



1



CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA

2^a
EDICIÓN



BRÚJULA

**Monitoreo en línea de
transformadores de potencia.
Mejora de confiabilidad y toma
de decisiones basada en datos**

Ing. Nicolás Gennari

Gerente – Gerencia de Explotación
Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe - Argentina



EPE
Energía de Santa Fe



2

Presentación del problema



**Alto Impacto en
CdS por fallas en
TF**



**Pérdida de
personal técnico**



**Registros
esporádicos de
parámetros del TF**

#CMCColombia2025



3

Monitoreo de parámetros del transformador.



Método tradicional

Medición de temperatura de forma local indirecta – Solo disparo

Revisión periódica general cada 1 a 1,5 años

Cromatografía

Reposición de sílica gel

Estado de ventilación forzada

Estado de CBC

Revisión general

NO se monitorea estado de bushings



Alta **tasa de falla** intempestiva



Elevado tiempo de **reposición** de servicio



Baja confiabilidad para la operación en sobrecarga



Pobre información para análisis de modos de fallas



Desconocimiento del estado general de operación



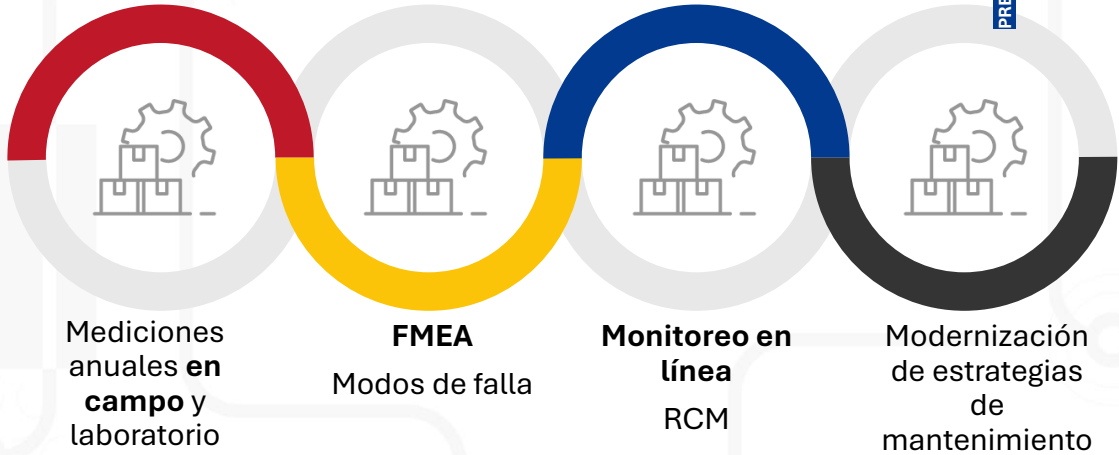
Elevados **costos** operativos

#CMCColombia2025



4

Propuestas de mejoras



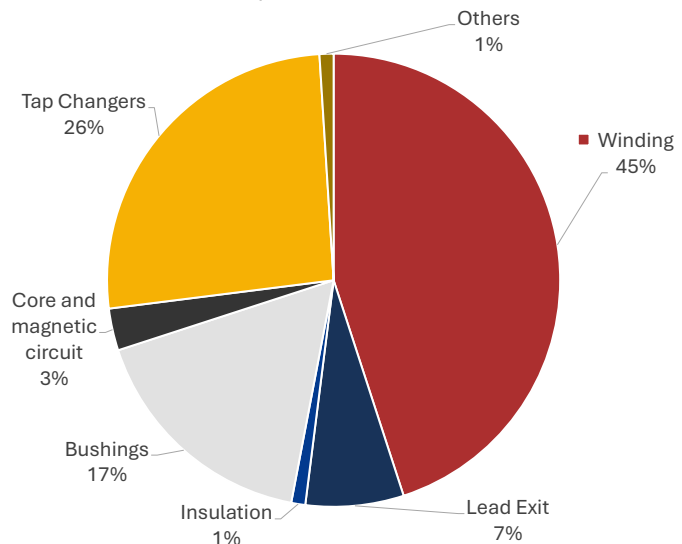
#CMCColombia2025



5

Análisis de fallas

Mecanismos de falla comunes en transformadores tipo subestación



A2.37, Cigre WG.
Transformer Reliability
Survey

#CMCColombia2025



6

Incorporación de Monitoreo en línea - 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 y precisión 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	Mediría nos permite definir si se requiere una acción de secado para mejorar la condición del papel aislante
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"	Estado de condición de la sílica gel	Optamos por un Secador de humedad de aire que permite regenerar y monitorear el estado de la sílica gel.
Conmutador bajo carga	Posición del conmutador Corriente del motor del conmutador	Permite conocer los tiempos de cambio de tomas y el estado del mecanismo.

#CMCColombia2025


 CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA

2ª
EDICIÓN

7

Definiciones iniciales



- **Etapas** definidas
- **Objetivos** realizables
- Garantizar el **éxito**

#CMCColombia2025


 CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA

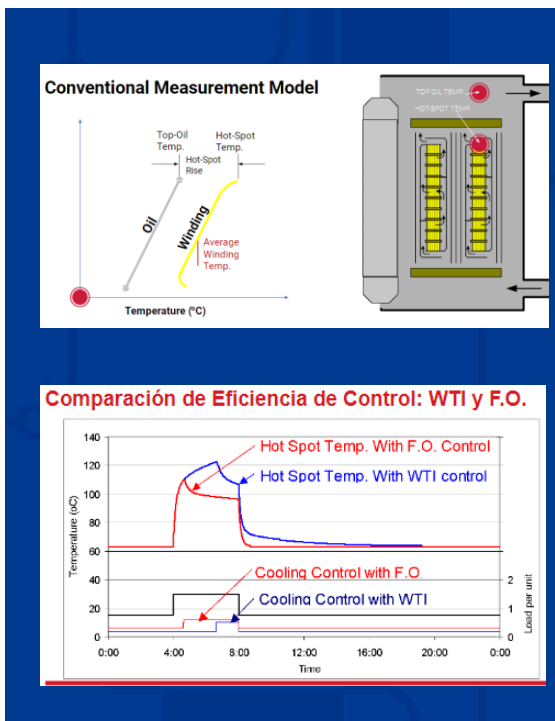
2ª
EDICIÓN

8

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

9

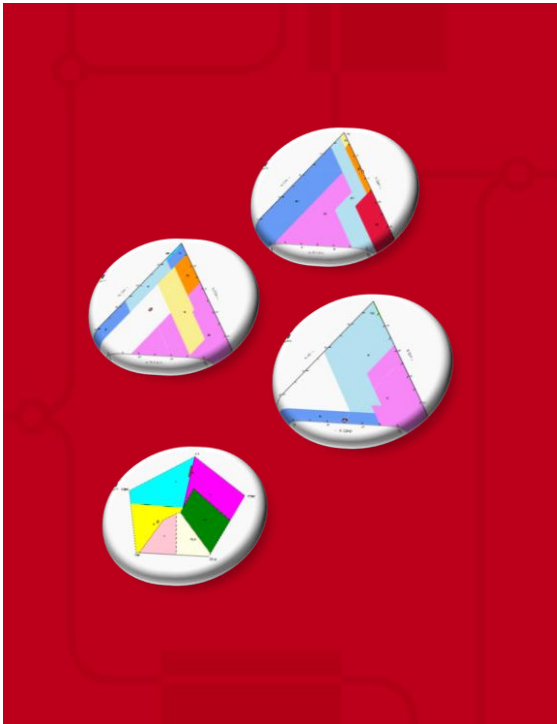


Monitoreo de temperatura de forma directa

Se instalan **25 FO** en las siguientes ubicaciones

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

10



Monitoreo de gases disueltos en al aceite (DGA)



- Detecta la falla en su **fase inicial**
- Permite acciones correctivas **antes que ocurran fallas severas**
 - Se detectan **90% de fallas** internas 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)



11

Tabla comparativa tecnologías DGA

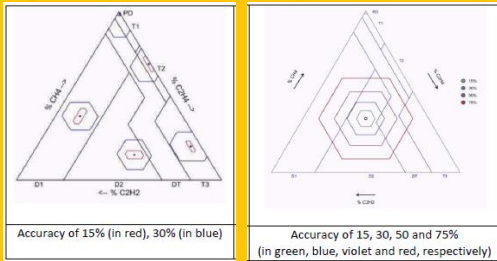


	Ventajas	Desventajas
Cromatografía Gaseosa (GC)	- Muy Buena exactitud y repetitividad - Límite de detección inferior muy bajo - Utiliza un solo sensor - Tecnología ampliamente probada - Bajo costo de mantenimiento	- Utiliza gas de arrastre de alta pureza como consumible - Envejecimiento de la columna cromatográfica, mantenimiento cada 8-10 años
Infrarrojo no dispersivo (NDIR)	- No utiliza gases de arrastre o calibración	- La exactitud y repetitividad es mala (15 a 25% de error típico) - Límites de detección altos - Desgaste del sensor
Sensores de estado Sólido (no es DGA)	- Bajo costo - Puede medir en fase líquida directamente algunos gases - Instalación en una única válvula	- Solo puede medir un gas a la vez (H₂ o CO) - Límite inferior de detección muy alto - Solo se puede usar no alarma de gas simple
Espectroscopía fotoacústica (PAS)	- No requiere gases de arrastre o calibración - Amplia banda de detección	- Problema de precisión en concentraciones altas - Sensibilidad cruzada y contaminación - Sensor sensible a vibración, presión, temp y estrés mecánico. - Costos asociados

#CMCColombia2025



12



Monitoreo de Gases Disueltos en el aceite (DGA)

Según CIGRE DGA monitoring systems
Reference: 783, APPENDIX C

- 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
- 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**.

13



Ejemplos Cañada de Gómez y Santa Fe Norte

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.

14

Tabla comparativa tecnologías BM

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

#CMCColombia2025

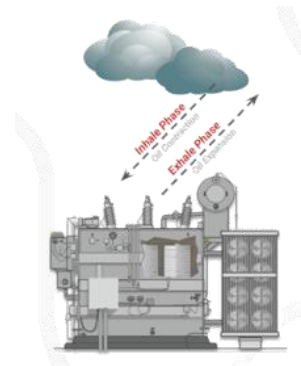

 CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA

2ª EDICIÓN

15

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 silica gel en un ciclo de "exhalación" del transformador

Tx INHALA

PASO 1
El aire atmosférico es succionado a través del respirador y secado por el desecante de gel de sílice antes de entrar al transformador..

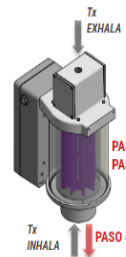
Tx EXHALA

PASO 2
Cuando el desecante se satura con agua, se activa un calentador dentro del tubo.

PASO 3
La humedad retenida en el gel de sílice se condensa en los lados del tubo.

PASO 4
El agua líquida drena por gravedad por el puerto inferior del respirador cuando el transformador está en una fase de "exhalación".

REGENERACIÓN



 CONGRESO DE
MANTENIMIENTO
& CONFIABILIDAD
COLOMBIA

2ª EDICIÓN

16

Tabla comparativa tecnologías secadores

	Ventajas	Desventajas
Secador tradicional de sílica gel	• Inversión inicial menor (\$) • Facilidad de instalación • No requiere conexiones eléctricas	• Necesita mantenimiento adicional regular después de la instalación • El gel de sílice debe ser desechado • Costos adicionales de desecho del gel de sílice debido a preocupaciones ambientales • Solo indicación visual (cambio de color) sin capacidad de alarma • No hay provisión para accesibilidad remota, ni revisión de datos
Secador regenerador de sílica gel	• Mantenimiento de rutina mínimo • No es necesario desechar el gel de sílice • Incluye relés para comunicar el estado de regeneración y alarma • Salida 4-20 mA y comunicaciones para registro continuo de datos • Registra niveles de humedad continuamente	• Inversión inicial más grande que la de los equipos tradicionales (\$)

#CMCColombia2025

17

Corolario

Evaluadas las alternativas, se decidió **monitorear tres variables principales:**

- **DGA**
- **BM**
- **Temperatura con FO**

Factores determinantes

- Tecnología a aplicar
- Único integrador

18



Corolario

Costo del activo EPE	100%
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



En la organización

- Paradigmas culturales
- Incertidumbre
- Oportunidad de cambio



Sobre los activos

- Información en línea
- Alarmas
- Confiabilidad



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 de las EETT

Evaluación del proyecto

Resultados del monitoreo en línea



(15/109) TF – **Mejora** en la toma de decisiones



Optimización del análisis de modelos de falla



Desarrollo de **estrategias** de mantenimiento centrado en la confiabilidad

Evaluación del proyecto



Beneficios del monitoreo en línea

Secadores inteligentes libres de mantenimiento

Arranque **temprano** de sistema de refrigeración

DGA en línea: **Aumento** de confiabilidad y Optimización de recursos

Arranque **programado** de forzadores y detección temprana de fallas

Optimización de carga y operación segura en sobrecarga

#CMCColombia2025



23

Futuro del proyecto



01

100%

Monitorear la totalidad de la flota de transformadores de potencia

02

Software

Incorporar toda la totalidad de la flota monitoreada al software experto

03

Índices

Desarrollar y constituir un índice de salud de cada transformador de la flota

Durante 2025 se espera el ingreso de 8 TF con monitoreo en línea, alcanzando así el 20% de la flota

#CMCColombia2025



24

LECCIONES APRENDIDAS



Incorporar RCM

Permitió confirmar que el TF como activo de mayor impacto en el sistema eléctrico



Monitoreo en línea

Reestructuración del personal y actividades



Proveedores

Alianza estratégica. Servicio y soporte local

#CMCColombia2025



25



iGracias!

Ing. Nicolás Gennari

ngennari@epe.santafe.gov.ar

26