

Ensayos y pruebas de diagnóstico de instalaciones de alta tensión

EPIM 2025

Jorge Fernández Daher - 27 de febrero de 2025

Introducción

- Equipos principales en instalaciones de alta tensión
- Ensayos de campo
- Normativa aplicable
- Diagnóstico
- Ensayos especiales
- Últimas tendencias

Consideraciones importantes

- Procedimiento general de ensayos
- Planificación y preparación
- Medidas de seguridad
- Ejecución de ensayos
- Análisis y evaluación de resultados
- Documentación y reporte

Equipos principales

- Transformadores de potencia
- Interruptores
- Seccionadores
- Transformadores de instrumentación
- Celdas de media tensión
- Cables de media tensión
- GIS

Transformadores de potencia

- Ensayos en fábrica (control de calidad)
 - IEC 60076
 - IEEE C57.12.90
- Ensayos de campo (mantenimiento y diagnóstico)
 - IEEE C57.152



Transformadores de potencia

- Ensayos en distintas etapas de la vida útil de un transformador
 - transporte: IEEE C57.150
 - instalación: IEEE C57.93
 - vida útil: IEEE C57.140
 - monitoreo permanente: IEEE C57.14

Ensayos en el aceite aislante

- Ensayos físico químicos:
 - IEC 60422
 - IEEE C57.637
- Gases disueltos:
 - IEC 60599
 - IEEE C57.104
- Furanos
 - IEC 61198

Transformadores – ensayos de campo

- IEEE C57.152
 - Técnicas clasificadas según las principales partes de un transformador
 - No necesariamente se hacen todos
 - Dependen del usuario
 - Dependen de la historia del equipo
 - Establecimiento de valores de referencia

Normativa – IEEE C57.152

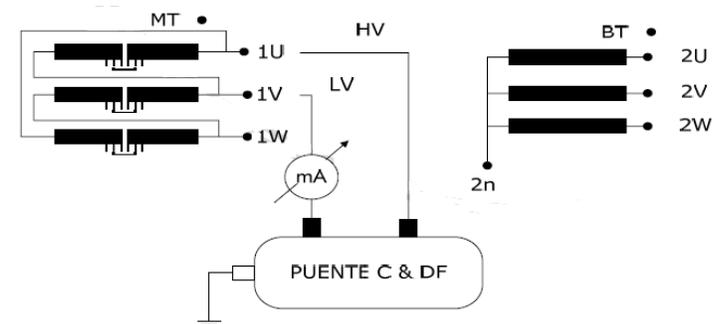
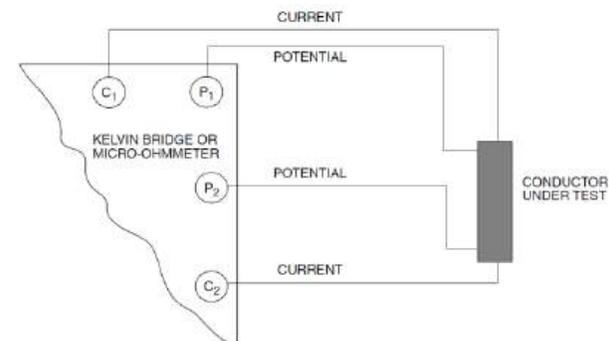
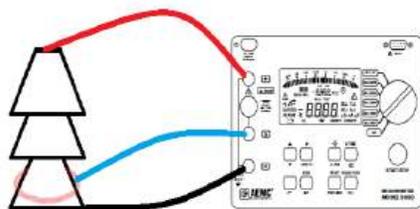
Maintenance test	Liquid-filled power transformer			
	Commissioning ^a	In-service ^b	After protection trip due to system fault ^c	After protection trip due to internal fault ^d
Main tank				
Tank pressure	Opt	Opt	Opt	REC
Core ground test	REC	AN	AN	REC
Insulating liquid quality tests and dissolved gas analysis (DGA)	REC	REC	AN	REC
Furan test	Opt	Opt ⁵	Opt	REC
Vacuum	REC	Opt	Opt	REC
Insulation resistance	REC	AN	AN	REC
Winding resistance	REC	AN	AN	REC
Turns ratio (DETC taps)	REC	AN	AN	REC
Excitation current	REC	AN	AN	REC
PF/Tan-Delta	REC	AN	AN	REC
Partial discharge (PD)	Opt	Opt	Opt	Opt
Induced voltage	Opt	Opt	Opt	Opt
Frequency response analysis (FRA)	REC	AN	AN	REC
Dielectric frequency response (DFR)	Opt	Opt	Opt	Opt
Infrared	N/A	REC	N/A	N/A
Bushing				
Contact resistance	Opt	N/A	N/A	Opt
Infrared	N/A	REC	N/A	N/A
PF/Tan-Delta	REC	REC	AN	REC
Continuity	REC	N/A	N/A	REC

Normativa – IEEE C57.152

Maintenance test	Liquid-filled power transformer			
	Commissioning ^a	In-service ^b	After protection trip due to system fault ^c	After protection trip due to internal fault ^d
Load tap changer (LTC) and de-energized tap changer (DETC)				
Insulating liquid quality tests and DGA for LTC	REC	REC	AN	REC
Contact continuity for LTC	REC	AN	AN	REC
Infrared for LTC	N/A	REC	N/A	N/A
Motor current signature analysis for LTC	REC	AN	AN	REC
Vibration and acoustic measurement for LTC	Opt	Opt	Opt	Opt
Voltage dynamic testing for LTC	Opt	Opt	Opt	Opt
Ancillary equipment				
Gauges calibration	REC	REC	Opt	REC
Gas pressure relay calibration	REC	REC	Opt	REC
Pressure relief vent	REC	REC	Opt	REC
Cooling fan controls	REC	REC	Opt	REC
Cooling pump controls	REC	REC	Opt	REC
Arresters	REC	REC	REC	Opt
Bushing CTs	REC	AN	AN	AN

Transformadores – ensayos eléctricos

- Resistencia de bobinados
- Relación de transformación
- Corriente de excitación
- Resistencia de aislación



Transformadores – ensayos eléctricos

- Índice de polarización
- Factor de potencia y capacidad

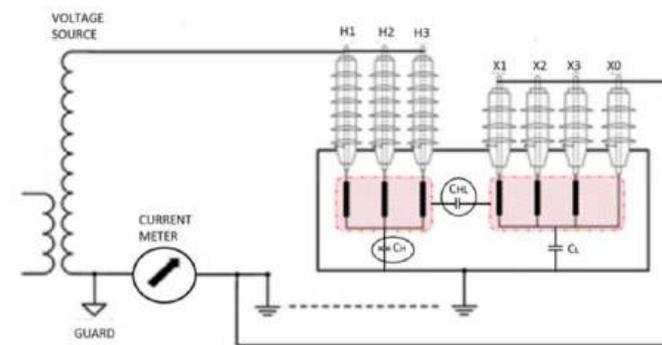
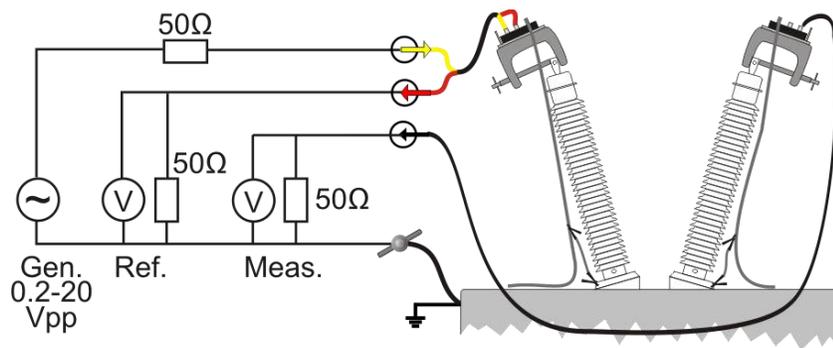


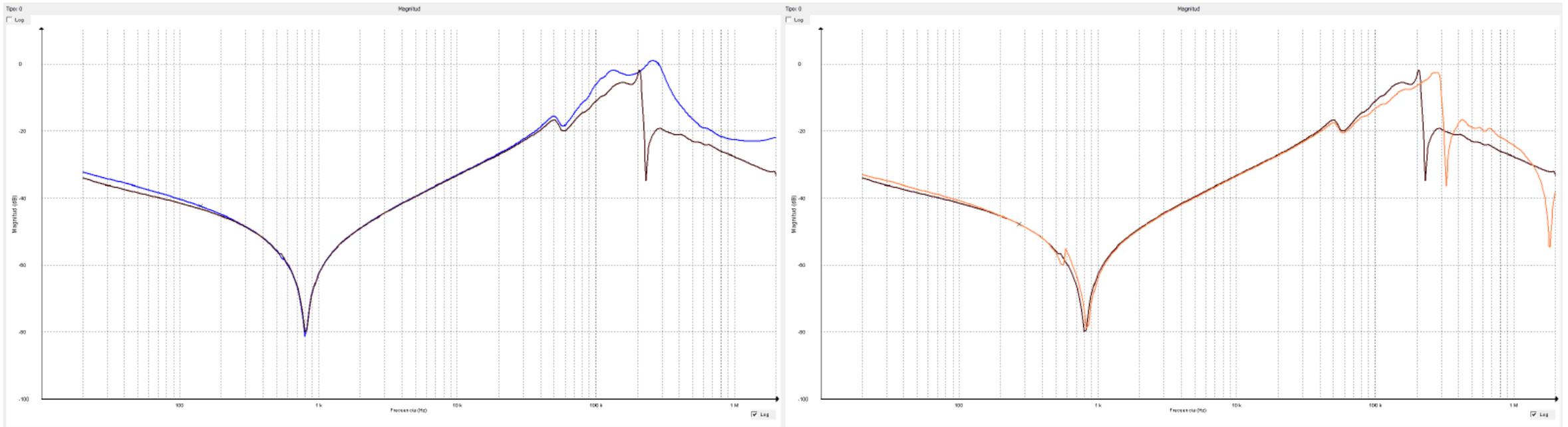
Figure A.3—Grounded specimen test circuit

Transformadores – ensayos eléctricos

- Análisis de respuesta en frecuencia
- Descargas parciales
- Respuesta de frecuencia dieléctrica



Transformadores – precauciones para FRA



Transformadores – ensayos eléctricos

- Complicaciones en campo

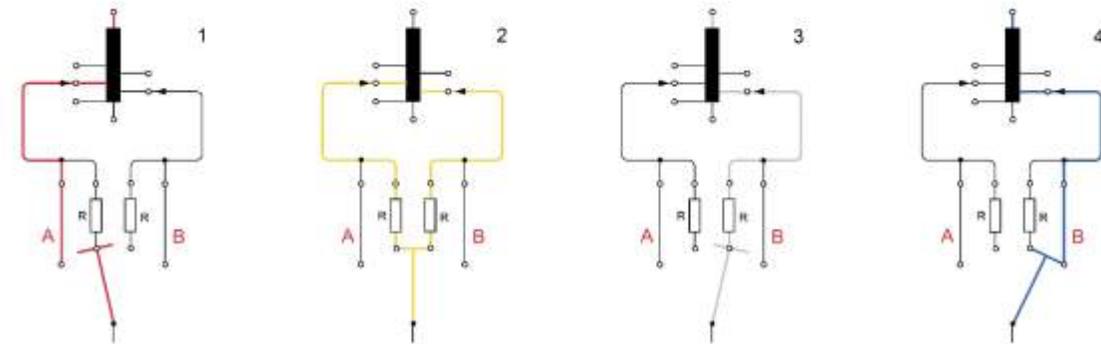
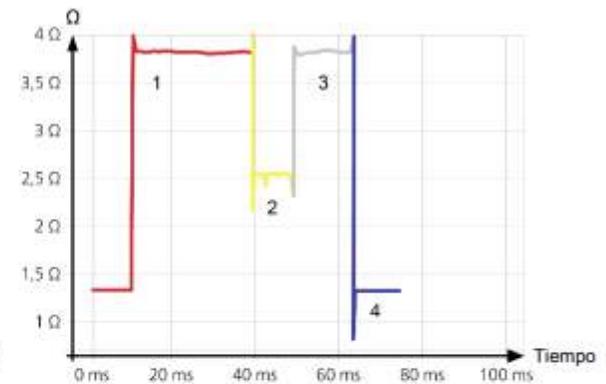
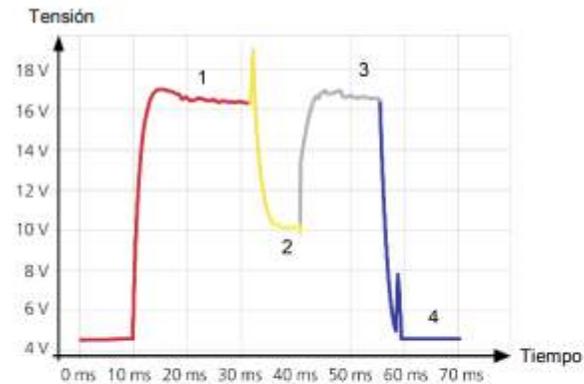
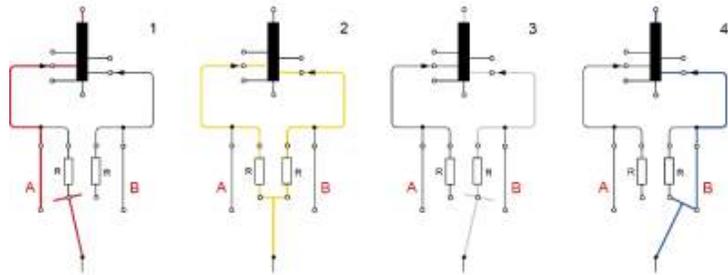
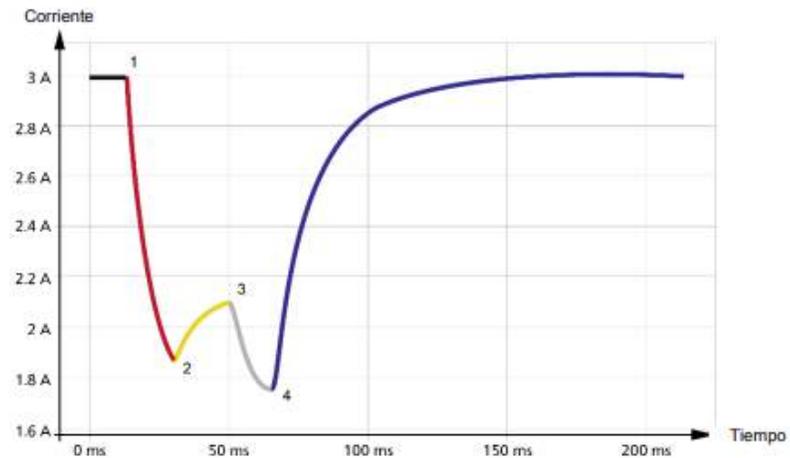


Ensayos en conmutadores bajo carga

- Resistencia dinámica
- Vibraciones



OLTC – resistencia dinámica



Transformadores - ensayos en el aceite

- Color
- Rigidez dieléctrica



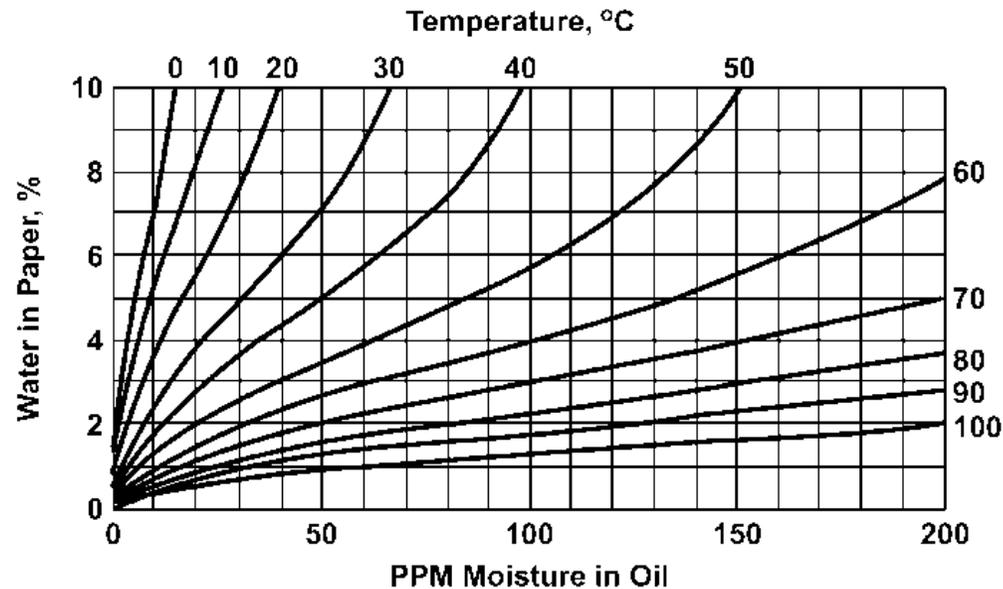
Transformadores - ensayos en el aceite

- Tensión interfasial



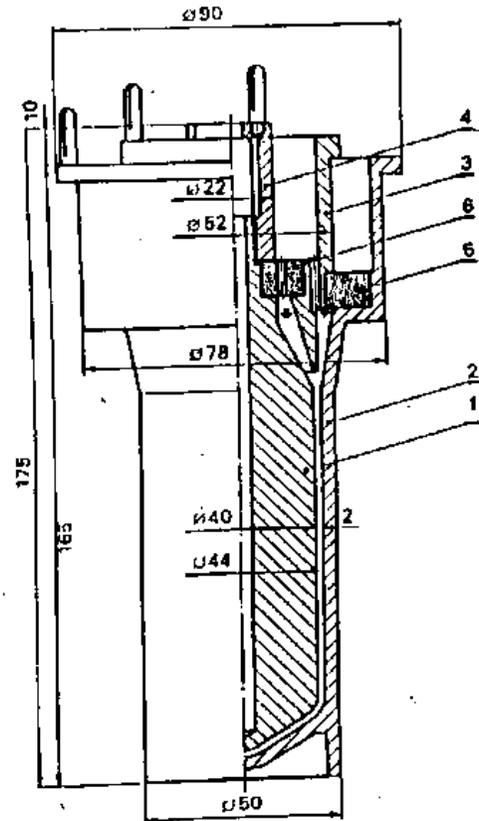
Transformadores - ensayos en el aceite

- Contenido de humedad



Transformadores - ensayos en el aceite

- Tangente delta



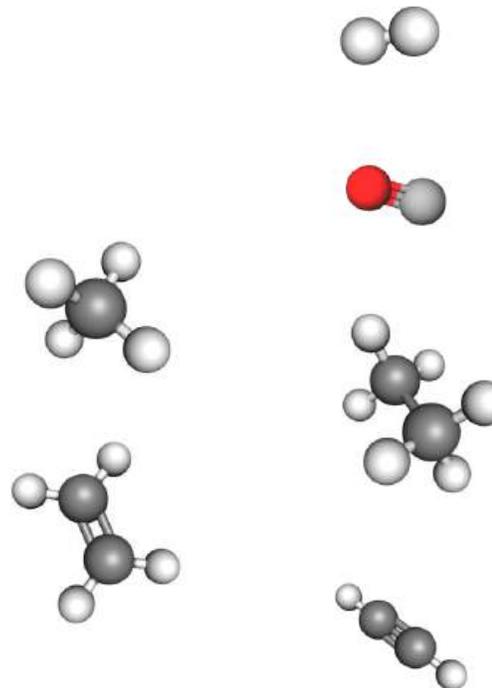
Ensayos en el aceite - límites

Tensión máxima	< 72,5 kV	72,5 a 170 kV	> 170 kV
rigidez dieléctrica (kV)	> 55	> 60	> 60
contenido de agua (mg/kg)	20	< 10	< 10
acidez (mg KOH/g)	Max. 0,03	Max. 0,03	Max. 0,03
tangente delta a 90 °C	Max. 0,015	Max. 0,015	Max. 0,010
tensión interfasial (mN/m)	Min. 35	Min. 35	Min. 35
PCBs (mg/kg)	no detectable (< 2)		

Análisis de gases disueltos en el aceite

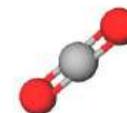
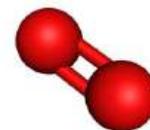
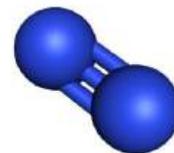
- Gases combustibles

- Hidrógeno, H_2
- Monóxido de carbono, CO
- Metano, CH_4
- Etano, C_2H_6
- Etileno, C_2H_4
- Acetileno, C_2H_2



Análisis de gases disueltos en el aceite

- Otros gases
 - Nitrógeno, N_2
 - Oxígeno, O_2
 - Dióxido de carbono, CO_2



Gases disueltos - normativa

- IEEE Std C57.104, IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers
- IEC 60599, Equipos eléctricos impregnados en aceite en servicio. Guía para la interpretación de los análisis de gases disueltos y libres

Gases disueltos - instrumentos



Gases disueltos - diagnóstico

Caso	Defecto característico	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
DP	descargas parciales	NS	< 0,1	< 0,2
D1	descargas baja energía	>1	0,1-0,5	>1
D2	descargas alta energía	0,6-2,5	0,1-1	>2
T1	térmico $t < 300$ °C	NS	>1 pero NS	<1
T2	térmico 300 °C $< t < 700$ °C	<0,1	>1	1-4
T3	térmico $t > 700$ °C	<0,2	>1	>4

Otros gases - relaciones

- Formación de CO y CO₂ aumenta con la temperatura
- CO >1000 y CO₂/CO < 3
 - Papel involucrado en el defecto
 - Posible carbonización
 - Presencia de otros gases
- CO₂ > 10000 y CO₂/CO > 10
 - Ligero calentamiento del papel (>160 °C) u
 - Oxidación del aceite

Otros gases - relaciones

- Equilibrio
 - O₂-32000 ppm
 - N₂-64000 ppm
 - O₂/N₂≈0,5
- O₂ se consume
 - Oxidación del aceite o
 - Envejecimiento del papel

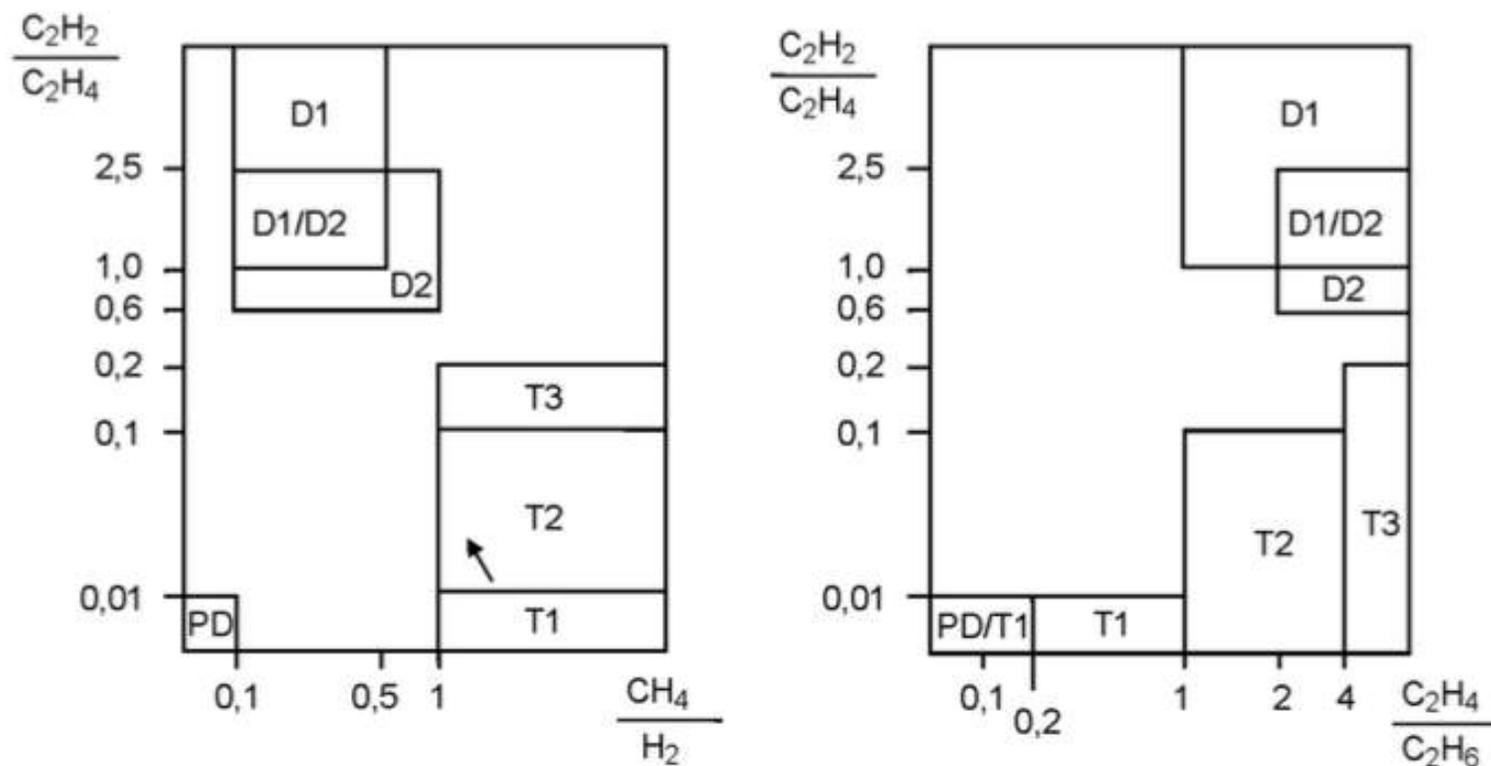
Gases disueltos – norma IEC

- Transformadores de potencia

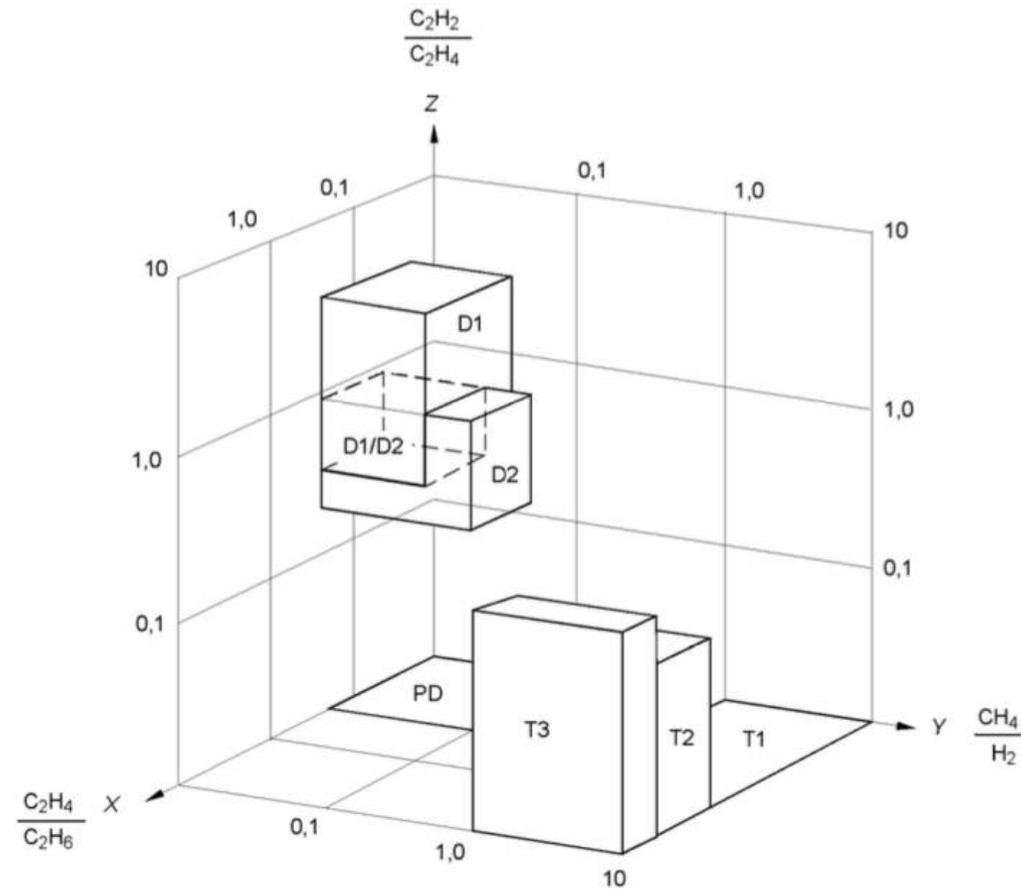
ppm	C ₂ H ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
todos los transformadores		50-150	30-130	60-280	20-90	400-600	3800-14000
sin CBC	2-20						
CBC comunicado	60-280						

ppm/año	C ₂ H ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
todos los transformadores		35-132	10-120	32-146	5-90	260-1060	1700-10000
sin CBC	0-4						
CBC comunicado	21-37						

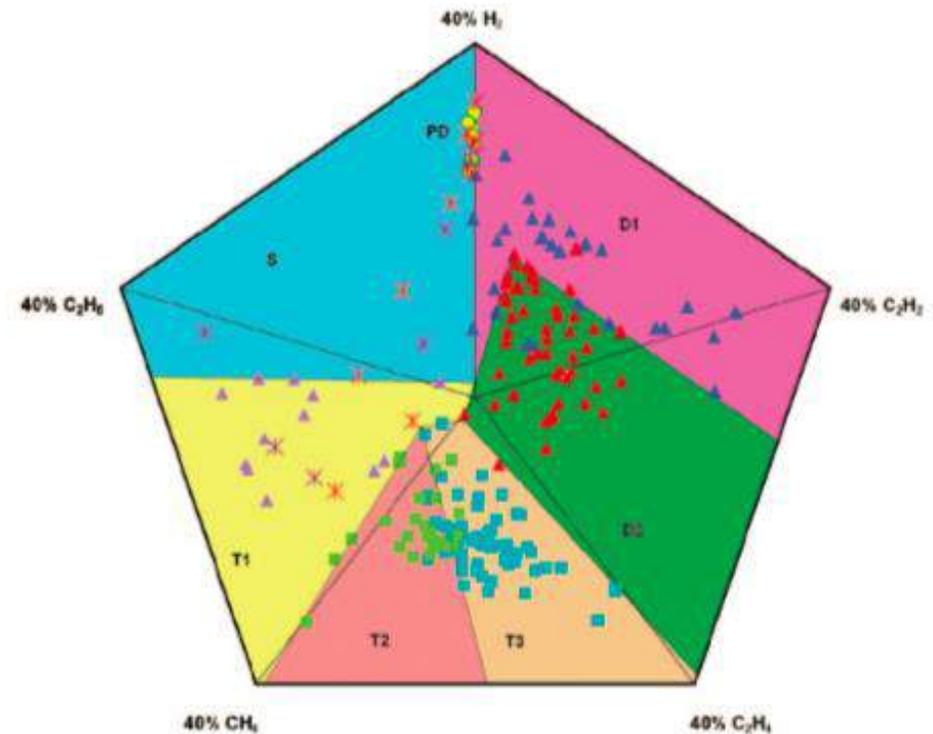
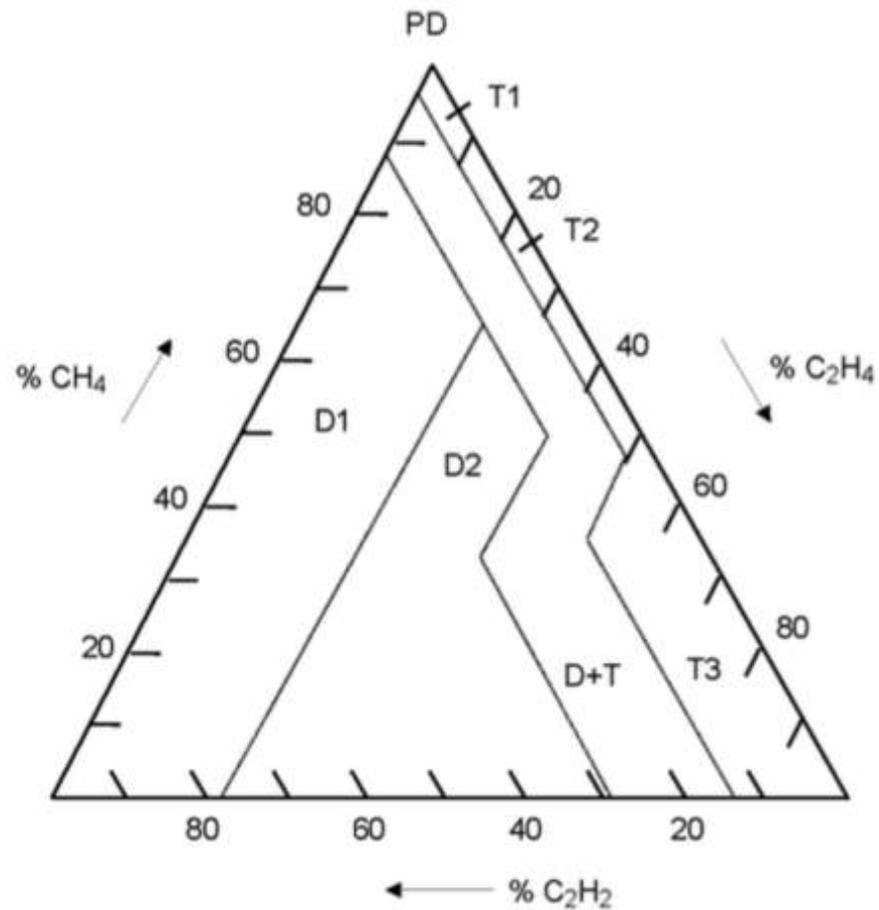
Gases disueltos – norma IEC



Gases disueltos – norma IEC



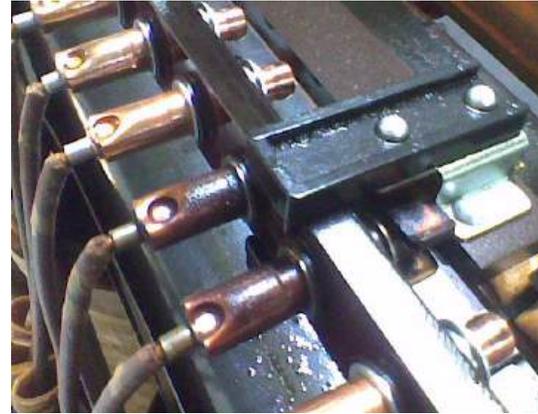
Gases disueltos - Duval



Gases disueltos – norma IEEE

O_2/N_2	$O_2/N_2 \leq 0,2$				$O_2/N_2 > 0,2$			
Gas/ edad	Edad (años)				Edad (años)			
	desc.	1-10	10-30	>30	desc.	1-10	10-30	>30
H_2	80	75		100	40	40		
CH_4	90	45	90	110	20	20		
C_2H_6	90	30	90	150	15	15		
C_2H_4	50	20	50	90	50	25	60	
C_2H_2	1	1			2	2		
CO	900	900			500	500		
CO_2	9000	5000	10000		5000	3500	5500	

Gases disueltos – norma IEEE



Interruptores

- Resistencia de contactos
- Tiempos de operación
 - Open
 - Close
 - Close-Open
- Concordancia de polos



Seccionadores

- Resistencias de contactos
- En el caso de ser motorizados consumos de los motores
- Alineación mecánica
- Termografías



Transformadores de instrumentación

- Tangente delta
- Relación de transformación



Celdas de media tensión

- Pruebas funcionales
- Resistencias de aislación
- Lubricación de mecanismos
- Tensión aplicada
- Resistencias de contactos
- Descargas parciales

Celdas de media tensión



27/02/2025

j.daher@ieee.org

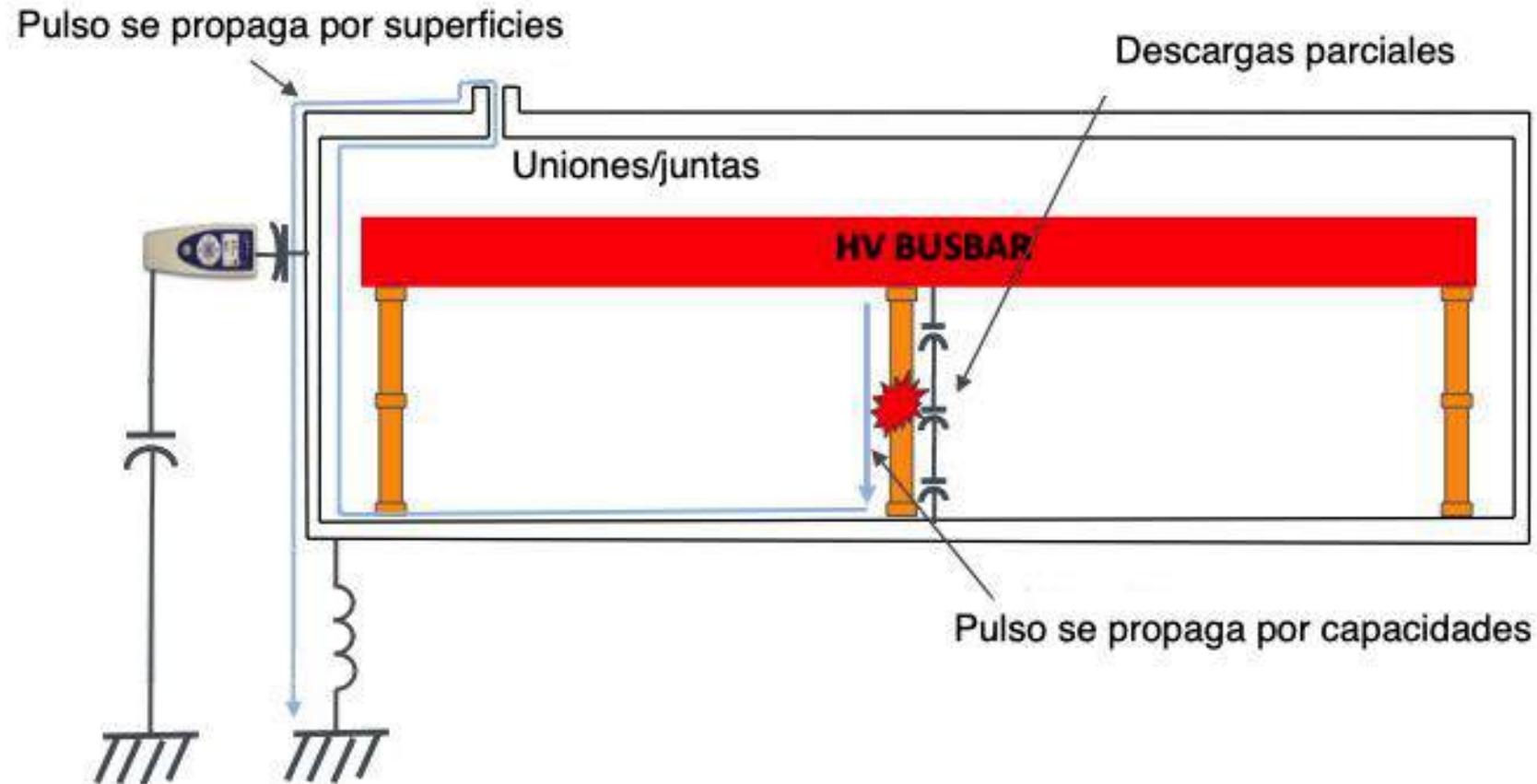
IMS 75th
Anniversary



PES&IMS
35 años



Celdas de media tensión

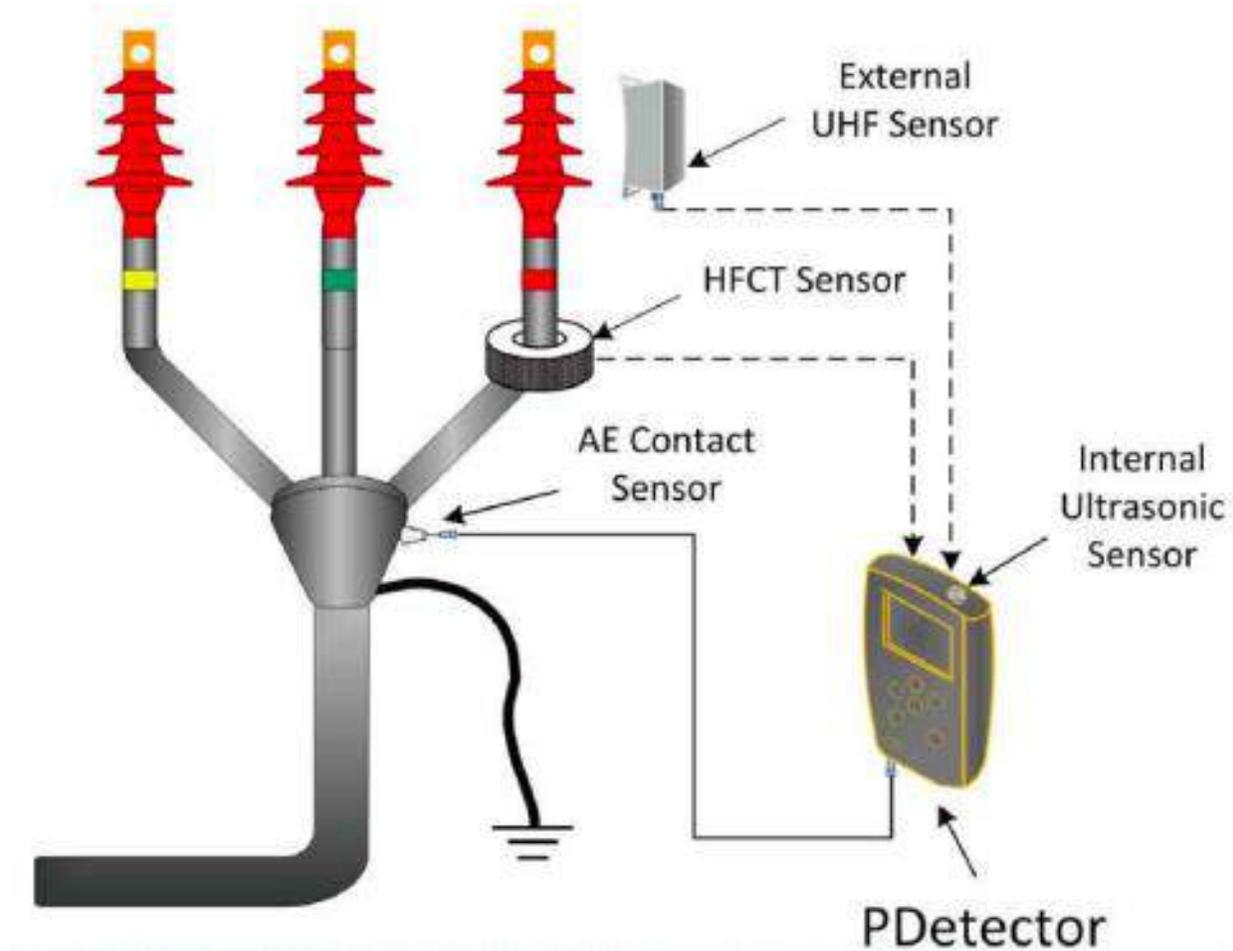


Cable de media tensión

- Very Low Frequency (VLF)
 - Aplicada
 - Medida de tg delta y descargas parciales
- Alta tensión en continua (casi en desuso)
- Normas
 - IEC 60502
 - IEEE serie 400



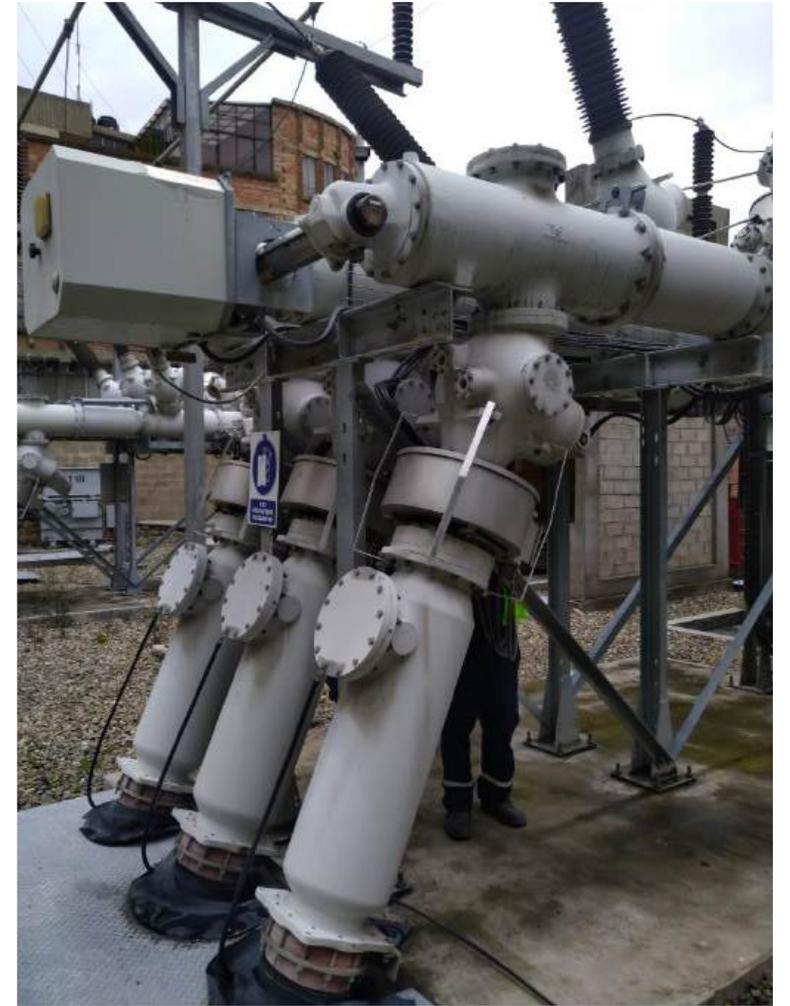
Cable de media tensión



Cable de media tensión

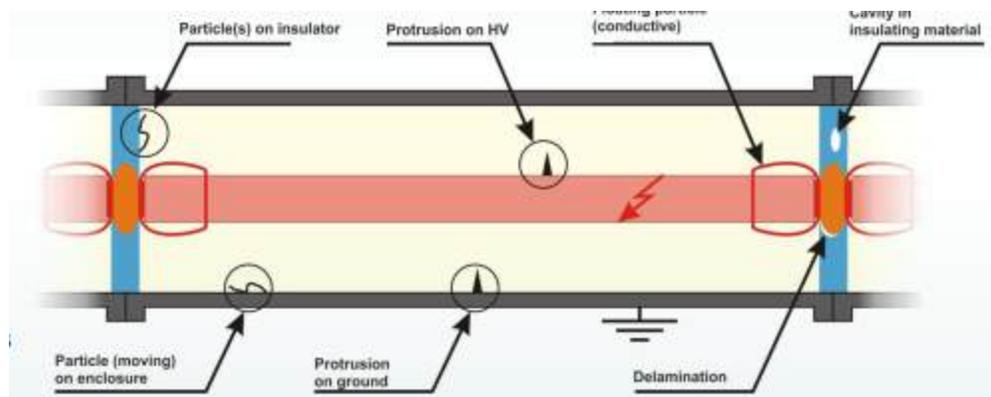


Cable de media tensión

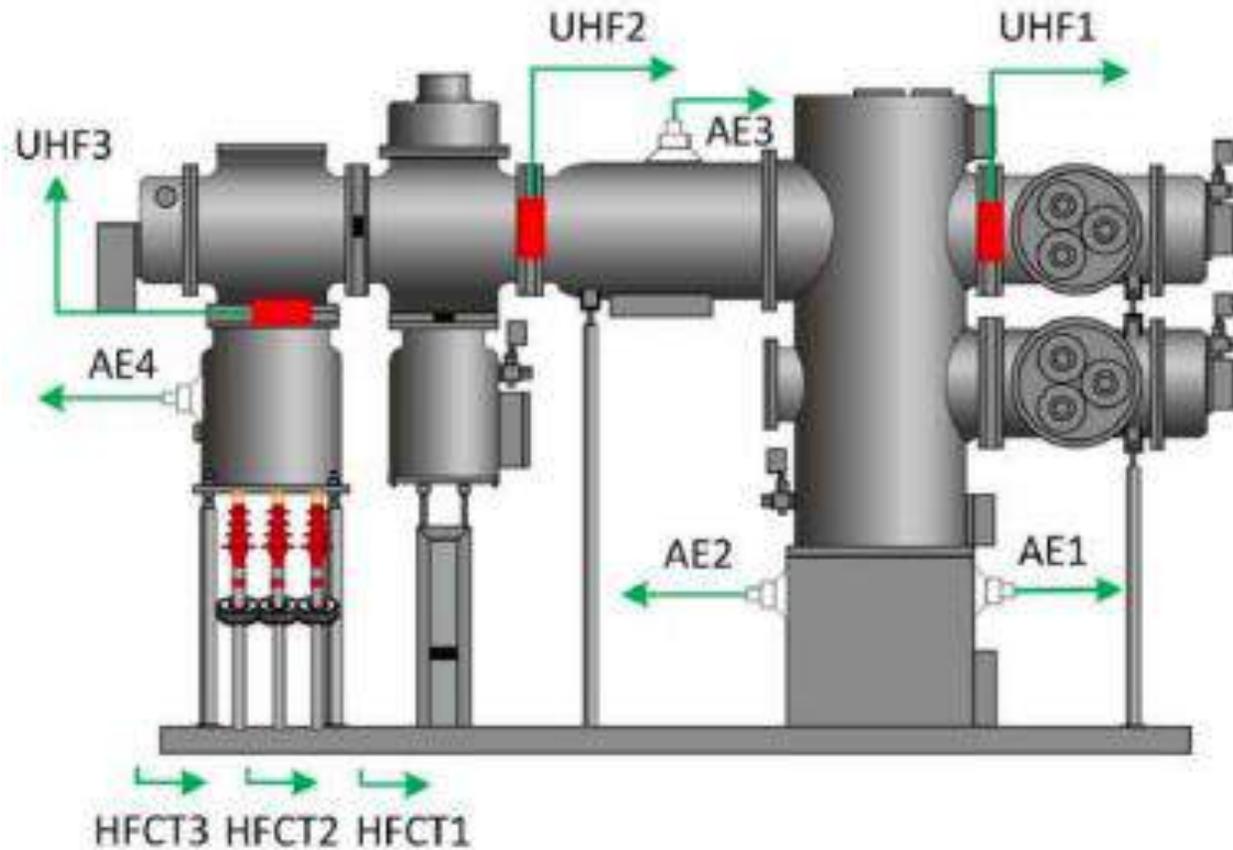


Gas insulated switchgear (GIS)

- Dependiendo de la configuración:
 - Relaciones en transformadores de instrumentación
 - Tensión aplicada
 - Ensayos de aislación
 - Descargas parciales



Gas insulated switchgear (GIS)

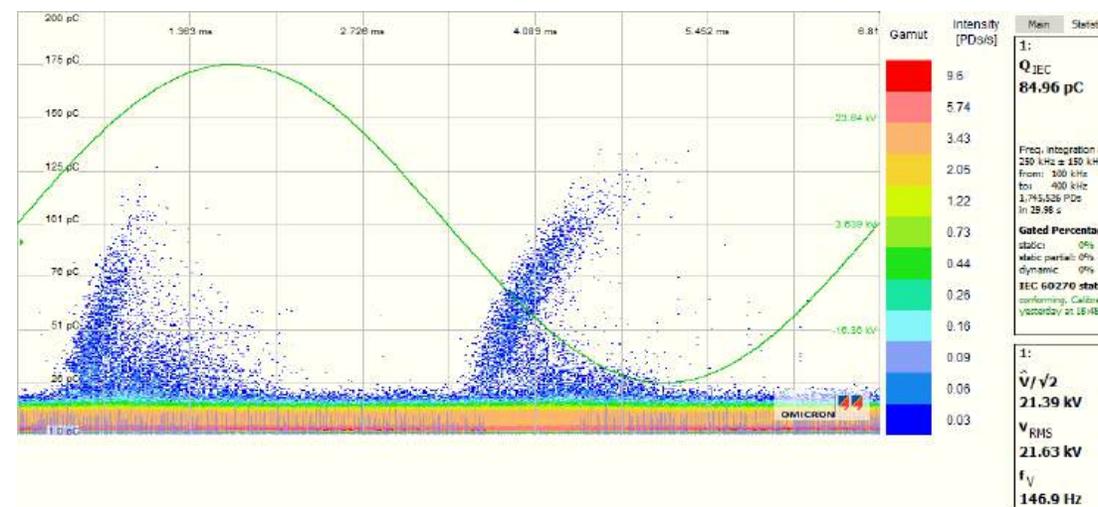
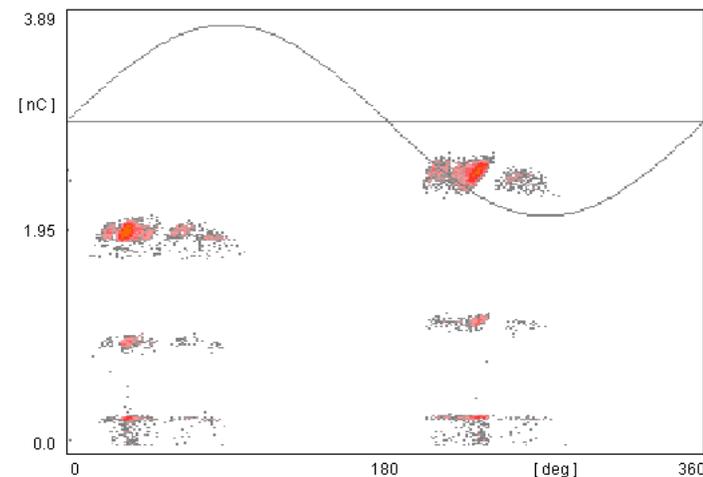
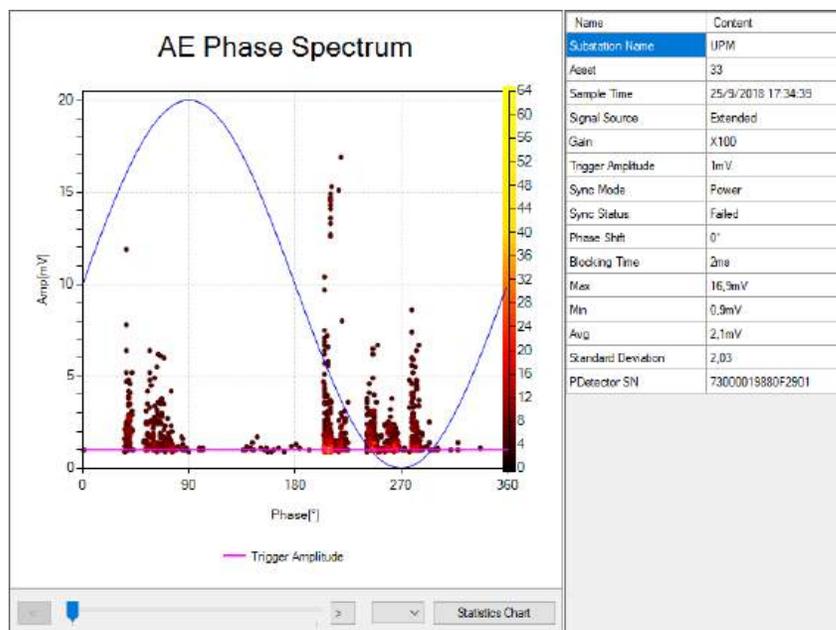


Gas insulated switchgear (GIS)

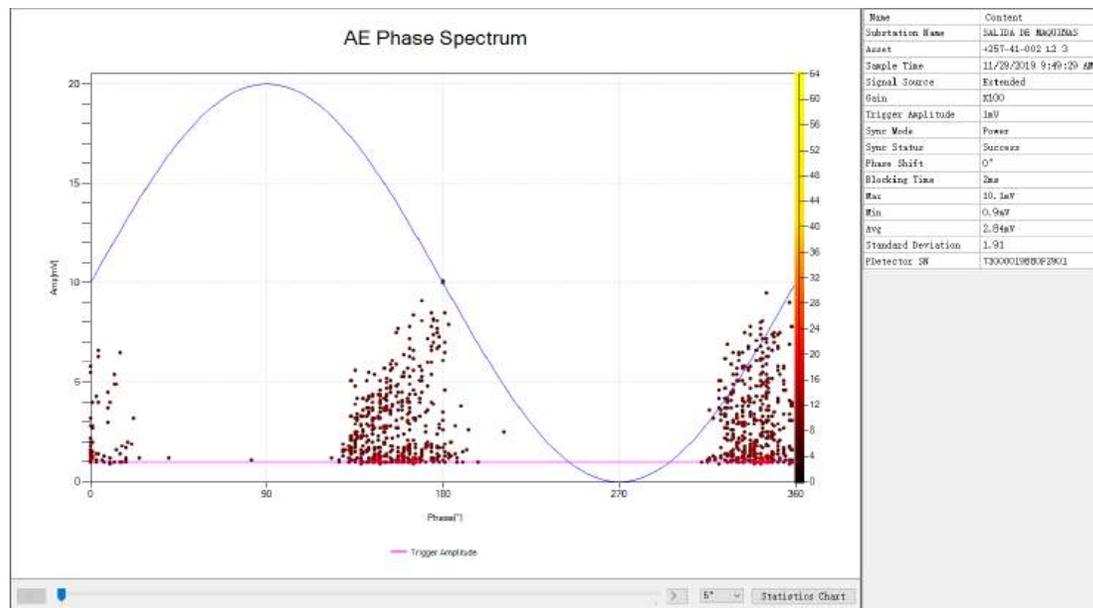


Ensayos especiales

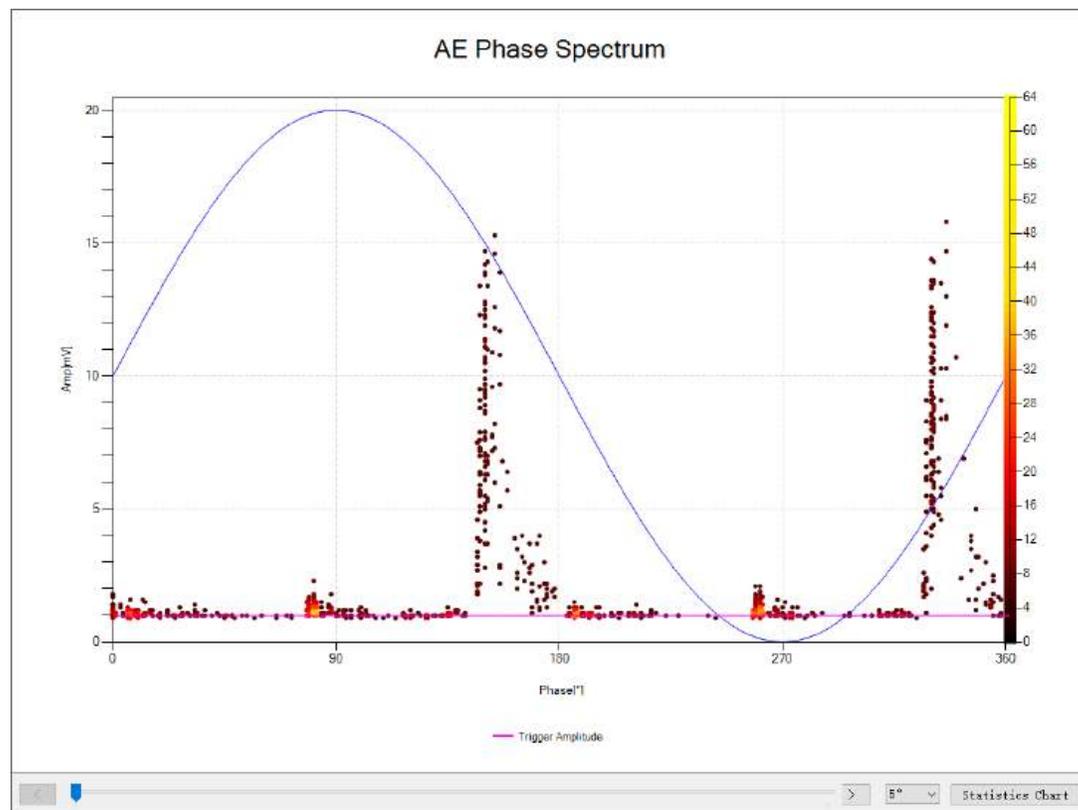
- Descargas parciales



Descargas parciales



Descargas parciales

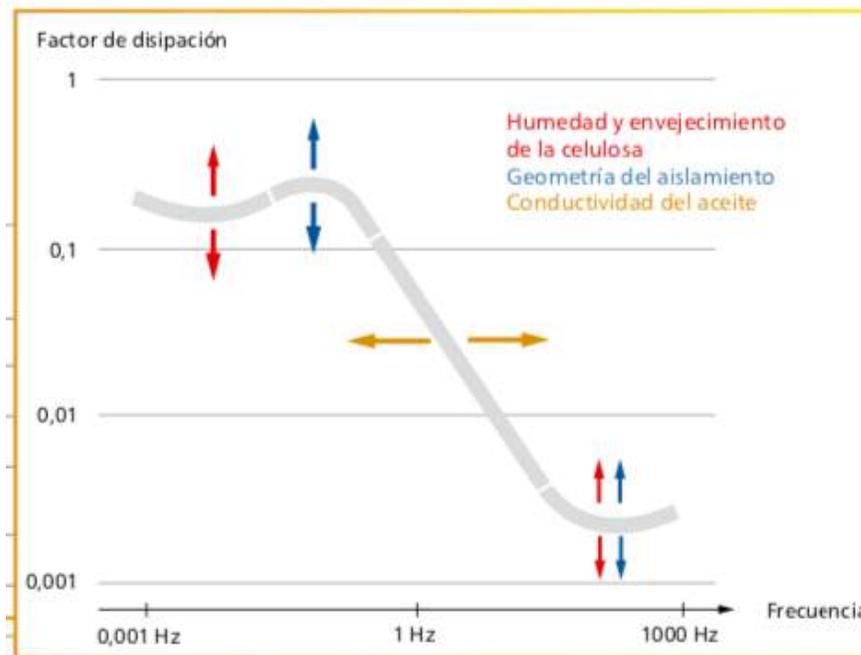


Descargas parciales

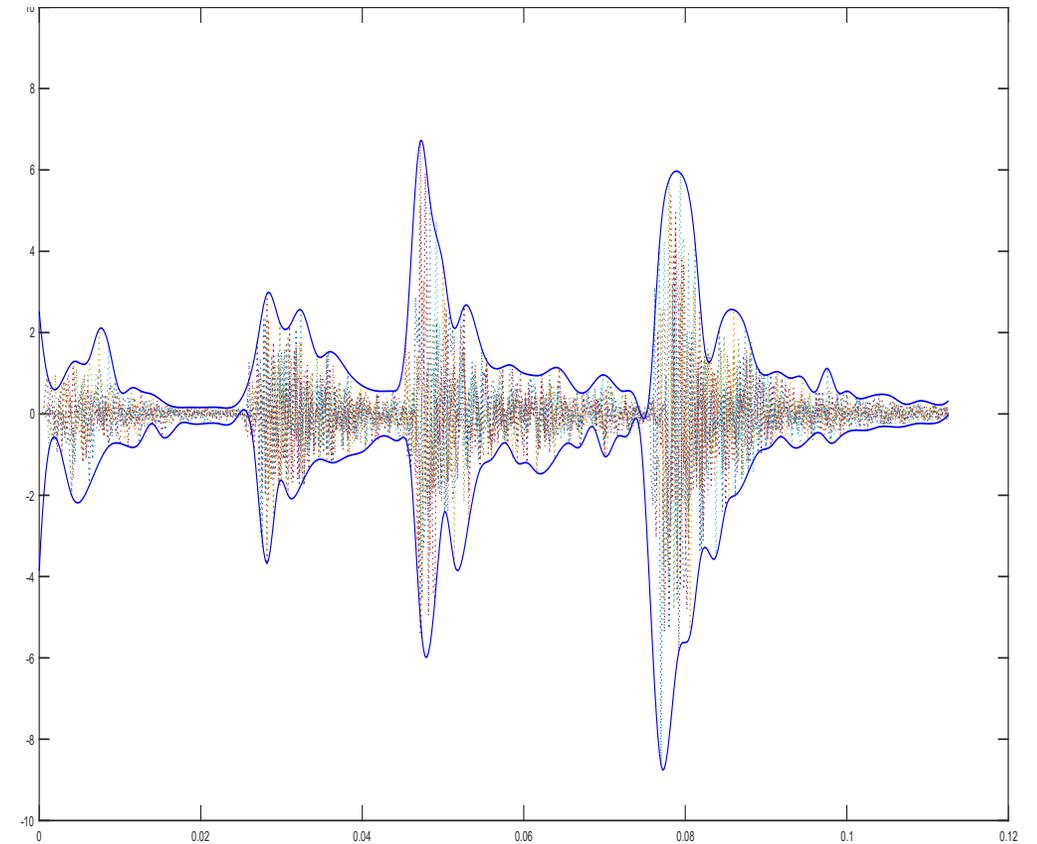
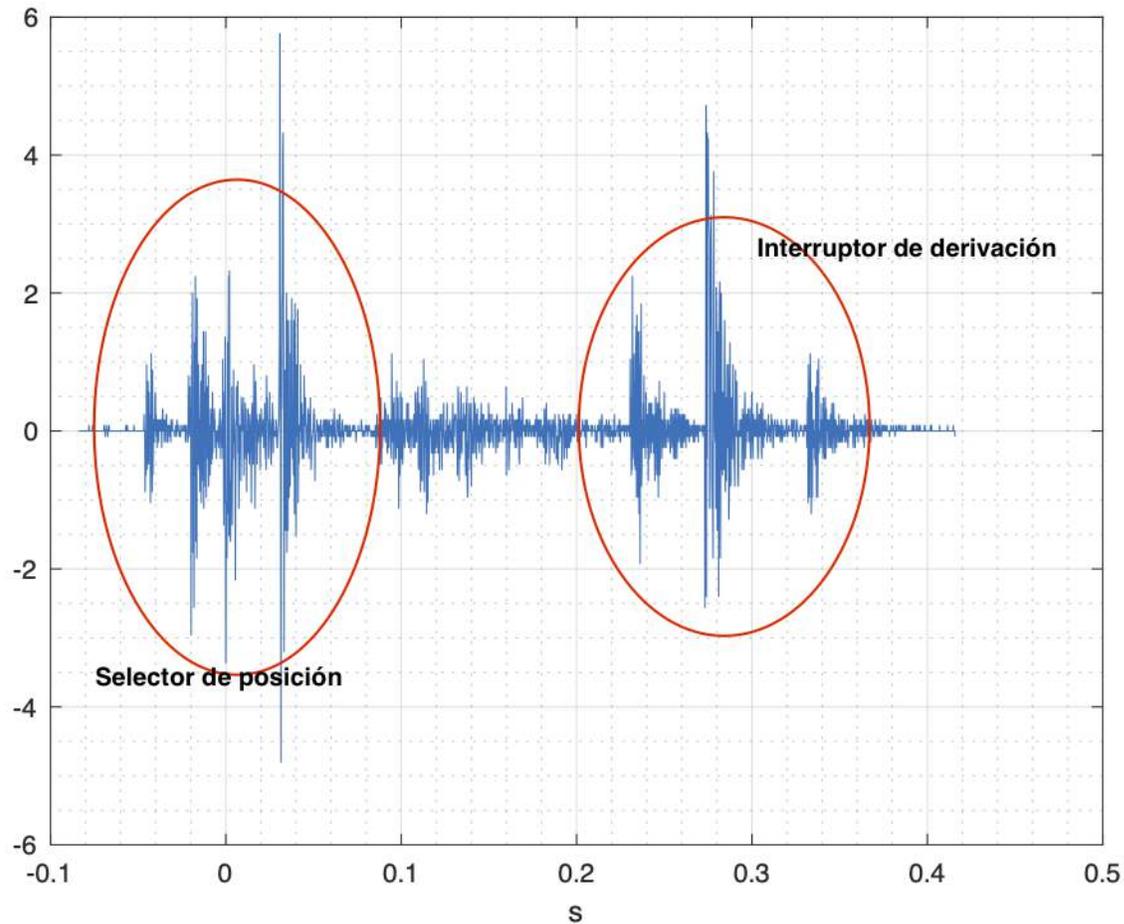


Transformadores – ensayos eléctricos

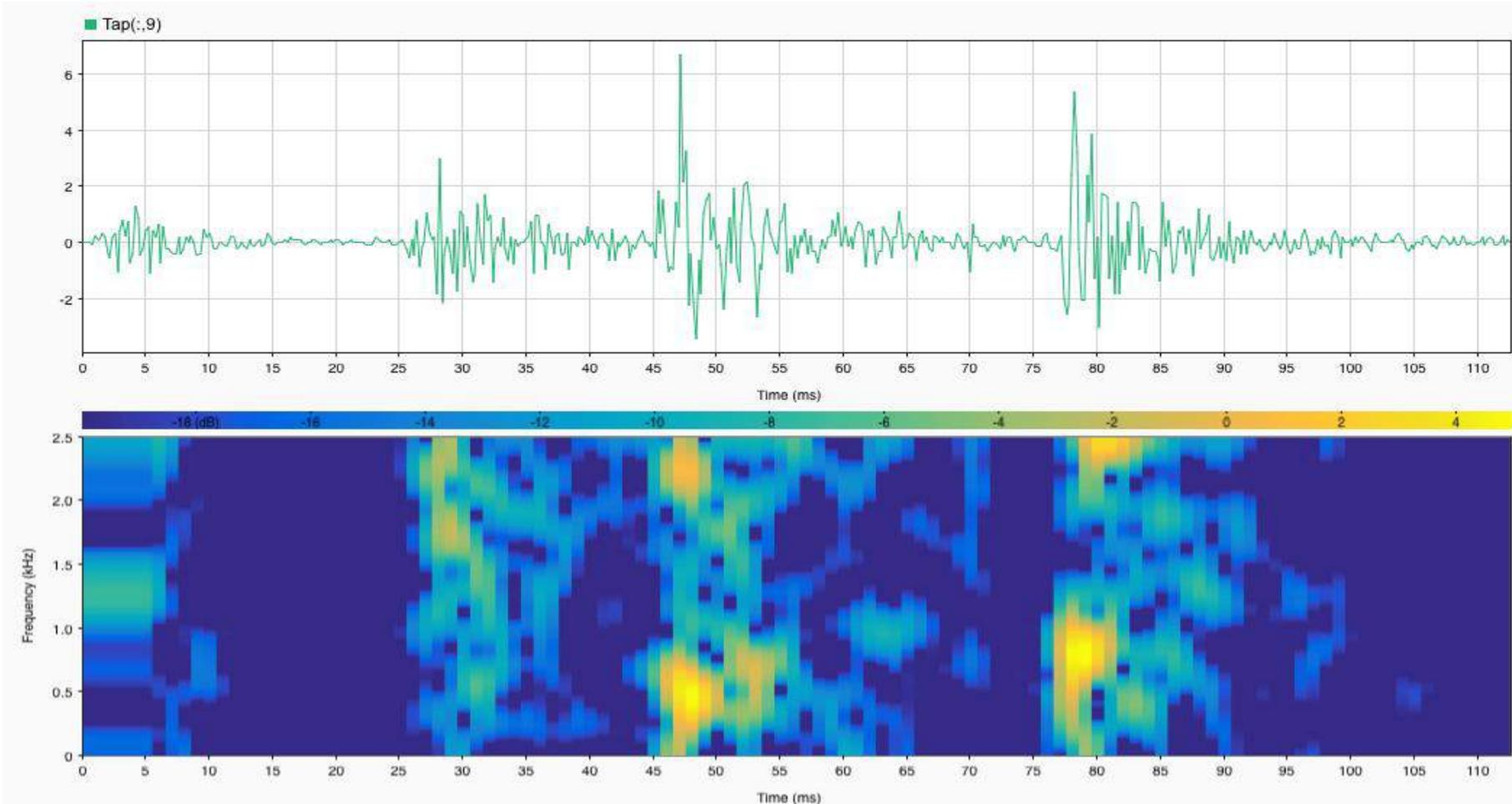
- Respuesta de frecuencia dieléctrica



OLTC - vibraciones



OLTC - vibraciones



Ultimas tendencias – monitoreo de subestaciones



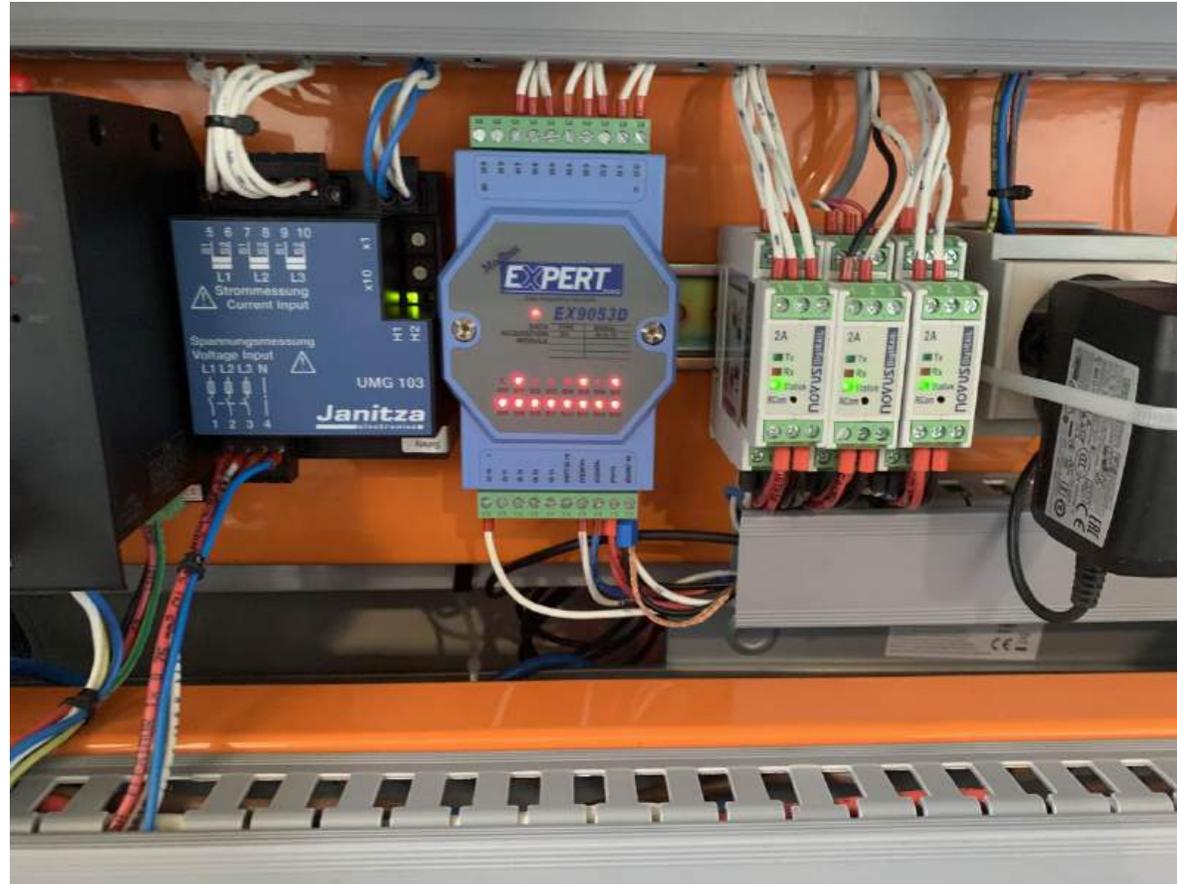
Ultimas tendencias – monitoreo de subestaciones



Ultimas tendencias – monitoreo de subestaciones



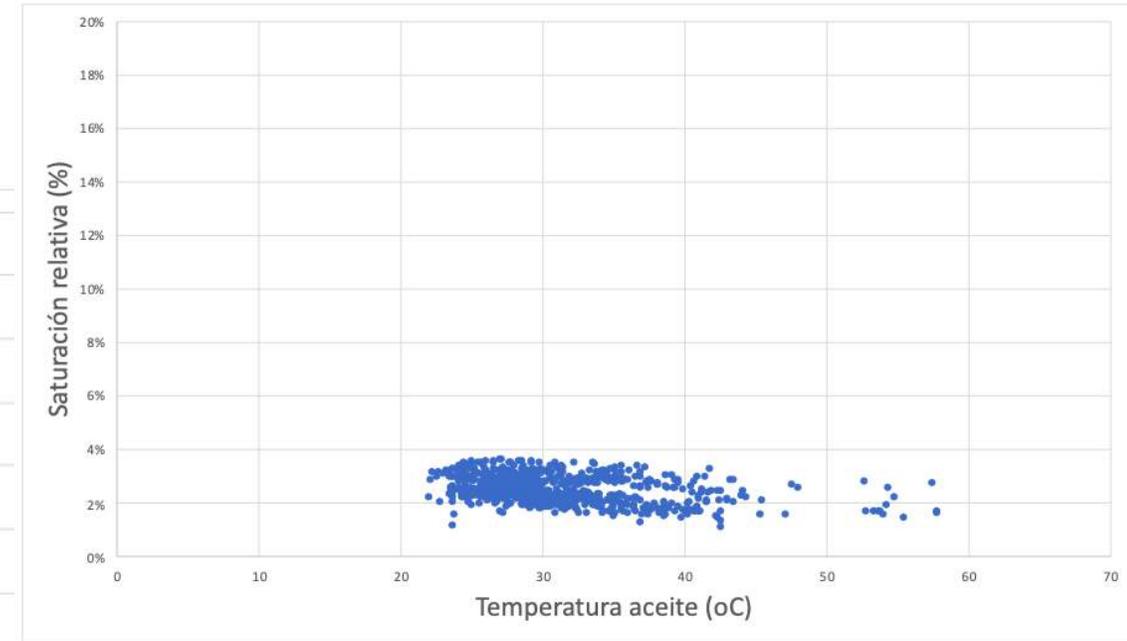
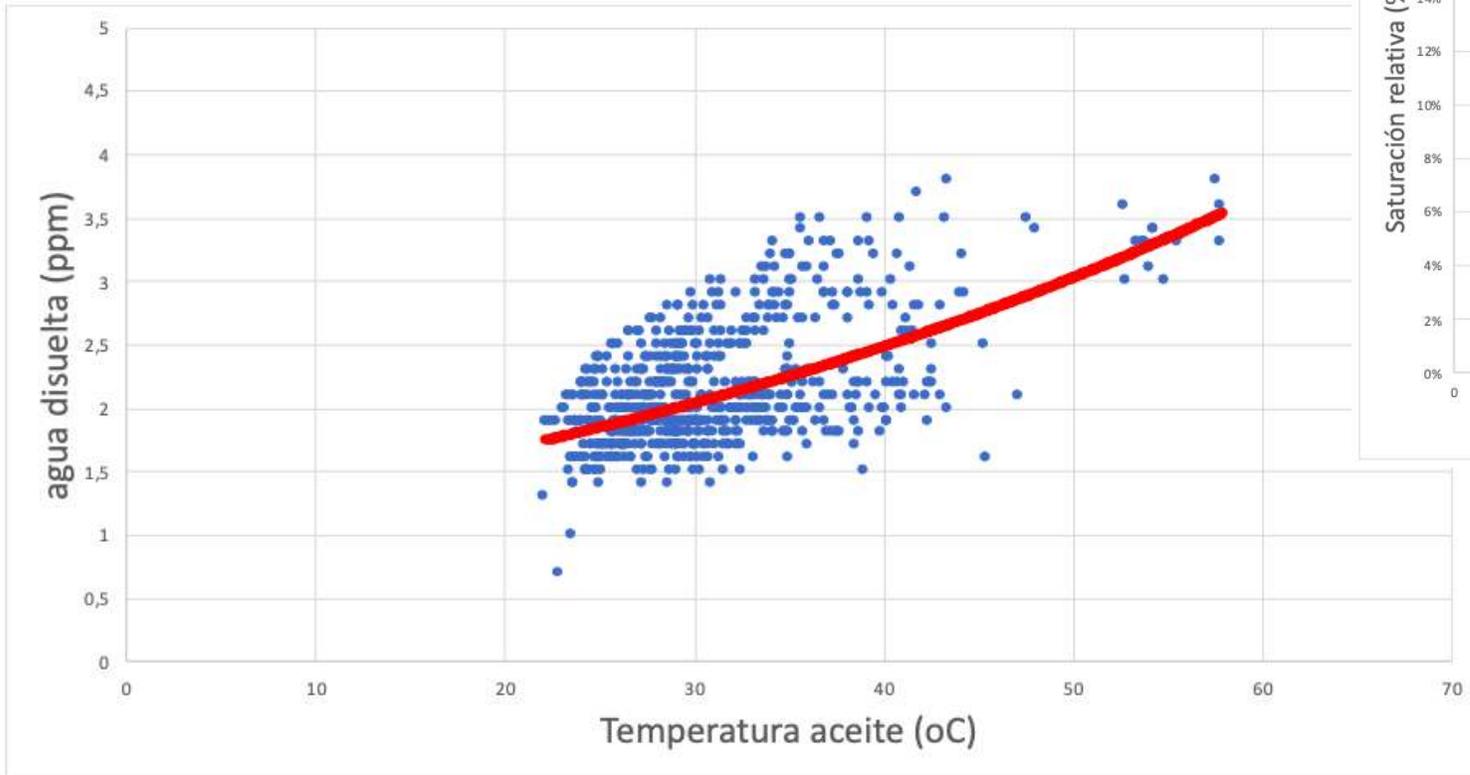
Ultimas tendencias – monitoreo de subestaciones



Ultimas tendencias – monitoreo de subestaciones



Monitoreo de subestaciones – análisis de resultados



Preguntas?

Muchas gracias!

27/02/2025

j.daher@ieee.org

IMS 75th
Anniversary

75
YEARS

IEEE
INSTRUMENTATION
& MEASUREMENT
SOCIETY

PES&IMS
35 años

