mediciones SFRA radica en la gran importancia de la comparación y la reproducibilidad
- Para asegurar una alta repetibilidad hay que tener en cuenta lo siguiente
  - Usar un instrumento de alta precisión y calidad con impedancias de entrada y salida iguales a las del cable coaxil (ej. 50 Ohm)
  - Usar la misma tensión en todas las mediciones SFRA
  - Asegurarse una buena conexión y conectar las pantallas de los cables coaxiales utilizando la menor longitud.
  - Mantener una buena documentación, ej. Tomar fotografías de las conexiones

## Análisis de respuesta en barrido de frecuencia

### Ejemplos de aplicación

## Ejemplo – Comparación basada en el tiempo

- Transformador elevador monofásico, 400 kV
- Mediciones SFRA antes y después del mantenimiento programado
- Transformador supuestamente en buena condición y listo para ser puesto en servicio...

## Ejemplo – Comparación basada en el tiempo



"Distorsión obvia" según norma DL/T911-2004 (falta de tierra del núcleo)

## Ejemplo – Comparación basada en el tiempo (luego de reparación)



”Normal” según norma DL/T911-2004 (arreglo de tierra del núcleo)

## Comparación basada en el tipo - (unidades gemelas)

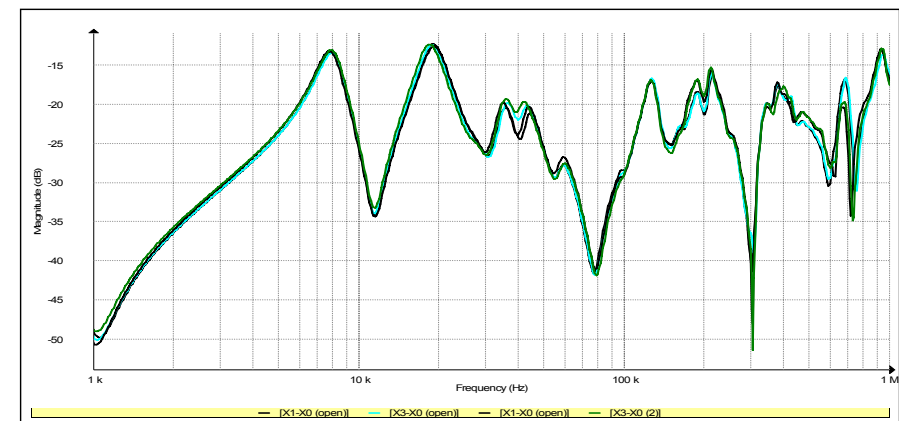
### Algunos parámetros para identificar unidades gemelas:

- Fabricante
- Lugar de fabricación
- Cliente original / Especificaciones técnicas
- Sin actualizaciones ni reparaciones
- Mismo año de producción o +/-1 año para unidades grandes
- Re compra no posterior a 5 años luego de la compra de referencia
- La unidad es parte de una orden en serie (Seguimiento de números ID)
- Para proyectos con varias unidades con diseños nuevos: El transformador de "referencia" preferentemente no deberá ser una de las primeras unidades producidas

## Comparación basada en el tipo - Ejemplo

- Dos transformadores de 33/11 kV, 10 MVA, fabricados en 1977
- Sacados de servicio para mantenimiento o reparación
- “Idénticas” excepto por pequeñas diferencias en la configuración de los taps (no puede ser arreglado en sitio debido a falta de herramienta...)
- El ensayo SFRA y la comparación de los transformadores salió bien indicando que no existen problemas electromecánicos en los transformadores (Altamente improbable que tengan problemas idénticos...)

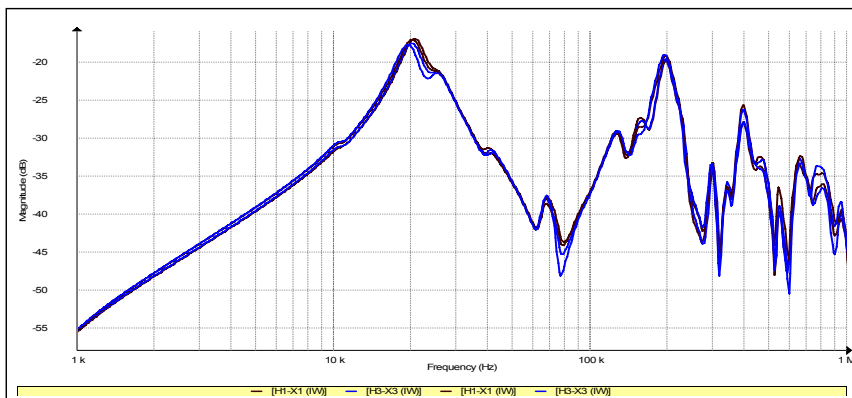
## Comparación basada en el tipo Bobinas de BT



- Transformador de 33 kV, 3 fases Yyn (30 años)
- ”Normal” según norma DL/T911-2004



## Comparación basada en el tipo Bobinas AT-BT



- Transformador de 33 kV, 3 fases Yyn (30 años)
- "Normal" según norma DL/T911-2004



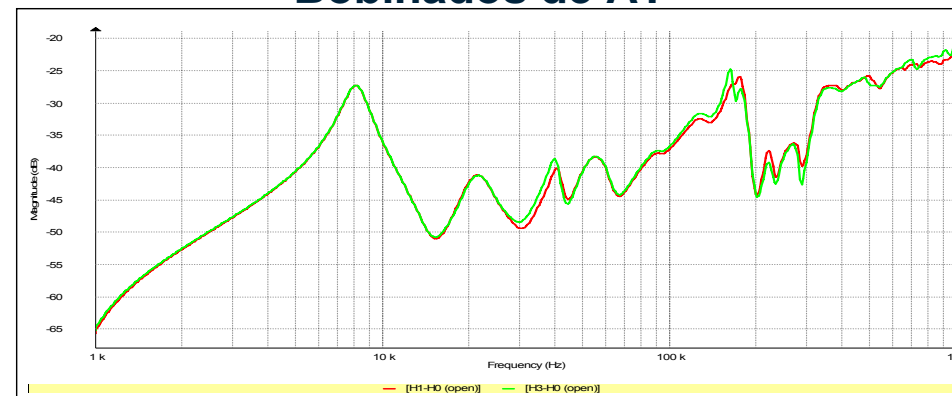
## Comparación de diseño

- Los transformadores de potencia son generalmente diseñados en un montaje de varias partes. Este tipo de diseño puede llevar a circuitos eléctricos simétricos
- Los defectos mecánicos en los bobinados generalmente ocasionan desplazamientos asimétricos
- Comparando los resultados de los ensayos en las diferentes partes puede ser un método apropiado para la evaluación de las condiciones mecánicas
- Dependiendo del tipo y tamaño del transformador, el rango de frecuencia para comparación de diseño se limita generalmente a 1MHz

## Comparación de diseño - Ejemplo

- Transformador de 132 kV, 60 MVA, fabricado en 2006
- Transformador nuevo. Nunca estuvo en servicio
- No hay referencias de mediciones FRA de fábrica
- El ensayo SFRA, comparando fases simétricas salió bien
- Los resultados pueden usarse como huellas dactilares para ensayos de diagnóstico futuros

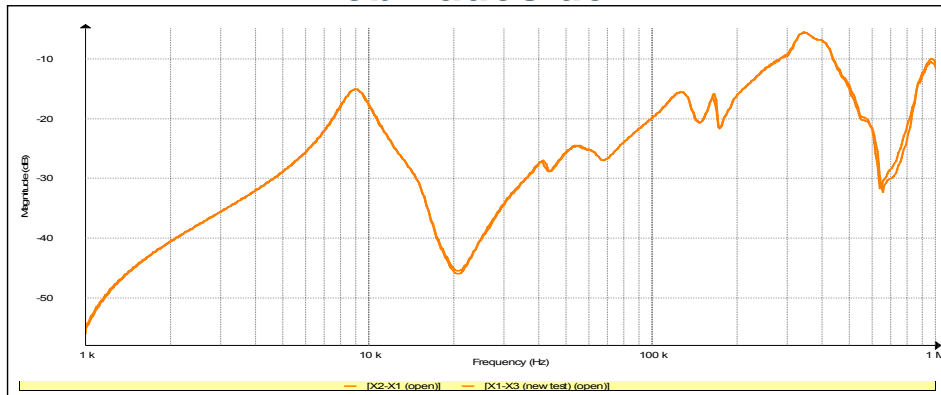
## Comparación basada en el diseño Bobinados de AT



- Transformador nuevo de 132 kV, 3-fases YNd1
- "Normal" según la norma DL/T911-2004
- H1-H0 vs H3-H0



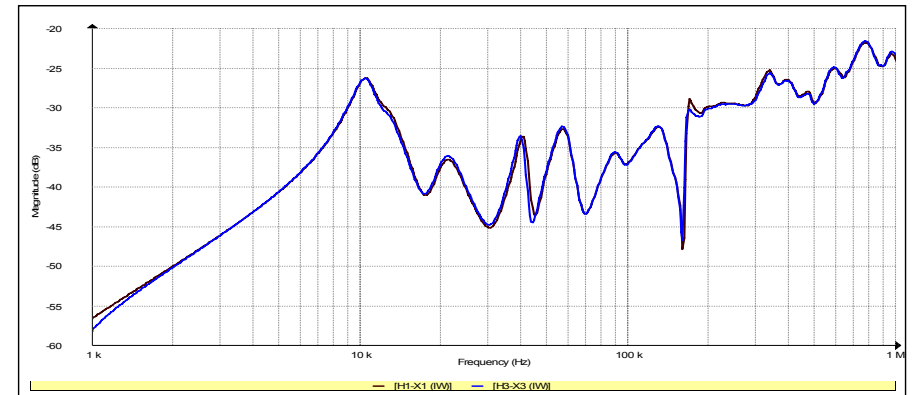
## Comparación basada en el diseño Bobinados de BT



- Transformador nuevo de 132 kV, 3-fases YNd1
- "Normal" según la norma DL/T911-2004
- X2-X1 vs X1-X3



## Comparación basada en el diseño Bobinados AT-BT



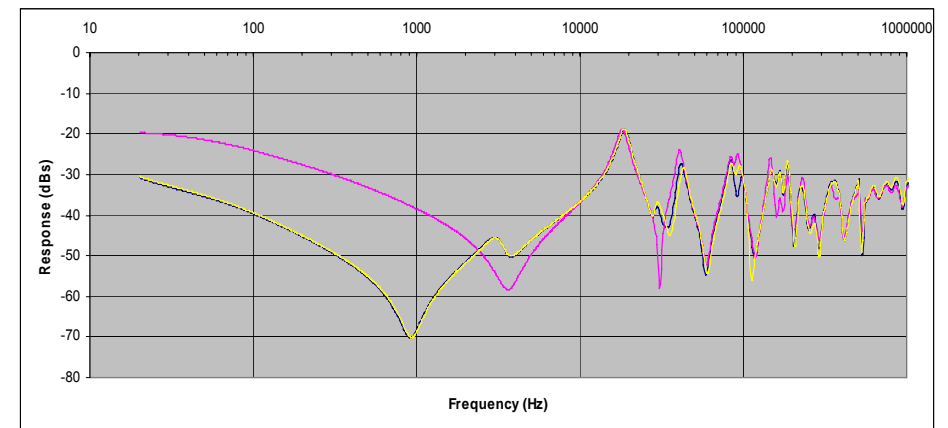
- Transformador nuevo de 132 kV, 3-fases YNd1
- "Normal" según la norma DL/T911-2004
- H1-X1 vs H3-X3



## Comparación basada en el diseño Luego de una sospecha de falla

- Transformador de potencia, 25MVA, 55/23kV, fabricado en 1985
- Por error, el transformador fue energizado con el lado de baja puesto a tierra
- Luego de esto, el transformador fue energizado nuevamente y como resultado se obtuvo un disparo del interruptor (¡La protección del transformador funcionó!)
- Se tomó la decisión de realizar un ensayo de diagnóstico

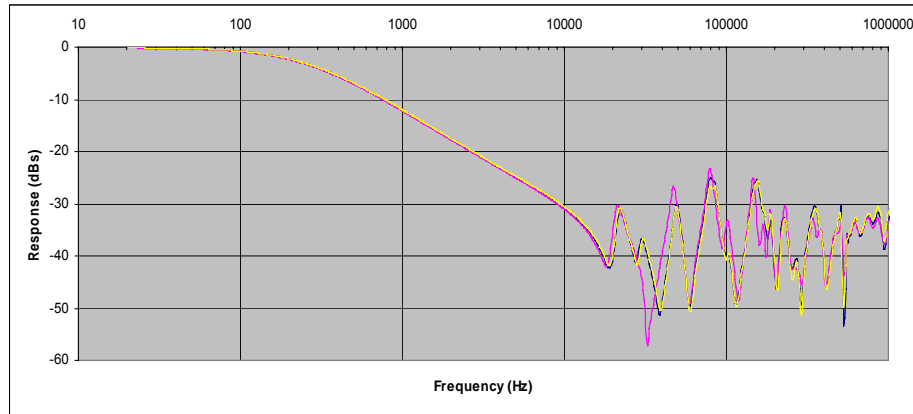
## Comparación basada en el diseño Luego de una sospecha de falla



- HV-0, LV abierto
- Fase A y C OK, gran desviación en fase B (¿espira en corto?)



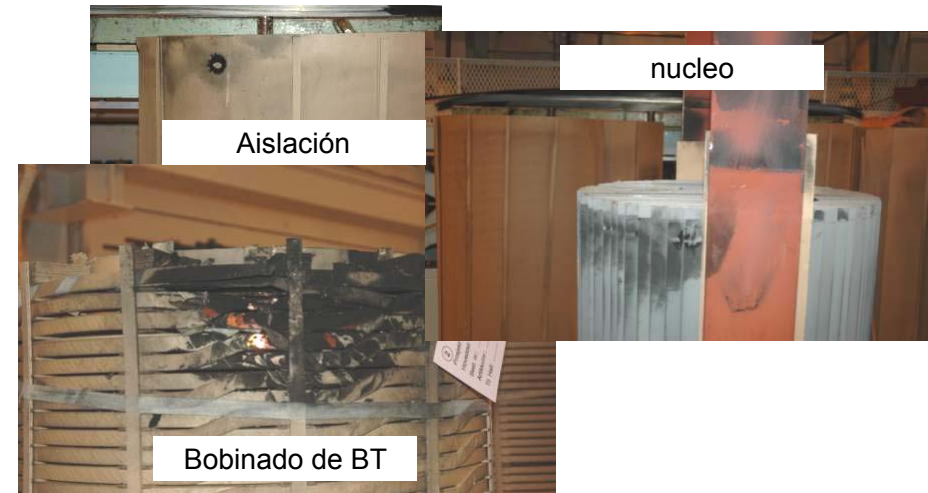
## Comparación basada en el diseño Luego de una sospecha de falla



- HV-0 (LV en corto)
- Fase A y C phase OK, desviación en fase B



## ¿Y como se veía la fase B.....?



## Análisis de respuesta en barrido de frecuencia

### Normas

## Recomendaciones y normas SFRA

- Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers, DL/T 911-2004, The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China
- Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA), CIGRE report 342, 2008
- IEEE PC57.149™/D4 Draft Trial-Use Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil Immersed Transformers, 2007 (Draft)
- Normas internas de fabricantes de transformadores, ej. Normas ABB FRA v.5

## Resumen – Normas SFRA

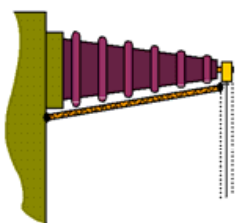
Standard	Instrumentation			Signal cable grounding	Self-test	Analysis
	Frequency range	Dynamic range	Accuracy			
EPISPRCDL/T911	1 kHz- 1 MHz	-100 to +20 dB	$\pm 1$ dB @ -80 dB	Wire, shortest length to transformer core grounding	not stated	Defined correlation in three frequency bands
CIGREWGA2.26	min 50 Hz - 2 MHz	-100 to +20 dB <b>measurement range</b>	$\pm 1$ dB @ -100 dB	Grounded at both ends using shortest braid	Test circuit with a known FRA response	Not stated (DL/T911 recognized as one standard)
IEEEPC57.149/D4	"Sufficient dynamic range, over the frequency range in order to accommodate <b>all transformer test objects</b> " (-120 dB..?)		"Calibrated to an acceptable standard"	Grounded at both ends using shortest braid	Standard test object with a known FRA response	Plot inspection, difference plots, general correlation techniques
ABB FRA Technical Standard v.5	10 Hz - 2 MHz	Better than -100 to +40 dB	$\pm 1$ dB @ -100 dB	Grounded at both ends using shortest wire/ braid	"Condition control of FRA device, including coaxial cables, is strongly recommended"	Plot inspection, difference plots.

## Instrumentación

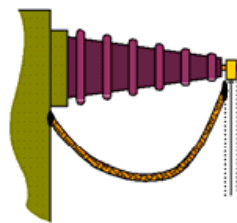
- Rango de frecuencia – Todas las principales marcas están OK
- Rango dinámico
  - El primer circuito de resonancia del transformador da una respuesta típica de -90dB. Los transformadores mas pequeños pueden tener su primer respuesta a -100 dB o menos
  - Notar que el CIGRE recomienda que el **rango de medición** llegue hasta -100 dB. Esto implica un rango dinámico de alrededor de -120 dB.
- Precisión
  - $\pm 1$  dB a -100 dB Cumple con todas las normas.

## Puestas a tierra

- La utilización del “cable mas corto” es generalmente aceptada
- Todos los fabricantes Europeos se adaptaron a esta práctica



Conexión a tierra recomendada (CIGRE)

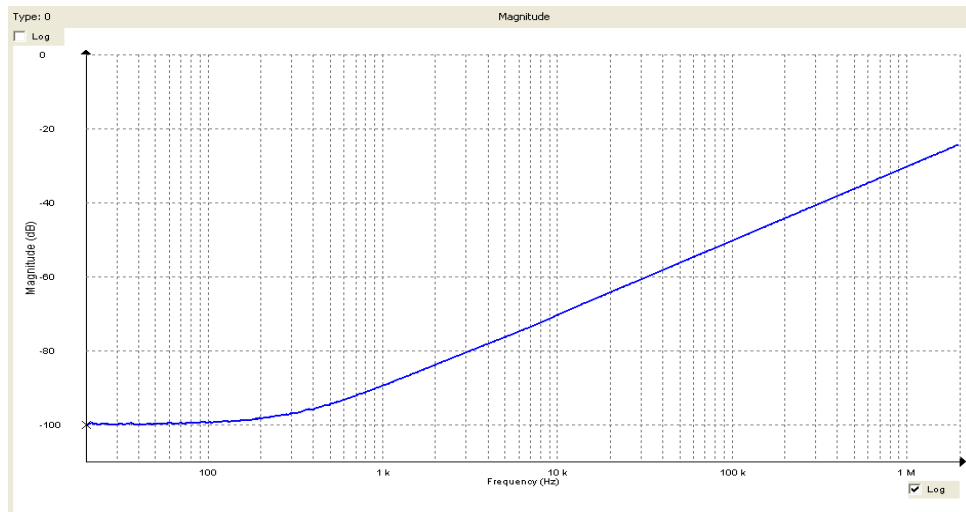


Mala conexión a tierra (CIGRE)

## Verificación de los instrumentos

- Verificación de los instrumentos, incluyendo los cables
  - Las mediciones con los cables “abiertos” (en las abrazaderas) debería dar una respuesta cercana al ruido del instrumento (a bajas frecuencias, dependiendo de la longitud del cable)
  - Las mediciones con los cables en “corto” (en las abrazaderas) debería dar una respuesta cercana a 0dB (dependiendo de la longitud del cable)
  - Dispositivo externo con respuesta en frecuencia conocida
- Calibración en intervalos recomendados.

## Unidad de verificación en campo



5to Congreso Uruguayo de Mantenimiento,  
Gestión de Activos y Confiabilidad  
URUMAN 2008 - Montevideo – Uruguay



## Resumen – Conclusiones

- SFRA es un método establecido para detección de cambios electromecánicos en transformadores de potencia
- La recolección de curvas de referencia en todos los transformadores de importancia crítica es una inversión
- Asegure repetitibilidad eligiendo buenos instrumentos y usando métodos de medición estandarizado

5to Congreso Uruguayo de Mantenimiento,  
Gestión de Activos y Confiabilidad  
URUMAN 2008 - Montevideo – Uruguay



Muchas gracias

5to Congreso Uruguayo de Mantenimiento,  
Gestión de Activos y Confiabilidad  
URUMAN 2008 - Montevideo – Uruguay



## Consultas

- Datos de contacto
  - Artec Ingeniería Mercosur
  - [artecingmercosur@artecing.com.ar](mailto:artecingmercosur@artecing.com.ar)

5to Congreso Uruguayo de Mantenimiento,  
Gestión de Activos y Confiabilidad  
URUMAN 2008 - Montevideo – Uruguay

