



***Transformadores y reactores para  
sistemas eléctricos  
Su relación con los ensayos y las  
mediciones***

***Álvaro Portillo***

***27 de febrero de 2025***

## **Introducción**

*Los transformadores y reactores son componentes esenciales de los sistemas eléctricos de potencia y luego de fabricados son sometidos a rigurosas pruebas normalizadas de recepción en fábrica (**FAT = Factory Acceptance Tests**).*

*Estos ensayos implican mediciones complejas de magnitudes de todo tipo cuya exactitud y precisión (repetitividad) es fundamental para su interpretación y aprobación.*

*Muchas de esas pruebas tienen el carácter de huella digital y son luego utilizadas como referencia en las pruebas de recepción en campo antes de la energización (**SAT = Site Acceptance Tests**) y en las pruebas de mantenimiento durante la vida del equipo.*

*También son comunes los ensayos de desarrollo, por ejemplo, para determinar la soportabilidad dieléctrica de estructuras aislantes o para la validación de modelos matemáticos eléctricos, térmicos y mecánicos aplicados en la etapa de diseño.*

*En esta presentación empezaremos por algunos conceptos generales y luego mostraremos varios ejemplos de estas mediciones y los desafíos que las mismas presentan.*

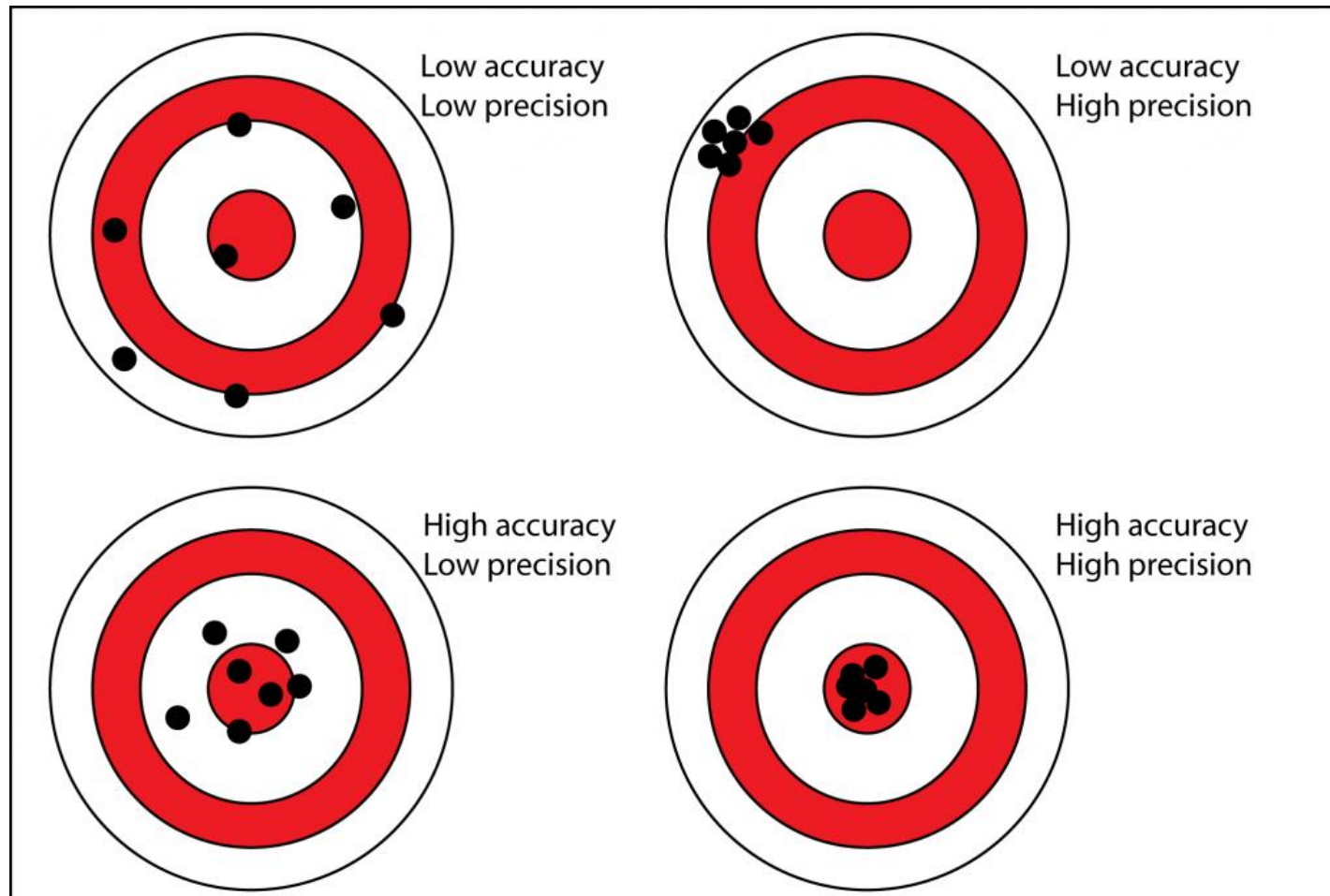
## Magnitudes a medir en ensayos de transformadores y reactores

- Voltaje (V)
- Corriente (A)
- Potencia (W)
- Frecuencia (Hz)
- Resistencia ( $\Omega$ )
- Capacitancia (F)
- Inductancia (H)
- Impedancia ( $\Omega$ )
- PD – Carga eléctrica (pC)
- Error de relación (%)
- Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ , K)
- Nivel de ruido (dB(A))
- Masa (kg)
- Longitud (m)
- Deformación (mm)
- Vibraciones ( $\mu\text{m}$ )
- FRA – Diagramas de Bode
- FDS – Tangente  $\delta$  vs frecuencia

- Viscosidad ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )
- Densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- Factor de potencia ( $\tan \delta$ )
- Rigidez dieléctrica (kV)
- Color
- Acidez (mgKOH/g)
- Tensión interfacial (mN/m)
- Contenido de agua (ppm = mg/kg)
- Contenido de inhibidor (wt%)
- Contenido total de azufre (wt%)
- Contenido de DBDS (mg/kg)
- Contenido de PCB (mg/kg)
- Contenido de PCA (wt%)
- Contenido de gases disueltos en el aceite - DGA (ppm =  $\mu\text{l}/\text{l}$ )
- Contenido de furanos disueltos en el aceite (ppm = mg/kg o ppb)
- Punto de fluidez ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Punto de inflamabilidad ( $^{\circ}\text{C}$ )

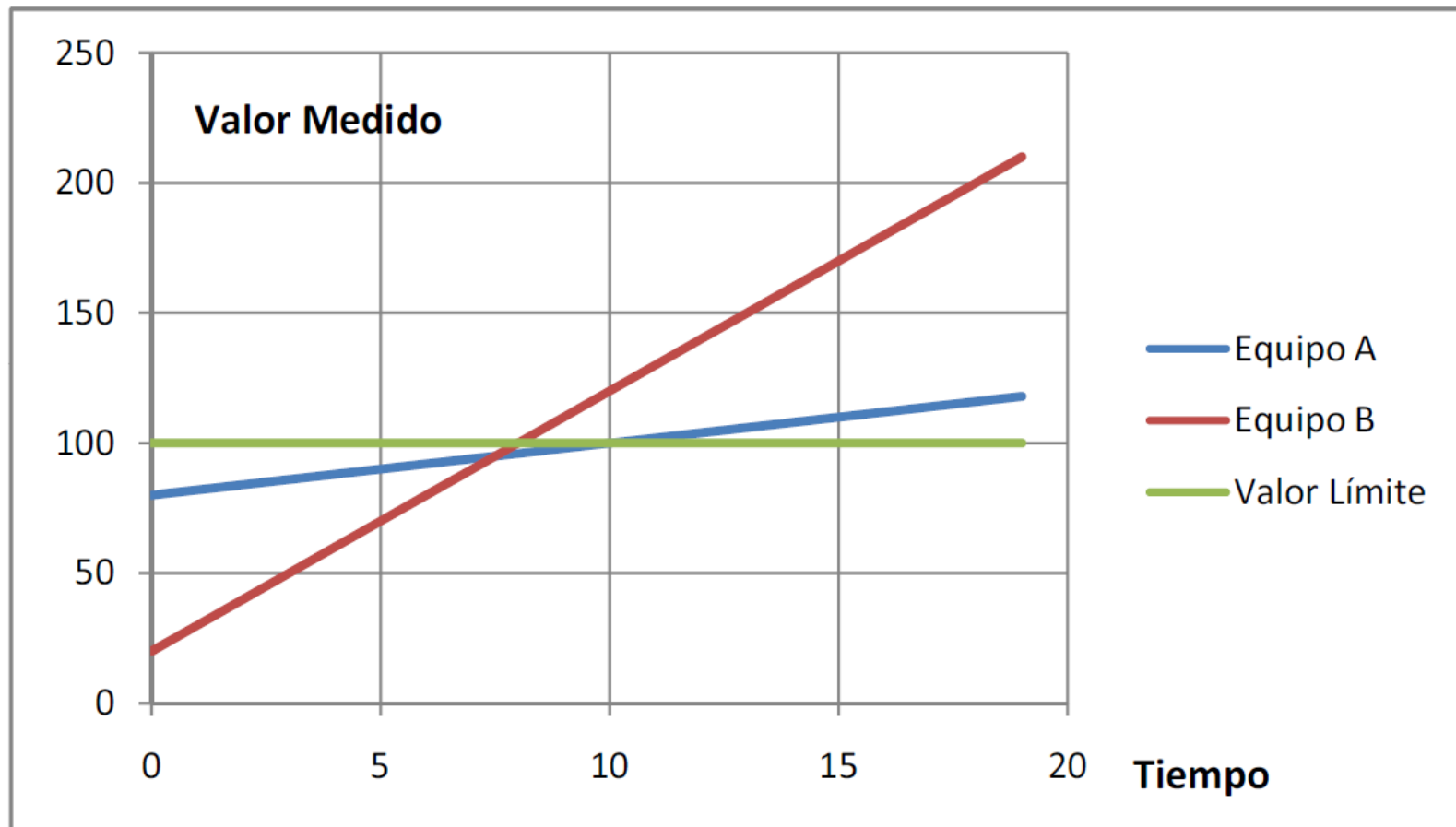
## Exactitud y precisión de una medida

*La exactitud y precisión (repetitividad) de los resultados de las medidas en las pruebas FAT, SAT y de mantenimiento es de fundamental importancia para la toma de decisiones correctas en relación con el estado del equipo.*



## Valores y tendencias

*En ciertos ensayos, como el de soportabilidad al cortocircuito según IEC 60076-5, y en los de mantenimiento no sólo interesan los valores medidos, sino que muchas veces son más importantes las tendencias:*



## **Normas y Guías sobre laboratorios de ensayos y medidas**

*Poco conocidas y poco utilizadas en la industria de los transformadores y reactores.*

- **ISO/IEC 17025:2017**

*General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*

*“Contiene todos los requisitos que los laboratorios de ensayo y calibración tienen que cumplir si desean demostrar que disponen de un sistema de gestión de la calidad, que son técnicamente competentes y que son capaces de producir resultados técnicamente válidos.”*

*“Esta norma internacional es aplicable a todas las organizaciones que realizan ensayos y/o calibraciones, incluyendo muestreo. Entre ellas, por ejemplo, laboratorios de primera, segunda o tercera parte y laboratorios cuyos ensayos o calibraciones formen parte de la inspección y certificación de productos.”*

- **ISO/IEC Guide 98-3:2008**

*Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

- **IEC GUIDE 115:2023**

*Application of measurement uncertainty to conformity assessment activities in the electrotechnical sector*

# **Normas y Guías aplicables a transformadores y reactores**

## **ISO – IEC – ANSI – IEEE – ASTM – NEMA – NETA – NFPA – UL – CEN – CENELEC**

*Aún con instrumentos ideales se pueden realizar medidas erróneas.*

*Por ejemplo:*

- *si no estimamos correctamente la temperatura del conductor en la medida de resistencia óhmica*
- *si no estimamos correctamente la temperatura de los aislamientos en la medida de resistencia aislación o tangente  $\delta$*
- *si no desmagnetizamos el núcleo antes de medir FRA o corriente de excitación*
- *si no cuidamos la disposición de los cables de conexión en el FRA*

*Si bien para medir con exactitud y precisión es fundamental contar con buenos instrumentos, también son necesarios buenos procedimientos y ahí es donde aparecen las normas.*

*Las normas nos dan los procedimientos que debemos aplicar en la realización de los ensayos para obtener resultados repetibles con otros instrumentos y otros operarios (Ejemplo: MAK, PAUWELS, KEMA 1991).*

## **Pruebas o ensayos (Tests)**

*Para realizar correctamente una prueba o ensayo no solo debemos saber cómo realizar las mediciones, es fundamental saber también cuál es el objetivo del ensayo y como se interpretan sus resultados.*

*Las personas encargadas de realizar las pruebas FAT, SAT y de mantenimiento deben estudiar y analizar cada uno de los ensayos que realizan de modo de poder responder las siguientes preguntas:*

***¿ Para qué se realiza ?***

***¿ Cómo se realiza y de acuerdo con qué norma ?***

***¿ Cómo interpretamos los resultados ?***

*Es muy importante que representantes del comprador asistan a los ensayos de recepción en fábrica (FAT).*

*Lo mismo aplica para las pruebas SAT, aunque las realice el fabricante o una empresa contratada por éste.*

*Se requiere personal especializado con experiencia en este tipo de actividades.*

*Además, es fundamental tener proveedores en los cuales podamos confiar.*






## ¿Podemos confiar en las pruebas FAT?

<https://www.asahi.com/ajw/articles/14604802>

### Mitsubishi Electric admits to faking test data on transformers

By KOICHI MURAKAMI/ Staff Writer

April 22, 2022 at 17:19 JST

 Share
  Tweet
  Print

[list](#)



One of the Mitsubishi Electric Corp. transformers in question after it emerged on April 21 that testing of the units had been falsified for decades. (Provided by Mitsubishi Electric Corp.)

## **¿Podemos confiar en las pruebas FAT?**

**<https://www.asahi.com/ajw/articles/14604802>**

*“The large-size transformers in question were manufactured at the company's factory in Ako, Hyogo Prefecture.*

*Between 1982 and March 2022, Mitsubishi Electric shipped 8.363 transformers from the factory. About 40% of those (3.384) were fraudulently tested or improperly designed.*

*1.589 of the 3.384 problem transformers were shipped within Japan, while 1.795 were sent overseas.*

*In some cases, the company's employees falsified figures in quality-testing reports, which said the unit's internal temperature remained within limits during heat tests. The temperature actually rose above the limits during these tests, according to the company on April 21.*

*The safety tests were conducted by the factory to see how much voltage the units could withstand, but did not meet acceptable test conditions set by international standards or by academia.*

*The voltage levels of some transformer insulators were lower than what the company had determined based on international standards.”*

## ***¿Podemos confiar en las pruebas FAT?***

***Sí, si confiamos en el fabricante.***

*Por eso es tan importante “cuidar” a los buenos fabricantes y no favorecer la competencia desleal entre fabricantes para obtener beneficios económicos.*

## ***¿Podemos evitar los fraudes o engaños en las FAT?***

***No, se pueden aumentar las exigencias como vamos a ver en los ensayos dieléctricos, pero es casi imposible evitar los fraudes.***

## ***¿Qué consecuencias pueden tener estos fraudes sobre la confiabilidad del equipo?***

***Difícil de evaluar.***

*En general pueden disminuir los márgenes de seguridad, pero no ser causa de una falla a corto plazo del equipo.*

*Los que hacen estos fraudes son bandidos, pero no tontos.*

## ***¿La calibración evita los fraudes?***

***No, obviamente cuando calibran miden bien.***

## Medidas que dependen de la temperatura

Resistencia óhmica	Resistencia de aislamiento	Tangente $\delta$																												
<p>Depende de la temperatura del conductor.</p> <p>IEC 60076-1:2011 Anexo E</p> $R_2 = R_1 \frac{\theta_2 + \theta_k}{\theta_1 + \theta_k}$ <p>Cobre: <math>\theta_k = 235^\circ\text{C}</math>            Aluminio: <math>\theta_k = 235^\circ\text{C}</math></p> <p>Mal: <math>R = 10 \Omega</math>            Bien: <math>R = 10 \Omega @ 22.3^\circ\text{C}</math></p> <p>Además, se debe considerar el efecto del <math>Ldi/dt</math>.</p>	<p>Depende de la temperatura del aislamiento.</p> $R_2 = R_1 2^{\frac{\theta_1 - \theta_2}{10}}$ <p>Se duplica cada <math>10^\circ\text{C}</math> de reducción en la temperatura.</p>	<p>Depende de la temperatura del aislamiento.</p> <p>IEEE C57.12.90-1999</p> $\tan \delta (20^\circ\text{C}) = \frac{\tan \delta (T)}{K}$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>Test temperature <math>T</math> [°C]</th> <th>Correction factor <math>K</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>10</td><td>0,80</td></tr> <tr><td>15</td><td>0,90</td></tr> <tr><td>20</td><td>1,00</td></tr> <tr><td>25</td><td>1,12</td></tr> <tr><td>30</td><td>1,25</td></tr> <tr><td>35</td><td>1,40</td></tr> <tr><td>40</td><td>1,55</td></tr> <tr><td>45</td><td>1,75</td></tr> <tr><td>50</td><td>1,95</td></tr> <tr><td>55</td><td>2,18</td></tr> <tr><td>60</td><td>2,42</td></tr> <tr><td>65</td><td>2,70</td></tr> <tr><td>70</td><td>3,00</td></tr> </tbody> </table>	Test temperature $T$ [°C]	Correction factor $K$	10	0,80	15	0,90	20	1,00	25	1,12	30	1,25	35	1,40	40	1,55	45	1,75	50	1,95	55	2,18	60	2,42	65	2,70	70	3,00
Test temperature $T$ [°C]	Correction factor $K$																													
10	0,80																													
15	0,90																													
20	1,00																													
25	1,12																													
30	1,25																													
35	1,40																													
40	1,55																													
45	1,75																													
50	1,95																													
55	2,18																													
60	2,42																													
65	2,70																													
70	3,00																													

## ***Incertidumbre en la medida de las pérdidas de vacío y cortocircuito***

- ***IEC 60076-8:1997***

*Power transformers – Part 8: Application guide*

*Treatment of measurement results is defined as follows in Clause 10.1 of IEC 60076-8:1997:*

*"The submitted test result shall contain the most correct estimate that is possible, based on the measurements that have been carried out. This value shall be accepted as it stands. The uncertainty margin shall not be involved in the judgement of compliance for guarantees with no positive tolerance or tolerance ranges for performance data of the test object."*

- ***IEC/TS 60076-19:2013***

*Power transformers – Part 19: Rules for the determination of uncertainties in the measurement of the losses on power transformers and reactors*

- ***IEC 60076-19-1:2023***

*Power transformers – Part 19-1: Rules for the determination of uncertainties in the measurement of the losses of power transformers*

## ***Incertidumbre en la medida de las pérdidas de vacío y cortocircuito IEC 60076-19-1:2023***

*“The losses of power transformers (no-load and load losses) are the object of guarantee and penalty in many contracts and play an important role in the evaluation of the total (service) costs and therefore in the investments involved. Furthermore, regional regulations, such as the Ecodesign Directive of the European Union (Directive 2009/125/EC), can also pose requirements on the establishment of reliable values for losses.”*

*“According to ISO/IEC 17025 and ISO/IEC Guide 98-3, the result of any measurement should be qualified with the evaluation of its uncertainty. A further requirement of those documents is that known corrections shall have been applied before evaluation of uncertainty. These provisions have been applied in this document.”*

*“The uncertainty range depends on the quality of the test installation and measuring system, on the skill of the staff and on the intrinsic measurement difficulties presented by the tested objects.”*

## ***Incertidumbre en la medida de las pérdidas de vacío y cortocircuito***

*“The procedures developed in this document for evaluation of measurement uncertainty are provided as a tool to assess the soundness of results of loss measurements. Uncertainty is understood as a “parameter, associated with the result of a measurement, that characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand” [SOURCE: IEV 311-01-02].”*

*“In cases where the losses are required to conform to stated tolerance limits, it is recommended that measurement systems are of such quality that their estimated uncertainty is less than the tolerance limit. (As an example, a measurement with a 5 % uncertainty on a test where the tolerance limit is 5 % is acceptable if the measured value lies within the tolerance limit.) This situation can occur for example in market surveillance activities. It can be noted that an uncertainty 3 % is regarded as state-of-the-art for uncertainty of loss.”*

*En el caso de Uruguay, en las licitaciones, se utiliza mucho la cuantificación de las pérdidas. Si los valores de pérdidas medidos en las FAT son 10% mayores que los garantizados en la oferta, como admiten las normas IEC, podría cambiar el resultado de la evaluación las ofertas y el ganador haber sido otro.*

# Incertidumbre en la medida de las pérdidas de vacío y cortocircuito

## Model function for load loss measurement at rated current

$$P_2 = k_{CN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_{CT}}{100}} \cdot k_{VN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_{VT}}{100}} \cdot P_W \frac{\cos \varphi}{\cos(\varphi + (\Delta_{\varphi V} - \Delta_{\varphi C}))} \cdot \left[ \frac{I_N}{k_{CN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_{CT}}{100}} I_{RMS}} \right]^2$$

Quantity	Component	Standard uncertainty	Sensitivity coefficient	Contribution to standard uncertainty	See subclause
CT ratio error	$\varepsilon_{CT}$	$u_{CT}$	1	$u_{CT}$	10.1.2
VT ratio error	$\varepsilon_{VT}$	$u_{VT}$	1	$u_{VT}$	10.1.2
Power meter	$P_W$	$u_{PW}$	1	$u_{PW}$	10.3
Phase displacement	$\frac{\cos(\varphi)}{\cos(\varphi + (\Delta_{\varphi V} - \Delta_{\varphi C}))}$	$u_{FD}$	1	$u_{FD}$	10.1.3
Ampere meter	$I_{RMS}$	$u_{IRMS}$	2	$2u_{IRMS}$	10.2

Combined standard relative uncertainty calculated as:  $u_{P2} = \sqrt{u_{CT}^2 + u_{VT}^2 + u_{PW}^2 + u_{FD}^2 + 4u_{IRMS}^2}$

The expanded relative uncertainty is  $U_{P2} = 2u_{P2}$  which corresponds to a coverage probability of approximately 95 %.

**NOTE** Sensitivity coefficient of 2 for the uncertainty due to the ampere meter derives from the fact that the current appears with an exponent 2 in the model function.



# Incertidumbre en la medida de las pérdidas de vacío y cortocircuito

Model function for load loss at rated current and reference temperature

$$P_{LL} = I_N^2 R_r + P_{ar} = I_N^2 R_2 \frac{t + \theta_r}{t + \theta_2} + P_{a2} \frac{t + \theta_2}{t + \theta_r} = I_N^2 R_2 \frac{t + \theta_r}{t + \theta_2} + (P_2 - I_N^2 R_2) \frac{t + \theta_2}{t + \theta_r}$$

Quantity	Component	Absolute standard uncertainty	Sensitivity coefficient	Contribution to absolute standard uncertainty
$I_N^2 R_r$ loss	$R_r$	$R_2 \cdot u_{R2}$	$I_N^2 \left( \frac{t + \theta_r}{t + \theta_2} - \frac{t + \theta_2}{t + \theta_r} \right)$	$I_N^2 R_2 \cdot \left( \frac{t + \theta_r}{t + \theta_2} - \frac{t + \theta_2}{t + \theta_r} \right) \cdot u_{R2}$
Measured loss	$P_2$	$u_{P2} \cdot P_2$	$\frac{t + \theta_2}{t + \theta_r}$	$\frac{t + \theta_2}{t + \theta_r} \cdot u_{P2} \cdot P_2$
Mean winding temperature	$\theta_r$	$\dot{u}_{\theta_2}$	$-I_N^2 R_2 \frac{t + \theta_r}{(t + \theta_2)^2} + \left( P_2 - I_N^2 R_2 \right) \frac{1}{t + \theta_r}$	$\left  -I_N^2 R_2 \frac{t + \theta_r}{(t + \theta_2)^2} + \left( P_2 - I_N^2 R_2 \right) \frac{1}{t + \theta_r} \right  \cdot \dot{u}_{\theta_2}$

The total standard absolute uncertainty is calculated as:

$$u_{LL} = \sqrt{\left[ I_N^2 R_2 \left( \frac{t + \theta_r}{t + \theta_2} - \frac{t + \theta_2}{t + \theta_r} \right) \cdot u_{R2} \right]^2 + \left[ \frac{t + \theta_2}{t + \theta_r} \cdot u_{P2} \cdot P_2 \right]^2 + \left[ \left( -I_N^2 R_2 \frac{t + \theta_r}{(t + \theta_2)^2} + \left( P_2 - I_N^2 R_2 \right) \frac{1}{t + \theta_r} \right) \cdot \dot{u}_{\theta_2} \right]^2}$$

The expanded absolute uncertainty is  $\dot{U}_{LL} = 2\dot{u}_{LL}$  which corresponds to a coverage probability of approximately 95 %.

The expanded relative uncertainty is obtained as:  $U_{LL} = \frac{\dot{U}_{LL}}{P_{LL}}$

## **Ensayo de calentamiento**

### *Objetivos:*

- *Verificar la potencia nominal del transformador*
- *Detección de posibles puntos calientes (termografía y DGA)*
- *Determinar la constante de tiempo del líquido aislante y otras constantes fundamentales para aplicar las guías de carga*

*Límites de aumentos de temperatura sobre el ambiente para transformadores en aceite mineral con papel Kraft (IEC 60076-2:2011):*

<b>Requirements for</b>	<b>Temperature rise limits</b> K
Top insulating liquid	60
Average winding (by winding resistance variation):	
– ON.. and OF.. cooling systems	65
– OD.. cooling system	70
Hot-spot winding	78

# **Ensayo de calentamiento**

## **IEC 60076-14:2013**

### *Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials*

**Table 3 – Maximum continuous temperature rise limits for transformers with hybrid insulation systems**

	Conventional insulation system <sup>a</sup>	Hybrid insulation systems				
		Semi-hybrid insulation winding	Mixed hybrid insulation winding	Full hybrid insulation winding <sup>b</sup>		
Minimum required solid high-temperature insulation thermal class	105	120	130	130	140	155
Top liquid temperature rise (K)	60	60	60	60	60	60
Average winding temperature rise (K)	65/70	75	65	85	95	105
Hot-spot temperature rise for solid insulation (K)	78	90	100	100	110	125
NOTE 1 Liquid operates at conventional temperatures.						
NOTE 2 The temperature rise limits for hybrid insulation systems do not depend on cooling mode.						
NOTE 3 The temperature rise limits shown are based on normal cooling medium temperatures according to IEC 60076-1. For alternate ambient temperature conditions, see IEC 60076-2.						
a Conventional insulation system included only for reference purposes.						
b Essentially oxygen-free applications where the liquid preservation system effectively prevents the ingress of air into the tank.						

# **Ensayo de calentamiento**

## **IEC 60076-14:2013**

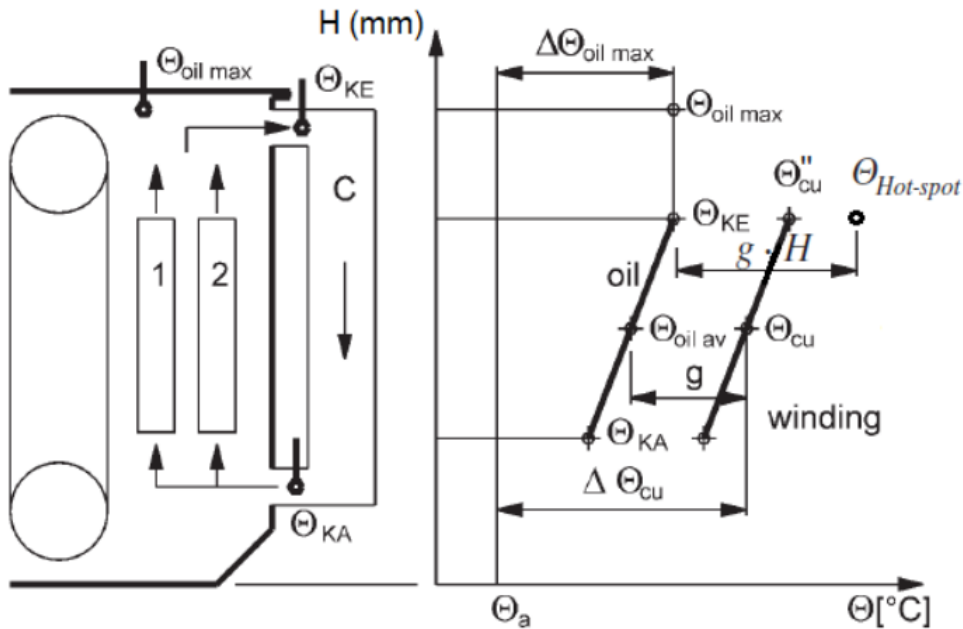
### *Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials*

**Table 4 – Maximum continuous temperature rise limits  
 for transformers with high-temperature insulation systems**

	Ester liquid				Silicone liquid			
<b>Minimum required high-temperature solid insulation thermal class</b>	130	140	155	180	130	140	155	180
<b>Top liquid temperature rise (K)</b>	90	90	90	90	115	115	115	115
<b>Average winding temperature rise (K)</b>	85	95	105	125	85	95	105	125
<b>Hot-spot temperature rise (K)</b>	100	110	125	150	100	110	125	150
<p>NOTE 1 Essentially oxygen-free applications where the liquid preservation system effectively prevents the ingress of air into the tank.</p> <p>NOTE 2 The temperature rise limits shown are based on normal cooling medium temperatures according to IEC 60076-1. For alternate ambient temperature conditions, see IEC 60076-2.</p> <p>NOTE 3 The high-temperature insulation frequently includes different temperature classes, all above conventional.</p> <p>NOTE 4 For cellulose/ester insulation systems, see 5.3.</p>								

## Ensayo de calentamiento

Distribución de temperaturas:

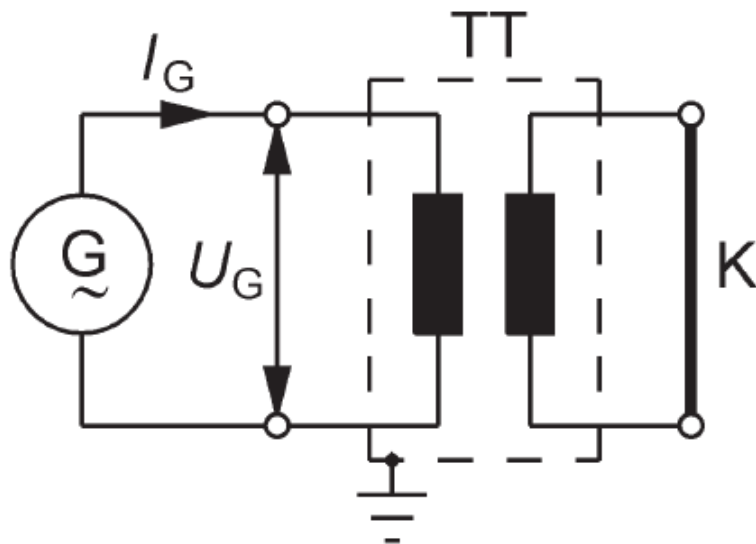


- $\Theta_{oil\ max}$  = top oil temperature (under the cover)
- $\Delta\Theta_{oil\ max}$  = top oil temperature rise (guarantee value)  
 $\Delta\Theta_{oil\ max} = \Theta_{oil\ max} - \Theta_a$
- $\Theta_a$  = ambient temperature, or water inlet temperature for water-cooled transformers
- $\Theta_{Cu}$  = average winding temperature
- $\Delta\Theta_{Cu}$  = average winding temperature rise (guarantee value)
- $\Theta_{KE}$  = oil temperature (cooler inlet)
- $\Theta_{KA}$  = oil temperature (cooler outlet)
- $\Theta_{oil\ av}$  = calculated average oil temperature
- $\Theta''_{Cu}$  = maximal winding temperature; Attention: this is normally not the winding hot-spot
- $\Theta_{Hot-spot}$  = winding hot-spot
- C = cooler
- 1,2 = transformer windings
- g = temperature gradient winding-oil
- H = hot-spot factor

## **Ensayo de calentamiento**

### **Método de cortocircuito**

*Este método se aplica para cada par de bobinados.*

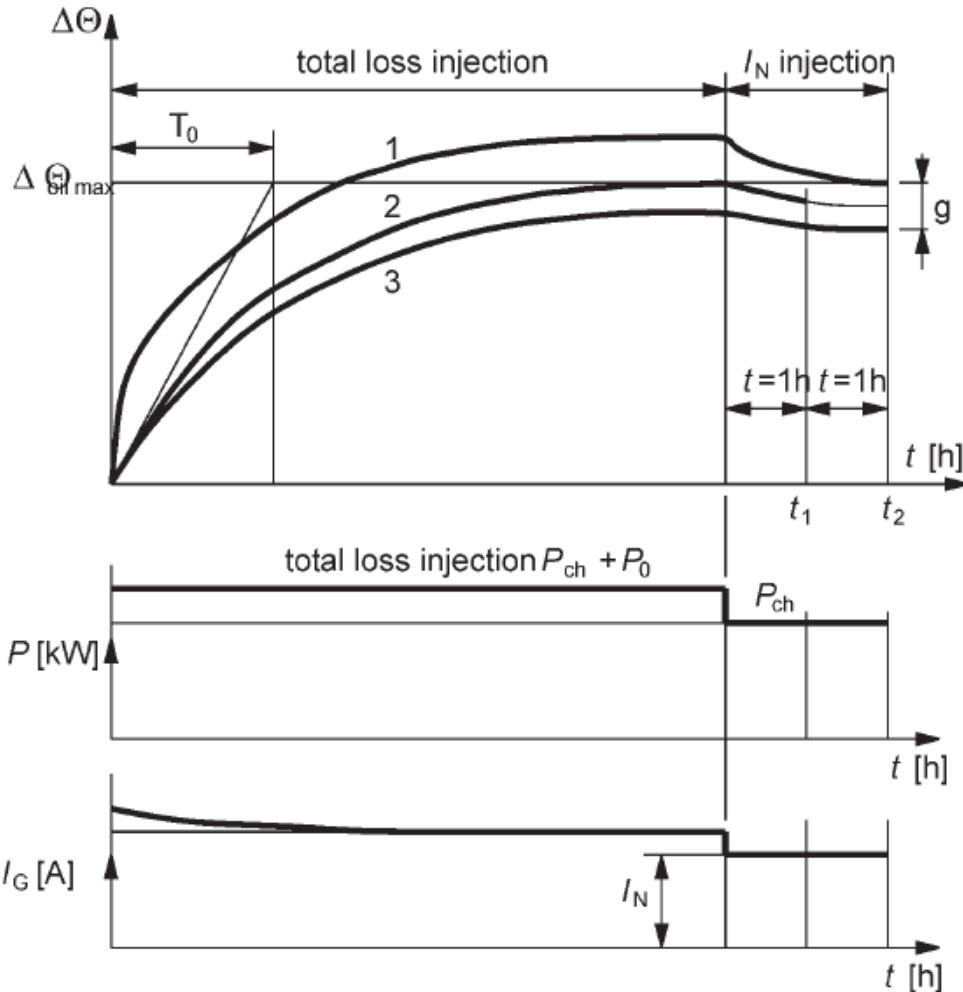


G = voltage source  
 K = short-circuit lead  
 $I_G$  = supply current  
 $U_G$  = supply voltage  
 TT = transformer under test

*El ensayo se lleva a cabo en dos partes:*

- *Inyección de las pérdidas totales, para obtener el calentamiento del top-oil*
- *Inyección de la corriente nominal, para hallar el calentamiento medio de los bobinados*

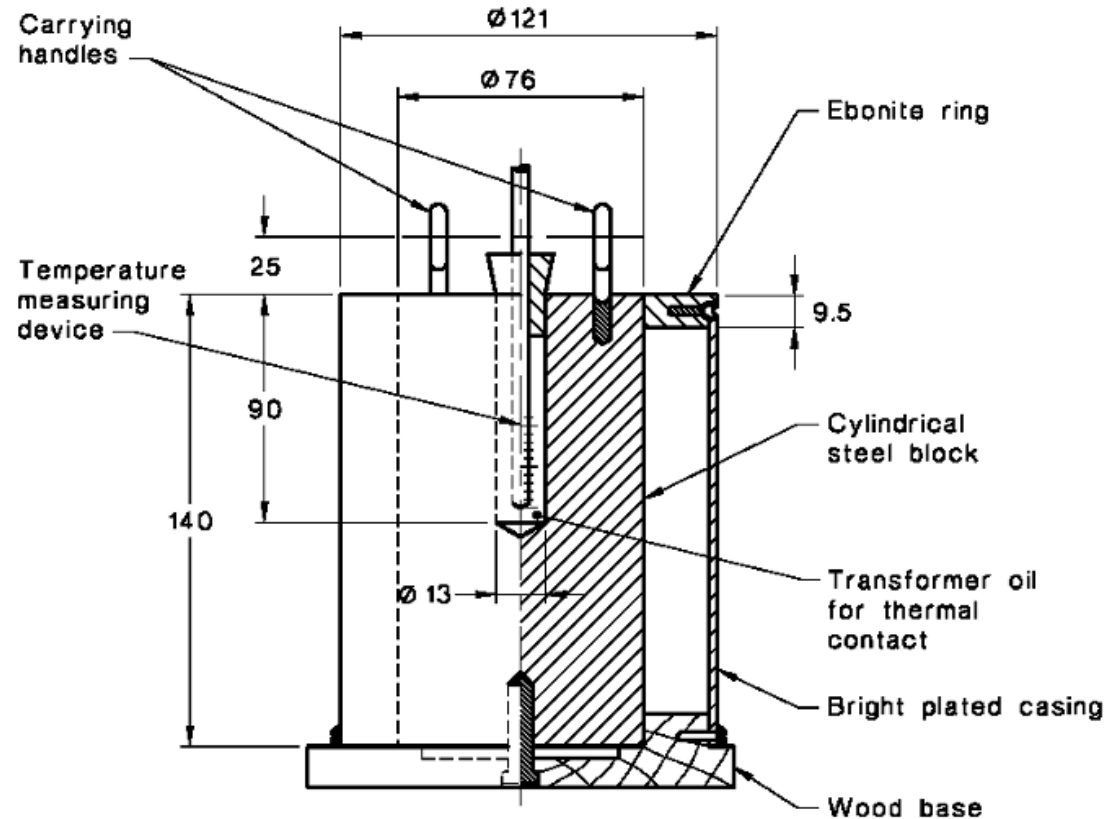
# Ensayo de calentamiento Método de cortocircuito



- $T_0$  = time constant of the transformer
- $t_1$  = moment of measurement of HV- and LV resistance measurement
- $t_2$  = moment of resistance measurement of the second winding in case of separate resistance measurement
- $g$  = temperature gradient winding-oil
- 1 = winding rise
- 2 = top oil rise
- 3 = average oil rise

## ***Ensayo de calentamiento***

### ***Medida de la temperatura ambiente (AN y AF)***



### ***Typical heat sink for air temperature measurement***

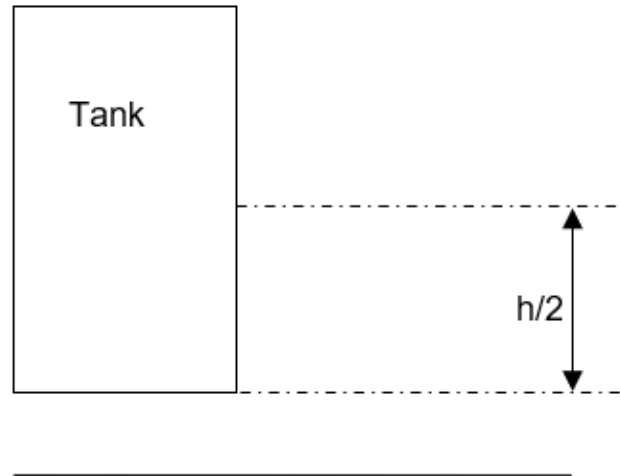
*The provided heat sink design has a time constant of 3 h which may be reduced to 2 h by removal of the plated casing. Packing the annular space with cotton wool will increase the time constant to 5 h. Dimensions are in mm.*



# *Ensayo de calentamiento*

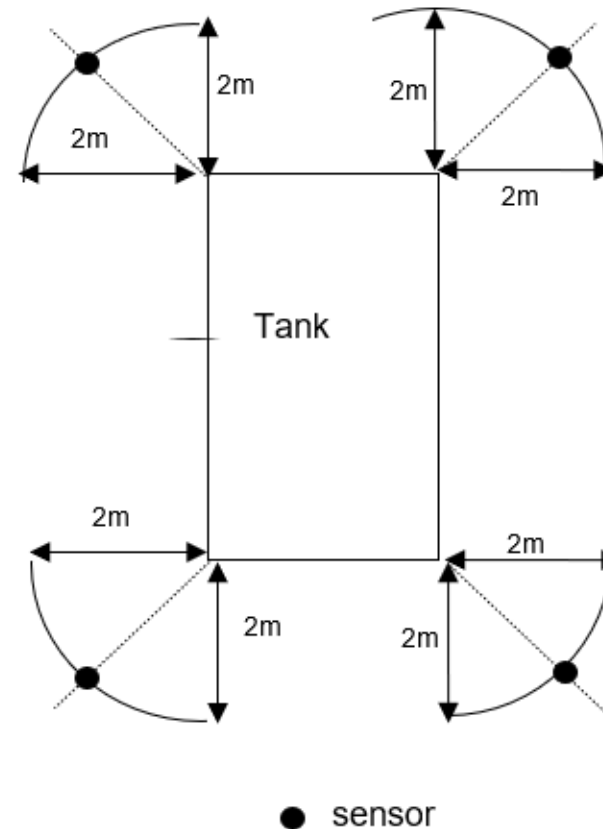
## *Medida de la temperatura ambiente*

Side view



$h/2$ - Indicates sensor distance from the bottom of the tank at half height of tank wall

Top view

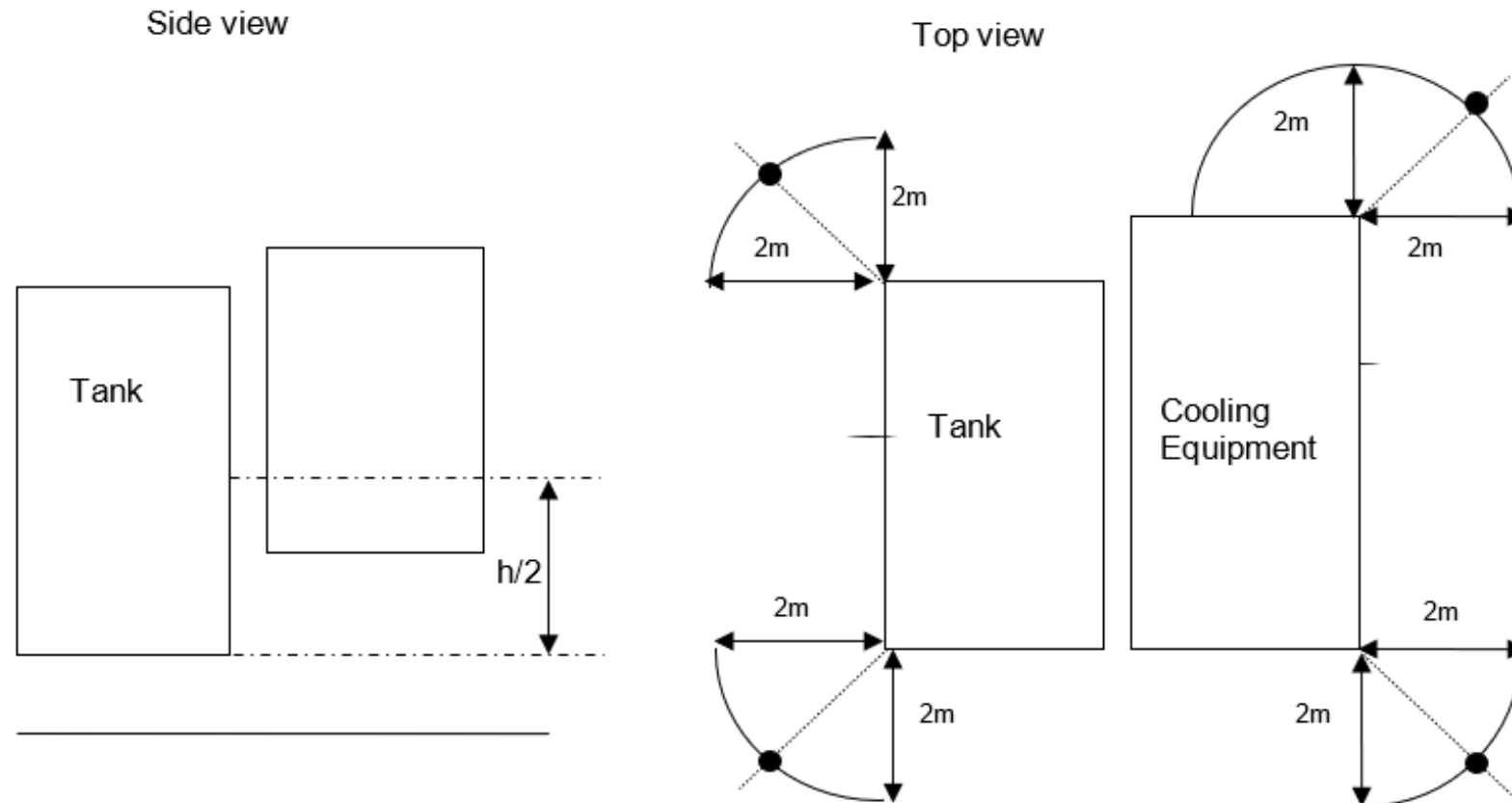


*Sensor location around **AN cooled** transformer **without external cooler**, figure illustrates a general piece of cooling equipment*

*At least four sensors shall be provided, and the average of their readings shall be used to determine the temperature of external cooling medium for the evaluation of the test results. For tests on large power transformers, 100MVA and above, the number of provided sensors shall be at least six.*

# *Ensayo de calentamiento*

## *Medida de la temperatura ambiente*



$h/2$ - Indicates sensor distance from the bottom of the tank at half height of tank wall

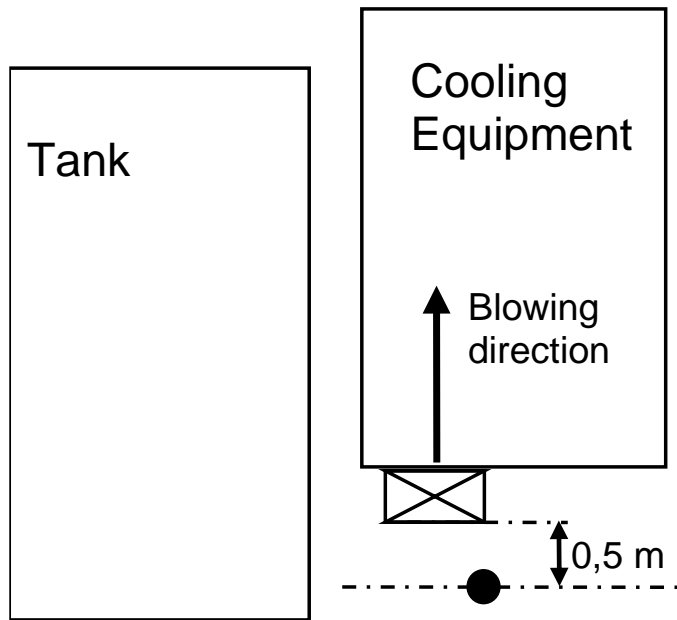
● sensor

*Sensor location around a transformer, **AN cooling**, figure illustrates a general piece of cooling equipment*

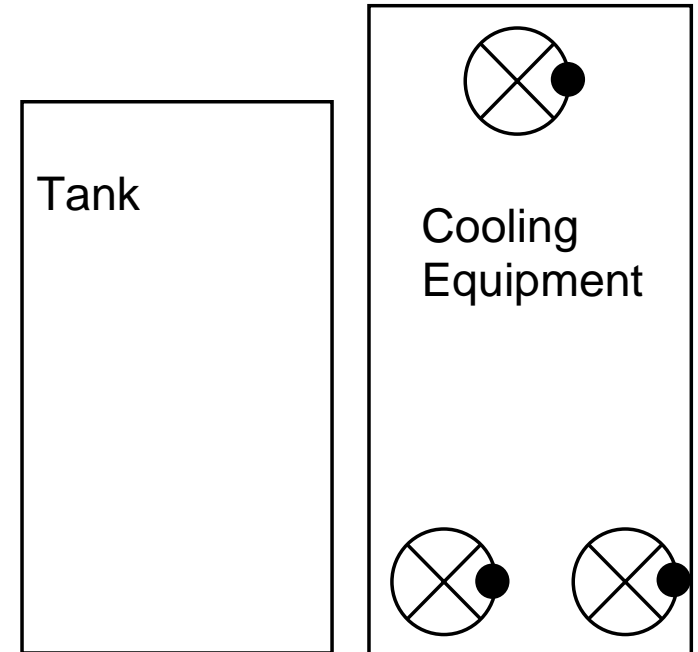
## *Ensayo de calentamiento*

### *Medida de la temperatura ambiente*

Side view



Top view

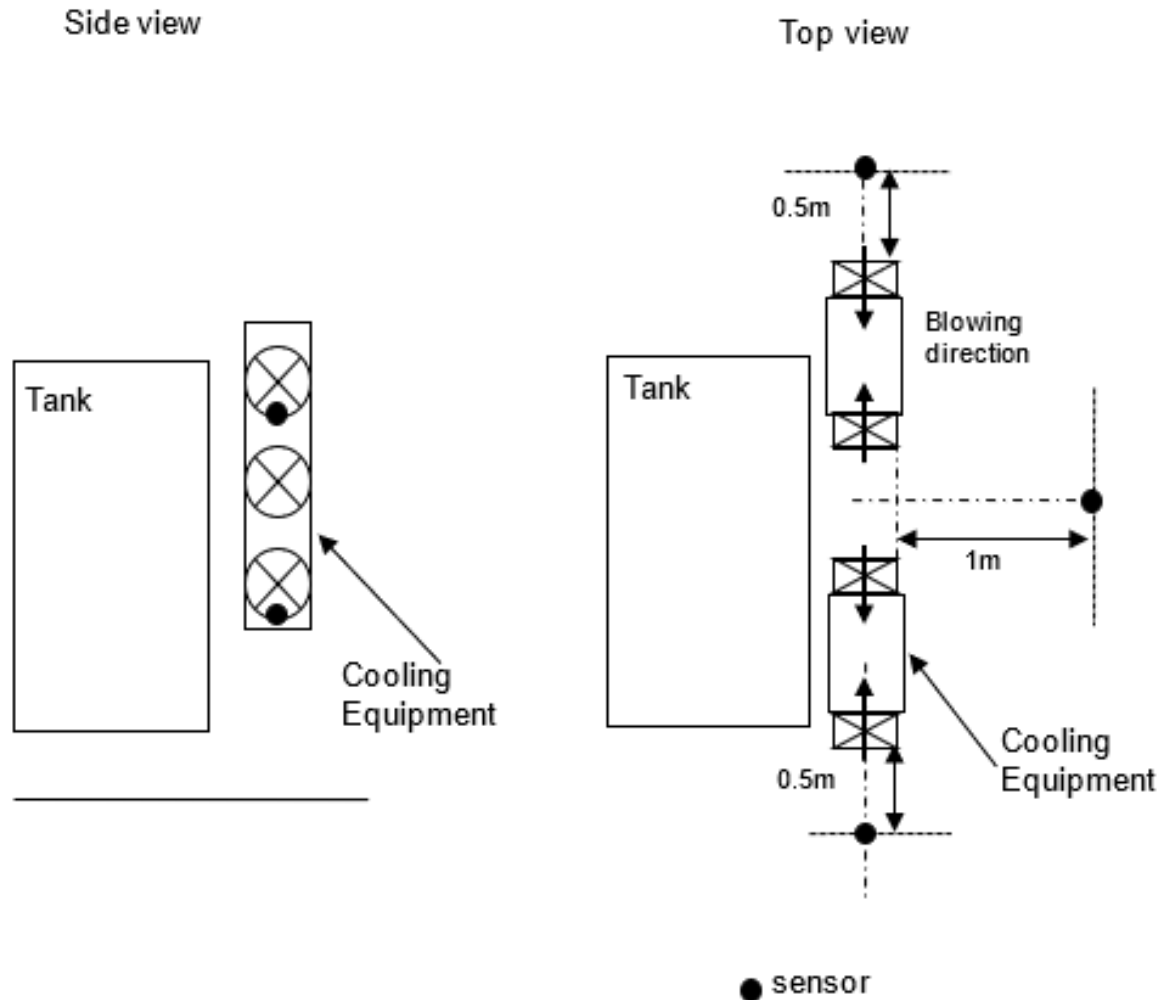


● sensor

*Example of sensor location around a vertically air forced-cooled transformer (AF), figure illustrates a general piece of cooling equipment*

# *Ensayo de calentamiento*

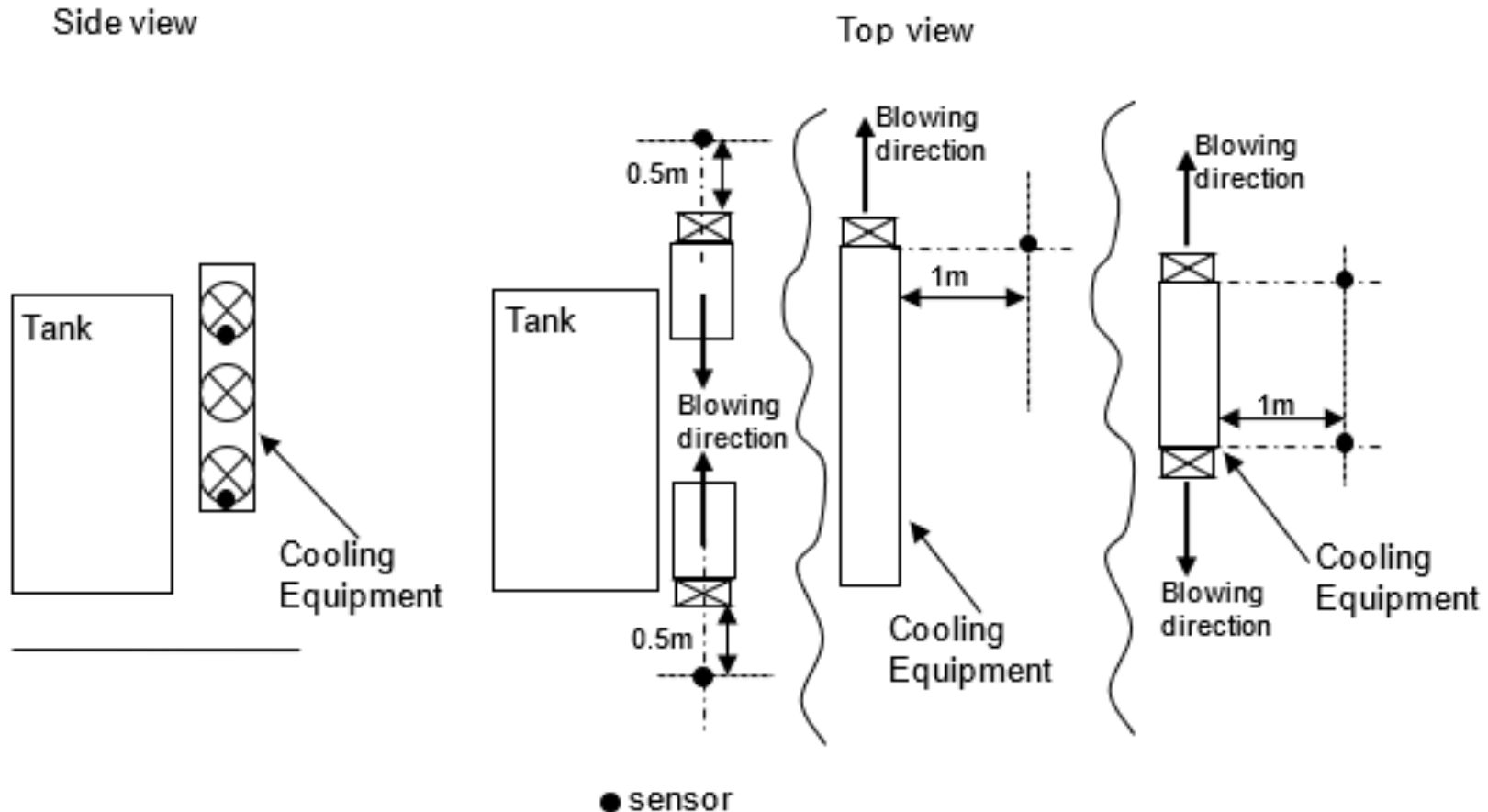
## *Medida de la temperatura ambiente*



*Sensor location around a horizontally air forced-cooled transformer (AF) equipped with radiators, figure illustrates a general piece of cooling equipment*

## *Ensayo de calentamiento*

### *Medida de la temperatura ambiente*



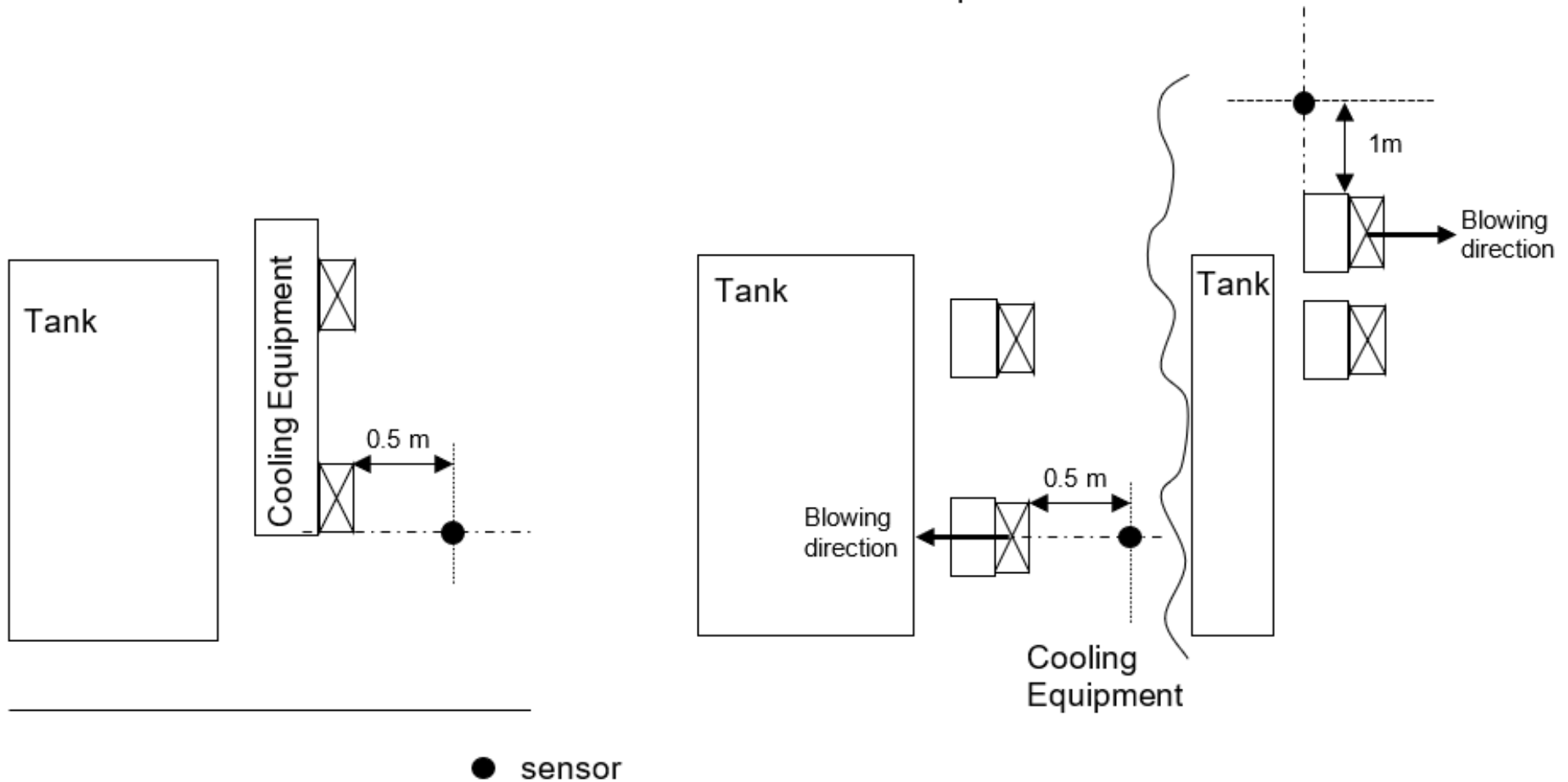
*Sensor location around a horizontally air forced-cooled transformer with radiators (AF), figure illustrates a general piece of cooling equipment*

# *Ensayo de calentamiento*

## *Medida de la temperatura ambiente*

Side view

Top view



*Example sensor location around a transformer (AF) equipped with liquid to air heat exchanger*

## ***Ensayo de calentamiento***

### ***Medida de la temperatura del líquido a la entrada y salida de los radiadores***



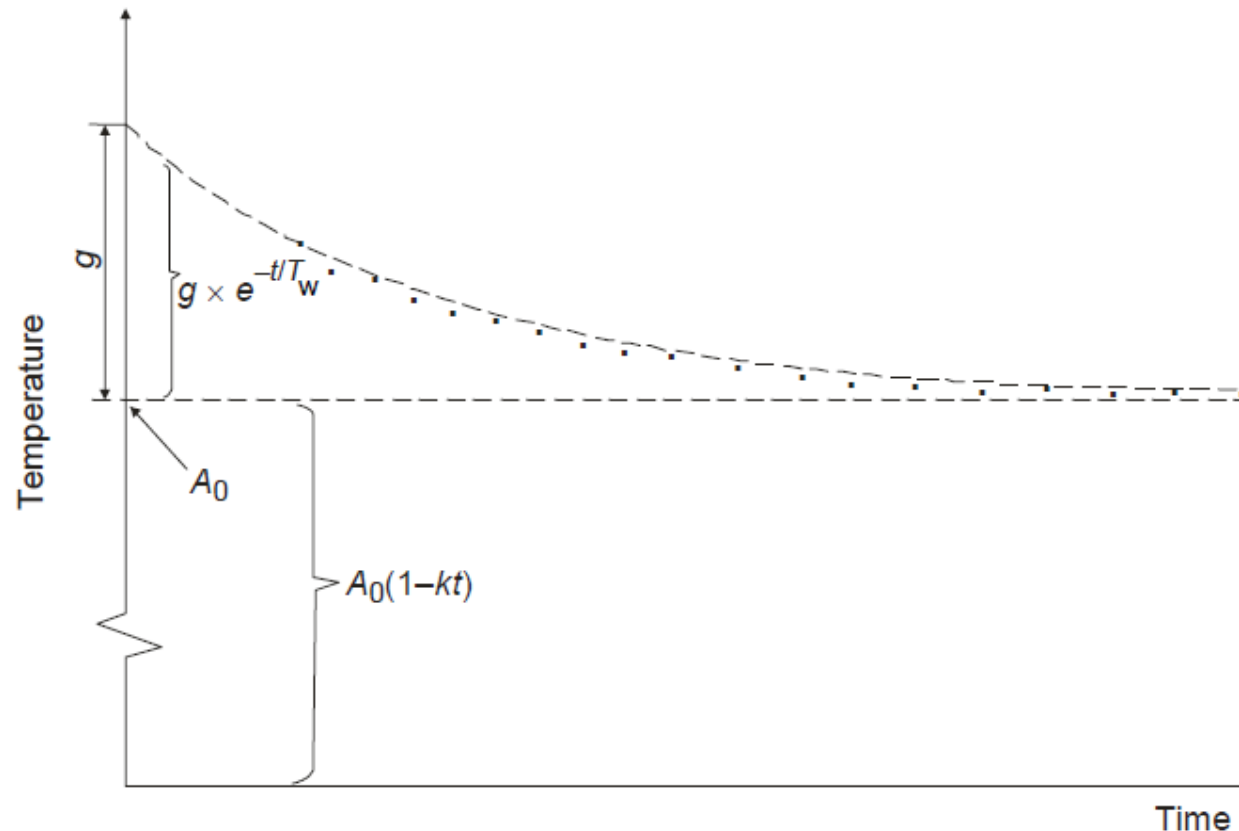
## Ensayo de calentamiento

### Medida de la temperatura de los devanados

Extrapolación no Interpolación (Anexo C de la IEC 60076-2:2011)

¡Nunca utilizar aproximaciones polinómicas!

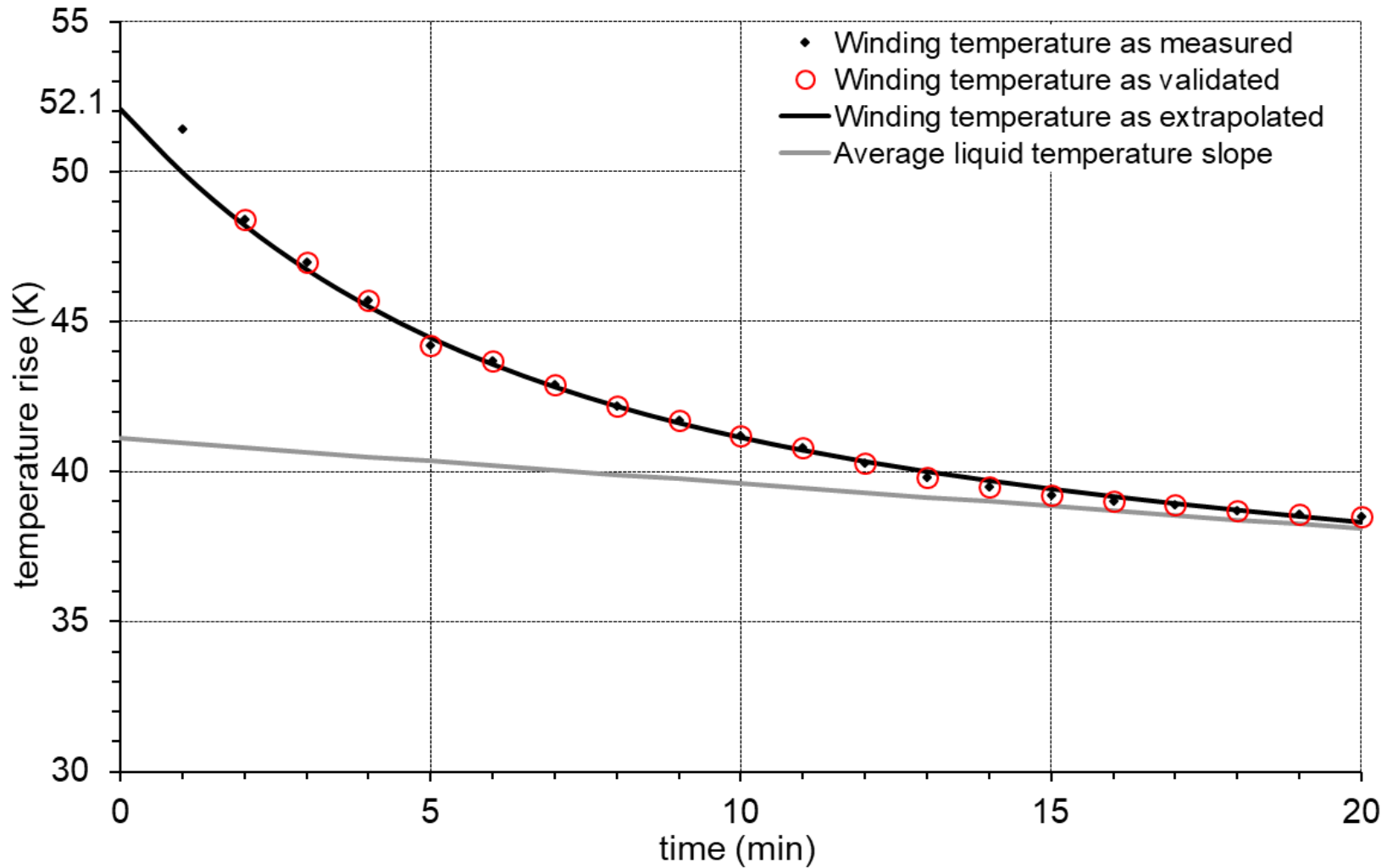
$$\theta_W(t) = (A_0 - kt) + B e^{-\frac{t}{\tau_w}} \quad R_2 = R_1 \frac{\theta_2 + \theta_k}{\theta_1 + \theta_k}$$





# *Ensayo de calentamiento*

## *Medida de la temperatura de los devanados*



Extrapolation of the cooling down curve, using the fitting curve  $\theta_W(t) = (A_0 - kt) + Be^{-\frac{t}{\tau_w}}$

## **Ensayo de calentamiento**

### **Importancia de la medida resistencia en frío $R_1$**

#### **IEC 60076-1:2011**

##### **11.2 Measurement of winding resistance**

##### **11.2.3 Liquid-immersed type transformers**

*After the transformer has been under liquid without excitation for at least 3 h, the average liquid temperature shall be determined, and the temperature of the winding shall be deemed to be the same as the average liquid temperature. The average liquid temperature is taken as the mean of the top and bottom liquid temperatures.*

*In measuring the cold resistance for the purpose of temperature-rise determination, special efforts shall be made to determine the average winding temperature accurately. Thus, the difference in temperature between the top and bottom liquid shall not exceed 5 K. To obtain this result more rapidly, the liquid may be circulated by a pump.*

#### **IEC 60076-19-1:2023**

##### **10.7 Winding temperature at load loss measurement**

##### **10.7.1 General**

*The temperature of the windings during the load loss measurement will affect subsequent recalculation of the results to reference temperature.*

*The method to determine the winding temperature is defined in IEC 60076-1 and in IEC 60076-11.  
**A safe estimate of the expanded uncertainty of winding temperature determined this way is 2 K.***

## Ensayo de calentamiento

### Importancia de la medida resistencia en frío $R_1$ y de la temperatura ambiente – Ejemplo

Transformador fabricado por TSEA (ex Toshiba) en su planta de Brasil.

37.5 MVA ONAF, 210/62.3 kV, 60 Hz, ensayado con el OLTC en la posición de 189 kV.

Resistencia en frío medida a 23.0°C.

Temperatura ambiente en el instante del comienzo de la medida de la resistencia en caliente (curva de enfriamiento) 25.9°C.

Cálculo de la temperatura del devanado de alta tensión en el momento del corte variando la temperatura a la cual se midió la resistencia en frío:

$\theta_{frio} (°C)$	$\theta_w (°C)$	$\Delta\theta_w(K)$
25.0	83.0	57.1
24.0	81.8	55.9
<b>23.0</b>	<b>80.5</b>	<b>54.6</b>
22.0	79.3	53.4
21.0	78.1	52.2

Si suponemos que la temperatura ambiente real puede estar entre 24.9°C y 26.9°C resulta:

$$51.2K \leq \Delta\theta_w \leq 58.1K$$

$$\Delta\theta_w \cong 54.6K \pm 3.5K$$

3.5K es el 6.4% de 54.6K

# **Ensayos dieléctricos**

## **Secuencia Ensayos Dieléctricos**

*La secuencia de realización de los ensayos dieléctricos se realizará de acuerdo con lo indicado en el numeral 7.2.3 de la Norma IEC 60076-3:2018. No se admitirá ninguna variación respecto al orden indicado en la norma.*

IEC 60076-3:2013+AMD1:2018 CSV – 17 –

© IEC 2018

### **7.2.3 Test sequence**

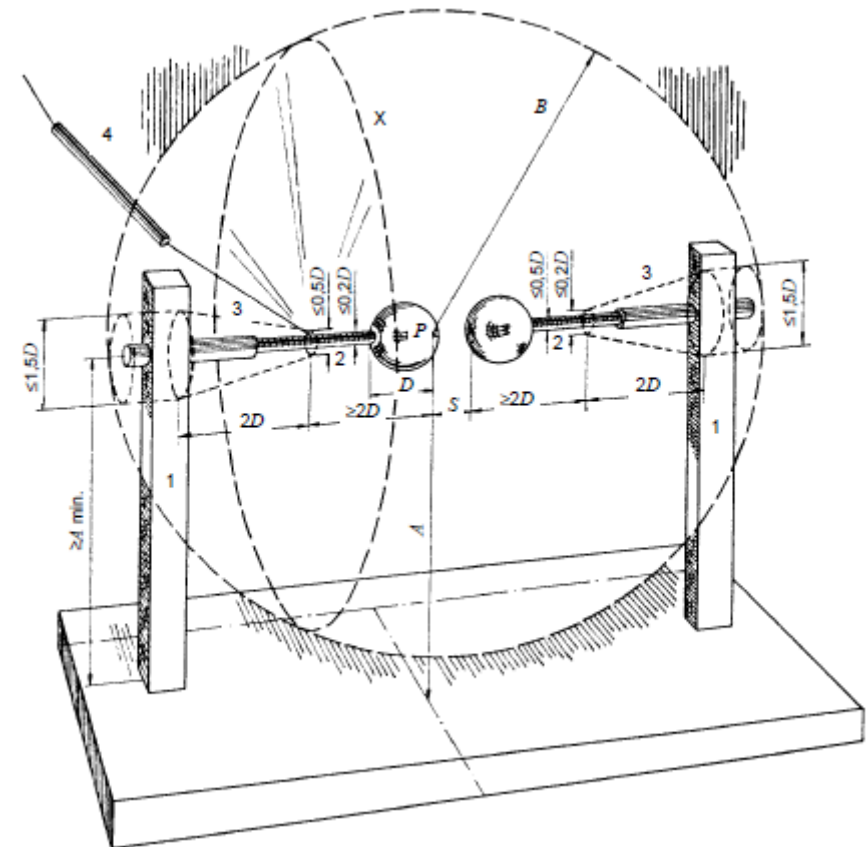
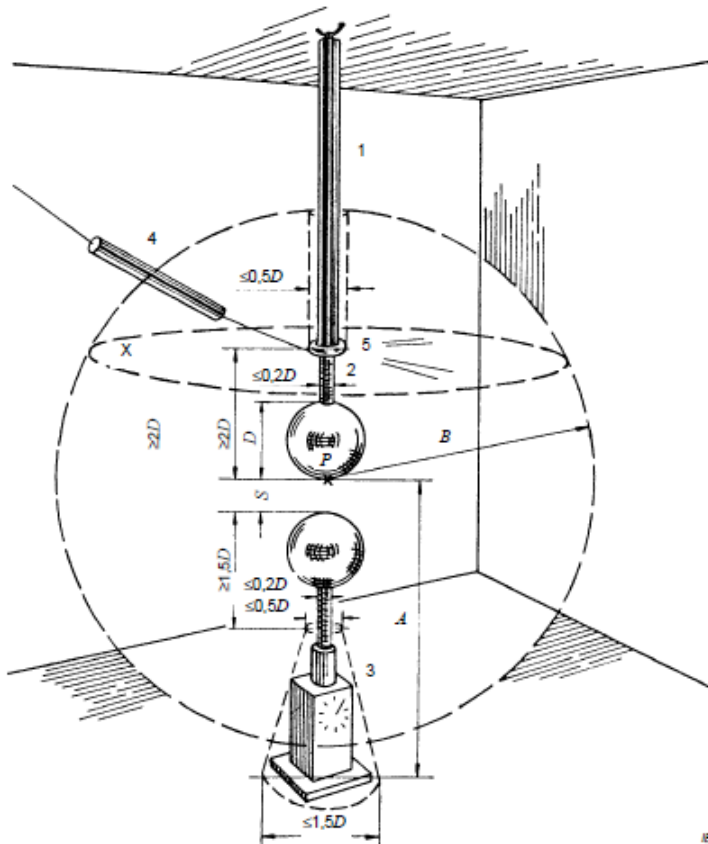
The tests shall be performed in the sequence given below:

- a) lightning impulse tests (LI, LIC, LIN, LIMT);
- b) switching impulse (SI);
- c) applied voltage test (AV);
- d) line terminal AC withstand test (LTAC);
- e) induced voltage withstand test (IVW);
- f) induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD).

# Medida de las tensiones en los ensayos dieléctricos

## Medida de las Tensiones de Ensayo – IEC 60052

Todas las tensiones que se aplicarán en los ensayos dieléctricos (ensayos de AC y de impulso) se medirán antes de realizar cada ensayo utilizando un espinterómetro de esferas de acuerdo con la Norma IEC 60052.



IEC 2275/01

# Medida de las tensiones en los ensayos dieléctricos

## Medida de las Tensiones de Ensayo – IEC 60052

60052 © IEC:2002

– 27 –

**Table 2 – Peak values of disruptive discharge voltages ( $U_{50}$  values in impulse tests) in kV for alternating voltages at power frequencies, full lightning and switching impulse voltages of negative polarity and direct voltages of both polarities**

Sphere-gap spacing cm	Sphere diameter cm												
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200	
0,05	2,8												
0,10	4,7												
0,15	6,4												
0,20	8,0	8,0											
0,25	9,6	9,6											
0,30	11,2	11,2											
0,40	14,4	14,3	14,2										
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8							
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9							
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0							
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0							
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9							
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7						
1,2	(35,1)	37,6	37,5	37,4	37,4	37,4	37,4						

## **Medida de las tensiones en los ensayos dieléctricos**

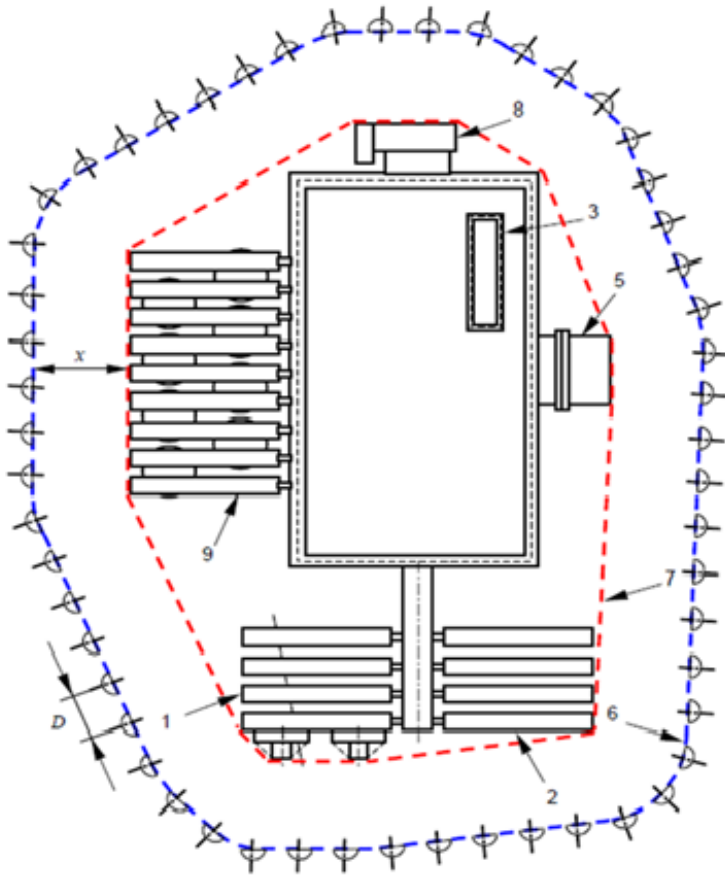
**Wolfgang Hauschild and Eberhard Lemke:  
 “High-Voltage Test and Measuring Techniques”  
 Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014**

*En la página 51 de este libro dice textualmente sobre los espinterómetros de esferas:*

*“Today they are not used for daily HV measurement and do not play the same important role in HV laboratories as in the past. Their main application is for performance checks of AMSs (Approved measuring system) or linearity checks. **For acceptance tests on HV apparatus the inspector may require a check of the applied AMS by a sphere gap to show that it is not manipulated.** For these applications mobile measuring gaps with sphere diameters less than 50 cm are sufficient.”*

# Medida del nivel de ruido

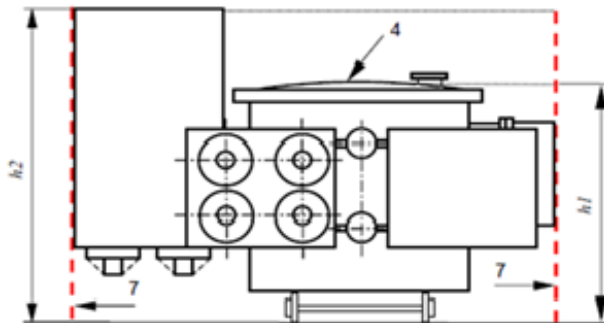
**IEC 60076-10:2016**



**Key**

- |                                 |                               |  |
|---------------------------------|-------------------------------|--|
| 1 Horizontal forced air cooling | 5 Cable box                   | 9 Vertical forced air cooling  |
| 2 Natural air cooling           | 6 Prescribed contour          | $D$ Microphone spacing (if applicable)                                     |
| 3 Turret                        | 7 Principal radiating surface | $h$ Height of the principal radiating surface; the larger of $h1$ and $h2$ |
| 4 Transformer tank              | 8 On-load tap-changer         | $x$ Measurement distance   |

**Figure 2 – Typical microphone path / positions for sound measurement on transformers having cooling devices mounted either directly on the tank or on a separate structure spaced < 3 m away from the principal radiating surface of the main tank**





## **Medida del nivel de ruido**

*El nivel de ruido potencia  $L_{WA}$  y el nivel de ruido presión  $L_{pA}$  están relacionados por la fórmula 22 de la norma IEC 60076-10:20016 que se transcribe a continuación:*

$$L_{WA} = L_{pA} + 10 \times \log_{10} \left( \frac{S}{S_0} \right)$$

*donde  $S$  es la superficie de medida y  $S_0 = 1 \text{ m}^2$ .*

*En los ensayos no es posible medir el nivel de ruido potencia y lo que se mide es el nivel de ruido presión y utilizando la fórmula anterior se obtiene el nivel de ruido potencia a partir del valor medido del ruido presión y de la superficie de medida  $S$ .*

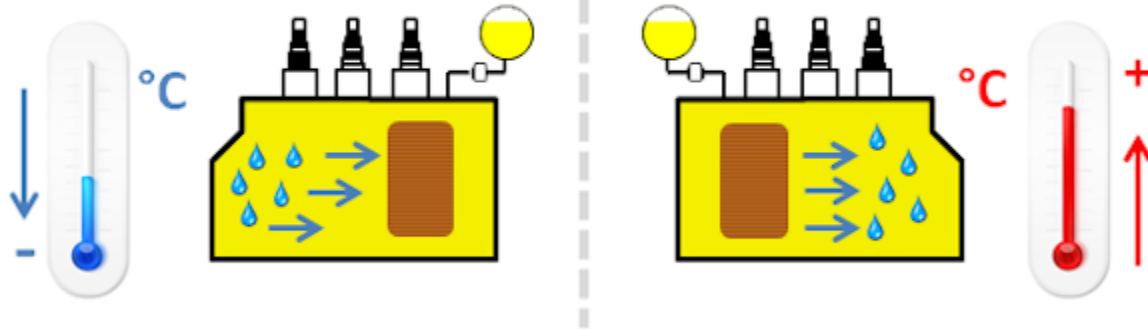
*En la etapa de diseño en cambio usualmente lo que se calcula es el nivel de ruido potencia a partir de los datos constructivos del transformador y del tipo de material utilizado en el núcleo y se obtiene el nivel de ruido presión utilizando la fórmula anterior estimando la superficie de medida.*

*Al especificar el nivel de ruido requerido para cumplir con las reglamentaciones municipales se debe tener en cuenta la ubicación del equipo en la subestación.*

*Puede haber diferencias importantes entre el nivel de ruido medido en las pruebas FAT y el nivel de ruido medido in situ.*

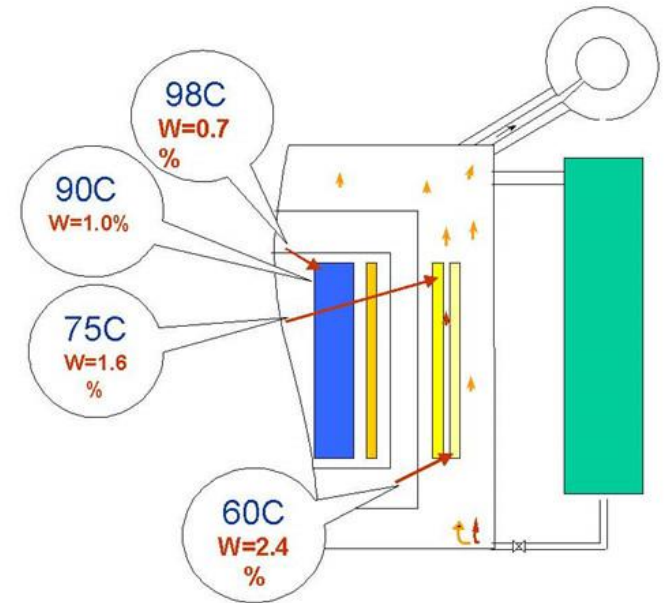
# Humedad en el papel y en el aceite

## Electrical insulation

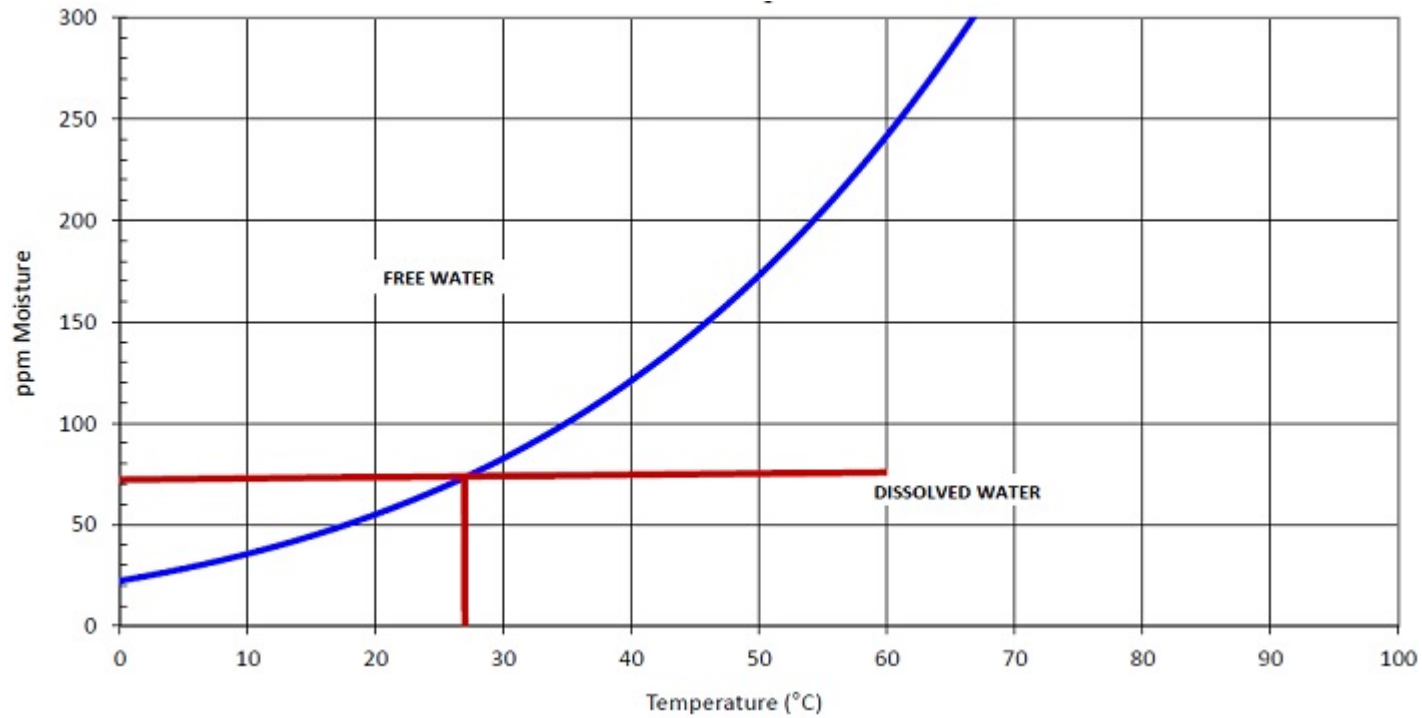


*If the temperature drops the water migrates from oil to the papers and vice versa if the temperature rises*

## Moisture profile

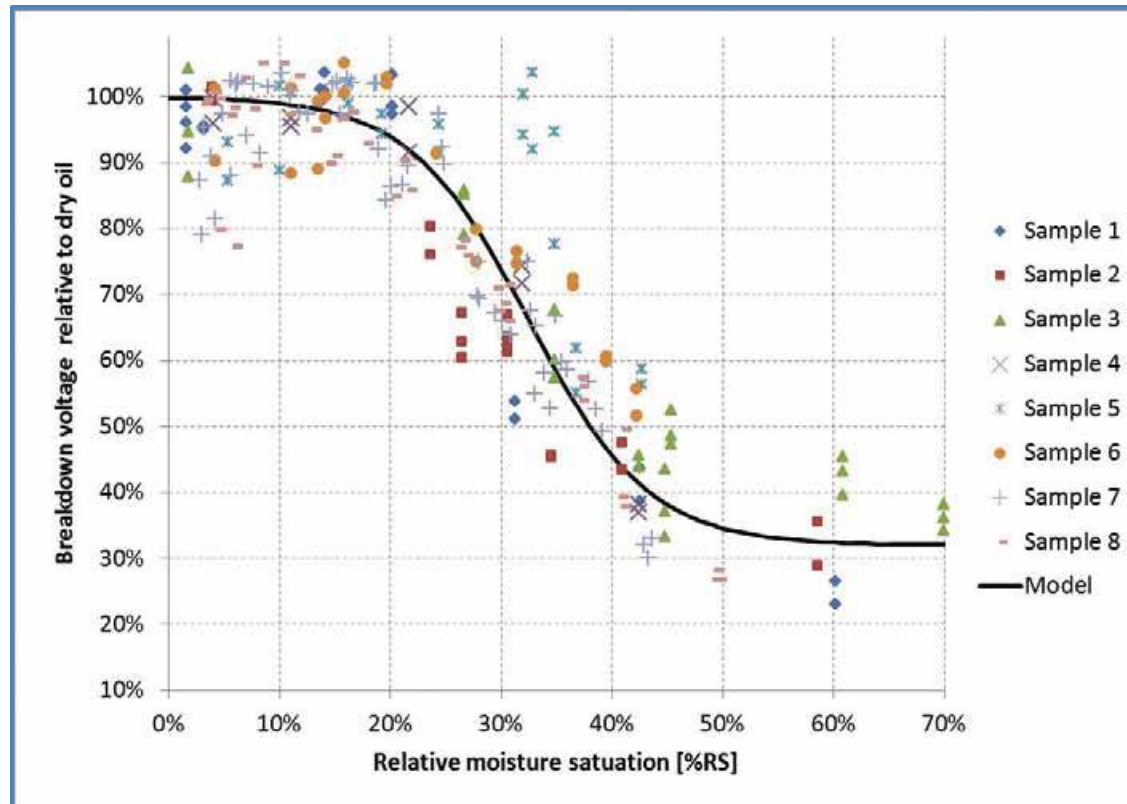


## Humedad en el papel y en el aceite



*Mineral oil saturation curve*

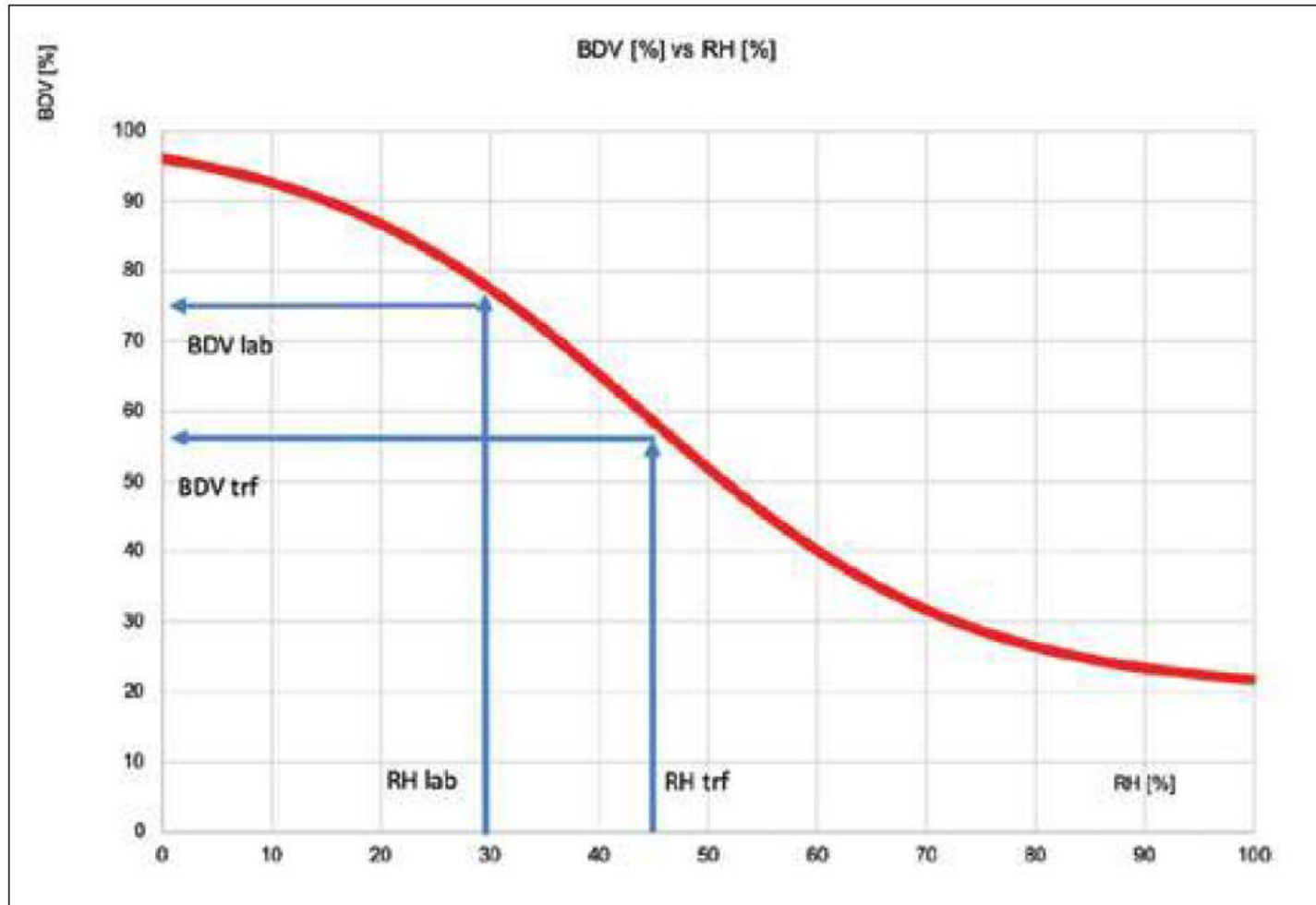
## Humedad en el papel y en el aceite



*Measured dependency of the breakdown voltage on the relative moisture saturation with an approximative model fitted to the data.*

*Each point corresponds to the average of six breakdown voltage measurements performed according to the IEC 60156 standard.*

## Humedad en el papel y en el aceite



*Laboratory BDV results in interpretation to different sampling RH condition*

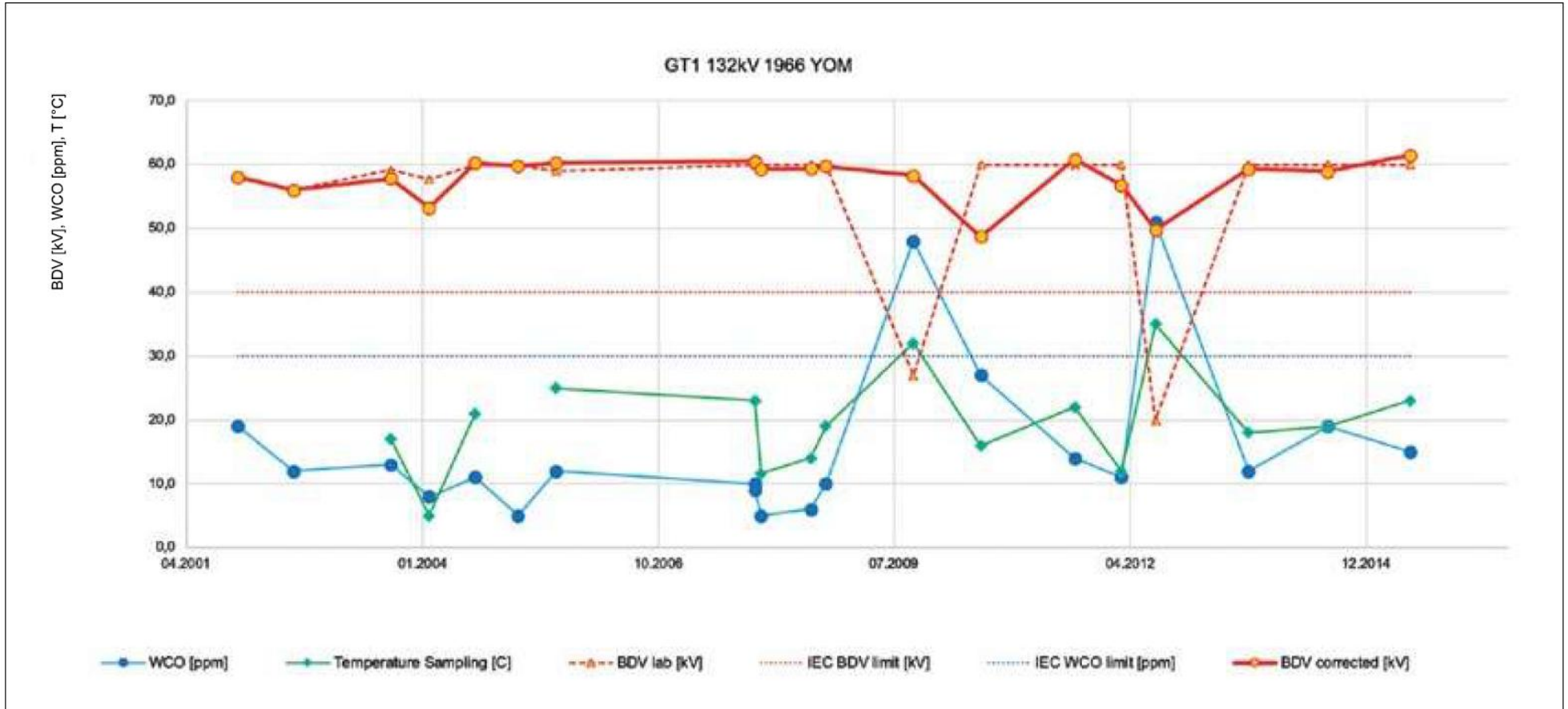
## Humedad en el papel y en el aceite

Sampling temperature, C		Lab moisture test result (WCO), ppm															
		New oil (A=7.09, B=1567) (4)								Old oil Acidity=0.3 (A=8.42, B=1921) (4)							
		2	5	10	15	20	30	40	2	5	10	15	20	30	40		
0		0.99	0.95	0.76	0.48	0.33			0.99	0.95	0.79	0.52	0.33				
10		1.00	0.98	0.94	0.84	0.69	0.50		1.00	0.99	0.95	0.88	0.77	0.52	0.44		
20		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
30		1.00	1.01	1.02	1.06	1.12	1.39	1.80	1.00	1.01	1.02	1.04	1.07	1.20	1.46		
40		1.00	1.01	1.04	1.08	1.17	1.56	2.28	1.00	1.01	1.02	1.05	1.09	1.26	1.61		
50		1.00	1.01	1.04	1.10	1.19	1.62	2.48	1.00	1.01	1.03	1.06	1.10	1.28	1.66		
60		1.00	1.02	1.05	1.10	1.20	1.66	2.57	1.00	1.01	1.03	1.06	1.11	1.29	1.69		
70		1.01	1.02	1.05	1.11	1.21	1.67	2.61	1.00	1.01	1.03	1.06	1.11	1.30	1.70		

*BDV correction factor  $k_{BDV}$  for the range of oil sampling temperatures and laboratory WCO results*

$$BDV_{trf}(kV) = k_{BDV} \times BDV_{lab}(kV)$$

# Humedad en el papel y en el aceite





***¡Muchas gracias por  
vuestra atención!***

***Álvaro Portillo  
acport18@gmail.com***