



# BRÚJULA



CONGRESO DE  
MANTENIMIENTO  
& CONFIABILIDAD  
CHILE

5<sup>a</sup>  
EDICIÓN



## Incorporación de monitoreo en línea a transformadores de potencia.

**Ing. Nicolás Gennari**

Jefe Área Mantenimiento - Gerencia de Explotación

Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe – Argentina



1

## Pilares plan de mejora



CONGRESO DE  
MANTENIMIENTO  
& CONFIABILIDAD  
CHILE

5<sup>a</sup>  
EDICIÓN



**Interrupción del suministro**



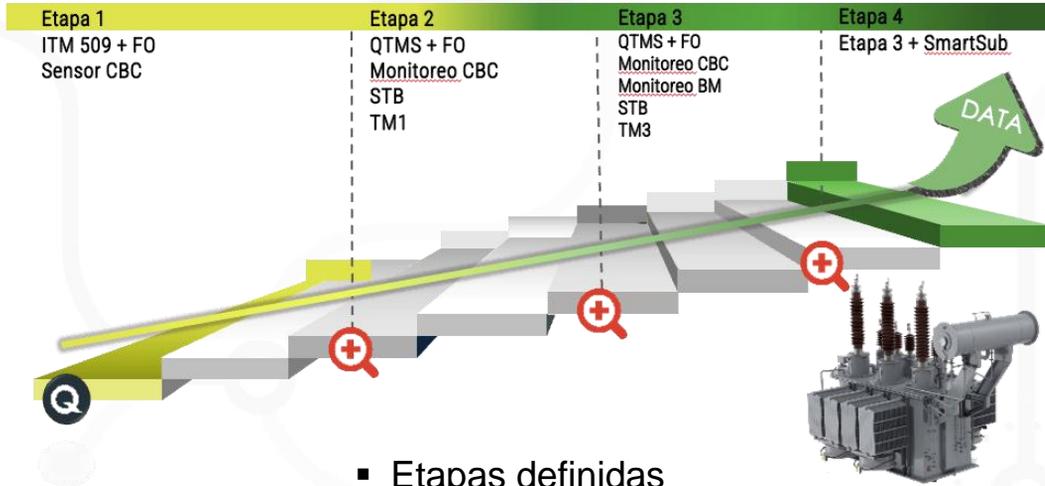
**Traspaso del conocimiento**



**Digitalización de activos**

2

# Definiciones iniciales



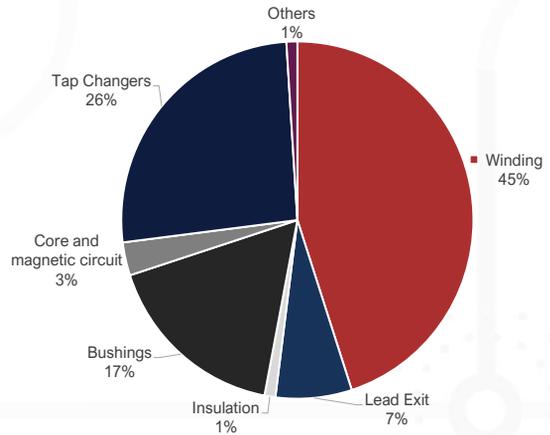
- Etapas definidas
- Objetivos realizables
- Garantizar el éxito

3

# Análisis de fallas

A2.37, Cigre WG. Transformer Reliability Survey

Mecanismo de falla comunes en tranformadores tipo subestación



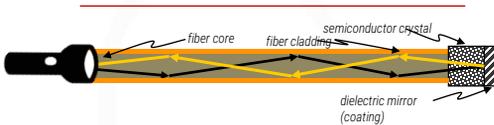
4



## Monitoreo de temperatura de forma directa

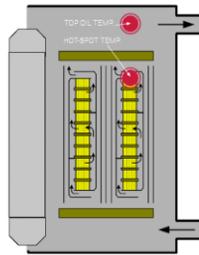
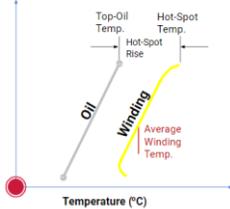
- Optimizar la carga sin comprometer la vida de la aislación
- Minimizar tiempo de inicio de sistema de enfriamiento del transformador
- Mejores predicciones de envejecimiento de la aislación y vida útil remanente

Costo muy bajo al instalar durante la fabricación



5

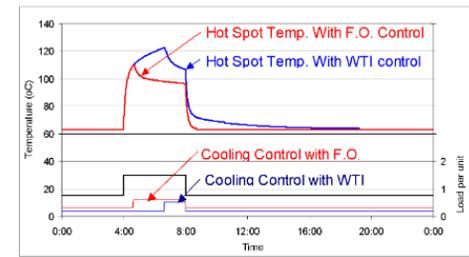
Conventional Measurement Model



## Monitoreo de temperatura de forma directa

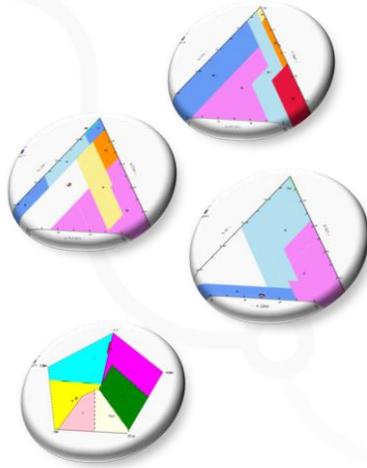
Se instalan 25 FO en las siguientes ubicaciones

Comparación de Eficiencia de Control: WTI y F.O.



- 4 en fase central por nivel de tensión
- 2 por fase lateral por nivel de tensión
- 1 para aceite superior

6



## Monitoreo de gases disueltos en al aceite (DGA)

- Detecta la falla en su fase inicial
- Permite acciones correctivas antes que ocurran fallas severas
  - 90% de fallas internas pueden ser detectadas con monitoreo en línea
  - Reducción de costos de mantenimiento y reparaciones
- Permite la operación segura del transformador durante toda su vida útil
- Es más confiable seguir la velocidad de cambio de gases con monitoreo en línea que con extracción de muestras y análisis de laboratorios (ref. CIGRE, Dr. Duval)

7

## Monitoreo de gases disueltos en al aceite (DGA)

Indicación /Gas de falla	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
	MdC	DdC	Metano	Etano	Etileno	Acetileno	Hidrógeno	Oxígeno	Humedad
Envejecimiento de la celulosa	X	X							X
Descomposición de aceite mineral			X	X	X	X	X		
Fugas en el sistema de expansión de aceite, juntas y soldaduras.		X						X	X
Fallas térmicas, celulosa	X	X	X				X	X	
Fallas térmicas, aceite 150-300°C			X	X	Rastro		X		
Fallas térmicas, aceite 300-700°C			X	X	X	Rastro	X		
Fallas térmicas, aceite >700°C			X		X	X	X		
Descargas Parciales			X			Rastro	X		
Arco			X		X	X	X		

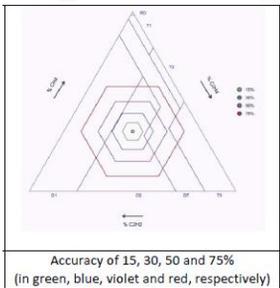
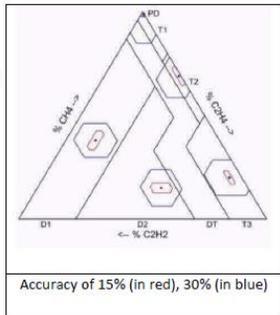
8

# Tabla comparativa tecnologías DGA



	Ventajas	Desventajas
<b>Cromatografía Gaseosa (GC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Muy Buena exactitud y repetitividad</li> <li>- Límite de detección inferior muy bajo</li> <li>- Utiliza un solo sensor</li> <li>- Tecnología ampliamente probada</li> <li>- Bajo costo de mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utiliza gas de arrastre de alta pureza como consumible</li> <li>- Envejecimiento de la columna cromatográfica, mantenimiento cada 8-10 años</li> </ul>
<b>Infrarrojo no dispersivo (NDIR)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No utiliza gases de arrastre o calibración</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La exactitud y retitividad es mala (15 a 25% de error típico)</li> <li>- Límites de detección altos</li> <li>- Desgaste del sensor</li> </ul>
<b>Sensores de estado Sólido (no es DGA)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajo costo</li> <li>- Puede medir en fase líquida directamente algunos gases</li> <li>- Instalación en una única válvula</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solo puede medir un gas a la vez (H<sub>2</sub> o CO)</li> <li>- Límite inferior de detección muy alto</li> <li>- Solo se puede usar no alarma de gas simple</li> </ul>
<b>Espectroscopía fotoacústica (PAS)</b>	<p>No requiere gases de arrastre o calibración Amplia banda de detección</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problema de precisión en concentraciones altas</li> <li>- Sensibilidad cruzada y contaminación</li> <li>- Sensor sensible a vibración, presión, temp y estrés mecánico.</li> <li>- Costos asociados</li> </ul>

9



## Monitoreo de gases disueltos en al aceite (DGA)

- Según IEC 60567 se podrán entregar resultados reproducibles (repetitividad) solo si la operación y calibración de los parámetros son controlados en forma precisa, pues en caso contrario pueden producirse errores significativos
- Según CIGRE DGA monitoring systems - Reference: 783, APPENDIX C. , la precisión declarada por las especificaciones técnicas de algunos fabricantes no puede ser sustentadas, en tanto que el concepto de calibración es un requerimiento para garantizar la precisión en el tiempo

10





## Monitoreo de Bushings

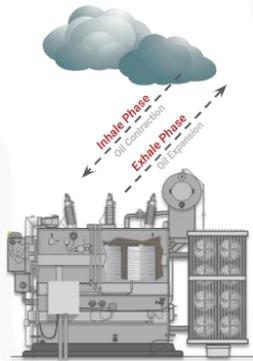
- 17% de las fallas de un transformador son debidas a fallas de bushings
- 50% de estas resultan catastróficas
- Altísima probabilidad de incendio, inconvenientes ambientales por fugas de aceite, riesgos a la propiedad y a las personas
- Ejemplos Cañada de Gómez y Santa Fe Norte

11

## Tabla comparativa tecnologías monitoreo de bushings

	Ventajas	Desventajas
Método de corriente de equilibrio	- Fácil de implementar	- Solo los grandes cambios en la capacitancias o en el factor de potencia pueden ser detectados - as de arrastre de alta pureza como consumible - Los cambios causados por la degradación del material de aislamiento y humedad apenas pueden ser detectados
Método señal de referencia	- Permite monitorear en forma individual cada uno de los bushing - La tangente delta es medida, no calculada - Corrección por factor de temperatura	- Es necesaria contar con tensiones de referencia

12



## Monitoreo de secador de humedad del aire

- Los transformadores "respiran" con la expansión y contracción del aceite causada por los cambios de temperatura.
- La humedad de la atmósfera puede ingresar al aceite del transformador cuando el transformador "inhala" durante el funcionamiento normal
- Con el tiempo, la acumulación de agua en el transformador afectará negativamente la vida útil del activo

Regeneración de sílica gel en un ciclo de "exhalación" del transformador



13

## Tabla comparativa tecnologías secadores

	Ventajas	Desventajas
Secador tradicional de sílica gel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inversión inicial menor (\$)</li> <li>- Facilidad de instalación</li> <li>- No requiere conexiones eléctricas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necesita mantenimiento adicional regular después de la instalación</li> <li>- El gel de sílice debe ser desechado</li> <li>- Costos adicionales de desecho del gel de sílice debido a preocupaciones ambientales.</li> <li>- Indicación visual solo (cambio de color) sin capacidad de alarma</li> <li>- No hay provisión para accesibilidad remota ni revisar los datos</li> </ul>
Secador regenerador de sílica gel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantenimiento de rutina mínimo</li> <li>- No es necesario desechar el gel de sílice</li> <li>- Incluye relés para comunicar el estado de regeneración y alarma</li> <li>- Salida de 4-20mA y comunicaciones para registrar datos continuamente</li> <li>- Registra niveles de humedad continuamente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inversión inicial más grande que la de los respiradores tradicionales (\$)</li> </ul>

14

# Corolario

Evaluadas las alternativas, se definió monitorear tres variables principales

- DGA
- BM
- Temperatura con FO

Aspectos determinantes

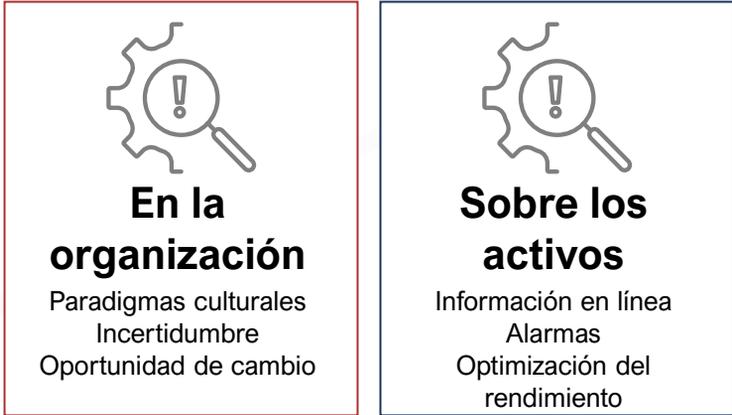
- Tecnología a aplicar
- Único integrador

# Corolario

Costo del activo EPE	100.00%
Sistema de monitoreo completo	6.22%
Vida útil del equipo	20 años

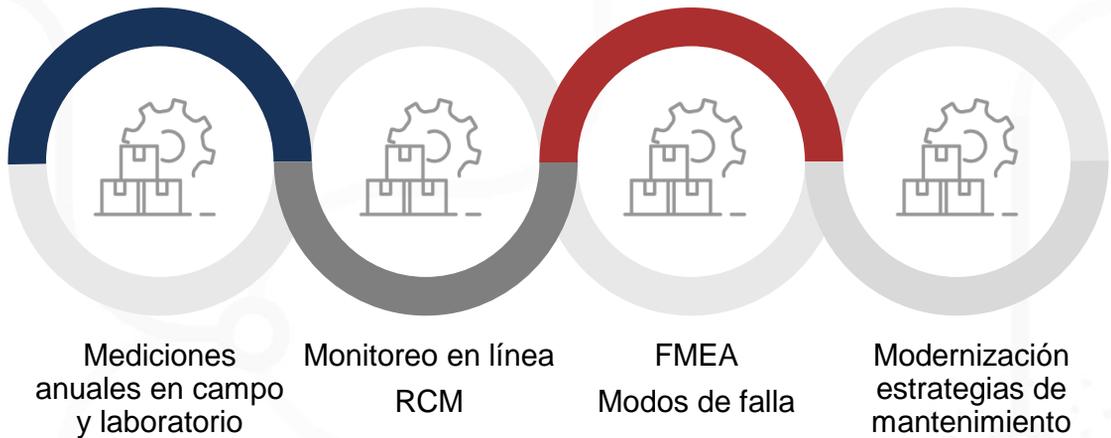
Costos asociados (*)		
Mantenimiento general	1.30%	anual
Entrenamiento	3.00%	una vez
Infraestructura	6.00%	una vez
Costo de operación	0.50%	anual
Software y actualizaciones	5.00%	una vez
(*) Referidos al valor del sistema de monitoreo		

# Impacto del proyecto



17

# Incorporación del mantenimiento centrado en la confiabilidad



18

# Incorporación del mantenimiento centrado en la confiabilidad

Modelo	Variables	Comentarios
Triangulo de Duval	Gas disuelto Metano, Etano y Acetileno	Optamos por cromatografía gaseosa ya que es la única que garantiza la repetitividad de las mediciones
Bushings	Capacitancia, Tangente Delta y temperatura del componente	Optamos por el método de tensión de referencia, ya que es el más preciso e independiza los resultados entre ellos
Eficiencia del sistema de enfriamiento	Temperatura de entrada y de salida de los radiadores, estado de los ventiladores activo o no activo y corrientes de arranque	No solo se trata de conocer el delta de temperatura si no el estado de los ventiladores
Humedad contenida en el Aceite	Humedad	Es un sensor simple de humedad
Temperatura de puntos calientes	Temperatura dentro del bobinado en diversos puntos	Optamos por la instalación de sensores de fibra óptica para medición directa dentro del bobinado. Elevadas prestaciones y su costo es residual en el precio del transformador
Humedad de respirado	Humedad contenida en al aire de respiración del tanque de expansión	Optamos por un Sensor de humedad de aire de Equipo activo autónomo que mide y seca el aire que entra al tanque de expansión.

19

## Proceso de implementación

Problemas y soluciones durante el desarrollo

- Comunicación TF-SALA
- Tendido FO. Obstrucciones
- Switch LTE
- Accesos remotos
- Arquitectura de comunicaciones
- Montajes de los fabricantes
- Nuevos gabinetes
- Mallas PAT

20

## Evaluación parcial del proyecto

Resultados del monitoreo en línea

- Monitoreo en línea (15/109) TF → Mejores tomas de decisiones
- Software Experto → Optimiza análisis de modelos de falla
- Desarrollo estrategias de mantenimiento centrado en la confiabilidad

21

## Evaluación parcial del proyecto

Beneficios del monitoreo en línea

- Arranque programado de forzadores y detección temprana de fallas
- Arranque temprano de Sistema de refrigeración
- Secadores inteligentes libres de mantenimiento
- DGA en línea – Confiabilidad – Optimización de recursos
- Optimización de carga de la máquina
- Operación segura en sobrecarga

22

# Futuro del proyecto

## Nuestros pasos a seguir

- Monitorear 100% de la flota de transformadores
- Incorporar software experto a toda la flota
- Construir índice de salud de cada máquina

Entre 2024 y 2025 ingreso 8 TF con monitoreo en línea, alcanzando el 20% de la flota

23

# Conclusiones

- RCM permitió identificar al transformador como activo de alto impacto en el sistema
- Migración hacia nuevas estrategias de mantenimiento RCM → Reestructuración UT Transformadores
- Alianzas proveedores. Servicio y soporte local

24



# iGracias!

**Ing. Nicolás Gennari**  
[ngennari@epe.santafe.gov.ar](mailto:ngennari@epe.santafe.gov.ar)