



Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

PROYECTO FINAL

**“VERIFICACION DE LA POTENCIA NOMINAL DE  
TRANSFORMADORES DE ENERGÍA ELECTRICA  
CON EL ENSAYO DE CALENTAMIENTO”**

**“Determinación de las incertidumbres de medición”**

Carrera: Ingeniería Eléctrica

Alumno: Ferreyra, Francisco

Legajo: F-3442/8

Directores:

Ing. Edgardo H. Bevilacqua,

Ing. Fernando Alonso

Ing. Boris Mateljan

Rosario, Argentina

2024



*Dedico este trabajo a mi familia, amigos y docentes,  
por ser la fuente de inspiración y apoyo constante  
en este viaje de formación y aprendizaje.*



## Agradecimientos

*Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas y organizaciones que me acompañaron en este camino y que fueron fundamentales para llegar a esta meta.*

*A mi familia, por ser mi refugio y brindarme su apoyo incondicional, comprensión y ánimo en cada momento de esta carrera. Gracias por estar ahí, alentándome a seguir adelante y creyendo mí.*

*A mis amigos y a mi novia, quienes compartieron conmigo los momentos de esfuerzo y celebración, siempre brindándome su paciencia, compañía y palabras de aliento. Su apoyo ha sido un pilar fundamental durante estos años.*

*A la Escuela de Ingeniería Eléctrica y a la Universidad Nacional de Rosario, por brindarme las herramientas y el conocimiento que me permitieron crecer como profesional. A mis docentes, especialmente a mis profesores Edgardo Bevilacqua y Fernando Alonso, Boris Mateljan por su dedicación y guía en este camino. A mis compañeros de clase, por las experiencias compartidas y la amistad que surgió en el proceso de aprendizaje.*

*Quiero también dar un agradecimiento especial a la empresa Mayo Transformadores y a todos sus empleados, mis compañeros de trabajo, por ofrecerme un espacio donde aplicar lo aprendido y seguir formándome en la práctica. Su apoyo y confianza fueron fundamentales para mi desarrollo profesional.*

*Gracias a todos por formar parte de esta etapa de mi vida y por ayudarme a cumplir este sueño.*



## Resumen

Este proyecto presenta un análisis exhaustivo del ensayo de calentamiento como método para la verificación de la potencia nominal de un transformador de energía eléctrica de gran potencia sumergido en aceite, quedando excluido de este estudio los transformadores de medición y protección. Este ensayo de calentamiento es muy importante ya que permite determinar la potencia real del transformador y los valores de temperatura que alcanzará en servicio. Estas características son esenciales para el transformador, porque con ellas y sus condiciones reales de servicio se determinará en gran medida, su vida útil. Se utiliza como principal guía de estudio la norma IRAM 2018 que está basada en la norma internacional IEC 90076-2 Power Transformers – Part 2: Temperature Rise for Liquid-immersed Transformers. Se desarrollará el método de ensayo, interpretando los resultados obtenidos y analizando los errores de medición involucrados en un ensayo real realizado en un transformador de potencia de 20MVA.

Palabras clave: Transformadores de potencia, Ensayo Calentamiento, Temperatura, Incertidumbre, Mediciones, Norma IRAM 2018,



## Abstract

This project shows a comprehensive analysis of the heat run test, also referred to as the temperature rise test, as a method to verify the nominal power of high-capacity liquid-immersed power transformers. Excluding measurement and protection transformers, the project emphasizes the test's role in determining operational temperatures and actual transformer power, key standard, aligned with IEC 60076-2 guidelines. Detailed test methodologies, result interpretation, and uncertainty quantification are demonstrated using a 20 MVA transformer.

Keywords: Power transformers, Temperature rise test, Heat run test, Uncertainty, Measurements, IRAM 2018 Standard.



# Contenido

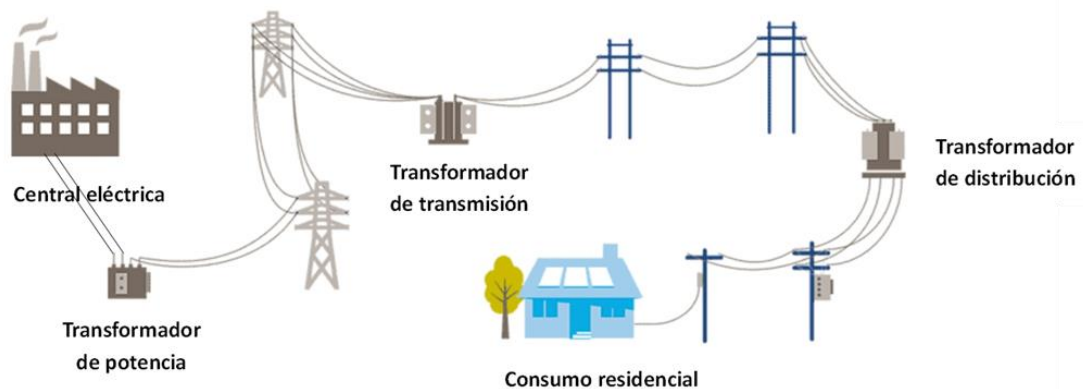
<b>1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>8</b>
1.1	El Transformador y la red .....	8
1.2	Aplicaciones y Tipos de Transformadores .....	9
<b>2</b>	<b>Conceptos Generales .....</b>	<b>11</b>
2.1	Principio de funcionamiento .....	11
2.1.1	El Núcleo .....	11
2.1.2	Arrollamientos.....	13
2.1.3	Sistema de Aislamiento .....	14
2.2	Pérdidas en el transformador .....	15
2.2.1	Pérdidas en vacío.....	15
2.2.2	Pérdidas en cortocircuito .....	16
2.2.3	Pérdidas adicionales.....	17
2.3	Métodos de Refrigeración para Transformadores.....	19
2.3.1	Transformadores con refrigeración forzada .....	21
2.4	Accesorios: .....	22
2.4.1	Bushing .....	23
2.4.2	Conmutadores de tomas .....	23
<b>3</b>	<b>Ensayo de Calentamiento.....</b>	<b>26</b>
3.1	Objetivo:.....	26
3.2	Normas .....	26
3.3	Condiciones de refrigeración y servicio Normales .....	27
3.3.1	Transformadores refrigerados por aire.....	27
3.3.2	Altitud .....	27
3.3.3	Forma de onda .....	28
3.3.4	Contenido de armónicos de la carga. ....	28
3.4	Métodos de ensayo.....	28
3.4.1	MÉTODO 1 “Método de cortocircuito”.....	28
3.4.2	MÉTODO 2 “Ensayo conexión a carga de diseño”.....	29
3.4.3	MÉTODO 3 “El método de oposición”.....	29
<b>4</b>	<b>Transformador de Potencia Ensayado .....</b>	<b>31</b>
4.1	Características del Transformador .....	31
4.2	Procedimientos para el ensayo .....	35
4.2.1	Durante el ensayo de calentamiento:.....	36
4.3	Definición de calentamiento .....	36
4.4	Desarrollo del Ensayo por el Método de Cortocircuito .....	37
4.4.1	ETAPA 1 .....	37
4.4.2	ETAPA 2 .....	40
4.4.3	Determinación del calentamiento de la parte superior del aceite en el instante del corte.....	41
4.4.4	ETAPA 3 .....	41
4.5	Determinación de la temperatura media del arrollamiento.....	45
<b>5</b>	<b>Cálculos utilizados en el ensayo de calentamiento.....</b>	<b>47</b>
5.1	Método basado en el anexo A de la norma 2018.....	47

5.2	Extrapolación según IRAM 2018 .....	47
5.3	Procedimiento para hacer la Extrapolación .....	49
5.4	Determinación de constantes de tiempo. ....	52
5.5	Gráficas y Resultados parciales .....	53
<b>6</b>	<b>Estimación y análisis de incertidumbres .....</b>	<b>56</b>
6.1	Definiciones de mediciones básicas .....	56
6.1.1	Incertidumbre (de medida).....	56
6.1.2	Criterios y aclaraciones .....	57
6.1.3	Error de medida .....	57
6.1.4	Error instrumental en instrumentos digitales .....	57
6.2	Variables involucradas en la medición del calentamiento. ....	58
6.3	Instrumental Utilizado.....	59
6.4	Análisis de Constantes Térmicas y Variable Temporal.....	60
6.4.1	<i>Temperatura</i> - Calculo de las constantes térmicas según IRAM 2018 .....	60
6.4.2	La variable <i>tiempo</i> .....	61
6.5	Estimación de Incertidumbres Combinadas .....	62
6.5.1	Calculo $\tan(\varphi)$ .....	62
6.5.2	Estimación de incertidumbre de los transformadores de medición.....	62
6.5.3	Estimación de la incertidumbre en la medición de Corriente.....	64
6.5.4	Estimación de incertidumbre combinada de la Potencia activa.....	64
6.5.5	Estimación de la incertidumbre aportada por el Analizador de arrollamiento .....	65
6.5.6	Estimación de incertidumbre del calentamiento del aceite <i>Coil</i> .....	65
6.5.7	Estimación de la incertidumbre en $\theta_w$ .....	68
6.5.8	Estimación de la incertidumbre en $\theta_w$ .....	70
6.5.9	Resumen de las incertidumbres estimadas .....	70
6.5.10	Estimación de la incertidumbre aportada en <i>Cat</i> .....	72
6.5.11	Estimación de la incertidumbre aportada en <i>Cbt</i> .....	73
6.5.12	Análisis /evaluación de calidad de la estimación de la incertidumbre.....	74
<b>7</b>	<b>Interpretación de resultados .....</b>	<b>78</b>
7.1	Límites de calentamiento para potencias de diseño. ....	78
7.2	Resultados finales con sus respectivas incertidumbres.....	78
7.3	Análisis y discusión de resultados .....	79
<b>8</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>81</b>
8.1	Adaptación de Procedimientos.....	81
8.2	Aplicación Práctica.....	81
8.3	Instrumental y errores de medición .....	81
8.4	Conclusión .....	82

# 1 Introducción

## 1.1 El Transformador y la red

Un transformador es un dispositivo estático que transfiere energía eléctrica de un circuito a otro por inducción electromagnética, sin cambio de frecuencia. El transformador puede vincular circuitos con diferentes tensiones eléctricas, y resulta fundamental para el uso universal del sistema de corriente alterna en la transmisión y distribución de energía eléctrica. En los sistemas de energía eléctrica se utilizan distintos valores de tensiones para la generación, transporte y distribución de energía eléctrica donde los transformadores desempeñan un papel clave en la interconexión de sistemas a diferentes niveles de tensión. Varios componentes del sistema de potencia como generadores, líneas de transmisión, redes de distribución y las cargas eléctricas, pueden ser operados a sus niveles de tensiones más adecuadas gracias a estos transformadores de potencia. Lo podemos apreciar esquemáticamente en la **Figura 1-1**.



**Figura 1-1:** Esquema de la topología de la red.

El transformador cuenta con un arrollamiento primario y otro secundario con diferente nivel de tensión, pudiendo existir en algunos casos también un arrollamiento terciario. Estos arrollamientos primarios y secundarios no están conectados eléctricamente, pero sí acoplados electromagnéticamente.

Un transformador se denomina como un transformador elevador o reductor dependiendo de si en el arrollamiento secundario la tensión eléctrica es mayor o menor que la tensión eléctrica aplicada al primario.

Por lo tanto, los transformadores pueden utilizarse para aumentar o reducir la tensión eléctrica dependiendo de la necesidad o su aplicación. Por esto, sus arrollamientos pueden denominarse también como de alta tensión/baja tensión (AT/BT) en lugar de arrollamientos primarios/secundarios.

## 1.2 Aplicaciones y Tipos de Transformadores

A continuación, se describe un breve recuento de la evolución de los transformadores, los diferentes tipos y las partes principales de los transformadores, entre las que están su circuito magnético, arrollamientos, sistemas de aislación, refrigeración y accesorios.

Previo de la invención de los transformadores, en los principios de la industria eléctrica, la energía se distribuía en corriente continua a baja tensión. La caída de tensión en las líneas limitó el uso de la electricidad únicamente a las zonas urbanas donde los consumidores eran atendidos con circuitos de distribución de pequeña longitud. Todo el equipo eléctrico tuvo que ser diseñado para la misma tensión. El desarrollo del primer transformador alrededor de 1885 cambió drásticamente los sistemas de transmisión y distribución. La energía de corriente alterna (CA) generada a baja tensión podría incrementarse para fines de transmisión a una tensión más alta y una corriente más baja, reduciendo las caídas de tensión y las pérdidas de transmisión. El uso de transformadores hizo posible transmitir la energía económicamente a cientos de kilómetros de la estación generadora. Los transformadores reductores luego reducen la tensión en las estaciones receptoras para la distribución de energía en niveles de tensión estandarizados para uso por parte de los consumidores. En **Figura 1-2** se muestra un diagrama unifilar de un sistema de potencia típico.



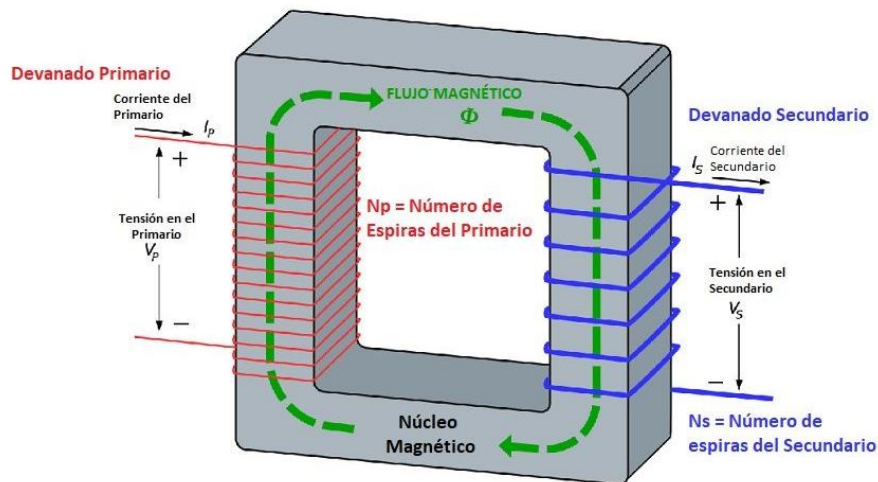
## 2 Conceptos Generales

### 2.1 Principio de funcionamiento

Un transformador se compone principalmente de dos elementos esenciales: el núcleo magnético y los arrollamientos. Estos elementos están interconectados con otros componentes diseñados para facilitar las conexiones mecánicas y eléctricas dentro y fuera de la cuba, así como para el transporte y la protección general de la máquina.

#### 2.1.1 El Núcleo

El núcleo es un componente esencial en transformadores. Este circuito magnético se forma mediante materiales de alta permeabilidad magnética que facilitan el paso

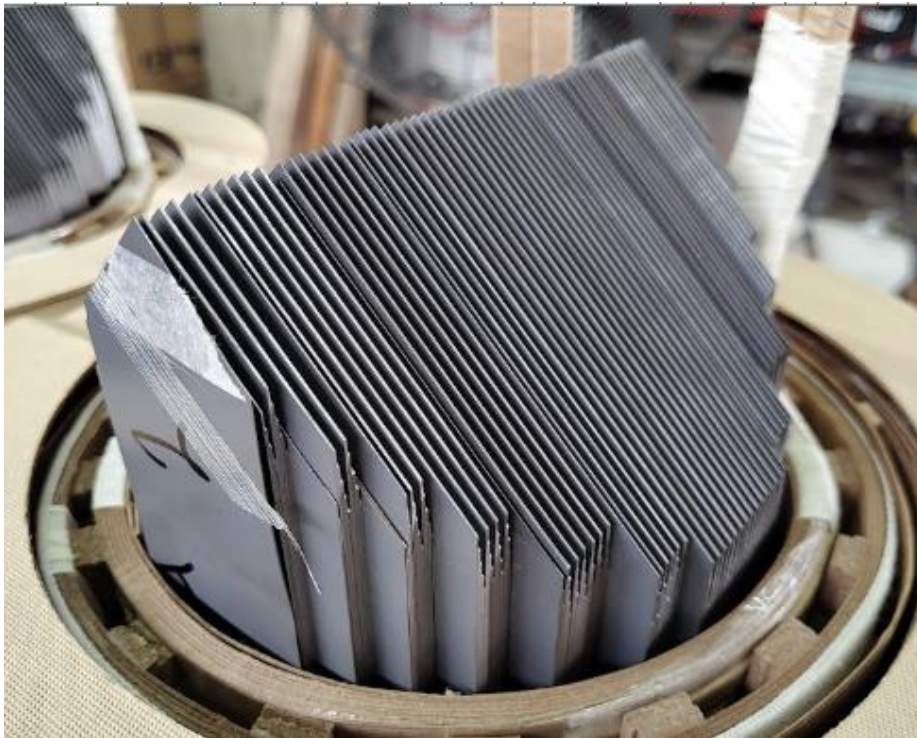


**Figura 2-1:** Esquema teórico de Núcleo de transformador

del flujo magnético. Su función principal es guiar y concentrar las líneas de fuerza del campo magnético, permitiendo su flujo de manera eficiente y controlada como se ve en **Figura 2-1**.

El núcleo está compuesto por finas láminas de acero silicio eléctricamente aisladas entre sí, lo que reduce las pérdidas y mejora la eficiencia. La sección del núcleo puede adoptar diferentes formas, como rectangular, circular, o una de las más utilizada que es la construcción cruciforme. La elección del tipo de acero y su

disposición en el núcleo dependen de la potencia nominal y el diseño del transformador, considerando aspectos de costo, rendimiento e inducción de trabajo como en las figuras de la **Figura 2-2**.



**Figura 2-2:** Núcleo de acero silicio en láminas eléctricamente aisladas.

Además, es importante tener en cuenta aspectos como la disipación adecuada del calor generado por el núcleo y su conexión a tierra por seguridad y para evitar potenciales eléctricos por acumulación electrostática. También se debe considerar la densidad de flujo máxima de trabajo, que se diseña próxima, pero por debajo de la zona de saturación para cumplir con los requerimientos de pérdidas y sobrecitaciones, considerando las tolerancias necesarias debido a los materiales y procesos de fabricación.

El comprender la estructura y funcionamiento del núcleo en un transformador es fundamental para su diseño eficiente, optimizando la transferencia de energía y minimizando las pérdidas. Estos conocimientos son esenciales en el campo de la ingeniería eléctrica y la producción de máquinas eléctricas.

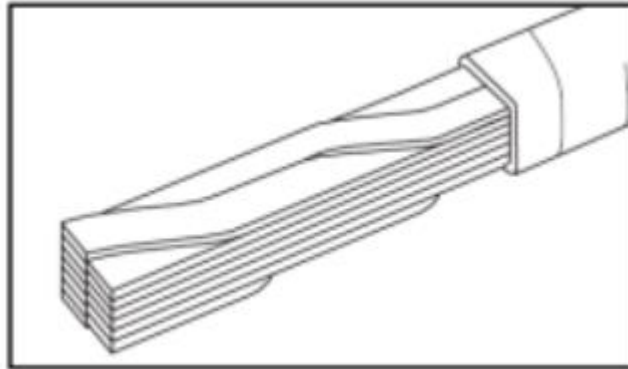
## 2.1.2 Arrollamientos

El arrollamiento es el conjunto de espiras formadas por un conductor eléctrico que forman el circuito eléctrico asociado con una de las tensiones correspondientes al transformador. Podemos ver una bobina real en la **Figura 2-3**. El arrollamiento con tomas es el aquél en que el número efectivo de espiras puede variar de forma escalonada.



**Figura 2-3:** Bobina de baja tensión durante montaje.

En general y por la sección del conductor necesaria el alambre de cobre esmaltado es el conductor más utilizado para el arrollamiento de Alta Tensión en transformadores de distribución (pequeña potencia), mientras que el conductor de cobre revestido de papel con sección rectangular es el más utilizado para todos los arrollamientos de transformadores de potencia medianos y grandes. Estos conductores pueden ser individuales o múltiples como los conductores continuamente transpuestos (CTC) **Figura 2-4**.



**Figura 2-4:** Conductores Continuamente Transpuestos (CTC)

### 2.1.3 Sistema de Aislamiento

En los arrollamientos se utiliza como aislante un papel especial (Presspahn); el cual es un material de aislamiento de superficies probado, resistente a altas tensiones y con una alta capacidad de impregnación de aceite de transformador. Este material **Figura 2-5**, hecho de pulpa de madera o papel kraft de grado eléctrico, se utiliza como aislante de superficies en aplicaciones de clase térmica A. Viene en varios espesores y formatos, y puede soportar altas cargas de calor durante cortos períodos.

El aislamiento principal (arrollamientos entre sí, arrollamiento y núcleo, etc.) consta de una serie de conductos de aceite formados por cilindros/barreras aislantes adecuadamente espaciados. También se utilizan balonas, tacos y pantallas de presspahn y otros componentes de aislamiento especiales.



**Figura 2-5:** Presspahn diamantado

El aceite mineral ha sido tradicionalmente el medio aislante eléctrico y refrigerante más utilizado en los transformadores. La alta rigidez dieléctrica del papel y cartón prensado impregnados de aceite es la principal razón para usarlo como el componente más importante del sistema de aislamiento del transformador.

## 2.2 Pérdidas en el transformador

Las pérdidas de energía activa en los transformadores se clasifican en tres grupos:

### 2.2.1 Pérdidas en vacío.

Las pérdidas de vacío en transformadores eléctricos se refieren a las pérdidas de energía activa que ocurren cuando el transformador está conectado a la tensión nominal pero no está trabajando en carga, o sea la corriente secundaria es nula. Estas pérdidas de vacío están localizadas en las laminaciones del núcleo y son causadas por dos fenómenos principales: histéresis y corrientes parásitas (Pérdidas de Foucault). Estas pérdidas también son muy influenciadas tanto por imperfecciones en la construcción del núcleo del transformador, como por rebabas en los cortes de las chapas del núcleo. Estas pérdidas se miden con vatímetros mediante un ensayo específico llamado “Ensayo de pérdidas de vacío”, según lo estipulado en la Norma IRAM 2106.



Es importante destacar que, en el ensayo de pérdidas de vacío, y dadas las muy bajas corrientes de magnetización (de vacío) que se logran, las pérdidas por efecto Joule debidas a la resistencia eléctrica en los arrollamientos, son despreciables en comparación con las pérdidas en el núcleo.

En resumen, las pérdidas de vacío se definen como la potencia activa medida cuando se aplica la tensión nominal a uno de los arrollamientos del transformador con los otros arrollamientos en circuito abierto. Estas pérdidas son esencialmente pérdidas en el núcleo y se consideran pérdidas fijas, ya que son prácticamente constantes e independientes de la carga del transformador. Estas pérdidas son muy importantes a la hora de evaluar la eficiencia de un transformador.

### 2.2.2 Pérdidas en cortocircuito

Las pérdidas en cortocircuito en un transformador se refieren a las pérdidas de energía activa que ocurren cuando se cortocircuita un arrollamiento y aplica al otro la tensión necesaria para que circule una intensidad de corriente comprendida entre el 25% y 100% de la Corriente nominal del transformador. La conexión para realizar el cortocircuito debe ser lo más corta posible y con una sección igual o mayor a los bornes del transformador.

Las pérdidas de cortocircuito en las condiciones de ensayo son indicadas por el vatímetro (o la suma algebraica de las lecturas de los instrumentos utilizados), teniendo en cuenta descontar el consumo instrumental obtenido por medio de cálculo con los datos de los instrumentos utilizados en la medición. En la actualidad se pueden utilizar transductores potencia para medir de forma directa las pérdidas durante el ensayo.

Cuando en el ensayo si se utiliza una corriente eléctrica distinta a la corriente nominal debe corregirse el valor obtenido multiplicando por

$$\left(\frac{I_{nom}}{I_{ens}}\right)^2 \quad (2.1)$$

Resultando: (2.2)

$$P_{cc_{ens}} = P_{ens} \times \left( \frac{I_{nom}}{I_{ens}} \right)^2$$

Como la temperatura influye en el valor de la resistencia de los arrollamientos, es muy importante referenciar la temperatura al momento de realizar los ensayos de medición de resistencias, pérdidas en cortocircuito y en el mismo ensayo de calentamiento. En el anexo de temperaturas se expande este tema y basándose en la Norma IRAM 2018.

Siendo  $t_1$  la temperatura de los arrollamientos en la medición de resistencia y  $t_2$  la temperatura de los arrollamientos durante el ensayo de cortocircuito.

Se calcula las pérdidas óhmicas para cada arrollamiento a la temperatura  $t_2$ :

$$R_{(t_2)} = \frac{(235 + t_2)}{(235 + t_1)} \times R_{(t_1)} \quad (2.3)$$

$$P_{joule} = R \times I^2 \quad (2.4)$$

$$P_{joule(t_2)} = R_{(t_2)} \times I_{nom}^2 \quad (2.5)$$

Estas pérdidas se deben a la resistencia de los arrollamientos del transformador, tanto en el primario como en el secundario. Se las conoce como Pérdidas en el arrollamiento o en el conductor (aluminio, cobre etc.) Son directamente proporcionales al cuadrado de la corriente ( $I^2$ ) y la resistencia ( $R$ ) de los arrollamientos. Se consideran parte de las pérdidas debidas a la carga del transformador y están presentes durante su operación normal.

### 2.2.3 Pérdidas adicionales

Las pérdidas adicionales en un transformador, también denominadas pérdidas parásitas, se originan en gran parte en los conductores de los arrollamientos debido al propio campo magnético de dispersión y al campo magnético que originan los cables o barras colectoras que transportan corrientes eléctricas elevadas. También se observan pérdidas adicionales en las partes de acero estructural del transformador, debido a estos campos magnéticos.



Las pérdidas adicionales en los conductores de los arrollamientos debido al propio campo de dispersión, pueden ser notables en transformadores grandes si no se seleccionan adecuadamente las dimensiones de los conductores y los métodos de transposición.

Esto puede contribuir significativamente a la pérdida total de carga del transformador, impactando su eficiencia.

Para reducir las pérdidas adicionales en las partes de acero estructural del transformador, es necesario tomar medidas, como optimizar las dimensiones y el diseño del transformador, y aplicar métodos de blindaje efectivos. El uso de herramientas de simulación, como el Método de Elementos Finitos (FEM), facilita el cálculo de estas pérdidas en componentes metálicos del transformador.

El cálculo de estas pérdidas es desafiante debido a la complejidad tridimensional y asimetría del transformador, así como a la no linealidad magnética. La evaluación precisa del campo de dispersión y sus efectos, la identificación de las contribuciones exactas de las pérdidas parásitas y las limitaciones de los métodos experimentales para transformadores de gran potencia complican el proceso. No obstante, con avances en herramientas de simulación y técnicas numéricas, se ha vuelto más factible abordar y controlar estas pérdidas adicionales en transformadores de potencia.

Si  $P_{cc}$  es la potencia medida

$$P_{cc} = P_{joule} + P_{ad} \quad (2.6)$$

$$P_{ad} = P_{cc} - P_{joule} \quad (2.7)$$

Llevando a la temperatura de referencia 75°C

$$P_{cc75^\circ C} = P_{joule 75^\circ C} + P_{ad 75^\circ C} \quad (2.8)$$

$$P_{cc75^\circ C} = \frac{310}{(235 + t_1)} \times P_{joule} + \frac{(235 + t_1)}{310} \times P_{ad} \quad (2.9)$$

$$P_{ad\ 75^{\circ}C} = P_{CC75^{\circ}C} - P_{joule\ 75^{\circ}C} \quad (2.6)$$

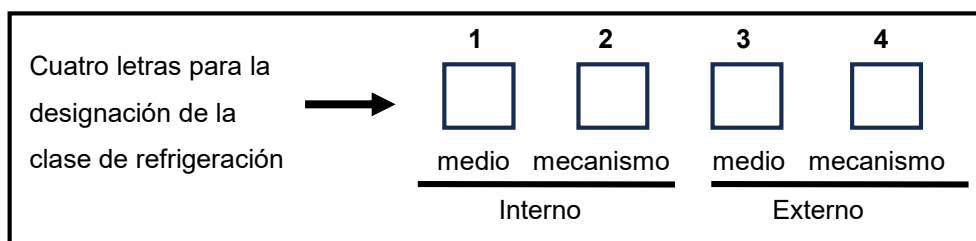
## 2.3 Métodos de Refrigeración para Transformadores

Como vimos, ningún transformador es realmente un transformador "ideal", cada uno tendrá un cierto grado de pérdidas de energía activa convertida en calor. Los métodos de eliminación de este calor pueden depender de la aplicación, el tamaño de la unidad, y la cantidad de calor que necesita ser disipada.

El medio de aislamiento dentro de un transformador, que por lo general es aceite, sirve a múltiples propósitos, en primer lugar, actuar como un aislante, y segundo, para proporcionar un buen medio a través del cual permita extraer el calor. Los arrollamientos y el núcleo son las principales fuentes de calor, aunque las estructuras internas metálicas también pueden actuar como una fuente de calor por las pérdidas adicionales. Es necesario tener conductos y espacios de refrigeración en la proximidad de las fuentes de calor a través de la cual el medio de enfriamiento puede fluir de manera que el calor puede ser extraído efectivamente del transformador. La circulación natural del aceite por el interior de un transformador a través de la convección, se denomina como efecto de convección natural. El calor es transportado por el medio aislante hasta las paredes del tanque para de aquí ser transferido al ambiente externo. Los radiadores que pueden ser desmontables, proveen un incremento del área de la superficie de disipación para la transferencia de calor por convección y radiación, sin aumentar el tamaño del tanque o cuba. En pequeños transformadores los tubos o aletas se utilizan para proporcionar este aumento en la superficie. Se pueden instalar ventiladores para aumentar el volumen de aire que se mueve a través de la superficie a enfriar, aumentando así la tasa de disipación de calor. Los transformadores más grandes que no pueden ser efectivamente enfriados con radiadores y ventiladores; usan bombas que circulan el aceite por el interior del transformador y por medio de intercambiadores de calor externos, o enfriadores, que puede utilizar el aire o el agua como medio de enfriamiento secundario.

Al uso de equipos auxiliares tales como ventiladores y bombas con enfriadores, se le llama circulación forzada, esta incrementa la refrigeración y por lo tanto la potencia activa (calor por pérdidas) disipada del transformador, sin aumentar el tamaño físico de la unidad.

Los métodos de refrigeración para los transformadores sumergidos en líquido se han organizado dentro de clases de refrigeración identificados por cuatro letras de designación como se muestra en la figura:



**Figura 2-6:** Código de letras para refrigeración

La Tabla 2-6 enlista el código de letras usadas para la designación de cuatro letras. Este sistema de identificación se logró mediante la estandarización entre las diferentes organizaciones internacionales de normalización

		Letra código	Descripción
<b>Interno</b>	Primera letra (Medio de refrigeración)	O	Líquido con punto de inflamación menor que o igual a 300°C
		K	Líquido con punto de inflamación mayor que o igual a 300°C
		L	Líquido con punto de inflamación no medible
	Segunda letra (Mecanismo de refrigeración)	N	Convección natural a través de equipo de refrigeración y arrollamientos
		F	Circulación forzada a través de equipos de refrigeración, convección natural en arrollamiento
		D	Circulación forzada a través de equipos de refrigeración, flujo dirigido en arrollamiento principales
<b>Externo</b>	Tercera letra (Medio de refrigeración)	A	Aire
		W	Agua
	Cuarta letra (Mecanismo de refrigeración)	N	Convección natural
		F	Circulación forzada

**Figura 2-7:** Tabla de código de refrigeración

### 2.3.1 Transformadores con refrigeración forzada

Estos transformadores usan ventiladores externos para mejorar la disipación de calor de los radiadores, y ciertas veces bombas internas para hacer circular el aceite por los radiadores y en ocasiones también a través de los ductos de enfriamiento existentes en el núcleo y los arrollamientos.

Un ejemplo de clasificaciones múltiples podría ser ONAN / ONAF1 / ONAF2, donde el transformador tiene una potencia nominal, donde 2 grupos de ventiladores están

encendidos para proporcionar la refrigeración necesaria para que el transformador sea capaz de soportar los kVA nominales para los cual fue diseñado (ONAF2). A medida que la carga disminuye, va disminuyendo el calor generado por las pérdidas en la carga y se van apagando en etapas grupos de ventiladores de la refrigeración forzada y va pasando a las diferentes clasificaciones (ONAF1) y por último se apagan todos los ventiladores y el funcionamiento es ONAN, donde se enfría por convección natural.

## 2.4 Accesorios:

Los aisladores pasatapas (Bushings) y el cambiador de tomas (que puede ser un conmutador sin tensión o un conmutador en carga) son algunos de los accesorios más importantes de un transformador.

También existen una serie de accesorios para la protección y control del transformador tales como: Termómetros, Imágenes térmicas, relé Buchholdz, Válvulas de sobrepresión, Niveles Magnéticos, etc.



**Figura 2-8:** Relé Buchholdz

### 2.4.1 Bushing

Un bushing, o aislador pasatapas, es un componente aislante con forma hueca que permite que un conductor eléctrico con tensión pueda atravesar la tapa de manera segura a través de un material aislante, sin establecer contacto eléctrico. Estos aisladores suelen fabricarse con porcelana, aunque se utilizan otros materiales aislantes.



**Figura 2-9:** Aisladores pasatapas o bushing.

### 2.4.2 Conmutadores de tomas

Un conmutador de tomas en un transformador es un mecanismo que permite ajustar la relación de tensión en pasos discretos. Esto se logra variando el número de espiras en un arrollamiento del transformador, lo que a su vez regula la tensión en el



otro arrollamiento. Existen dos tipos principales de conmutadores de tomas: el conmutador de tomas sin tensión CST o DTC (por sus siglas en inglés De-energized tap changer) que se acciona al desconectar el transformador del sistema eléctrico, generalmente se utilizan en transformadores de baja potencia. Para transformadores de mayor potencia, que deben mantenerse en servicio de manera continua y ajustar el número de espiras continuamente según la demanda del servicio, se emplean conmutadores especiales conocidos como CBC conmutadores bajo carga o OLTC (por sus siglas en inglés On-load tap changer).

Es importante destacar que los problemas en el conmutador de tomas son una de las principales causas de fallas en los transformadores. Los conmutadores de tomas, en particular los CBC son mecanismos complejos que requieren inspecciones regulares para garantizar un funcionamiento confiable. La confiabilidad del servicio de los CBC es esencial, ya que la continuidad de operación del transformador depende de su rendimiento a lo largo de su vida útil, que suele ser de 30 a 40 años.

Para mantener la confiabilidad de los CBC, se han desarrollado varios métodos de monitoreo y mantenimiento. Estos métodos incluyen la medición de la resistencia de contacto, el monitoreo del par/corriente del motor de accionamiento, análisis de gases disueltos, mediciones acústicas y la medición del aumento de temperatura.



**Figura 2-10:** Cambiador de tomas bajo carga (CBC).



## 3 Ensayo de Calentamiento

### 3.1 Objetivo:

Se realiza el desarrollo y estudio del ensayo de calentamiento de un transformador con la finalidad de:

- Determinar el calentamiento máximo del aceite (capa superior)
- Determinar el calentamiento medio de los arrollamientos de AT y BT
- Verificar la potencia nominal del Transformador según IRAM 2018

### 3.2 Normas

Las principales normas sobre el ensayo de calentamiento en que nos apoyaremos para el estudio son:

- IRAM 2099 - Transformadores de potencia. Generalidades.
- IRAM 2180 - Aislaciones eléctricas. Evaluación y clasificación térmica.
- IRAM 2018 "Calentamiento de transformadores sumergidos en líquidos
- IEC 60076-8:1997 - Power transformer - Part 8: Application guide. IEC 60076-2 // Edition 3.0 2011-02 / Power transformers –Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers
- IEC 61181:2007 - Mineral oil-filled electrical equipment - Application of dissolved gas analysis (DGA) to factory test on electrical equipment.
- Guía IEC 115:2007 - Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector.

### 3.3 Condiciones de refrigeración y servicio Normales

#### 3.3.1 Transformadores refrigerados por aire

Los límites normales de temperatura ambiente para transformadores de potencia se establecen en la IRAM 2099. En lo concerniente a los requisitos normales del calentamiento; las condiciones de temperatura ambiente en el lugar de instalación previsto, no deben exceder:

- +40°C en cualquier momento
- +30°C de media mensual (del mes más cálido)
- +20°C de media anual

Si la temperatura del medio de refrigeración externo en el lugar de instalación excede a uno o más de los valores normales anteriores, todos los límites de calentamiento indicados se deben corregir por el mismo valor que el exceso. Los valores obtenidos se deben redondear al número entero más próximo en Kelvin.

Los valores de referencia de temperatura ambiente recomendados y las correcciones del límite de calentamiento pertinentes se establecen en la tabla 1.

Temperaturas Ambiente (°C)			Corrección del calentamiento (K) <sup>a</sup>
Media anual	Media mensual	Maxima	
20	30	40	0
25	35	45	-5
30	40	50	-10
35	45	55	-15

Tabla 1- Valores recomendados de correcciones del calentamiento en condiciones de servicio especiales

#### 3.3.2 Altitud

Si el lugar de la instalación está situado a más de 1 000 m sobre el nivel del mar, pero el laboratorio de ensayos del fabricante no lo está, entonces los calentamientos admisibles durante los ensayos en fábrica se deben reducir de la manera siguiente:



Para un transformador con refrigeración natural (... AN): el límite de calentamiento del líquido en la parte superior, el calentamiento medio y el calentamiento del punto más caliente de los arrollamientos se deben reducir en 1 K por cada intervalo de 400 m en los que la altitud de la instalación supere los 1000 m sobre el nivel del mar;

para un transformador con refrigeración forzada (... AF): la reducción debe ser de 1 K por cada 250 m que supere los 1000 m sobre el nivel del mar.

Una corrección inversa correspondiente se puede aplicar en los casos donde la altitud del laboratorio de ensayos del fabricante sea mayor que 1000 m sobre el nivel del mar y la altitud de la instalación sea menor que 1000 m sobre el nivel del mar.

Toda corrección de altitud se debe redondear al número entero más próximo de grados Kelvin.

### **3.3.3 Forma de onda**

La Forma de onda de la tensión de alimentación debe ser una tensión de alimentación sinusoidal, con un contenido total de armónicos menor o igual al 5% y un contenido de armónicos pares menor o igual del 1%.

### **3.3.4 Contenido de armónicos de la carga.**

Una corriente de carga cuyo contenido total de armónicos debe ser menor o igual al 5% de la corriente nominal.

## **3.4 Métodos de ensayo**

Existen diferentes métodos para realizar el ensayo para la determinación del calentamiento:

### **3.4.1 MÉTODO 1 “Método de cortocircuito”**

El método de ensayo de calentamiento por cortocircuito es una técnica utilizada para evaluar el comportamiento térmico de transformadores sumergidos en aceite sin aplicarles la carga completa. En este ensayo, se conecta el transformador en cortocircuito en el lado de baja tensión y se aplica un voltaje reducido en el lado de

alta tensión, generando una corriente igual o próxima a la nominal. Esto permite simular las condiciones de operación en carga y medir el calentamiento de temperatura en el aceite y en sus arrollamientos.

El ensayo se realiza hasta alcanzar la estabilidad térmica, es decir, cuando la temperatura se estabiliza. Los resultados permiten evaluar si el transformador puede disipar el calor generado en condiciones de carga y verificar el cumplimiento de los estándares de calentamiento establecidos.

Este método es el que se utiliza más comunmente en la práctica. Alternativamente, se puede convenir para casos particulares, utilizar los otros 2 métodos que se van a mencionar a continuación.

### **3.4.2 MÉTODO 2 “Ensayo conexión a carga de diseño”**

Ensayo con la tensión y la corriente aproximadamente a valores nominales mediante la conexión a una carga conveniente. (Únicamente aplicable a los transformadores de pequeña potencia nominal).

### **3.4.3 MÉTODO 3 “El método de oposición”**

En éste método se requieren dos transformadores iguales, uno de los cuales es el transformador ensayado. Ambos se conectan en paralelo y se alimentan con la tensión nominal del transformador en ensayo. Mediante diferentes relaciones de transformación o con la ayuda de otro transformador auxiliar que aplica una tensión auxiliar, se hace circular la corriente nominal en el transformador en ensayo. Este ensayo de oposición, conocido a veces con los nombres de ensayo de potencia circulante, fue ideado por Gisbert Kapp. Este método de ensayo tiene como ventaja que el transformador ensayado está al mismo tiempo a Tensión Nominal y a Corriente Nominal.



**Figura 3-1:** Transformadores de 1000 kVA en ensayo de calentamiento por método de oposición.

## 4 Transformador de Potencia Ensayado

Se utiliza un Transformador de 20 MVA para su estudio y posterior análisis.

### 4.1 Características del Transformador

El transformador ensayado es el N°: 67395, Modelo: Subtransmisión ST20MVA con condición de refrigeración ONAF/ONAN (IRAM 2476). Cuenta con CBC conmutador bajo carga con 21 tomas de regulación (+10% y -10%  $U_n$ ).

Potencia nominal ( $P_{nom}$ ): 20000 kVA

Tensión primaria nominal ( $U_{n1}$ ): 33 kV

Tensión secundaria nominal ( $U_{n2}$ ): 13,86 kV



**Figura 4-1:** Transformador 91986 de SubTransmisión 20MVA 33 kV 13,86 kV



El ensayo se realiza por el Método de Cortocircuito y en la toma del conmutador de máxima corriente, como indica la IRAM 2018 para transformadores de potencia nominal mayor a 2500 kVA.

En este caso se realiza en la toma N° 21, siendo la tensión de este punto es 85% de la  $U_n$  (punto de regulación -15%).

$$\text{Tensión pt.21 } (U_{p21}): \quad 33 \times (1 - 10\%) = 29.7 \text{ kV}$$

Corriente pt.21 ( $I_{p21}$ ):

$$I_{p21} = \frac{P_{nom}}{U_{p21} \times \sqrt{3}} = 388,8 \text{ A} \quad (4.1)$$

Y tomando los resultados de medición de pérdidas de los ensayos de rutina realizados en el Laboratorio de la Empresa (ANEXO C Tipos de Ensayos y Protocolo de Ensayos [según IRAM 2099]

$$\text{Pérdidas de Vacío } (P_o): \quad P_o = 12429 \text{ W}$$

$$\text{Pérdidas en cortocircuito } (P_{cc}): \quad P_{cc} = 100951 \text{ W}$$

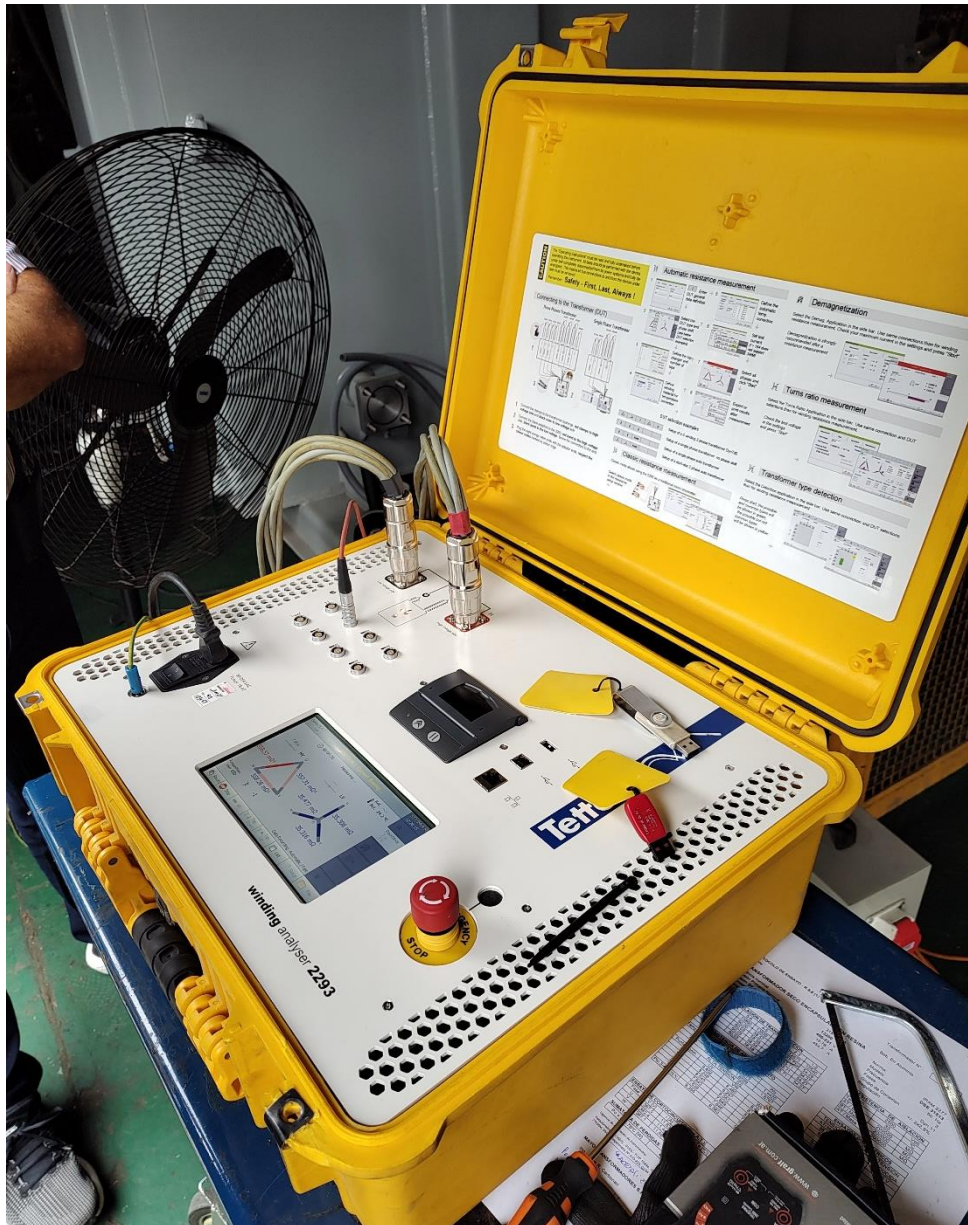
Punto 21 (Máxima Corriente) a 75°C

$$\text{Pérdidas totales } (P_{tot}): \quad P_{tot} = 113380 \text{ W}$$

En este punto del conmutador de máxima corriente, se mide la resistencia a temperatura ambiente del arrollamiento antes de iniciar el ensayo de calentamiento. Esta medición se detalla en el ANEXO B Procedimiento para la medición de resistencia del arrollamiento y corresponde a la "resistencia en frío", ya que se realiza antes del inicio del calentamiento del transformador. A continuación, se presentan los resultados de esta medición, obtenidos a una temperatura ambiente de 22,3°C, en cada una de las posiciones del CBC (Conmutador Bajo Carga).

Para la medición de la resistencia del arrollamiento, se utilizó un Analizador de Arrollamiento (Winding Analyzer), pero se podría haber utilizado cualquier otro método compatible con la jerarquía de medición pretendida y la medición de

resistencias altamente inductivas tales como el método de Amperímetro y Voltímetro o puente de Kelvin.



**Figura 4-2:** Analizador de Arrollamiento (Winding Analyzer)

Este analizador automático de resistencia de arrollamientos, es un equipo optimizado para realizar mediciones en transformadores de potencia y distribución trifásicos. Este equipo combina varias funciones en un solo instrumento, haciendo



más eficiente el proceso de medición. Entre sus funciones se incluyen: Medición de resistencia de arrollamientos, Medición de relación de transformación, Desmagnetización del núcleo, Detección del grupo de conexión del transformador y toma de datos para el Ensayo de calentamiento. Sus principales ventajas son:

- Sistema de “conexión única”: Una vez que el dispositivo se conecta al transformador, todos los ensayos pueden realizarse consecutivamente sin necesidad de reconexión, lo que reduce drásticamente el tiempo de medición.
- Método de magnetización simultánea de bobinados: Esto garantiza mediciones rápidas y confiables de resistencia. Incluso en grandes transformadores de potencia con conexión en triángulo en el lado de baja tensión (resistencias extremadamente inductivas) y lográndose mediciones estables.
- Función de desmagnetización: Esta elimina la remanencia magnética, que puede causar, altos picos de corriente de conexión (inrush) y un mal funcionamiento de los relés de protección.

Resultado de las mediciones de resistencias de los arrollamientos y en todos los puntos del conmutador, a temperatura ambiente y referida a 75°C.

### MEDICION DE RESISTENCIA DE ARROLLAMIENTO

Temp [°C]	BAJA TENSION [mΩ]			Temp [°C]	BAJA TENSION [mΩ]		
	Un	Vn	Wn		Un	Vn	Wn
29,3	13,436	13,459	13,355	75,0	15,76	15,79	15,66

Temp [°C]	ALTA TENSION [mΩ]			Posición RBC	Temp [°C]	ALTA TENSION [mΩ]			
	UV	VW	WU			UV	VW	WU	
29,3	245,97	245,83	245,08	1	10,00%	75,0	288,50	288,34	287,46
	243,71	243,77	242,88	2	9,00%		285,85	285,92	284,88
	241,48	241,57	240,62	3	8,00%		283,23	283,34	282,23
	239,28	239,14	238,34	4	7,00%		280,65	280,49	279,55
	236,96	236,89	236,12	5	6,00%		277,93	277,85	276,95
	234,65	234,60	233,75	6	5,00%		275,22	275,16	274,17
	232,37	232,16	231,37	7	4,00%		272,55	272,30	271,38
	230,05	230,04	229,07	8	3,00%		269,83	269,82	268,68
	227,85	227,92	227,10	9	2,00%		267,25	267,33	266,37
	225,53	225,73	224,90	10	1,00%		264,53	264,76	263,79
	221,48	221,11	221,43	11A	0,00%		259,78	259,34	259,72
	<b>221,48</b>	<b>221,11</b>	<b>221,43</b>	<b>11B</b>	<b>0,00%</b>		<b>259,78</b>	<b>259,34</b>	<b>259,72</b>
	221,48	221,11	221,43	11C	0,00%		259,78	259,34	259,72
	225,47	225,06	224,00	12	-1,00%		264,46	263,98	262,73
	227,67	227,30	86,00	13	-2,00%		267,04	266,60	100,87
	229,94	229,42	229,24	14	-3,00%		269,70	269,09	268,88
	232,30	231,84	231,73	15	-4,00%		272,47	271,93	271,80
	234,43	233,89	233,62	16	-5,00%		274,97	274,33	274,02
	236,73	236,04	235,84	17	-6,00%		277,66	276,85	276,62
	239,13	238,83	238,23	18	-7,00%		280,48	280,13	279,42
	241,34	240,93	240,69	19	-8,00%		283,07	282,59	282,31
243,44	242,88	242,64	20	-9,00%	285,53	284,88	284,59		
243,35	242,84	242,63	21	-10,00%	285,43	284,83	284,58		

Figura 4-3: Medición Resistencia de arrollamiento en frio

Previo al ensayo, se realiza una medición en el punto donde se va a realizar el ensayo de calentamiento. Se toman las mediciones en el Punto 21, de la fase Vn en Baja tensión y VW en alta Tensión.

Temperatura ambiente:

$$\theta_{in} = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Resistencia en arrollamiento Alta Tensión (Punto 21):

$$Ra = 241.53 \times 10^{-3} \text{ } \Omega$$

Resistencia en arrollamiento Baja Tensión:

$$Rb = 13.248 \times 10^{-3} \text{ } \Omega$$

## 4.2 Procedimientos para el ensayo

Se describen los procedimientos para la determinación y medición de valores de temperaturas durante los ensayos en fábrica en la sección de ANEXO A Determinación de Temperaturas.



### 4.2.1 Durante el ensayo de calentamiento:

- El transformador se debe equipar con todos sus dispositivos de protección (relé Buchholz, válvula de sobrepresión, termómetros, imagen térmica etc). Cualquier indicación o actuación de estos dispositivos durante el ensayo se debe registrar e investigar las causas.
- La temperatura del aire de refrigeración en el momento del ensayo, debe estar entre 10 °C y la temperatura ambiente máxima para la que se diseña el transformador.
- Se debe disponer la cantidad suficiente de sensores de temperatura o termómetros para determinar la temperatura ambiente y las temperaturas del aceite del transformador.
- Las lecturas se deben realizar a intervalos regulares (por ejemplo, cada 30 minutos,).
- Los termómetros para temperatura ambiente se deben distribuir alrededor de la cuba, aproximadamente a 2 m del perímetro de la cuba.

Se deben tomar precauciones para minimizar las variaciones de temperatura del aire de refrigeración, de manera que provoque unas condiciones ambientales estables (en particular durante la parte final del período de ensayo cerca del régimen estable).

## 4.3 Definición de calentamiento

El calentamiento del aceite en la parte superior ( $\Delta\theta_{ac}$ ) se debe determinar por la diferencia entre la temperatura del aceite en la parte superior de la cuba medida al final del periodo de ensayo con pérdidas totales ( $\theta_{ac}$ ) y la temperatura del medio de refrigeración externo al final del periodo de ensayo con pérdidas totales ( $\theta_{amb}$ ), esto es:

$$\Delta\theta_{ac} = \theta_{ac} - \theta_{amb} \quad (4.2)$$

El calentamiento del aceite en la parte inferior de la cuba ( $\Delta\theta_{acinf}$ ) se debe determinar por la diferencia entre la temperatura del aceite en la parte inferior

( $\theta_{acinf}$ ) medida o calculada según ANEXO A y la temperatura del medio de refrigeración externo ( $\theta_{amb}$ ), esto es:

$$\Delta\theta_{acinf} = \theta_{acinf} - \theta_{amb} \quad (4.3)$$

El calentamiento en el medio aceite ( $\Delta\theta_{om}$ ) se debe determinar por diferencia entre la temperatura media del aceite ( $\theta_{om}$ ) calculada según ANEXO A y la temperatura del medio de refrigeración externo ( $\theta_{amb}$ ), esto es:

$$\Delta\theta_{om} = \theta_{om} - \theta_{amb} \quad (4.4)$$

## 4.4 Desarrollo del Ensayo por el Método de Cortocircuito

Durante este ensayo, el transformador tiene uno de sus arrollamientos en cortocircuito (generalmente el lado de Baja Tensión) y se somete a una tensión y corriente diferentes de las nominales por los otros (arrollamientos de Alta Tensión), inyectando las pérdidas totales calculadas previamente en los ensayos de pérdidas de cortocircuito y pérdidas en vacío

Como ya mencionamos, para transformadores trifásicos de hasta 2500 kVA, los límites de calentamiento se aplican en la toma principal correspondiente a la tensión nominal. En el caso de transformadores trifásicos con potencia nominal superior a 2500 kVA, o si las extensiones de tomas exceden  $\pm 5\%$ , los límites de calentamiento deben aplicarse en todas las tomas, a la potencia, tensión y corriente correspondientes a la posición del conmutador que soporta la máxima corriente.

Este ensayo de calentamiento se realiza en tres etapas, las cuales son:

### 4.4.1 ETAPA 1

#### “Inyección de pérdidas totales para alcanzar régimen estable”

En esta primera etapa, se determina el calentamiento de la capa superior y el calentamiento medio del líquido refrigerante. Para ello, se aplica al transformador ensayado una tensión de ensayo que genera una potencia activa igual a las

pérdidas totales del transformador. Esta tensión de ensayo produce una corriente mayor a la nominal o a la correspondiente al punto del conmutador en el momento del ensayo, suficiente para generar una cantidad adicional de pérdidas que igualarían a las pérdidas en vacío, incrementando así el calentamiento de los arrollamientos.

Se toman y registran las lecturas de temperatura del aceite en la parte superior y en el medio de refrigeración en intervalos regulares. El ensayo continúa hasta alcanzar el régimen estable, definido como el momento en que la tasa de cambio del calentamiento del líquido en la parte superior es menor que 1 K/h durante un período continuo de 3 horas. El valor promedio de las lecturas de la última hora se considera como resultado del ensayo (temperatura del líquido en la parte superior).

Para medir las temperaturas, se pueden utilizar distintos instrumentos:



**Figura 4-4:** Elementos de medición de temperatura.

Termómetro de alcohol o mercurio: Permite medir la temperatura del aceite.

Termocupla con imán: Ideal para medir en lugares de difícil acceso, como las salidas superior e inferior de los radiadores.

La potencia, tensión y corriente se miden mediante un banco de medición que incluye transformadores de corriente (CTs) de relación 500/5 A y transformadores de tensión (VTs) de 3,3/0,11KV. Un transductor de potencia digital mide las variables de potencia, corriente y tensión en cada fase, lo cual es ilustrado en Figura 4-5, mostrando el banco de medición y sus componentes.



**Figura 4-5:** Banco de medición y transductor de potencia.

Se controlan las temperaturas del aceite en la parte superior y del medio de refrigeración (aire en este caso). Esta etapa finaliza cuando se establecen los calentamientos de líquido en régimen estable y el ensayo determina el calentamiento máximo en la capa superior del aceite.

Temperatura del aceite en la parte superior de la cuba medida es:

$$\theta_{ac} = 63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{amb} = 33.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$



## 4.4.2 ETAPA 2

### “Inyección con corriente nominal durante una hora”

Una vez que se ha alcanzado el régimen estable de calentamiento en la capa superior del aceite, el ensayo continúa inmediatamente, ajustando la corriente de ensayo al valor de corriente nominal (o a la correspondiente al Punto 21, en este caso):

$$I_{ensat} = 380 \text{ A}$$

Se mantiene durante 1 hora a esta corriente de ensayo, registrando cada 5 minutos la temperatura en el punto más caliente transformador (cuando es posible medirlo) y en el medio de refrigeración externo (temperatura ambiente,  $\theta_{amb}$ )

Para optimizar el tiempo del ensayo, ambas etapas se pueden combinar mediante la inyección de una potencia que se sitúe entre las pérdidas debidas a la carga y las pérdidas totales del transformador. La potencia inyectada debe representar, como mínimo, el 80% de las pérdidas totales. Si durante el ensayo de calentamiento no se alcanza el valor de corriente o potencia especificado, los resultados deben ajustarse según las especificaciones establecidas en el Anexo D “Correcciones”.

Pérdidas totales ( $P_{tot}$ ):	$P_{tot} = 113380 \text{ W}$	
Potencia de ensayo	$P_{enc} = 96000$	W
Temperatura final del aceite parte superior	$\theta_{ac} = 63$	°C
Temperatura final del aceite parte inferior	$\theta_{acinf} = 39$	°C
Temperatura Ambiente	$\theta_{amb} = 33.9$	°C

Al final de esta etapa, se obtiene la caída de la temperatura media del líquido en la última hora de ensayo bajo corriente nominal.  $\Delta\theta_{ofm}$  Como en este ensayo no se hizo a la potencia total y luego bajar a corriente nominal, este valor  $\Delta\theta_{ofm}$  es igual a 0. En este estudio, el ensayo del transformador de 20 MVA se le inyecta una potencia mayor al 80% de sus pérdidas totales y se ajustan los resultados según el Anexo D, permitiendo optimizar tanto los recursos como el tiempo de ensayo.

Podemos calcular el calentamiento del aceite con las correcciones detalladas del ANEXO D “Correcciones”

#### 4.4.3 Determinación del calentamiento de la parte superior del aceite en el instante del corte

La temperatura media del líquido:

$$\theta_{om} = \frac{(\theta_{ac} + \theta_{acinf})}{2} \quad (4.5)$$

Donde:

$\theta_{acinf}$  la temperatura del aceite en la parte inferior

$\theta_{ac}$  la temperatura del aceite en la parte superior

La determinación del calentamiento máximo del aceite (capa superior) corregido es:

$$Coil = (\theta_2 - \theta_{amb}) \times \left(\frac{P_{tot}}{P_{ens}}\right)^{0.9} = 36.124 \text{ °C} \quad (4.6)$$

donde:

$\theta_2$  la temperatura media del arrollamiento en el instante del corte,

$\theta_{amb}$  la temperatura del medio de refrigeración  $\theta_{amb}$

#### 4.4.4 ETAPA 3

##### “Desconexión y medición de Resistencia de arrollamientos”

En la última etapa se debe determinar la temperatura media del arrollamiento ensayado, y como éste no es accesible desde el exterior del transformador para su medición directa, se determina mediante cálculos utilizando el valor de la resistencia medida en frío y la resistencia del arrollamiento en el instante del corte. Para esto es fundamental una desconexión rápida de la alimentación y del cortocircuito. ANEXO B

Pero como que por más rápido que se realicen la desconexión y el armado del circuito de medición de resistencia, siempre pasarán unos minutos en los cuales los arrollamientos se irán enfriando. Por lo tanto, la resistencia del arrollamiento ( $R_2$ )



instante antes del corte se debe determinar mediante una regresión y extrapolación en el tiempo, utilizando las reglas que se indican a continuación.

Al mismo tiempo de la desconexión de la fuente de energía de ensayo se inicia la medición del tiempo mediante un cronómetro; se retira la conexión del cortocircuito y se conecta el circuito de medición de resistencias a los terminales del arrollamiento correspondientes a medir. Se toman una cantidad de pares de valores Tiempo-Resistencia (10 pares de valores como mínimo) de modo de tener datos suficientes para una regresión y determinar el valor confiable de la resistencia del arrollamiento en el momento del corte.



**Figura 4-6:**Medición de la resistencia de los arrollamientos con el Analizador de arrollamientos



Los pares de valores adquiridos durante el ensayo son:

$$T_{ms} = \begin{bmatrix} 2 & 24 \\ 2 & 34 \\ 2 & 44 \\ 2 & 54 \\ 3 & 04 \\ 3 & 14 \\ 3 & 24 \\ 3 & 34 \\ 3 & 44 \\ 3 & 54 \end{bmatrix} [min] \quad R = \begin{bmatrix} 218.11 \\ 277.83 \\ 277.59 \\ 277.38 \\ 277.17 \\ 276.97 \\ 276.77 \\ 276.58 \\ 276.39 \\ 276.21 \end{bmatrix} * 10^{-3} [\Omega]$$

$$t_{ms} = \begin{bmatrix} 2 & 24 \\ 2 & 34 \\ 2 & 44 \\ 2 & 54 \\ 3 & 04 \\ 3 & 14 \\ 3 & 24 \\ 3 & 34 \\ 3 & 44 \\ 3 & 54 \end{bmatrix} [min] \quad r = \begin{bmatrix} 15.491 \\ 15.468 \\ 15.455 \\ 15.442 \\ 15.431 \\ 15.419 \\ 15.409 \\ 15.399 \\ 15.388 \\ 15.378 \end{bmatrix} * 10^{-3} [\Omega]$$

Las mediciones de tiempo y resistencia,  $T_{ms}$  y  $R$  pertenecen al arrollamiento de Alta tensión; y las mediciones  $t_{ms}$  y  $r$  al arrollamiento de baja tensión.

Los arrollamientos de los transformadores de potencia tienen una constante de tiempo electromagnética elevada ( $L/R$ ). Por esta razón las lecturas precisas solamente se obtienen después de un cierto tiempo desde el inicio de la medición y por lo general la primera medición se puede desestimar.

El tiempo se puede reducir minimizando tanto como sea posible el tiempo entre el corte y la conexión del circuito de medición de resistencia, así como reduciendo la constante de tiempo electromagnético mediante una adecuada elección de los parámetros del circuito de medición. En éste caso al usar un instrumento específico para medir resistencias de arrollamientos utilizamos el analizador de arrollamientos (Winding Analyzer) con capacidad de medir los dos a la vez y con la configuración más adecuada, se minimizan los tiempos.

Para simplificar los cálculos el tiempo se trabaja  $T_{ms}$  y  $t_{ms}$  en segundos

$$T_{ms} = \begin{bmatrix} 144 \\ 154 \\ 164 \\ 174 \\ 184 \\ 194 \\ 204 \\ 214 \\ 224 \\ 234 \end{bmatrix} [s] \quad y \quad t_{ms} = \begin{bmatrix} 144 \\ 154 \\ 164 \\ 174 \\ 184 \\ 194 \\ 204 \\ 214 \\ 224 \\ 234 \end{bmatrix} [s]$$

Las condiciones de refrigeración no se deben perturbar durante el tiempo en que se realizan las mediciones de resistencia. Si tuviesen bombas de aceite (OF) y están funcionando durante el ensayo de calentamiento, se deben mantener durante las mediciones (No es este caso ya que el transformador ensayado es ONAF).

En el Anexo B de resistencias se dan las recomendaciones para la ejecución detallada de la medición.

Los valores de temperatura media de los dos arrollamientos se determinan a partir de las variaciones de resistencias medidas, y además tomando en consideración el decrecimiento de la temperatura del líquido cuando se reduce la corriente al valor nominal, así como la variación de la temperatura del medio de refrigeración externo.

## 4.5 Determinación de la temperatura media del arrollamiento

Como ya mencionamos la temperatura media del arrollamiento se determina midiendo la resistencia óhmica del arrollamiento; normalmente en la fase central de los arrollamientos si el transformador es trifásico (Se supone que es la más caliente por su ubicación).

Previamente se debe realizar una primera medición de referencia de todas las resistencias ( $R_a$ ,  $\theta_{in}$ ), la cual se lleva a cabo con el transformador a temperatura ambiente, en una condición estable según la norma IRAM 2099)

Cuando se mide la resistencia ( $R$ ) a una temperatura diferente, se obtiene el valor de temperatura  $\theta_{wm}$  siguiente:

Para Cobre:



$$\theta_{wm} = \frac{R}{R_a} \times (235 + \theta_{in}) - 235 \quad (4.7)$$

Para Aluminio:

$$\theta_{wm} = \frac{R}{R_a} \times (225 + \theta_{in}) - 225 \quad (4.8)$$

siendo:

$\theta_{wm}$  la temperatura media del arrollamiento luego del corte.

Utilizando El software de cálculo MathCad y los datos de las mediciones de las resistencias de los arrollamientos obtenidas durante la etapa 3 del ensayo y la fórmula (4.6) pasamos los valores Resistencia en función del tiempo a valores de Temperatura Media del arrollamiento en función del tiempo.

Los arrollamientos tienen una constante de tiempo eléctrica elevada (L/R). Por esta razón las lecturas precisas se obtienen después de un cierto tiempo. Adicionalmente se tienen que contemplar los tiempos de ejecución de las conexiones y el tiempo para la estabilizar la corriente continua. Se excluye la primera medición, porque la desviación entre el primer y segundo cálculo es mayor que 0.5K.

Lado alta tensión AT

$$\theta_{wm} = \begin{bmatrix} 68,376 \\ 66.116 \\ 65.888 \\ 65.661 \\ 65.444 \\ 65.227 \\ 65.021 \\ 64.814 \\ 64.619 \end{bmatrix} [^{\circ}C]$$

Lado baja tensión

$$\theta_{wmbt} = \begin{bmatrix} 70.904 \\ 70.647 \\ 70.390 \\ 70.172 \\ 69.935 \\ 69.737 \\ 69.539 \\ 69.322 \\ 69.124 \end{bmatrix} [^{\circ}C]$$

## 5 Cálculos utilizados en el ensayo de calentamiento

### 5.1 Método basado en el anexo A de la norma 2018

En la IRAM 2018 el anexo A de la norma IRAM 2018 propone un método numérico para realizar el cálculo de los calentamientos del transformador, junto con su determinación de la potencia.

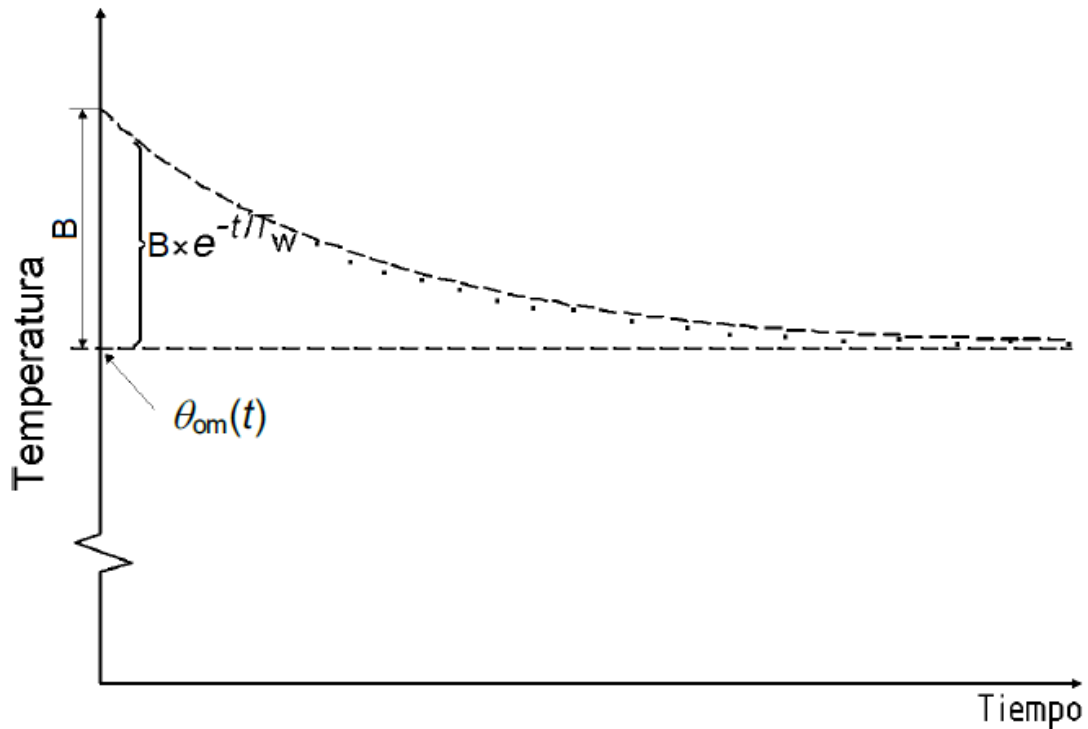
Se realiza el cálculo del ensayo de calentamiento descrito en el anexo A, para el caso de estudio.

### 5.2 Extrapolación según IRAM 2018

Durante la medición de resistencia (Ver Anexo B “Procedimiento para la medición de resistencia del arrollamiento”), los instrumentos utilizados para la medición pueden ser por lectura manual o por registro automático, analógicos o digitales. Se tiene que realizar un número considerable de lecturas equidistantes durante un periodo de tiempo, y estas lecturas se tienen que evaluar para la extrapolación hacia atrás en el tiempo hasta el instante del corte.

El primer paso del procedimiento de extrapolación es para pasar de la variación de resistencia a la temperatura del arrollamiento. Como fue determinado anteriormente en “Determinación de la temperatura media del ensayo”.

Un trazado de la temperatura del arrollamiento en función del tiempo tendría la forma que se muestra en la figura, donde la temperatura del arrollamiento desciende relativamente rápido durante un periodo de algunos minutos y después se estabiliza.



**Figura 5-1:** Variación de la temperatura media del arrollamiento después del corte

En algún caso, particularmente cuando se ensayan transformadores de gran potencia con refrigeración forzada, y el equipo de refrigeración permanece funcionando después del corte de la potencia de ensayo, puede ser necesario reconocer una asíntota descendente, sobre la que se superpone la variación inicial más rápida.

El descenso de la temperatura media del arrollamiento  $\theta_w(t)$  con el tiempo  $t$  se puede expresar con la relación exponencial:

$$\theta_w(t) = \theta_{om}(t) + B \times e^{\frac{-t}{T_w}} \quad (5.1)$$

donde:

$\theta_{om}(t)$  una estimación para la temperatura media del líquido utilizando una función de descenso lento o constante.

$B$  una estimación del gradiente arrollamiento- líquido en el instante del corte

$T_w$  una estimación para la constante de tiempo del arrollamiento con un descenso de la temperatura de forma exponencial.

$\theta_{om}(t)$  se puede considerar como una constante, una variación lineal o un descenso exponencial según el tipo y tamaño del Transformador. Estas son las posibles estimaciones de la temperatura media que se puede adoptar para el aceite:

$$\theta_{om}(t) = A_o \quad (5.2)$$

$$\theta_{om}(t) = A_o \times (1 - k \times t) \quad (5.3)$$

$$\theta_{om}(t) = A_o \times e^{\frac{-t}{T_o}} \quad (5.4)$$

siendo

$T_o$  una estimación de la constante de tiempo térmica del líquido.

En un transformador con constante de tiempo térmica muy grande; la variación de temperatura del líquido se puede suponer que su asíntota es un valor constante

$$A_o \times (1 - k \times t) \approx A_o.$$

El resultado de la extrapolación estimada para el momento del corte ( $t = 0$ ) es la siguiente:

$$\theta_w(t = 0) = A_o + B \quad (5.5)$$

Que corresponde a la temperatura media del arrollamiento en el instante del corte.

### 5.3 Procedimiento para hacer la Extrapolación

La extrapolación de la curva de enfriamiento se debe realizar utilizando un procedimiento numérico mediante programas de computación, que adapte una función analítica para un conjunto de valores de tiempo - temperatura

El procedimiento numérico descrito a continuación se puede utilizar para adaptar una función analítica a un conjunto de lecturas de temperaturas equidistantes en el tiempo.

La ventaja de este método es que la mejor estimación de la temperatura media del arrollamiento se determina de un modo objetivo.

Ajuste de los  $n$  valores medidos de resistencia (temperatura) en función del tiempo, a una curva exponencial del tipo:

$$\theta(t) = A_0 + B \times e^{-\frac{t}{T_w}} \quad t = t_1, t_2 \dots t_n \quad (5.6)$$

Diferencia entre dos puntos medidos consecutivos, con una diferencia de tiempo constante en  $\Delta t$ .

$$\Delta\theta(t_i) = \theta(t_i + \Delta t) - \theta(t_i) \quad (5.7)$$

$$\Delta\theta(t_i) = A_0 + B \times e^{-\frac{t_i + \Delta T}{T_w}} - \left( A_0 + B \times e^{-\frac{t_i}{T_w}} \right) = B \times e^{-\frac{t_i}{T_w}} \times e^{-\frac{\Delta T}{T_w}} - B \times e^{-\frac{t_i}{T_w}} \quad (5.8)$$

$$\Delta\theta(t_i) = B \times e^{-\frac{t_i}{T_w}} \times \left( e^{-\frac{\Delta T}{T_w}} - 1 \right) \quad (5.9)$$

Obtenemos de (5.6):

$$\theta(t_i) = A_0 + B \times e^{-\frac{t_i}{T_w}} \Rightarrow B \times e^{-\frac{t_i}{T_w}} = \theta(t_i) - A_0 \quad (5.10)$$

Reemplazando en (5.9):

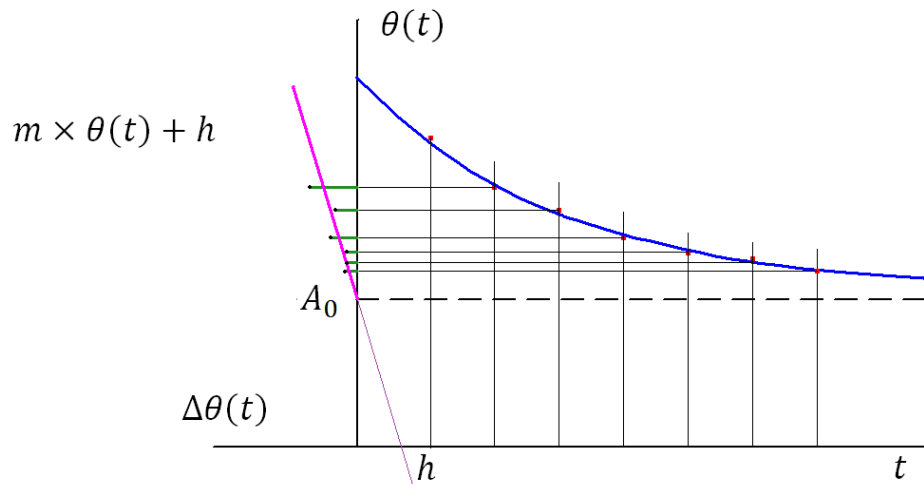
$$\Delta\theta(t_i) = (\theta(t_i) - A_0) \times \left( e^{-\frac{\Delta T}{T_w}} - 1 \right) ; \Delta\theta(t) = 0 \Leftrightarrow \theta(t \rightarrow \infty) = A_0 \quad (5.11)$$

Vemos que las diferencias entre dos puntos consecutivos de esta función  $\Delta\theta(t_i)$ , se puede expresar como un función lineal de  $\theta(t_i)$ , con pendiente  $m$  e intersección en el eje de ordenadas en  $h$ .

$$\Delta\theta(t_i) = \theta(t_i) \times \left( e^{-\frac{\Delta T}{T_w}} - 1 \right) - A_0 \times \left( e^{-\frac{\Delta T}{T_w}} - 1 \right) = m \times \theta(t_i) + h \quad (5.12)$$

Siendo:

$$m = e^{-\frac{\Delta T}{T_w}} - 1 ; h = -A_0 \times \left( e^{-\frac{\Delta T}{T_w}} - 1 \right) \quad (5.13)$$



**Figura 5-2:** Grafica de extrapolación de temperatura

Los valores de  $m$  y  $h$ , los podemos obtener por una regresión lineal por mínimos cuadrados de la función (5.12):

$$\Delta\theta(t_i) = m \times \theta(t_i) + h \quad (5.14)$$

$$m = \frac{n \times \sum(\theta \times \Delta\theta) - \sum \theta \times \sum \Delta\theta}{n \times \sum \theta^2 - |\sum \theta|^2} \quad (5.15)$$

$$h = \frac{\sum \Delta\theta \times \sum \theta^2 - \sum \theta \times \sum(\theta \times \Delta\theta)}{n \times \sum \theta^2 - |\sum \theta|^2} \quad (5.16)$$

Por (5.13) se puede calcular los valores de  $A_0$  y  $T_w$

$$A_0 = \frac{-h}{m} \quad (5.17)$$

$$T_w = \frac{\Delta T}{\ln(m + 1)} \quad (5.18)$$

Solo falta calcular  $B$  que se puede calcular de la siguiente manera, de (5.6):

$$\theta(t_i) - A_0 = B \times e^{-\frac{t_i}{T_w}} \quad (5.19)$$

Calculando el promedio de todas estas diferencias:

$$\frac{\sum(\theta(t_i) - A_0)}{n} = \frac{\sum B \times e^{-\frac{t_i}{T_w}}}{n} \Rightarrow \sum \theta(t_i) - n \times A_0 = B \times \sum e^{-\frac{t_i}{T_w}} \quad (5.20)$$

$$B = \frac{\sum \theta(t_i) - n \times A_0}{\sum e^{-\frac{t_i}{T_w}}} \quad (5.21)$$

## 5.4 Determinación de constantes de tiempo.

Por último, referenciando a las nomenclaturas de IRAM 2018-2019:

$$S_a = \left| \sum \Delta\theta(t_i) \right| \quad S_b = \left| \sum \theta(t_i) \right| \quad S_c = \sum (\theta(t_i) \times \Delta\theta(t_i))$$

$$S_d = \sum (\theta(t_i))^2 \quad S_e = \sum e^{-\frac{t_i}{T_w}}$$

$$t_e = \frac{(n \times S_c - S_b \times S_a)}{(n \times S_d - S_b^2)} \quad t_c = \frac{(S_d \times S_a - S_b \times S_c)}{(n \times S_d - S_b^2)}$$

$$A_0 = \frac{-t_c}{t_e} \quad B = \frac{S_b - n \times A_0}{S_e} \quad T_w = \frac{\Delta T}{\ln(t_e + 1)}$$

$$\theta_w(t = 0) = A_0 + B$$

LA Asíntota  $A_0$ , el  $B$  es el gradiente y  $T_w$  es la constante de tiempo térmica del arrollamiento definen la función exponencial que mejor se ajusta a mis mediciones.

$$\theta(t) = A_0 + B \times e^{-\frac{t_i}{T_w}}$$

Estos cálculos se realizan utilizando el software de cálculo de MathCad, y se encuentra detallado el procedimiento en el ANEXO J "MEMORIA DE CALCULOS"

$S_a = \left  \sum \Delta\theta_w \right  = 1.757$	$S_{abt} = \left  \sum \Delta\theta_{wbt} \right  = 1.78$
$S_b = \left  \sum \theta_w \right  = 522.8$	$S_{bbt} = \left  \sum \theta_{wbt} \right  = 5.589 \times 10^2$
$S_c = \left  \sum M\Delta\theta_w \right  = 114.9$	$S_{cbt} = \left  \sum M\Delta\theta_{wbt} \right  = 124.4$
$S_d = \sum (\theta_w)^2 = 34165.5$	$S_{dabt} = \sum (\theta_{wbt})^2 = 23520$

$t_e = \frac{(n \times S_c - S_b \times S_a)}{(n \times S_d - S_b^2)} = 0.035$	$t_{ebt} = \frac{(m \times S_{cbt} - S_{bbt} \times S_{abt})}{(m \times S_{d_{bt}} - S_{bbt}^2)} = 3.942 \times 10^{-2}$
$t_c = \frac{(S_d \times S_a - S_b \times S_c)}{(n \times S_d - S_b^2)} = -2.077$	$t_{c_{bt}} = \frac{(S_{d_{bt}} \times S_{abt} - S_{bbt} \times S_{cbt})}{(m \times S_{d_{bt}} - S_{bbt}^2)} = -2.531$
$T_w = \frac{\Delta t}{\ln(1 + t_e)} = 2.895 \times 10^2$	$T_{w_{bt}} = \frac{\Delta t}{\ln(1 + t_{ebt})} = 2.586 \times 10^2$
$S_e = \sum_{i=1}^n e^{\frac{-T_i}{T_w}} = 4.036$	$S_{e_{bt}} = \sum_{i=1}^m e^{\frac{-T_{bt_i}}{T_{w_{bt}}}} = 3.721$
$A_0 = \frac{-t_c}{t_e} = 59.099$	$A_{0_{bt}} = \frac{-t_{c_{bt}}}{t_{e_{bt}}} = 64.215$
$B = \frac{(S_b - n \times A_0)}{S_e} = 12.389$	$B = \frac{(S_{bbt} - m \times A_{0_{bt}})}{S_{e_{bt}}} = 12.134$

## 5.5 Gráficas y Resultados parciales

A partir de las constantes previamente calculadas obtenemos las estimaciones de las ecuaciones de las curvas aproximadas de temperatura que se ajustan a nuestro caso de estudio.

**Para el lado de Alta Tensión:**

$$\theta_w(t) = A_0 + B \times e^{-\frac{t_i}{T_w}} \quad (5.22)$$

La temperatura media del arrollamiento de Alta Tensión para el momento de corte de energía, en el instante  $t=0$ .

$$\theta_w(0) = 71.488 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La resistencia del arrollamiento de Alta Tensión en ese instante a partir de la ecuación (4.7) :

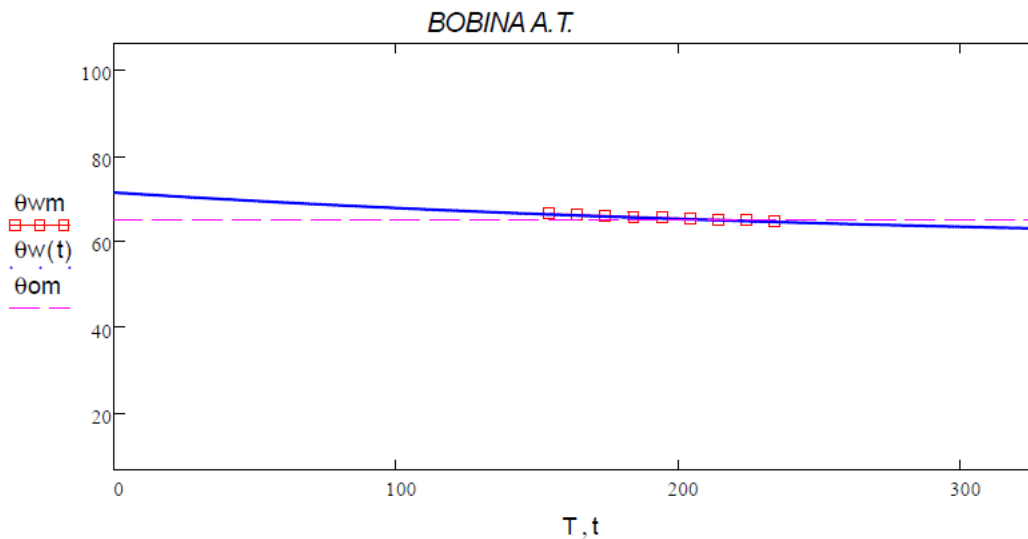
$$Res(0) = 0,283 \text{ } \Omega$$

Y a estos valores se les deben hacer las correcciones enunciadas en el ANEXO D LAS CORRECCIONES para el cálculo del Calentamiento Medio del Arrollamiento de Alta Tensión:

$$Cat = (\theta_2 - \theta_{om}) \cdot \left( \frac{In}{Iensat} \right)^{1.6} + (\theta_{om} - \theta_{amb}) \cdot \left( \frac{Ptot}{Pens} \right)^{0.9} \quad (5.23)$$

Resultando el Calentamiento Medio del Arrollamiento de Alta Tensión:

$$Cat = 41.24^\circ\text{C}$$



**Figura 5-3:** Gráfica AT

**Para el lado de Baja Tensión:**

$$\theta_{wbt}(t) = A_{obt} + Bbt \times e^{-\frac{t_i}{T_{wbt}}} \quad (5.24)$$

La temperatura media del arrollamiento de Baja Tensión para el momento de corte de energía, en el instante  $t=0$ .

$$\theta_{wbt}(0) = 76.349^\circ\text{C}$$

La resistencia del arrollamiento de Baja Tensión en ese instante a partir de la ecuación (4.7) :

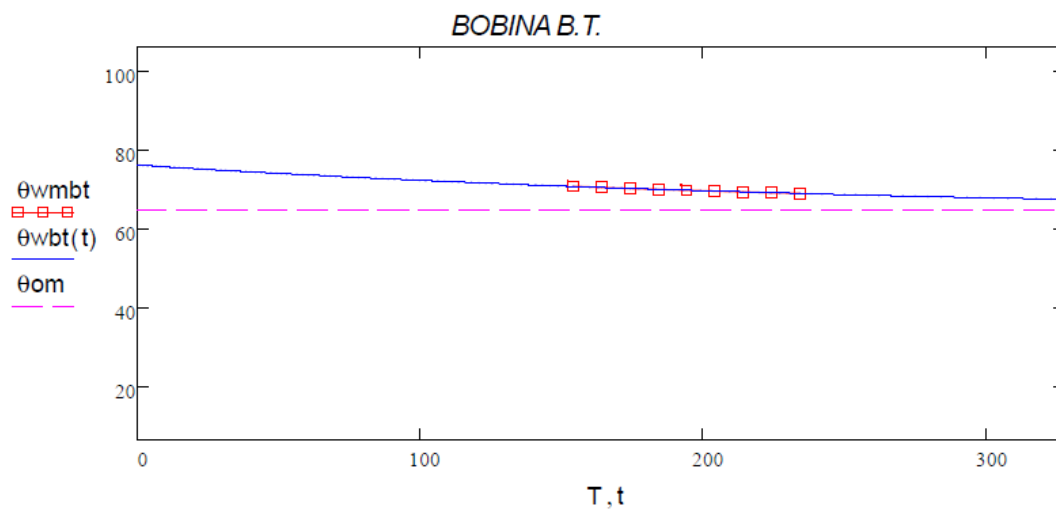
$$res(0) = 1.574 \times 10^{-2} \Omega$$

Y a estos valores se les deben hacer las correcciones enunciadas en el ANEXO D LAS CORRECCIONES para el cálculo del Calentamiento Medio del Arrollamiento de baja tensión:

$$C_{bt} = (\theta_{2bt} - \theta_{om}) \cdot \left(\frac{In}{I_{ensat}}\right)^{1.6} + (\theta_{om} - \theta_{amb}) \cdot \left(\frac{P_{tot}}{P_{ens}}\right)^{0.9} \quad (5.25)$$

Resultando el Calentamiento Medio del Arrollamiento de baja tensión:

$$C_{bt} = 46.28^{\circ}C$$



**Figura 5-4:** Grafica BT



## 6 Estimación y análisis de incertidumbres

Los resultados del ensayo de calentamiento están afectados por incertidumbres relativas al método de ensayo y los instrumentos utilizados.

### 6.1 Definiciones de mediciones básicas

Las definiciones están tomadas del Vocabulario Internacional de Metrología (abreviadamente VIM) \*

La palabra “incertidumbre” significa duda. Así, en su sentido más amplio, “incertidumbre de medida” significa duda sobre la validez del resultado de una medición. Como no se dispone de distintas palabras para este concepto general de incertidumbre y para las magnitudes específicas que proporcionan medidas cuantitativas del concepto, por ejemplo, la desviación típica, es necesario utilizar la palabra “incertidumbre” en estos dos sentidos diferentes.

#### 6.1.1 Incertidumbre (de medida)

- 1- Parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando.
- 2- Medida del error posible en el valor estimado del mensurando, proporcionado como resultado de una medición.
- 3- Estimación que expresa el campo de valores dentro del cual se halla el verdadero valor del mensurando.

El objetivo de una medición es determinar el valor del mensurando (valor verdadero); esto es, el valor de la magnitud particular bajo medición. Por tanto, una medición comienza con una adecuada definición del mensurando, del método de medida y del procedimiento de medida.

En general, el resultado de una medición es sólo una aproximación o estimación del valor del mensurando, y únicamente se halla completo cuando está acompañado de una declaración acerca de la incertidumbre de dicha estimación.

### 6.1.2 Criterios y aclaraciones

El criterio general para la evaluación de la incertidumbre se da en la Guía IEC 115 y en el apartado “Bibliografía de la IEC” de la norma IRAM 2018.

Como una recomendación general, las incertidumbres extendidas se deben asociar con un intervalo de confianza del 95%.

Durante el ensayo se realizan mediciones tanto directas como indirectas y con diferentes instrumentos y métodos de medición. Se tomarán para cálculo el error aportado en cada una de las mediciones realizadas.

Se tienen en cuenta todas las variables que influyen en el cálculo y que en su medición aportan un error.

### 6.1.3 Error de medida

El error de medida es la diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia.

El concepto se emplea cuando existe un único valor de referencia, como en el caso de realizar una calibración mediante un patrón cuyo valor medido tenga una incertidumbre de medida despreciable, o cuando se toma un valor convencional, en cuyo caso el error es conocido.

El error sistemático de medida es componente de error de medida que, en mediciones repetidas, permanece constante o varía de manera predecible. El error sistemático y sus causas pueden ser conocidas o no. Para compensar un error sistemático conocido puede aplicarse una corrección.

### 6.1.4 Error instrumental en instrumentos digitales

Según los datos del manual del fabricante del multímetro utilizado en la medición de Tensión, Corriente y Potencia Activa, el error en cada variable estará determinado por:

$$\Delta X = \alpha_{\%} \cdot lec + \beta \cdot dig \quad (6.1)$$



## 6.2 Variables involucradas en la medición del calentamiento.

En el ensayo de calentamiento intervienen 6 variables involucradas que se precisan medir. Estas son:

- La temperatura ambiente
- La Temperatura del aceite
- La Temperatura de las resistencias en frío: Se tomará igual a la temperatura ambiente, si el transformador está en equilibrio térmico con el ambiente. (Se considera que el transformador está en equilibrio térmico con el ambiente si permanece como mínimo 24 horas sin energización).
- La Resistencia del arrollamiento ensayado en frío (a temperatura ambiente, previo al calentamiento).
- La Corriente de ensayo
- La Potencia Activa
- La Resistencia del arrollamiento ensayado en caliente.

A cada variable le corresponde su respectivo error porcentual de medición.

La temperatura  $\theta_{amb}$

$$e_{\theta_{amb}} = \frac{\Delta\theta_{amb}}{\theta_{amb}} \times 100 \quad (6.2)$$

La temperatura  $\theta_{Aceite}$ :

$$e_{\theta_{aceite}} = \frac{\Delta\theta_{ac}}{\theta_{ac}} \times 100 \quad (6.3)$$

La Potencia Activa:

$$e_{Pens} = \frac{\Delta P_{ens}}{P_{ens}} \times 100 \quad (6.4)$$

La resistencia de los arrollamientos en frío

$$e_{Ra} = \frac{\Delta R_a}{R_a} \times 100 \quad e_{Rb} = \frac{\Delta R_b}{R_b} \times 100 \quad (6.5)$$

La resistencia de los arrollamientos en caliente

$$e_R = \frac{\Delta R}{R} \times 100 \quad e_r = \frac{\Delta r}{r} \times 100 \quad (6.6)$$

La corriente

$$e_{Im} = \frac{\Delta I_m}{I_m} \times 100 \quad (6.7)$$

### 6.3 Instrumental Utilizado

- Transformadores de Intensidad (CT):

Instrumento	Marca	Modelo	NºSerie	Clase	Alcance
Transformador de Intensidad	TAIT	BPA	M/101296	0.2	500/5A
Transformador de Intensidad	TAIT	BPA	M/101297	0.2	500/5A
Transformador de Intensidad	TAIT	BPA	M/101298	0.2	500/5A

- Transformadores de Tensión (VT):



Instrumento	Marca	NºSerie	Clase	Alcance
Transformador de Tensión	Mayo	TT101	0,2	1600-800/100 V
Transformador de Tensión	Mayo	TT102	0,2	1600-800/100 V
Transformador de Tensión	Mayo	TT103	0,2	1600-800/100 V

- Transductor de potencia (Multímetro):

Instrumento	Marca	Modelo	NºSerie	Tipo	Clase	Alcance
Trasductor de Potencia	YEW	WT333E	C3YL01003E	Digital	0.1 % lect. + 0.05 rg	Escala multiple

- Winding analyzer (Analizador de resistencia de arrollamientos):

Instrumento	Marca	Modelo	NºSerie	Tipo	Clase	Alcance
Analizador de arrollamiento	Haefely Test AG, Basel	2293	183653	Digital	±0,1%rdg+0,5μΩ ±0,1%rdg ±1,0%rdg	0Ω<R≤300μΩ 300μΩ<R<30kΩ 30kΩ≤R<300KΩ

- Termómetro de alcohol

Instrumento	Marca	Tipo	Incertidumbre	Alcance
Termómetro	ZEISING	Columna Mercurio	0.2	-10 a 110 °C

- Sensor de temperatura magnético

Instrumento	Marca	Tipo	Incertidumbre	Alcance
Sensor de temperatura magnético	Haefely	PT100 Class A	0,25°C	200 °C

## 6.4 Análisis de Constantes Térmicas y Variable Temporal

### 6.4.1 Temperatura - Calculo de las constantes térmicas según IRAM 2018

Siendo:

Masa total del transformador:  $M_{total} = 40.5 \text{ Tn}$

Masa total del aceite:  $M_{aceite} = 10.3 \text{ Tn}$

Entonces

Constante térmica del aceite:	$CteTer_{oil} = \frac{5 \times M_{total} + 15 \times M_{aceite}}{\frac{P_{ot}}{1000}} * C_{oil} = 645 \text{ min}$
Constante térmica del arrollamiento de baja tensión:	$CteTer_{Baja} = \frac{Twbt}{60} = 4 \text{ min}$
Constante térmica del arrollamiento de alta tensión:	$CteTer_{alta} = \frac{Tw}{60} = 5 \text{ min}$

En este ensayo y cuando se alcance nuevamente la estabilidad térmica del transformador después de inyectar la potencia activa equivalente a las pérdidas totales, se considera que tanto las temperaturas del aceite y del ambiente permanecen constantes durante la medición de la resistencia en caliente, incluso en los minutos posteriores al corte de energía. Esto se debe a que la constante térmica del aceite tiene un orden de magnitud en horas, lo que implica que su temperatura no se ve significativamente afectada durante la medición de resistencias que se realizarán en pocos minutos.

Por otro lado, la constante térmica de los arrollamientos, que es del orden de los minutos, permite observar los cambios de temperatura de los arrollamientos en ese mismo intervalo. Por esta razón, no se toma en cuenta la posible variación de temperatura del aceite en los minutos siguientes al corte de energía.

#### 6.4.2 La variable *tiempo*

Una variable que también está presente durante el ensayo es el tiempo. Se mide con un cronómetro electrónico cuya menor lectura será de 00:00:01 es decir, una centésima o 1/100 de segundo. Con una apreciación a la centésima de segundo y con errores de calibración de la misma magnitud, el error que aporta la medición del



tiempo será despreciable, por lo tanto, no se considera en el presente análisis de errores.

## 6.5 Estimación de Incertidumbres Combinadas

### 6.5.1 Calculo $\tan(\varphi)$

Calculo de la Tangente del Angulo de carga  $\varphi$  del transformador durante el ensayo.

Las mediciones durante el ensayo fueron:

$$P_{ens} = 96000 \text{ W} \qquad U_{ens} = 1446 \text{ V} \qquad I_{ensat} = 380 \text{ A}$$

De las cuales obtenemos la potencia aparente por fase

$$\text{Fase U :} \qquad S = U_{ens} \times I_{ensat} \times \sqrt{3} = 9,517 \times 10^5 \text{ VA} \qquad (6.8)$$

A partir de las cuales se calcula el ángulo  $\varphi$  en radianes por cada fase

$$\varphi = \cos^{-1} \left( \frac{P_{ens}}{S} \right) = 1.47 \qquad (6.9)$$

Y su respectiva  $\tan(\varphi)$

$$\tan(\varphi) = 9.863 \qquad (6.10)$$

### 6.5.2 Estimación de incertidumbre de los transformadores de medición.

Para los transformadores de tensión de medición, según la IRAM 2344 "Parte 2". las garantías de exactitud normalizadas se consideran en bornes del transformador, y entre el 80% y el 120% de la  $U_n$  y entre el 25% y el 100% de la carga nominal.

Para los Transformadores de corriente de medición las garantías de exactitud normalizadas se consideran entre el 5 % y el 120% de la  $I_n$  y entre el 25% y el 100% de la carga de prestación nominal.

Se verificó que los transformadores de tensión y corriente se encuentran en prestación.

La incertidumbre producida por el TT en la medición de potencia activa es de

$$e_{TT\%} = \xi_{\%} + 100 * \delta * \tan(\phi) \quad (6.11)$$

Donde

$\xi_{\%} = 0,2$  Error porcentual de relación

$\delta = 0,3$  Error de fase (en centirad)

$\tan(\phi) = 9.863$  Tangente del ángulo de la carga del TT

Dando como resultado

$$e_{TT} = 3,159 \%$$

La incertidumbre producida por el TC en la medición de potencia activa es de

$$e_{TI} = \eta_{\%} + 100 * \beta * \tan(\phi) \quad (6.12)$$

Donde

$\eta_{\%} = 0,25$  Error porcentual de relación

$\beta = 0,35$  Error de fase (en centirad)

$\tan(\phi) = 9.863$  Tangente del ángulo de la carga

Dando como resultado

$$e_{TI} = 3.702 \% \quad (6.13)$$



### 6.5.3 Estimación de la incertidumbre en la medición de Corriente

La estimación de la incertidumbre de la medición de corriente es una incertidumbre combinada. Depende de la incertidumbre aportada por el TI y por el error de medición por el instrumento utilizado para medir corriente.

Las Incertidumbres de corriente por el instrumento y por cada una de las fases se estiman:

$$\Delta ImYew = Iensat \times 0.1\% + 0.05\% \times 100 \times 5 = 0.63 A \quad (6.14)$$

$$eImYew = \frac{\Delta ImYew}{Iensat} \times 100 = 0.166 \% \quad (6.15)$$

### 6.5.4 Estimación de incertidumbre combinada de la Potencia activa

La estimación de incertidumbre de la medición de Potencia activa es una incertidumbre combinada que depende de múltiples variables.

Incertidumbre aportada por medición de Potencia activa

$$\Delta pw = 0.1 \% \times Pens + 0.05\% \times 150 \times 5 \times 16 \times 100 = 696 W \quad (6.16)$$

$$epw = \frac{\Delta pw}{Pens} \times 100 = 0.725 \% \quad (6.17)$$

Incertidumbre aportada por medición de Potencia activa total:

$$ePens = e_{TI} + e_{TT} + e_{pw} = 7.586 \% \quad (6.18)$$

$$\Delta Pens = \frac{ePens \times Pens}{100} = 7282.7 W \quad (6.19)$$

### 6.5.5 Estimación de la incertidumbre aportada por el Analizador de arrollamiento

Siendo:

la Incertidumbre relativa en la medición de las resistencias:

$$Cla_{wa} = \pm 0.1\%$$

Resistencia A.T

$$R_a = 127 \times 10^{-3} \Omega$$

la Incertidumbre en valor absoluto de mediciones de las resistencias este definido por la siguiente formula:

$$\Delta R = Cla_{wa} \times R \quad (6.20)$$

Dando como resultado

$$\Delta Ra_{frio} = 1,27 \times 10^{-4} \Omega$$

$$\Delta Ra_{caliente} = \begin{pmatrix} 1,45 \times 10^{-4} \\ 1,449 \times 10^{-4} \\ 1,448 \times 10^{-4} \\ 1,447 \times 10^{-4} \\ 1,446 \times 10^{-4} \\ 1,444 \times 10^{-4} \\ 1,444 \times 10^{-4} \\ 1,442 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \Omega$$

### 6.5.6 Estimación de incertidumbre del calentamiento del aceite *Coil*

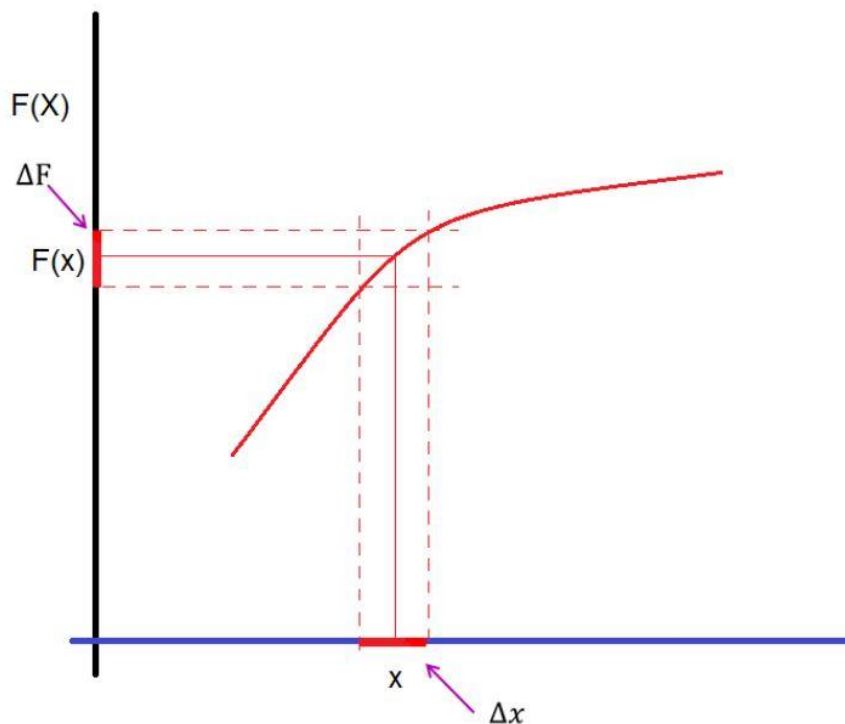
Se calcula las incertidumbres que intervienen en el Calentamiento del aceite.

Las incertidumbres de las temperaturas medidas:

$$e\theta_{ac} = \frac{\Delta\theta_{ac}}{\theta_{ac}} \times 100 \quad (6.21)$$

$$e\theta_{acinf} = \frac{\Delta\theta_{acinf}}{\theta_{acinf}} \times 100 \quad (6.22)$$

Para la estimación de la incertidumbre en la determinación del calentamiento del aceite *Coil* corregidas por potencia, utilizaremos el siguiente razonamiento. Cómo la variable *Coil* es función de tres mediciones, determinaremos la influencia de cada



**Figura 6-1:** Grafica de estimación de incertidumbre

una de ellas en el valor calculado.

Supongamos una función  $F$  de una sola variable  $x$ , graficada en la **Figura 6-1:** Grafica de estimación de incertidumbre. Como se ve en la gráfica, la incertidumbre en  $F$  dada por la medición de la variable  $x$  con su incertidumbre de medición  $\Delta x$ , queda de la siguiente manera

$$\Delta F = \frac{\delta F}{\delta x} \times \Delta x$$

Y en forma relativa o porcentual:

$$\left| \frac{\Delta F}{F} \right| = \left| \frac{\delta F}{\delta x} \times \frac{x}{F} \right| \times \frac{\Delta x}{x}$$

Ahora, si la función  $F$  es de  $n$  variables, la expresión anterior queda de la siguiente manera

$$\text{Sea } F = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$\frac{\Delta F(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n)}{F} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\delta F}{\delta x_i} \times \frac{\Delta x_i}{F} \right|$$

$$\frac{\Delta F(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n)}{F} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\delta F}{\delta x_i} \times \frac{x_i}{F} \right| \times \frac{\Delta x_i}{x_i} \quad (6.23)$$

Si,

La determinación del calentamiento máximo del aceite (capa superior) corregido es:

$$Coil = (\theta_2 - \theta_{amb}) \times \left( \frac{P_{tot}}{P_{ens}} \right)^{0.9} = 36.124 \quad (6.24)$$

Primero calcularemos las derivadas parciales. Siendo:

$$\text{Derivada con respecto a } \theta_2 \quad \frac{dCoil}{d\theta_2} \rightarrow \left( \frac{113380}{P_{ens}} \right)^{0.9} \quad (6.25)$$

$$\text{Derivada con respecto a } \theta_{amb} \quad \frac{dCoil}{d\theta_{amb}} \rightarrow \left( \frac{113380}{P_{ens}} \right)^{0.9}$$

$$\text{Derivada con respecto a } P_{ens} \quad \frac{dCoil}{dP_{ens}} \rightarrow \frac{102042 \times (\theta_2 - \theta_{amb})}{P_{ens}^2 \times \left( \frac{113380}{P_{ens}} \right)^{0.1}}$$

Reemplazando las derivadas en la ecuación obtenemos:

$$\frac{\Delta Coil}{Coil} = \left| \left( \frac{113380}{Pens} \right)^{0.9} \times \frac{\theta_2}{Coil} \right| \times \frac{\Delta \theta_2}{\theta_2} + \left| - \left( \frac{113380}{Pens} \right)^{0.9} \times \frac{\theta_{amb}}{Coil} \right| \times \frac{\Delta \theta_{amb}}{\theta_{amb}}$$

$$+ \left| \frac{102042 \times (\theta_2 - \theta_{amb})}{Pens^2 \times \left( \frac{113380}{Pens} \right)^{0.1}} \times \frac{Pens}{Coil} \right| \times \frac{\Delta Pens}{Pens}$$

Como resultado obtenemos el calentamiento máximo del aceite (capa superior) corregido.

$$e_{Coil} = \frac{\Delta Coil}{Coil} = 7,471 \%$$

$$\Delta Coil = \frac{e_{Coil} \times 7.471}{100} = 2.699^\circ C$$

### 6.5.7 Estimación de la incertidumbre en $\theta_w$

Para la estimación de la incertidumbre en la determinación de la temperatura media de los arrollamientos corregidas por temperatura, utilizaremos el mismo razonamiento que para el cálculo de  $Coil$ . Cómo la variable  $\theta_{wm}$  es función de tres mediciones, determinaremos la influencia de cada una de ellas en el valor calculado.

Supongamos una función  $F$  de una sola variable  $x$ , graficada en la **Figura 6-1**: Grafica de estimación de incertidumbre.. Como se ve en la gráfica, la incertidumbre en  $F$  dada por la medición de la variable  $x$  con su incertidumbre de medición  $\Delta x$ , queda de la siguiente manera

$$\Delta F = \frac{\delta F}{\delta x} \times \Delta x$$

Y en forma relativa o porcentual:

$$\left| \frac{\Delta F}{F} \right| = \left| \frac{\delta F}{\delta x} \times \frac{x}{F} \right| \times \frac{\Delta x}{x}$$

Ahora, si la función  $F$  es de  $n$  variables, la expresión anterior queda de la siguiente manera

$$\text{Sea } F = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$\frac{\Delta F(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n)}{F} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\delta F}{\delta x_i} \times \frac{\Delta x_i}{F} \right|$$

$$\frac{\Delta F(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n)}{F} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\delta F}{\delta x_i} \times \frac{x_i}{F} \right| \times \frac{\Delta x_i}{x_i} \quad (6.26)$$

Primero calcularemos las derivadas parciales. Siendo:

$$\theta_{wm} = \frac{R}{R_a} \times (235 + \theta_{in}) - 235$$

Derivada con respecto a  $R$   $\frac{d\theta_{wm}}{dR} \rightarrow \frac{\theta_{in} + 235}{R_a}$

Derivada con respecto a  $R_a$   $\frac{d\theta_{wm}}{dR_a} \rightarrow -\frac{R \times (235 + \theta_{in})}{R_a^2}$

Derivada con respecto a  $\theta_{in}$   $\frac{d\theta_{wm}}{d\theta_{in}} \rightarrow \frac{R}{R_a}$

Reemplazando las derivadas en la ecuación obtenemos:

$$\frac{\Delta\theta_{wm}}{\theta_{wm}} = \left| \frac{\theta_{in} + 235}{R_a} \times \frac{R_i}{\theta_{wmi}} \right| \times \frac{\Delta R_i}{R_i} + \left| \frac{R_i \times (235 + \theta_{in})}{R_a^2} \times \frac{R_a}{\theta_{wmi}} \right| \times \frac{\Delta R_{afrio}}{R_a} + \left| \frac{R_i}{R_a} \times \frac{\theta_{in}}{\theta_{wmi}} \right| \times \frac{\Delta\theta_{in}}{\theta_{in}}$$

Como resultado obtenemos para cada valor de temperatura media del arrollamiento de alta tensión.

$$e\theta_{wm} = \frac{\Delta\theta_{wm}}{\theta_{wm}} = \begin{pmatrix} 1,081 \\ 1,085 \\ 1,088 \\ 1,091 \\ 1,093 \\ 1,096 \\ 1,099 \\ 1,102 \end{pmatrix} \%$$

$$\Delta\theta_{wm} = \begin{pmatrix} 0,718 \\ 0,717 \\ 0,717 \\ 0,716 \\ 0,715 \\ 0,715 \\ 0,714 \\ 0,713 \end{pmatrix} ^\circ C$$

### 6.5.8 Estimación de la incertidumbre en $\theta_w$

Para la Estimación de la incertidumbre en  $\theta_{wt}$  arrollamiento de Baja tensión se realiza el mismo procedimiento. Que para el arrollamiento del lado AT.

Da como resultados:

$$e\theta_{btwm} = \frac{\Delta\theta_{btwm}}{\theta_{btwm}} = \begin{pmatrix} 1,028 \\ 1,030 \\ 1,033 \\ 1,036 \\ 1,038 \\ 1,041 \\ 1,043 \\ 1,046 \\ 1,048 \end{pmatrix} \% \quad (6.27)$$

$$\Delta\theta_{btwm} = \begin{pmatrix} 0,729 \\ 0,728 \\ 0,727 \\ 0,727 \\ 0,726 \\ 0,726 \\ 0,725 \\ 0,725 \\ 0,724 \end{pmatrix} ^\circ C \quad (6.28)$$

### 6.5.9 Resumen de las incertidumbres estimadas

Incertidumbre tiempo

*Despreciable*

Incertidumbre temperatura final del

$\Delta\theta_{ac} = 0,1^\circ C$

aceite parte superior

Incertidumbre temperatura Final del  
aceite parte inferior

$$\Delta\theta_{acinf} = 0,1^{\circ}C$$

Incertidumbre temperatura ambiente

$$\Delta\theta_{amb} = 0,1^{\circ}C$$

Incertidumbre Potencia de ensayo

$$\Delta Pens = 7282 W$$

Incerteza a temperatura  
Amb.(resistencia en frio)

$$\Delta\theta_{inc} = 0,1^{\circ}C$$

Incertidumbre de la temperatura media  
del líquido

$$\Delta\theta_m = 0,2^{\circ}C$$

Incertidumbre Corriente de ensayo

$$\Delta Im = 14,698 A$$

Incerteza resistencia en frio

$$\Delta Ra = 2,415 \times 10^{-4} \Omega$$

$$\Delta Rb = 1,325 \times 10^{-5} \Omega$$

Incertidumbre resistencia en caliente AT

$$\Delta R = \begin{pmatrix} 2,778 \times 10^{-4} \\ 2,776 \times 10^{-4} \\ 2,774 \times 10^{-4} \\ 2,772 \times 10^{-4} \\ 2,770 \times 10^{-4} \\ 2,768 \times 10^{-4} \\ 2,766 \times 10^{-4} \\ 2,764 \times 10^{-4} \\ 2,762 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \Omega$$

Incertidumbre resistencia en caliente BT

$$\Delta r = \begin{pmatrix} 1,547 \times 10^{-5} \\ 1,545 \times 10^{-5} \\ 1,544 \times 10^{-5} \\ 1,543 \times 10^{-5} \\ 1,542 \times 10^{-5} \\ 1,541 \times 10^{-5} \\ 1,540 \times 10^{-5} \\ 1,539 \times 10^{-5} \\ 1,538 \times 10^{-5} \end{pmatrix} \Omega$$



Incertidumbre temperatura arrollamiento  
en caliente AT

$$\Delta\theta_{wm} = \begin{pmatrix} 0,718 \\ 0,717 \\ 0,717 \\ 0,716 \\ 0,715 \\ 0,715 \\ 0,714 \\ 0,713 \end{pmatrix} ^\circ\text{C}$$

Incertidumbre temperatura arrollamiento  
en caliente BT

$$\Delta\theta_{btwm} = \begin{pmatrix} 0,729 \\ 0,728 \\ 0,727 \\ 0,727 \\ 0,726 \\ 0,726 \\ 0,725 \\ 0,725 \\ 0,724 \end{pmatrix} ^\circ\text{C}$$

### 6.5.10 Estimación de la incertidumbre aportada en $C_{at}$

Siendo el calentamiento medio del arrollamiento de AT  $C_{at}$ :

$$C_{at} = (\theta_2 - \theta_{om}) \times \left(\frac{I_n}{I_{ensat}}\right)^{1,6} + (\theta_{om} - \theta_{amb}) \times \left(\frac{P_{tot}}{P_{ens}}\right)^{0,9} \quad (6.29)$$

Procederemos utilizando la fórmula 6.30

Derivada con respecto a  $\theta_2$   $\frac{dC_{at}}{d\theta_2} \rightarrow \left(\frac{I_n}{I_{ensat}}\right)^{1,6}$

Derivada con respecto a  $I_{ensat}$   $\frac{dC_{at}}{dI_{ensat}} \rightarrow \frac{1,6 \times I_n \times (\theta_2 - \theta_{om}) \times \left(\frac{I_n}{I_{ensat}}\right)^{0,6}}{I_{ensat}^2}$

Derivada con respecto a  $\theta_{amb}$   $\frac{dC_{at}}{d\theta_{amb}} \rightarrow \left(\frac{P_{tot}}{P_{ens}}\right)^{0,9}$

Derivada con respecto a  $P_{ens}$   $\frac{dC_{at}}{dP_{ens}} \rightarrow \frac{0,9 \times P_{tot} \times (\theta_{om} - \theta_{amb})}{P_{ens}^2 \times \left(\frac{P_{tot}}{P_{ens}}\right)^{0,1}}$

Derivada con respecto a  $\theta_{om}$   $\frac{dC_{at}}{d\theta_{om}} \rightarrow \left(\frac{P_{tot}}{P_{ens}}\right)^{0,9} - \left(\frac{I_n}{I_{ensat}}\right)^{1,6}$

Reemplazando las derivadas en la ecuación obtenemos:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C_{at}}{C_{at}} = & \left| \left(\frac{I_n}{I_{ensat}}\right)^{1,6} \times \frac{\theta_2}{C_{at}} \right| \times \frac{\Delta \theta_2}{\theta_2} + \left| \frac{1,6 \times I_n \times (\theta_2 - \theta_{om}) \times \left(\frac{I_n}{I_{ensat}}\right)^{0,6}}{I_{ensat}^2} \times \frac{I_{ensat}}{C_{at}} \right| \times \frac{\Delta I_{ensat}}{I_{ensat}} \\ & + \left| \left(\frac{P_{tot}}{P_{ens}}\right)^{0,9} \times \frac{\theta_{amb}}{C_{at}} \right| \times \frac{\Delta \theta_{amb}}{\theta_{amb}} + \left| \frac{0,9 \times P_{tot} \times (\theta_{om} - \theta_{amb})}{P_{ens}^2 \times \left(\frac{P_{tot}}{P_{ens}}\right)^{0,1}} \times \frac{P_{ens}}{C_{at}} \right| \times \frac{\Delta P}{P_{ens}} + \\ & + \left| \left[ \left(\frac{P_{tot}}{P_{ens}}\right)^{0,9} - \left(\frac{I_n}{I_{ensat}}\right)^{1,6} \right] \times \frac{\theta_{om}}{C_{at}} \right| \times \frac{\Delta \theta_{om}}{\theta_{om}} \end{aligned}$$

Como resultado obtenemos

$$\frac{\Delta C_{at}}{C_{at}} \times 100 = eC_{at} = 8.662 \%$$

Por lo cual

$$\Delta C_{at} = 3.572 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 6.5.11 Estimación de la incertidumbre aportada en $C_{bt}$

Para el caso del arrollamiento de Baja Tensión, se realiza procedimiento análogo al realizado en el punto 6.5.10 y se estima su incertidumbre del calentamiento medio del arrollamiento de BT  $C_{bt}$ :

Sus resultados finales son

$$\frac{\Delta C_{bt}}{C_{bt}} = eC_{bt} = 8,417 \%$$

$$\Delta C_{bt} = 3.896 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 6.5.12 Análisis /evaluación de calidad de la estimación de la incertidumbre

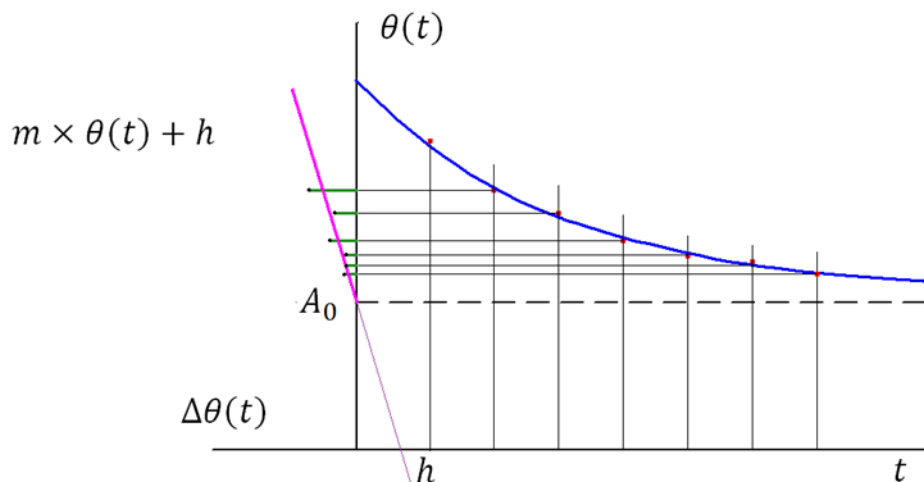
Para evaluar la calidad de la estimación de incertidumbre en una curva exponencial del tipo:

$$\theta w(t) = A_0 + B \times e^{\frac{-t}{T_w}} \quad (6.31)$$

se realiza una linealización de la curva exponencial, transformándola en una ecuación lineal de la forma:

$$\Delta\theta(t_i) = m \times \theta(t_i) + h \quad (6.32)$$

donde:



Utilizando el coeficiente de correlación de Pearson, podemos obtener una medida de dependencia lineal entre estas dos variables cuantitativas  $\Delta\theta w(t_i)$  y  $\theta w(t_i)$ .

Coeficiente de correlación de Pearson  $r$

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \times \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (6.33)$$

$x_i$  = valores de la variable x de la muestra

$\bar{x}$  = media de los valores de la variable x

$y_i$  = valores de la variable x de la muestra

$\bar{y}$  = media de los valores de la variable y

Las constantes de tiempo

$$t_e = 3.515 \times 10^{-2}$$

$$t_c = -2.077$$

$$t_{ebt} = 3.942 \times 10^{-2}$$

$$t_{cbt} = -2.531$$

$$\Delta\theta_w = \begin{pmatrix} -0.26 \\ -0.228 \\ -0.228 \\ -0.217 \\ -0.217 \\ -0.206 \\ -0.206 \\ -0.195 \end{pmatrix} \quad \theta_{wn} = \begin{pmatrix} 66.116 \\ 65.888 \\ 65.661 \\ 65.444 \\ 65.227 \\ 65.021 \\ 64.814 \\ 64.619 \end{pmatrix} \quad \Delta\theta_{wbt} = \begin{pmatrix} -0.257 \\ -0.257 \\ -0.218 \\ -0.237 \\ -0.198 \\ -0.198 \\ -0.218 \\ -0.198 \end{pmatrix} \quad \theta_{wnbt} = \begin{pmatrix} 70.647 \\ 70.39 \\ 70.172 \\ 69.935 \\ 69.737 \\ 69.539 \\ 69.322 \\ 69.124 \end{pmatrix}$$

**Figura 6-2:** Variables utilizadas para el cálculo del Coeficiente de Correlación

Para el arrollamiento de AT

$\theta_{wimedio}$  media de los valores de la variable “x”

$$\theta_{wimedio} = \frac{\sum \theta_{wn}}{7} \tag{6.34}$$

$\Delta\theta_{wmedio}$  media de los valores de la variable y

$$\Delta\theta_{wmedio} = \frac{\sum \Delta\theta_w}{7} = 65,349 \tag{6.35}$$

Realizando el cálculo de r para el lado de Alta tensión

$$CorrAT = \frac{\sum_{k=0}^6 [(\theta_{wn_k} - \theta_{wimedio}) \times (\Delta\theta_{w_k} - \Delta\theta_{wmedio})]}{\sqrt{\sum_{k=0}^6 [(\theta_{wn_k} - \theta_{wimedio})^2 \times \sum_{k=0}^6 (\Delta\theta_{w_k} - \Delta\theta_{wmedio})^2]}} \tag{6.36}$$



Resulta:

$$CorrAT = -0,928 \quad (6.37)$$

Para el arrollamiento de BT

$\theta w_{mediobt}$  media de los valores de la variable "x"

$$\theta w_{mediobt} = \frac{\sum \theta w_n}{7} \quad (6.38)$$

$\Delta \theta w_{mediobt}$  media de los valores de la variable y

$$\Delta \theta w_{mediobt} = \frac{\sum \Delta \theta w}{7} = 69,858 \quad (6.39)$$

Realizando el cálculo de r para el lado de Baja tensión

$$CorrBT = \frac{\sum_{k=0}^6 [(\theta w_{nbt_k} - \theta w_{mediobt}) \times (\Delta \theta w_{bt_k} - \Delta \theta w_{mediobt})]}{\sqrt{\sum_{k=0}^6 [(\theta w_{nbt_k} - \theta w_{mediobt})^2 * \sum_{k=0}^6 (\Delta \theta w_{bt_k} - \Delta \theta w_{mediobt})^2]}} \quad (6.40)$$

Resulta:

$$CorrBT = -0.821 \quad (6.41)$$

Y, lo cual permite medir la precisión de la linealización. El coeficiente de correlación ideal es -1 para una relación lineal perfecta decreciente.

En este caso, se obtuvo:

$$Corr(\Delta \theta w, \theta w) = -0.928 \quad (6.42)$$

$$Corr(\Delta \theta w_{bt}, \theta w_{bt}) = -0.821 \quad (6.43)$$

Este valor cercano a -1 o igual, indica una alta correlación lineal, lo que sugiere que la aproximación exponencial linealizada es adecuada para representar la relación entre las variables X e Y.

Y, validando así la calidad de la estimación de incertidumbre en la curva.

Debido a que los valores son muy buenos del ajuste como se ve en la evaluación de bondad, la incertidumbre de la estimación de temperatura es igual a a la incertidumbre estimada para su medición.

## 7 Interpretación de resultados

Es necesario definir los Límites de calentamiento a potencia nominal.

### 7.1 Límites de calentamiento para potencias de diseño.

Los límites de calentamiento dados en la tabla son válidos para transformadores que tienen sistemas de aislación sólida designada como clase térmica A (105 °C) según la IRAM 2180, y sumergido en aceite mineral o, líquido sintético, o líquido natural con punto de inflamación de 300 °C como máximo (primera letra del código: O)

Los límites se refieren a condiciones estables bajo potencia nominal continua, y 20 °C de temperatura media anual del medio de refrigeración externo.

Requisitos para	Límites de calentamiento (K)
Líquido aislante en la parte superior	60
Arrollamiento medio (por variación de resistencia del arrollamiento):	
- Sistemas de refrigeración ON ... y OF ...	65
- Sistema de refrigeración OD ...	70
Punto más caliente del arrollamiento	78

**Figura 7-1:**Tabla de límites de calentamiento según IRAM 2018

No se permite una tolerancia en exceso (discrepancia positiva) sobre los límites de calentamiento especificados.

### 7.2 Resultados finales con sus respectivas incertidumbres

Resultados expresados con sus respectivas cifras significativas e incertidumbres

**Calentamiento del aceite: (Capa superior)**

$$Coil = (36 \pm 3) ^\circ C$$

$$Coil = 36^{\circ}C \pm 7\%$$

**Calentamiento medio del arrollamiento de alta Tensión:**

$$Cat = (41 \pm 4)^{\circ}C$$

$$Cat = 41^{\circ}C \pm 9\%$$

**Calentamiento medio del arrollamiento de Baja Tensión:**

$$Cbt = (46 \pm 4)^{\circ}C$$

$$Cbt = 46^{\circ}C \pm 9\%$$

### 7.3 Análisis y discusión de resultados

El ensayo de calentamiento del transformador de 20 MVA mostró que los valores de calentamiento de la parte superior del aceite ( $36^{\circ}C$ ) y del calentamiento medio de los arrollamientos de alta y baja tensión ( $41^{\circ}C$  y  $46^{\circ}C$ ) se encuentran dentro de los límites permitidos por la norma IRAM 2180. Dado que los resultados cumplen con los límites establecidos, queda determinado que el transformador posee una potencia real de 20 MVA y puede operar de manera segura a su potencia nominal.

Una de las principales fuentes de incertidumbre en este tipo de ensayos está relacionada con la medición de la potencia activa y el uso de los Transformadores de medición.

Si bien el método utilizado en el ensayo es adecuado y el límite establecido para el calentamiento de los arrollamientos es de  $65^{\circ}C$ , es recomendable realizar el cálculo con un margen de seguridad para tener en cuenta las incertidumbres involucradas. Por ejemplo, al considerar el diseño térmico del transformador, es aconsejable plantear un diseño que contemple para el calentamiento medio de los arrollamientos un valor de  $4^{\circ}C / 9\%$  por debajo de los  $65^{\circ}C$  de límite y lo mismo para el calentamiento de la capa superior del aceite.

En conclusión, al diseñar y ensayar un transformador de potencia, es importante tener en cuenta los equipos de medición adecuados, las incertidumbres en la medición, y prever un margen de seguridad en el diseño de los mismos. Este



enfoque asegura que el equipo no supere los límites establecidos en la Norma IRAM 2018.

## 8 Conclusiones y recomendaciones

La base teórica de este proyecto se establece mediante un análisis profundo de la norma IRAM 2018. Este estudio proporciona la estructura conceptual para el ensayo de calentamiento y sirve como guía para la aplicación de los procedimientos del ensayo. La revisión teórica también abarca la fundamentación de los conceptos relacionados con la Potencia Nominal del transformador y la importancia del ensayo de calentamiento en el diseño, el estado de carga en servicio y la vida útil del transformador.

### 8.1 Adaptación de Procedimientos

La aplicación práctica de los conceptos teóricos se materializa en la comprensión y adaptación de los procedimientos y Normas del ensayo de calentamiento. Se establecen pasos claros y se integran mejores prácticas para mejorar la ejecución del ensayo. Esto busca evitar posibles errores y maximizar la precisión en la verificación de la Potencia Nominal.

### 8.2 Aplicación Práctica

El ensayo de calentamiento se llevó a cabo un transformador de energía eléctrica real, permitiendo la aplicación práctica de los procedimientos y la validación de los resultados teóricos. Durante este proceso, se presta especial atención a las condiciones de servicio del transformador, garantizando así la representatividad de los resultados para el entorno real.

### 8.3 Instrumental y errores de medición

Esta etapa del estudio se enfocó en analizar los errores asociados al ensayo de calentamiento. Rigurosamente evaluamos la coherencia y alineación de los resultados con las expectativas, destacando la importancia crítica de la precisión en la validez de los datos recopilados. La contribución clave de este estudio radica en la identificación y análisis de los errores de medición y las incertidumbres que generan.



#### 8.4 Conclusión

El estudio y análisis integral del ensayo de calentamiento, desde su fundamento teórico hasta su aplicación práctica, demuestra solidez tanto en el método de ensayo analizado como en la confiabilidad de los resultados.

#### Recomendaciones

La principal incertidumbre proviene de la medición de potencia activa ya que nuestra carga a ensayar es muy inductiva siendo el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente muy próximo a  $90^\circ$ . Para mejorar las incertidumbres de las mediciones se propone:

- 1) Utilizar Transformadores de medición de Corriente y Tensión de una mejor clase (Cl.: 0.1 o mejor) , reduciendo en gran medida la incertidumbre que estos aportan.
- 2) Se plantea el uso de las calibraciones de los Transformadores de Tensión y de Corriente siguiendo los lineamientos de la especificación técnica: "IEC/TS 60076-19 - Power transformers – Part 19: "Rules for the determination of uncertainties in the measurement of the losses on power transformers and reactors".

Como recomendaciones se propone para nuevos estudios, el desarrollo las estimaciones de la incertidumbre por medio de la guía de la "IEC/TS 60076-19, una comparación de métodos matemáticos para las diferentes regresiones exponenciales para una mejor extrapolación, un estudio estadístico de diferentes ensayos de calentamientos de un mismo transformador, Una propuesta de metodología y procedimientos más claros dentro de las normativas vigentes para las IRAM y Las IEEE. Etc.

## Bibliografía

### Normas

- [1] IRAM 2099, 2106, 2180, 2473, 2476. (2018). Normas IRAM para Transformadores y Equipos de Medición.
- [2] IEC 60076-8:1997. Power Transformers - Application Guide.
- [3] IEC 61181:2007. Power Transformers - Guide for the Application of Composite Bushings.
- [4] IEC 115:2007. Guide for Test Requirements and Test Procedures for Transformer Insulation Systems.
- [5] IEEE C57.12.90:2015. Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers.
- [6] IEC/TS 60076-19:2013. Technical Specification Power Transformers – Part 19: Rules for the determination of uncertainties in the measurement of the losses on power transformers and reactors.

### Apuntes de Clase

- [7] SCHUJMAN, L. O. Medidas Eléctricas. Apuntes de Cátedra, Universidad Nacional de Rosario.
- [8] BEVILACQUA, E. H. Medidas Eléctricas. Apuntes de Cátedra, Universidad Nacional de Rosario.

### Libros

- [9] HEATHCOTE, Martin J. The J & P Transformer Book. 12th Edition, Oxford: Newnes, 1998.
- [10] KULKARNI, S. V., KHAPARDE, S. A. Transformer Engineering: Design and Practice. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [11] FRAILE MORA, J. Máquinas Eléctricas. 6ta edición, Madrid: McGraw-Hill, 2005..



- [12] CORRALES MARTÍN, Juan. La Escuela del Técnico Electricista T.VII: Teoría, Cálculo y Construcción de Transformadores. Madrid: Paraninfo, 1997.
- [13] JARMANDO, C. Testing Power Transformers: Principles, Procedures, and Testing Equipment. Berlin: Springer, 2014.
- [14] KARSHAW, D. L., VAIDYA, S. B. Electrical Testing of Transformers and Power Apparatus. John Wiley & Sons, 2012.
- [15] SCHNEIDER, R. Transformers and Their Applications: Design, Testing, and Operation. New York: Wiley, 2010.
- [16] COMITÉ CONJUNTO PARA GUÍAS EN METROLOGÍA (JCGM/WG 1). Evaluación de datos de medición – Guía para la expresión de la incertidumbre de medida. 1.<sup>a</sup> edición, versión corregida 2012. JCGM 100:2008.
- [17] OFICINA INTERNACIONAL DE PESAS Y MEDIDAS (BIPM), COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL (IEC), FEDERACIÓN INTERNACIONAL DE QUÍMICA CLÍNICA Y LABORATORIOS MÉDICOS (IFCC), COOPERACIÓN INTERNACIONAL DE ACREDITACIÓN DE LABORATORIOS (ILAC), ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN (ISO), UNIÓN INTERNACIONAL DE QUÍMICA PURA Y APLICADA (IUPAC), UNIÓN INTERNACIONAL DE FÍSICA PURA Y APLICADA (IUPAP), OFICINA INTERNACIONAL DE METROLOGÍA LEGAL (OIML). Vocabulario Internacional de Metrología: Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados. 3.<sup>a</sup> edición, versión en español, 2012. Centro Español de Metrología.

## Anexo A

### Determinación de temperaturas

#### Temperatura ambiente (Temperatura del medio de refrigeración - Aire)

Para el ensayo de calentamiento de un transformador, la temperatura del aire de refrigeración debe situarse entre 10 °C y la temperatura ambiente máxima para la cual está diseñado el transformador. Se requieren varios medidores de temperatura, cuyas lecturas se promedian para determinar la temperatura ambiente. Las lecturas pueden hacerse en intervalos regulares o mediante un registro automático continuo.

Alrededor de un transformador ONAN, se colocan sensores de temperatura a la mitad de la altura de las superficies de refrigeración, distribuidos a 2 m del perímetro de la cuba y protegidos de la radiación térmica directa.

#### Temperatura del líquido (temperatura superior):

La temperatura del líquido en la parte superior ( $\theta_o$ ) de un transformador se determina utilizando sensores sumergidos en el líquido aislante en la parte superior de la cuba o en vainas en la tapa.

La cantidad de vainas recomendada varía según la potencia nominal del transformador. Si se utilizan varias vainas, las lecturas se promedian para obtener un valor representativo.

#### Temperatura del líquido (temperatura inferior):

La temperatura del líquido en la parte inferior ( $\theta_b$ ) se debe determinar por sensores de temperatura situados en los conductos de retorno de los enfriadores o radiadores.

#### La temperatura media del líquido

La temperatura media del líquido ( $\theta_{om}$ ) se utiliza para el cálculo del gradiente

La temperatura media del líquido es:

$$\theta_{om} = \frac{(\theta_o + \theta_b)}{2} \quad (8.1)$$

## Anexo B

### Procedimiento para la medición de resistencia del arrollamiento

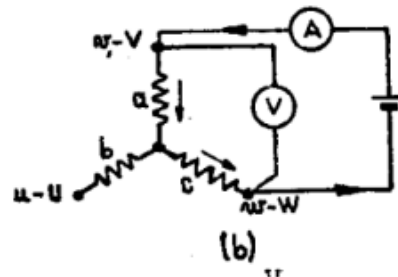
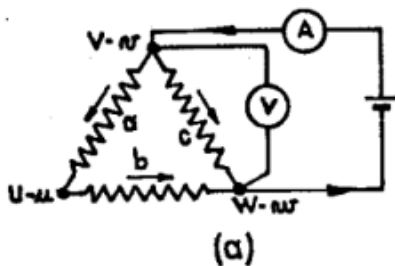
#### Medición de resistencia del arrollamiento

Medición de la resistencia del arrollamiento previo al ensayo. (Resistencia en frío)

Los ensayos y cálculos relativos a la determinación de las pérdidas en cortocircuito, y a la determinación del calentamiento de los arrollamientos, requieren efectuar la medición de las resistencias óhmicas de los arrollamientos, en frío, a la temperatura imperante en el momento de ensayo.

La medición de la resistencia de cada arrollamiento, preferentemente fase por fase, puede hacerse por dos métodos:

- 1- Utilizando un puente de Wheatstone, Kelvin o un analizador de arrollamientos. (caso en que las mediciones son directas)
- 2- Utilizando una fuente de corriente continua, un voltímetro y un amperímetro de corriente continua. Se realiza la medición tomando como modelo de resistencia el de 4 terminales, único aplicable para resistencias pequeñas, donde las resistencias de contactos son significativas.



Esta medición se realiza con la configuración (a) y (b) según sea el grupo de conexión del transformadore a medir (triangulo, estrella, etc.).

En el momento de la medición de la R arrollamientos, debe medirse cuidadosamente su temperatura. En los transformadores con aceite dieléctrico de refrigerante, puede asumirse con suficiente aproximación, que el arrollamiento está a igual temperatura que el aceite en condiciones de ambiente estable donde el arrollamiento y el aceite están en equilibrio térmico.

Para el cálculo de las pérdidas en los arrollamientos referidas a 75°C, deben efectuarse correcciones de las R medidas a diferentes temperaturas.

En caso que Ri se mida en a la temperatura ti del ensayo.

$$R_{75^{\circ}C} = \frac{235 + 75}{235 + t_i} \times R_{75^{\circ}C} \quad (8.2)$$

donde

Ri = resistencia del arrollamiento en el instante de ensayo

ti = temperatura del arrollamiento en el instante de ensayo

### **Medición de resistencia del arrollamiento en el instante del corte**

Ajuste del equipo de refrigeración durante la medición de la resistencia del arrollamiento

El dispositivo de refrigeración se debe mantener preferentemente en el mismo estado (método de refrigeración) durante la inyección de corriente en el arrollamiento. Con este ajuste, es posible obtener información acerca del comportamiento térmico transitorio del arrollamiento y del líquido, a partir de la curva de enfriamiento.

### **Procedimiento para la medición de resistencia del arrollamiento**

La temperatura media del arrollamiento al final del ensayo de calentamiento se determina normalmente por la medición de la resistencia del arrollamiento.

La medición de la resistencia del arrollamiento comienza después del corte de la potencia de ensayo y de la conexión de los arrollamientos a las fuentes de medición en corriente continua.



Como la temperatura y la resistencia del arrollamiento varían con el tiempo, el problema está en extrapolar hacia atrás en el tiempo hasta el instante del corte.

La medición de la resistencia debe comenzar tan pronto como sea posible después de la conexión de los arrollamientos al equipo de medición. En el comienzo, antes de que se establezca la corriente de medición en corriente continua, las lecturas se consideran incorrectas debido a la caída de tensión inductiva en el arrollamiento. El tiempo necesario para esta estabilización se puede reducir:

- controlando la saturación en el núcleo de tal modo que las caídas de inductancia efectiva se reduzcan hasta un valor del mismo orden de magnitud que la inductancia de cortocircuito;
- utilizando un suministro de corriente constante, una fuente de suministro controlada electrónicamente o una batería potente con una elevada resistencia adicional en serie.

Controlar la saturación en el núcleo significa establecer una cierta cantidad de flujo que reduzca el retraso al mínimo posible.

Los dos arrollamientos del par ensayado se pueden conectar a dos circuitos de corriente continua separados o se pueden conectar en serie a uno común. En ambos casos, las direcciones de la corriente deben cooperar a la saturación del núcleo.

Una diferencia de temperatura de 1 K corresponde a una diferencia de resistencia relativa en el orden de  $1/300$ , lo cual, por un descenso exponencial del error, debe corresponder a un descenso de cinco o seis veces la constante de tiempo eléctrica. Todo esto significa, en general, que las primeras mediciones útiles se obtienen dentro del minuto posterior después de establecer la saturación efectiva.

La medición de resistencia de arrollamientos de baja tensión en transformadores elevadores de gran potencia es muy sensible a la f.e.m. inductiva residual que perturba la medición incluso cuando la corriente continua se estabiliza. La f.e.m. inductiva se superpone a la tensión resistiva (en el orden de milivoltios) y los valores de resistencia evaluados en presencia de estas tensiones perturbadas se aumentan o disminuyen artificialmente, dependiendo de la polaridad de las tensiones inducidas. Esto se puede reconocer claramente, cuando la curva de resistencia

viene del extremo alto o, en algunos casos, del extremo más bajo durante la parte inicial de la curva de enfriamiento. En los transformadores de gran potencia, los mejores resultados se pueden obtener cuando la corriente continua se hace circular a través de la totalidad de espiras del arrollamiento de alta tensión. En casos extremos, con resistencias de arrollamiento cercanas o menores que  $1 \text{ m}\Omega$ , se obtendrán valores de resistencia razonables uno o dos minutos después de estabilizar la corriente continua.

Adicionalmente, se tienen que contemplar los tiempos de ejecución de las conexiones y el tiempo para la estabilización de la corriente continua.

El primer valor de resistencia útil se puede obtener en función del tamaño del núcleo.

Se recomienda que el tiempo desde el corte hasta el primer punto válido de la medición de resistencia caliente debe ser menor o igual que:

- 2 min para transformadores  $< 100 \text{ MVA}$ ;
- 3 min para transformadores de  $100 \text{ MVA}$  a  $< 500 \text{ MVA}$ ;

La duración de la curva de enfriamiento debe ser como mínimo de dos veces la constante de tiempo térmica del arrollamiento para dar información acerca del comportamiento térmico transitorio de los arrollamientos y del líquido. La duración puede variar de acuerdo con las características del transformador y las modalidades de ensayo.



## Anexo C

### Tipos de Ensayos y Protocolo de Ensayos [según IRAM 2099]

#### Ensayo de rutina

Este ensayo se realiza en todos los transformadores para verificar características básicas de funcionamiento. Incluye ensayo de resistencia de aislamiento, pérdidas en vacío y cortocircuito, ensayos dieléctricos, etc.

#### Ensayo de tipo

Un ensayo que se realiza sobre un transformador que es representativo de otros transformadores, para demostrar que estos transformadores cumplen con las condiciones especificadas no cubiertas por los ensayos de rutina. Se considera que un transformador es representativo de otros si está construido de acuerdo con los mismos planos, utilizando las mismas técnicas y materiales, y en la misma fábrica. Los ensayos de tipo suelen incluir el ensayo de calentamiento o pruebas de impulso atmosférico.

#### Ensayo especial:

Este es un ensayo acordado entre el fabricante y el comprador, diseñado para condiciones específicas o requisitos adicionales que no están cubiertos por los ensayos de rutina o tipo. Un ensayo especial podría ser un ensayo de Fra o análisis de respuesta en frecuencia.

## Anexo D

### Correcciones

#### Medición de resistencia del arrollamiento

Si no se han obtenido los valores especificados de corriente nominal y o pérdidas totales inyectadas durante el ensayo de calentamiento, los resultados se deben corregir de acuerdo con las siguientes relaciones válidas dentro de una gama de  $\pm 20\%$  del valor establecido de potencia y  $\pm 10\%$  del valor establecido de corriente.

Por acuerdo entre el fabricante y el comprador, se pueden ampliar las correcciones a  $-30\%$  del valor establecido de potencia y a  $-15\%$  del valor establecido de corriente.

Los calentamientos del líquido sobre la temperatura del medio de refrigeración externo al final de la inyección de las pérdidas totales se deben multiplicar por:

$$\left( \frac{\text{Pérdidas totales}}{\text{Pérdidas de ensayo}} \right)^x \quad (8.3)$$

El calentamiento medio del arrollamiento sobre la temperatura media del líquido en el corte se debe multiplicar por:

$$\left( \frac{\text{Corriente nominal}}{\text{Corriente de ensayo}} \right)^y \quad (8.4)$$

El calentamiento en el punto más caliente de los arrollamientos sobre la temperatura del líquido en la parte superior del corte debe multiplicar por:

$$\left( \frac{\text{Corriente nominal}}{\text{Corriente de ensayo}} \right)^z \quad (8.5)$$

Los componentes x, y, z a aplicar se dan en la tabla ...NN de a acuerdo con el tipo de transformador y su sistema de refrigeración.



**Tabla 3 - Exponentes para las correcciones de los resultados de ensayos de calentamiento**

Exponente	Transformadores de distribución	Transformadores de media y de gran potencia			
	ONAN	ONAN	ONAF	OF....	OD...
x	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0
y	1,6	1,6	1,6	1,6	2,0
z	–	1,6	1,6	1,6	2,0

NOTA. Para el propósito de esta tabla, los transformadores de distribución son transformadores con una potencia nominal de hasta 2 500 kVA inclusive.

# Anexo E

## Transformadores de Tensión y Corriente

Para el caso de los TT utilizados al ser clase 0,2 y estando en prestación:

- Error de relación = 0,2 %
- Error de fase 0,3 en centiradianes.

Para el caso de los TI utilizados al ser clase 0,2 y estando en prestación.

### Estimación de la incertidumbre de los transformadores de corriente (TI)

Las características y requisitos a satisfacer para los transformadores de corriente se encuentran normalizado internacionalmente. En nuestro país la IRAM 2275 establece:

Corriente secundaria nominal  $I_s=5^a$  (admitiendo 1 y 2 A como preferenciales)

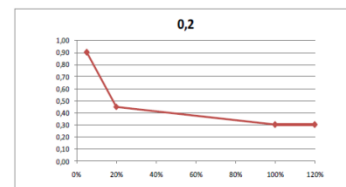
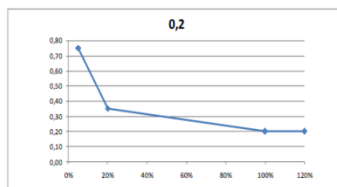
Corrientes nominales ( $I_p$ ): 10 - 12,5 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 75 A

Con sus múltiplos y submúltiplos decimales

Clases 0,1 - 0,5 - 1,0 - 3,0 - 5,0 - 0,2S - 0,5S

Clase de exactitud d (1)	± Error porcentual de relación				± Error de fase en							
					minuto				Centiradian = minuto*360/(2*π*10 <sup>2</sup> )			
	5%	20%	100%	120%	5%	20%	100%	120%	5%	20%	100%	120%
0.1	0.40	0.20	0.10	0.10	15	8	5	5	0.45	0.24	0.15	0.15
0.2	0.75	0.35	0.20	0.20	30	15	10	10	0.90	0.45	0.30	0.30
0.5	1.50	0.75	0.50	0.50	75	37	25	25	2.20	1.10	0.72	0.72
1.0	3.00	1.50	1.00	1.00	150	75	50	50	4.40	2.20	1.44	1.44

Clase de exactitud d (2)	± Error porcentual de relación	
	50%	120%
3	3	3
5	5	5



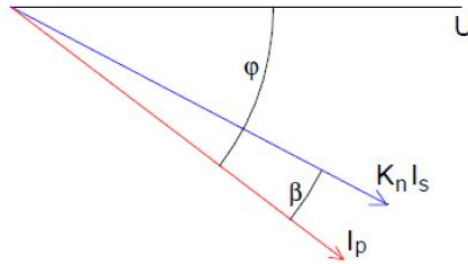
### Incidencia de los errores del T.I.

Siendo la corriente observada

$$I_{obs} = K_n * I_{Sobs}$$

$$e_l = \eta + \left( \frac{\Delta I_S}{I_S} \right)_{cl y ap}$$

Ahora en el caso de medición de potencia, energía o factor de potencia:



**Figura 8-1:** diagrama Fasorial

$$P_{obs} = U * K_n * I_S * \cos(\phi - \beta)$$

$$P = U * I * \cos(\phi)$$

$$e|_{T.I\%} = \frac{P_{obs} - P}{P}$$

$$ee|_{T.I\%} = \frac{U * K_n * I_S * \cos(\phi - \beta) - U * K_e * I_S * \cos(\phi)}{U * K_e * I_S * \cos(\phi)}$$

$$e|_{T.I\%} = \frac{U * K_n * I_S * [\cos(\phi) * \cos(\beta) + \sin(\phi) * \sin(\beta)] - U * K_e * I_S * \cos(\phi)}{U * K_e * I_S * \cos(\phi)}$$

$$e|_{T.I\%} = \frac{K_n * \cos(\phi) * \cos(\beta) - K_e * \cos(\phi)}{K_e * \cos(\phi)} + \frac{K_n * \cos(\phi) * \sin(\beta)}{K_e * \cos(\phi)}$$

Como

$$\cos(\beta) \sim 1$$

$$\sin(\beta) \sim \beta$$

$$\frac{K_n}{K_e} \sim 1$$

Entonces

$$e|_{T.1\%} = \eta + 100 * \beta * \tan(\phi) \tag{8.8}$$

Haciendo una interpolación gráfica, obtenemos los valores para nuestro caso de estudio.

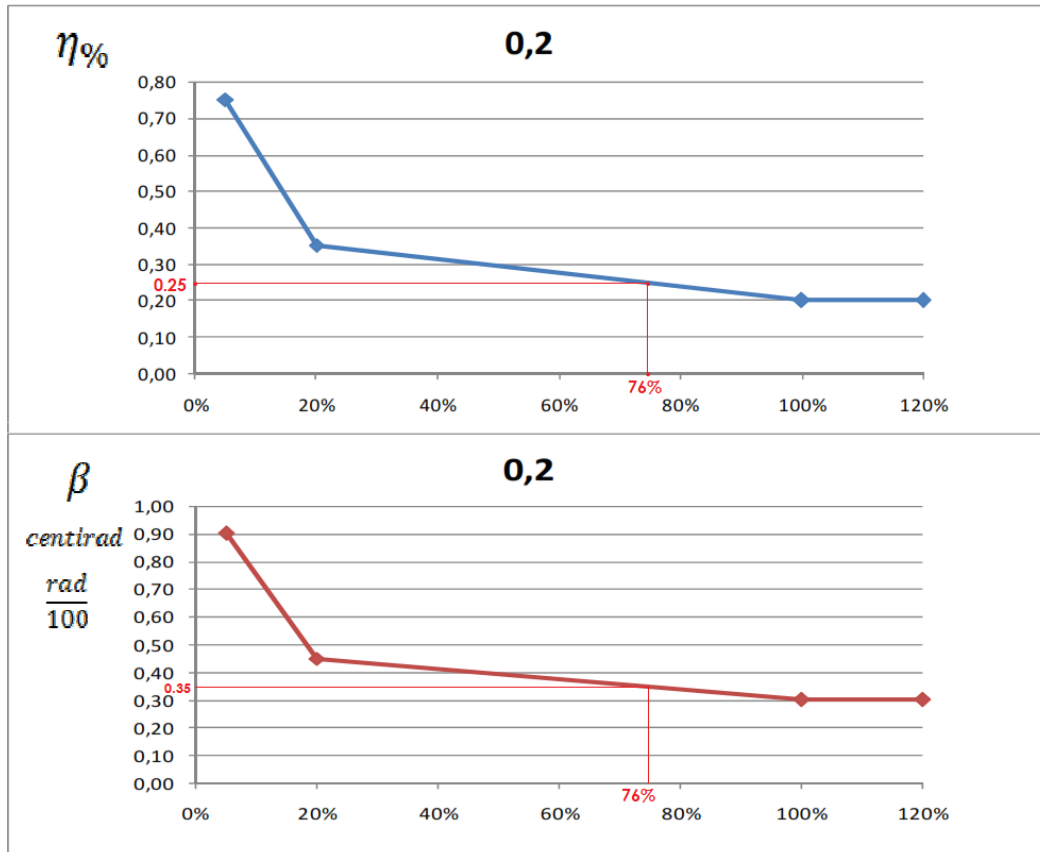


Figura 8-2: Estimación de los errores de CT por interpolación gráfica.



## Anexo F

### Coeficiente de correlación lineal

#### Coeficiente de correlación lineal (coeficiente de Pearson)

El coeficiente de correlación de Pearson, es una medida estadística que cuantifica la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables. Se denota comúnmente como  $r$  y puede tomar un valor entre -1 y 1.

Dentro de sus aplicaciones, el coeficiente de Pearson se utiliza en diversas disciplinas, incluidas las ciencias sociales, la economía, la biología y la ingeniería, para analizar y comprender la relación entre variables cuantitativas.

#### Interpretación de los Valores de $r$ :

- $r=1$  Correlación positiva perfecta (a medida que una variable aumenta, la otra también lo hace de manera proporcional).
- $r=-1$  Correlación negativa perfecta (a medida que una variable aumenta, la otra disminuye de manera proporcional).
- $r=0$  No hay correlación lineal (las variables no tienen una relación lineal observable).

Expresión:

Coeficiente de correlación de Pearson  $r$

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \times \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (8.6)$$

$x_i$  = valores de la variable  $x$  de la muestra

$\bar{x}$  = media de los valores de la variable  $x$

$y_i$  = valores de la variable  $y$  de la muestra.

$\bar{y}$  = media de los valores de la variable  $y$

#### Consideraciones Importantes:

- Linealidad: El coeficiente de Pearson solo mide la relación lineal entre dos variables. No detecta relaciones no lineales.
- Escala de Medición: Las variables deben ser medidas en una escala de intervalo o razón.
- Sensibilidad a valores atípicos: El coeficiente de Pearson puede verse afectado por valores atípicos, lo que puede distorsionar la medida de la relación.

En mathcad:

**corr(A, B)** Devuelve el coeficiente de correlación de Pearson de los elementos en **A** y **B**.

$$\frac{\text{cvar}(A, B)}{(\text{stdev}(A) \cdot \text{stdev}(B))}$$

**Argumentos:**

- **A** y **B** son arrays reales o complejos del mismo tamaño.

## Anexo G

### Cálculo de compensación para ensayo

El ensayo del transformador se realiza por el lado de AT y con el lado de BT en cortocircuito. Y como el transformador en cortocircuito es una carga extremadamente inductiva, es necesario al corrección del Factor de potencia, haciendo una compensación con bancos de capacitores en paralelo a la carga.

El cálculo de compensación para cortocircuito se realiza con la siguiente ecuación

$$U_{CC\ 75^{\circ}C} = 9.80 \%$$

$$Z_{cc} = \frac{U_{CC\ 75^{\circ}C}}{100} \times \frac{V1N^2}{P \times 1000} \quad (8.7)$$

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 \times \left(\frac{I_u + I_v + I_w}{3}\right)^2} \times \frac{235 + 0,8 \times T_{ensayo}}{235 + t_{ensayo}} \quad (8.8)$$

Dando como resultado

$$Z_{cc} = 4,32\Omega$$

$$R_{cc} = 0,196\Omega$$

Pérdidas totales	$(P_{cc\ 75} + 88853) \times 0,8$	51175 W
------------------	-----------------------------------	---------

Potencia activa de ensayo estimada	$P_e$	50000 W
---------------------------------------	-------	---------

Corriente de ensayo	$I_e = \sqrt{\frac{P_e}{3 \times R_{cc}}}$	292 A
---------------------	--	-------

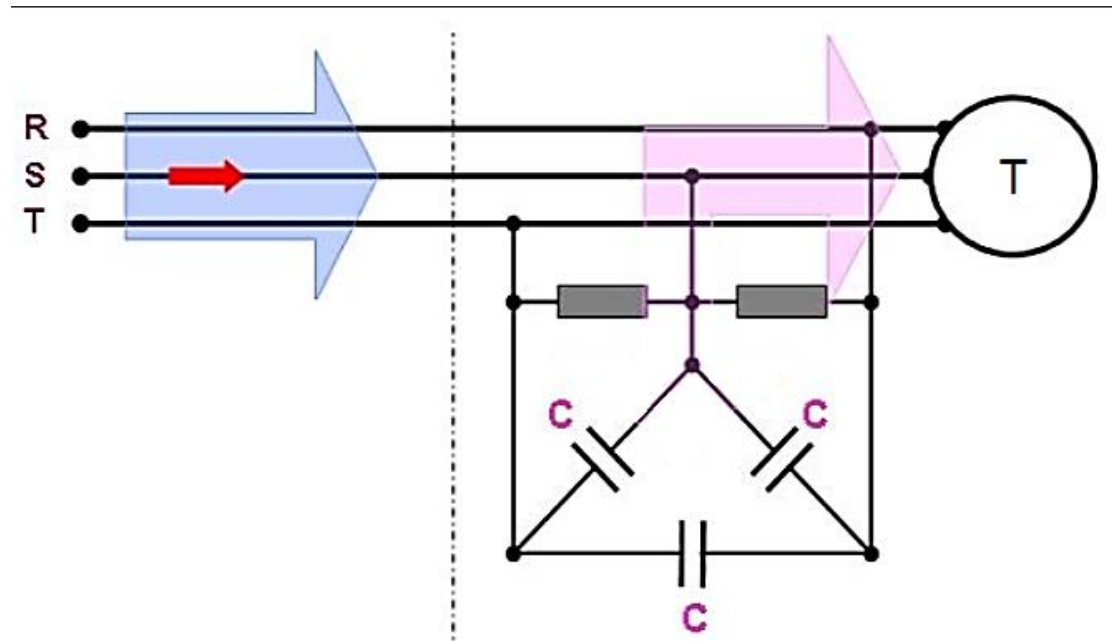
Potencia reactiva inductiva	$Q_1 = 3 \times X_{cc} \times I_e^2 \times \frac{1}{1000}$	1101 kVAR
-----------------------------	--	-----------

Potencia aparente	$S_o = \sqrt{P_e^2 + (Q_1 \times 1000)^2}$	
-------------------	--	--

Tensión de línea

$$U_e = \frac{S_o}{\sqrt{3} \times I_e}$$

2181 V



**Figura 8-3** Esquema de compensación

Potencia reactiva capacitiva

Se cuentan con un banco de capacitores de varias potencias para realizar la compensación, En este ensayo se suman todos los bancos de capacitores

$$Q_c = \left[ \frac{100}{(\sqrt{1} \times 1328)^2} \times 1 + \frac{250}{(\sqrt{1} \times 1328)^2} \times 1 + \frac{500}{(\sqrt{1} \times 1328)^2} \times 1 \right] \times 3 \times U_e^2 \text{ Kvar} \quad (8.9)$$

Dando como resultado

$$Q_c = 1011 \text{ Kvar}$$

La corriente de salida del transformador auxiliar para inyectar las pérdidas totales para el calentamiento se calcula:



$$I_{ccComp} = \frac{\sqrt{P_e^2 + [(Q1 - Q_c) \times 1000]^2}}{U_e \times \sqrt{3}} \quad (8.10)$$

Dando como resultado

$$I_{ccComp} = 27 A$$

La corriente de alimentación en 380v

$$I_{ccAlim} = I_{ccComp} \times \frac{U_e}{380} \quad (8.11)$$

Dando como resultado

$$I_{ccAlim} = 156 A$$

## Anexo H

### Regresión exponencial utilizando Levenberg-Marquardt

Una opción diferente al modelo de mínimos cuadrados planteado por la norma IRAM 2018, es el método de minimización de Levenberg-Marquardt el cual es un método iterativo utilizado para resolver problemas de optimización

El algoritmo de Levenberg-Marquardt es un método iterativo utilizado para resolver problemas de optimización no lineales, especialmente en el contexto del ajuste de modelos no lineales a datos experimentales. Es una combinación de dos métodos: el método del gradiente descendente y el método de Gauss-Newton, y se emplea comúnmente para minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por un modelo.

Aplicaciones:

El algoritmo de Levenberg-Marquardt es particularmente útil en el ajuste de curvas y superficies a datos experimentales, donde se requiere un modelo no lineal. Es ampliamente utilizado en áreas como la visión por computadora, la ingeniería, la física y muchas otras disciplinas que implican la optimización de funciones.

Ventajas:

- **Convergencia Rápida:** En muchos casos, converge más rápido que los métodos basados únicamente en el gradiente descendente o Gauss-Newton.
- **Estabilidad:** Maneja problemas de optimización mal condicionados más eficientemente que algunos otros métodos.

Desventajas:

- **Sensibilidad a la Elección de Parámetros Iniciales:** Puede no converger si los parámetros iniciales están lejos de la solución óptima.
- **Costoso en Computación:** Especialmente en problemas con grandes conjuntos de datos o muchas variables, debido a la necesidad de calcular y almacenar matrices de Jacobiano.



En el programa de cálculo Mathcad, está la función para realizar el cálculo para obtener los coeficientes para encontrar la curva exponencial que mejor se aproxima a los datos ingresados.

---

**Regresión Exponencial**

Ayuda de Mathcad

**expfit(vx, vy, [vg])** Devuelve un vector que contiene tres coeficientes para una curva exponencial de la forma  $A \cdot \exp(b \cdot x) + C$  que mejor se aproxima a los datos de **vx** y **vy**. La función **expfit** emplea el método de minimización de Levenberg-Marquardt.

**Argumentos:**

- **vx** y **vy** son vectores de valores de datos reales de la misma longitud, correspondiente a los valores x e y en el conjunto de datos. Los valores de x deben ser  $\geq 0$ . Deben existir al menos 3 puntos de datos.
- **vg** (opcional) es un vector de tres elementos de valores de prueba reales de los parámetros A, b y C en la ecuación exponencial. Si este argumento no se utiliza, **expfit** genera una prueba ajustando una línea a los registros de **vy**.

**Notas:**

- Para analizar los datos con mayor profundidad o determinar la adecuación de una regresión lineal, es posible que desee aplicar otras [funciones estadísticas](#) de análisis de datos.
- Si desea hacer un ajuste exponencial que sea diferente del anterior, utilice [genfit](#).
- Si desea realizar un ajuste de potencia en los datos que tengan valores x negativos, debe colocar los datos en el eje positivo. Los ajustes exponenciales en datos x negativos pueden producir una función de ajuste de valor imaginario.

**Figura 8-4:**Regresión exponencial según el software MathCAD

## Anexo I

Anexo reservado para adjuntar el Protocolo de ensayos de Transformador ensayado.

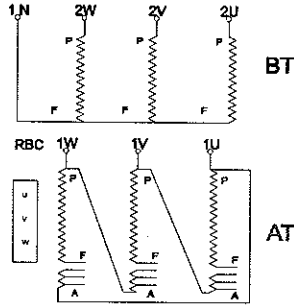
Que se adjunta a continuación.



**PROTOCOLO DE ENSAYO - R 8.2.3 A -1**

Cliente: **MAYO TRANSFORMADORES**  
 Potencia nominal ONAF / ONAN 20 / 14 [MVA]  
 Tensión Primaria Nominal 33000 [V]  
 Tensión Secundaria Nominal 13860 [V]  
 Intensidad Primaria Nominal 350 [A]  
 Intensidad Secundaria Nominal 833 [A]

Transformador N°.: **67395**  
 Fecha 16/05/2017  
 Norma IRAM 2476:2005  
 Modelo ST20MVA  
 Frecuencia 50 Hz  
 Fases 3  
 Grupo de Conexión Dyn11



Conmutador Bajo Carga				
Maschinenfabrik Reinhausen				
VVIII250D40-12233W				
N° Serie 1758749				
Puntos	Reg. Máx.	Reg. Mín.	Pos. nominal	
21	10%	-10%	11	

**MEDICION DE RESISTENCIA DE ARROLLAMIENTO**

Temp [°C]	BAJA TENSION [mΩ]		
	Un	Vn	Wn
20,0	13,024	12,933	13,394

Temp [°C]	BAJA TENSION [mΩ]		
	Un	Vn	Wn
75,0	15,83	15,72	16,28

Temp [°C]	ALTA TENSION [mΩ]			Posición RBC	Temp [°C]	ALTA TENSION [mΩ]			
	UV	VW	WU			UV	VW	WU	
20,0	237,11	236,57	236,31	1	10,00%	75,0	288,25	287,59	287,28
	234,95	234,35	234,14	2	9,00%		285,63	284,90	284,64
	232,79	232,20	232,08	3	8,00%		283,00	282,28	282,14
	230,55	230,03	229,83	4	7,00%		280,28	279,64	279,40
	228,35	227,76	227,63	5	6,00%		277,60	276,88	276,73
	226,06	225,48	225,31	6	5,00%		274,82	274,11	273,91
	223,89	223,29	223,12	7	4,00%		272,18	271,45	271,24
	221,68	221,03	220,87	8	3,00%		269,49	268,70	268,51
	219,41	218,82	218,66	9	2,00%		266,73	266,02	265,82
	217,18	216,62	216,51	10	1,00%		264,02	263,34	263,21
	213,70	213,31	213,38	11A	0,00%		259,79	259,32	259,40
	213,70	213,31	213,38	11B	0,00%		259,79	259,32	259,40
	213,70	213,31	213,38	11C	0,00%		259,79	259,32	259,40
	217,37	216,76	216,57	12	-1,00%		264,25	263,51	263,28
	219,56	219,00	218,87	13	-2,00%		266,92	266,24	266,08
	221,73	221,21	221,02	14	-3,00%		269,55	268,92	268,69
	223,92	223,34	223,20	15	-4,00%		272,22	271,51	271,34
	225,96	225,38	225,21	16	-5,00%		274,70	273,99	273,78
	228,21	227,61	227,43	17	-6,00%		277,43	276,70	276,48
	230,40	229,76	229,59	18	-7,00%		280,09	279,32	279,11
	232,58	231,99	231,78	19	-8,00%		282,74	282,03	281,77
234,80	234,23	234,07	20	-9,00%	285,44	284,75	284,56		
237,08	236,47	236,25	21	-10,00%	288,21	287,47	287,21		

Vigencia de calibración de instrumentos:

Relatómetro N° A10433, 11/16 - TI N° 10294, 10295, 10296, 05/19 - Transductor de Potencia DPMS N° 002, 10/17  
 Voltímetros N° 77540M, 11/16 - Megóhmetro N° A10-225, 10/18 - Miliohmímetro N° A10460, 11/16

**MAYO TRANSFORMADORES S.R.L.**

Ing. Rubén Schalpeter



MAYO TRANSFORMADORES S.R.L. - C.U.I.T.: 30-51925561-4 Ing. Brutos: C

Casa Central: Av. Carranza y 25 de Mayo - Villa Nueva - Córdoba - C.P.

Tel. (0353) 4918601 - Fax (0353) 4918666 E-mail: ventas@gcmayo.com - www.gcmayo.com

Fábrica y Sucursal Rosario: Pje. Santa María 3694 - C.P.: 2000 - Rosario - Santa Fe

Telefax: (0341) 4320351

Sucursal Córdoba: Av. 24 de Septiembre 1212 - C.P.: 5000 - Córdoba Capital - Telefax (0351) 4514343

Planta Fabril Córdoba: Defensa s/n - Córdoba Capital - Planta Impregnadora: Chacra 101 - Paso de los Libres - Corrientes

PRODUCIMOS PARA LA GENTE QUE TRABAJA CON ENERGIA



**PROTOCOLO DE ENSAYO - R 8.2.3 A -1**

Transformador N°.: **67395**

Cliente: **MAYO TRANSFORMADORES**  
 Potencia nominal ONAF / ONAN 20 / 14 [MVA]  
 Tensión Primaria Nominal 33000 [V]  
 Tensión Secundaria Nominal 13860 [V]  
 Intensidad Primaria Nominal 350 [A]  
 Intensidad Secundaria Nominal 833 [A]

Fecha 16/05/2017  
 Norma IRAM 2476:2005  
 Modelo ST20MVA  
 Frecuencia 50 Hz  
 Fases 3  
 Grupo de Conexión Dyn11

**MEDICION DE RELACION DE TRANSFORMACION**

Posición del RBC			Relación teórica	Fase			Tolerancia	
				U	V	W	-0,5%	0,5%
1	10,00%	36300	4,536	4,542	4,534	4,534	4,514	4,559
2	9,00%	35970	4,495	4,500	4,492	4,492	4,473	4,518
3	8,00%	35640	4,454	4,458	4,451	4,451	4,432	4,476
4	7,00%	35310	4,413	4,417	4,409	4,409	4,391	4,435
5	6,00%	34980	4,371	4,375	4,367	4,367	4,350	4,393
6	5,00%	34650	4,330	4,334	4,326	4,326	4,308	4,352
7	4,00%	34320	4,289	4,292	4,284	4,284	4,267	4,310
8	3,00%	33990	4,248	4,250	4,242	4,242	4,226	4,269
9	2,00%	33660	4,206	4,209	4,201	4,201	4,185	4,227
10	1,00%	33330	4,165	4,167	4,159	4,159	4,144	4,186
11A	0,00%	33000	4,124	4,125	4,117	4,117	4,103	4,145
<b>11B</b>	<b>0,00%</b>	<b>33000</b>	<b>4,124</b>	<b>4,125</b>	<b>4,117</b>	<b>4,117</b>	<b>4,103</b>	<b>4,145</b>
11C	0,00%	33000	4,124	4,125	4,117	4,117	4,103	4,145
12	-1,00%	32670	4,083	4,084	4,076	4,076	4,062	4,103
13	-2,00%	32340	4,041	4,042	4,034	4,034	4,021	4,062
14	-3,00%	32010	4,000	4,000	3,992	3,992	3,980	4,020
15	-4,00%	31680	3,959	3,958	3,951	3,951	3,939	3,979
16	-5,00%	31350	3,918	3,917	3,911	3,911	3,898	3,937
17	-6,00%	31020	3,876	3,875	3,868	3,868	3,857	3,896
18	-7,00%	30690	3,835	3,834	3,826	3,826	3,816	3,854
19	-8,00%	30360	3,794	3,792	3,784	3,784	3,775	3,813
20	-9,00%	30030	3,753	3,751	3,743	3,743	3,734	3,772
21	-10,00%	29700	3,712	3,709	3,701	3,701	3,693	3,730

Relaciómetro N° A10433, 11/16 - TI N° 10294, 10295, 10296, 05/19 - Transductor de Potencia DPMS N° 002, 10/17 - Voltímetros N° 77540M, 11/16 - Megóhmetro N° A10-225, 10/18 - Miliohmímetro N° A10460, 11/16

**MAYO TRANSFORMADORES S.R.L.**  
Ing. Rubén Schalpeter



**MAYO TRANSFORMADORES S.R.L.** - C.U.I.T.: 30-51925561-4 Ing. Brutos: CM 921.750376.9

**Casa Central:** Av. Carranza y 25 de Mayo - Villa Nueva - Córdoba - C.P.: 5903

Tel. (0353) 4918601 - Fax (0353) 4918666 E-mail: ventas@gcmayo.com - www.gcmayo.com

**Fábrica y Sucursal Rosario:** Pje. Santa María 3694 - C.P.: 2000 - Rosario - Santa Fe

Telefax: (0341) 4320351

**Sucursal Córdoba:** Av. 24 de Septiembre 1212 - C.P.: 5000 - Córdoba Capital - Telefax (0351) 4514343

**Planta Fabril Córdoba:** Defensa s/n - Córdoba Capital - **Planta Impregnadora:** Chacra 101 - Paso de los Libres - Corrientes



**PROTOCOLO DE ENSAYO - R 8.2.3 A -1**

Transformador N°: **67395**

Cliente: **MAYO TRANSFORMADORES**

Potencia nominal ONAF / ONAN 20 / 14 [MVA]  
 Tensión Primaria Nominal 33000 [V]  
 Tensión Secundaria Nominal 13860 [V]  
 Intensidad Primaria Nominal 350 [A]  
 Intensidad Secundaria Nominal 833 [A]

Fecha 16/05/2017  
 Norma IRAM 2476:2005  
 Modelo ST20MVA  
 Frecuencia 50 Hz  
 Fases 3  
 Grupo de Conexión Dyn11

**ENSAYO DE VACIO**

**Ensayo a Un**

Transformadores de medición:

Relación Nominal Constante	T.I.	T.T.
	2 / 5 A/A	13200 / 110 V/V
	0,4	120

	Lecturas tensión	Lecturas Corriente	Lectura Potencia	Tensión [V]	Corriente [A]	Pot. activa total [W]
Fase U	111,22	1,65	232,1	13.346	0,661	11.141
Fase V	0,00	0,00		0	0,000	
Fase W	118,35	1,60		14.202	0,638	
Promedio				13.774	0,65	

Corriente de vacío a 100% de Un **0,08%** [%In]  
 Pérdidas de vacío **11.141** [W]

**Ensayo a 1,1 Un**

Transformadores de medición:

Relación Nominal Constante	T.I.	T.T.
	2 / 5 A/A	13200 / 110 V/V
	0,4	120

	Lecturas tensión	Lecturas Corriente	Tensión [V]	Corriente [A]
Fase U	122,79	2,21	14735	0,885
Fase V	0,00	0,00	0	0,000
Fase W	128,53	2,02	15423	0,809
Promedio			15079	0,85

Corriente de vacío a 110% de Un **0,10%** [%In]

Relaciómetro N° A10433, 11/16 - TI N° 10294, 10295, 10296, 05/19 - Transductor de Potencia DPMS N° 002, 10/17 - Voltímetros N° 77540M, 11/16 - Megóhmetro N° A10-225, 10/18 - Miliohmímetro N° A10460, 11/16

**MAYO TRANSFORMADORES S.R.L.**

Ing. Rubén Schabeter



MAYO TRANSFORMADORES S.R.L. - C.U.I.T.: 30-51925561-4 Ing. Brutos:

**Casa Central:** Av. Carranza y 25 de Mayo - Villa Nueva - Córdoba - C.F

Tel. (0353) 4918601 - Fax (0353) 4918666 E-mail: ventas@gcmayo.com - www.gcmayo.com

**Fábrica y Sucursal Rosario:** Pje. Santa María 3694 - C.P.: 2000 - Rosario - Santa Fe

Telefax: (0341) 4320351

**Sucursal Córdoba:** Av. 24 de Septiembre 1212 - C.P.: 5000 - Córdoba Capital - Telefax (0351) 4514343

**Planta Fabril Córdoba:** Defensa s/n - Córdoba Capital - **Planta Impregnadora:** Chacra 101 - Paso de los Libres - Corrientes



**PROTOCOLO DE ENSAYO - R 8.2.3 A -1**

Transformador N°.: **67395**

Cliente: | **MAYO**  
TRANSFORMADORES

Potencia nominal ONAF / ONAN 20 / 14 [MVA]  
Tensión Primaria Nominal 33000 [V]  
Tensión Secundaria Nominal 13860 [V]  
Intensidad Primaria Nominal 350 [A]  
Intensidad Secundaria Nominal 833 [A]  
Posición del RBC 11 Toma de Regulación 0%

Fecha 16/05/2017  
Norma IRAM 2476:2005  
Modelo ST20MVA  
Frecuencia 50 Hz  
Fases 3  
Grupo de Conexión Dyn11

Conmutador Bajo Carga	Puntos	Reg. Máx.	Reg. Min.	Posición nominal
	21	10%	-10%	11

**ENSAYO DE CORTOCIRCUITO**  
Posición del RBC Punto Nominal 11

Transformadores de medición		Instrumentos		
T.I.	T.T.	Corriente	Tensión	Potencia
300 / 5	3.300 / 110	5 / 5	120 / 120	1
Constante 60	30	60	30	1.800

Fase	Lecturas tensión	Lecturas Corriente	Lectura Potencia	Tensión [V]	Corriente [A]	Pot. Activa	Temp. [°C]
U	46,730	3,833	18,24	1.401,90	229,98	32.823	22,0
V	41,560	3,851		1.246,80	231,06		
W	39,200	3,815		1.176,00	228,90		
Promedio				<b>1.274,90</b>	<b>229,98</b>		

Potencia de cortocircuito a Temp. de ensayo y corriente nominal: 75.982 [W]  
Potencia Joule a Temp. de ensayo y corriente nominal: 67.038 [W]  
Potencia Joule a 75°C y corriente nominal: 80.863 [W]  
Pérdidas adicionales a Tem. de ensayo y corriente nominal: 8.944 [W]  
Pérdidas adicionales a 75°C y corriente nominal: 7.414 [W]  
8,4 [%]

Potencia de cortocircuito a 75°C y corriente nominal: **88.278** [W]

Tensión de cortocircuito a 75°C **10,18** [%]

Relatómetro N° A10433, 11/16 - TI N° 10294, 10295, 10296, 05/19 - Transductor de Potencia DPMS N° 002, 10/17 - Voltímetros N° 77549M, 11/16 - Megóhmetro N° A10-225, 10/18 - Miliohmímetro N° A10460, 11/16

**MAYO TRANSFORMADORES S.R.L.**

Ing. Rubén Schalpeter



MAYO TRANSFORMADORES S.R.L. - C.U.I.T.: 30-51925561-4 Ing. Brutos: CM

**Casa Central:** Av. Carranza y 25 de Mayo - Villa Nueva - Córdoba - C.P.: 5903

Tel. (0353) 4918601 - Fax (0353) 4918666 E-mail: ventas@gcmayo.com - www.gcmayo.com

**Fábrica y Sucursal Rosario:** Pje. Santa María 3694 - C.P.: 2000 - Rosario - Santa Fe

Telefax: (0341) 4320351

**Sucursal Córdoba:** Av. 24 de Septiembre 1212 - C.P.: 5000 - Córdoba Capital - Telefax (0351) 4514343

**Planta Fabril Córdoba:** Defensa s/n - Córdoba Capital - **Planta Impregnadora:** Chacra 101 - Paso de los Libres - Corrientes

PRODUCIMOS PARA LA GENTE QUE TRABAJA CON ENERGIA



**PROTOCOLO DE ENSAYO - R 8.2.3 A -1**

Cliente: **MAYO TRANSFORMADORES**  
 Potencia nominal ONAN / ONAF **14 / 20** [MVA]  
 Tensión Primaria Nominal **33.000** [V]  
 Tensión Secundaria Nominal **13.860** [V]  
 Intensidad Primaria Nominal **350** [A]  
 Intensidad Secundaria Nominal **833** [A]

Transformador N°.: **67395**  
 Fecha: **16/05/2017**  
 Norma **IRAM 2476:2005**  
 Modelo **ST20MVA**  
 Frecuencia **50 Hz**  
 Fases **3**  
 Grupo de Conexión **Dyn11**

Conmutador Bajo Carga	Puntos	Reg. Máx.	Reg. Mín.	Posición nominal
	21	10%	-10%	11

**MEDICION DE PERDIDAS PARA CALENTAMIENTO**

Posición del RBC Punto 1 (10%)

Transformadores de medición		Instrumentos		
T.I.	T.T.	Corriente	Tensión	Potencia
500 / 5	3.300 / 110	5 / 5	120 / 120	1
100	30	100	30	3.000

Constante de lectura

Fase	Lecturas tensión	Lecturas Corriente	Lectura Potencia	Tensión [V]	Corriente [A]	Pot. Activa [W]	Temp. [°C]
U	45,70	1,767	7,66	1.371,0	176,7	22.973	20
V	40,30	1,761		1.209,0	176,1		
W	38,17	1,753		1.145,0	175,3		
Promedio				<b>1.241,7</b>	<b>176,0</b>		

**Condición de refrigeración**

	ONAN	ONAF	
Potencia del transformador de ensayo	14	20	[MVA]
Porcentaje de regulación toma seleccionada	10%	10%	%
Tensión primaria de toma seleccionada	36.300	36.300	[V]
Corriente primaria de toma seleccionada	223	318	[A]
Corriente secundaria nominal	584	834	[A]
Potencia de cortocircuito a temp. de ensayo y a In	36.845	75.194	[W]
<b>Potencia Joule a temp. de ensayo y In</b>	<b>31.053</b>	<b>63.374</b>	<b>[W]</b>
Potencia joule a 75°C y In	37.751	77.043	[W]
Pérdidas adicionales a temp. de ensayo y In	5.792	11.820	[W]
Pérdidas adicionales a 75°C y In	4.764	9.723	[W]
Potencia de cortocircuito a 75°C y In	<b>42.515</b>	<b>86.766</b>	[W]
Potencia total para ensayo de cal. Po + Pcc 75°C	<b>53.656</b>	<b>97.907</b>	[W]
Tensión de cortocircuito a 75°C		<b>10,72</b>	[%]

Relaciómetro N° A10433, 11/16 - TI N° 10294, 10295, 10296, 05/19 - Transductor de Potencia DPMS N° 002, 10/17 - Voltímetros N° 77540M, 11/16 - Megóhmetro N° A10-225, 10/18 - Miliohmímetro N° A10460, 11/16

**MAYO TRANSFORMADORES S.R.L.**

Ing. Rubén Schelpeter



MAYO TRANSFORMADORES S.R.L. - C.U.I.T.: 30-51925561-4 Ing. Brutos: C

Casa Central: Av. Carranza y 25 de Mayo - Villa Nueva - Córdoba - C.P.

Tel. (0353) 4918601 - Fax (0353) 4918666 E-mail: ventas@gcmayo.com - www.gcmayo.com

Fábrica y Sucursal Rosario: Pje. Santa María 3694 - C.P.: 2000 - Rosario - Santa Fe

Telefax: (0341) 4320351

Sucursal Córdoba: Av. 24 de Septiembre 1212 - C.P.: 5000 - Córdoba Capital - Telefax (0351) 4514343

Planta Fabril Córdoba: Defensa s/n - Córdoba Capital - Planta Impregnadora: Chacra 101 - Paso de los Libres - Corrientes



**PROTOCOLO DE ENSAYO - R 8.2.3 A -1**

Cliente: **MAYO TRANSFORMADORES**  
 Potencia nominal ONAN / ONAF **14 / 20 [MVA]**  
 Tensión Primaria Nominal **33.000 [V]**  
 Tensión Secundaria Nominal **13.860 [V]**  
 Intensidad Primaria Nominal **350 [A]**  
 Intensidad Secundaria Nominal **833 [A]**

Transformador N°: **67395**  
 Fecha: **16/05/2017**  
 Norma **IRAM 2476:2005**  
 Modelo **ST20MVA**  
 Frecuencia **50 Hz**  
 Fases **3**  
 Grupo de Conexión **Dyn11**

Conmutador Bajo Carga	Puntos	Reg. Máx.	Reg. Mín.	Posición nominal
	21	10%	-10%	11

**MEDICION DE PERDIDAS PARA CALENTAMIENTO**

Posición del RBC Punto 21 (-10%)

Transformadores de medición		Instrumentos		
T.I.	T.T.	Corriente	Tensión	Potencia
500 / 5	3.300 / 110	5 / 5	120 / 120	1
100	30	100	30	3.000

Constante de lectura

Fase	Lecturas tensión	Lecturas Corriente	Lectura Potencia	Tensión [V]	Corriente [A]	Pot. Activa [W]	Temp. [°C]
U	44,61	2,8152	15,46	1.338,3	281,5	46.382	22
V	39,14	2,8176		1.174,2	281,8		
W	37,49	2,7936		1.124,7	279,4		
Promedio				<b>1.212,4</b>	<b>280,9</b>		

**Condición de refrigeración**

	ONAN	ONAF	
Potencia del transformador de ensayo	<b>14</b>	<b>20</b>	[MVA]
Porcentaje de regulación toma seleccionada	-10%	-10%	%
Tensión primaria de toma seleccionada	29.700	29.700	[V]
Corriente primaria de toma seleccionada	272	389	[A]
Corriente secundaria nominal	584	834	[A]
Potencia de cortocircuito a temp. de ensayo y a In	43.647	89.076	[W]
<b>Potencia Joule a temp. de ensayo y In</b>	<b>40.076</b>	<b>81.787</b>	<b>[W]</b>
Potencia joule a 75°C y In	48.340	98.653	[W]
Pérdidas adicionales a temp. de ensayo y In	3.572	7.290	[W]
Pérdidas adicionales a 75°C y In	2.961	6.043	[W]
Potencia de cortocircuito a 75°C y In	<b>51.301</b>	<b>104.697</b>	[W]
Potencia total para ensayo de cal. Po + Pcc 75°C	<b>62.442</b>	<b>115.838</b>	[W]
Tensión de cortocircuito a 75°C		<b>9,80</b>	[%]

Relatómetro N° A70433, 11/16 - TI N° 10294, 10295, 10296, 05/19 - Transductor de Potencia DPMS N° 002, 10/17  
 Voltímetros N° 77540M, 11/16 - Megóhmetro N° A10-225, 10/18 - Miliohmímetro N° A10460, 11/16

**MAYO TRANSFORMADORES S.R.L.**  
 Ing. Rubén Schalpeter



**MAYO TRANSFORMADORES S.R.L.** - C.U.I.T.: 30-51925561-4 Ing. Brutos: Cl

**Casa Central:** Av. Carranza y 25 de Mayo - Villa Nueva - Córdoba - C.P.:

Tel. (0353) 4918601 - Fax (0353) 4918666 E-mail: ventas@gcmayo.com - [www.gcmayo.com](http://www.gcmayo.com)

**Fábrica y Sucursal Rosario:** Pje. Santa María 3694 - C.P.: 2000 - Rosario - Santa Fe

Telefax: (0341) 4320351

**Sucursal Córdoba:** Av. 24 de Septiembre 1212 - C.P.: 5000 - Córdoba Capital - Telefax (0351) 4514343

**Planta Fabril Córdoba:** Defensa s/n - Córdoba Capital - **Planta Impregnadora:** Chacra 101 - Paso de los Libres - Corrientes

PRODUCIMOS PARA LA GENTE QUE TRABAJA CON ENERGIA

3PFZ  
 C. I. B. R. A.  
 INGENIERIA



**PROTOCOLO DE ENSAYO - R 8.2.3 A - 1**

Cliente: **MAYO**  
TRANSFORMADORES

Potencia nominal ONAF / ONAN 20 / 14 [MVA]  
Tensión Primaria Nominal 33000 [V]  
Tensión Secundaria Nominal 13860 [V]  
Intensidad Primaria Nominal 350 [A]  
Intensidad Secundaria Nominal 833 [A]

Transformador N°: **67395**  
Fecha: 16/05/2017  
Norma IRAM 2476:2005  
Modelo ST20MVA  
Frecuencia 50 Hz  
Fases 3  
Grupo de Conexión Dyn11

**MEDICION DE RESISTENCIA DE AISLACION**

Tensión de ensayo [V]	5000							
Temperatura [°C]	20,4			20				
Tiempo [min]	0,5	1	10	0,5	1	10	RAD	IP
AT/ BAJA [Giga-Ohm]	10,13	13,62	80,40	10,54	14,16	83,62	1,34	5,90
BT/ MASA [Giga-Ohm]	11,30	16,12	64,40	11,75	16,76	66,98	1,43	4,00
AT / MASA [Giga-Ohm]	19,40	22,00	26,60	20,18	22,88	27,66	1,13	1,21
Núcleo/ MASA [Giga-Ohm]	1,07			Tensión de ensayo [V]			2500	

<b>MEDICION DE IMPEDANCIA HOMOPOLAR</b>			
Posición del RBC Punto Nominal			11
Tensión [V]	Corriente [A]	Temp [°C]	Zo [Ω]
16,9	54,0	27,6	0,94

<b>ENSAYOS DIELECTRICOS</b>		
TENSION APLICADA		TENSION INDUCIDA
AT/ Masa	BT/ Masa	
72 [kV]	38 [kV]	27,72 [kV]
60 [s]	60 [s]	45 [s]
50 [Hz]		150 [Hz]

Rigidez Dieléctrica Aceite [kV]	60
Hermeticidad - Estanqueidad 50 [Kpa]-30[min]	OK
Prueba de funcionamiento circuito de ventilación	OK (*)
Ensayos de los elementos de protección del transformador	OK (*)
Ensayos de operación del conmutador bajo carga	OK
Control de espesor, uniformidad y adherencia de pintura	OK

**Aceite aislante: YPF 64, de la partida AGE535L, libre de PCB.**

(\*) Ver nota acta

Relatómetro N° A10433, 11/16 - TI N° 10294, 10295, 10296, 05/19 - Transductor de Potencia DPMS N° 002, 10/17 - Voltímetros N° 77540, 11/16 - Megóhmetro N° A10-225, 10/18 - Miliohmímetro N° A10460, 11/16

**MAYO TRANSFORMADORES S.R.L.**

Ing. Rubén Schnalper



MAYO TRANSFORMADORES S.R.L. - C.U.I.T.: 30-51925561-4 Ing. Br

Casa Central: Av. Carranza y 25 de Mayo - Villa Nueva - Córdoba

Tel. (0353) 4918601 - Fax (0353) 4918666 E-mail: ventas@gcmayo.cc...

Fábrica y Sucursal Rosario: Pje. Santa María 3694 - C.P.: 2000 - Rosario - Santa Fe

Telefax: (0341) 4320351

Sucursal Córdoba: Av. 24 de Septiembre 1212 - C.P.: 5000 - Córdoba Capital - Telefax (0351) 4514343

Planta Fabril Córdoba: Defensa s/n - Córdoba Capital - Planta Impregnadora: Chacra 101 - Paso de los Libres - Corrientes



**PROTOCOLO DE ENSAYO - R 8.2.3 A - 1**

Cliente: **MAYO TRANSFORMADORES**  
 Potencia nominal ONAF / ONAN 20 / 14 [MVA]  
 Tensión Primaria Nominal 33000 [V]  
 Tensión Secundaria Nominal 13860 [V]  
 Intensidad Primaria Nominal 350 [A]  
 Intensidad Secundaria Nominal 833 [A]

Transformador N°.: **67395**  
 Fecha: 16/05/2017  
 Norma IRAM 2476:2005  
 Modelo ST20MVA  
 Frecuencia 50 Hz  
 Fases 3  
 Grupo de Conexión Dyn11

**MEDICION DE CORRIENTE EXITACION**

Se aplica 220 V 50 Hz por BT estando el transformador en vacío.

FASE	Tensión [V]	Corriente [A]
Un	231,14	0,078
Vn	231,28	0,064
Wn	231,06	0,079

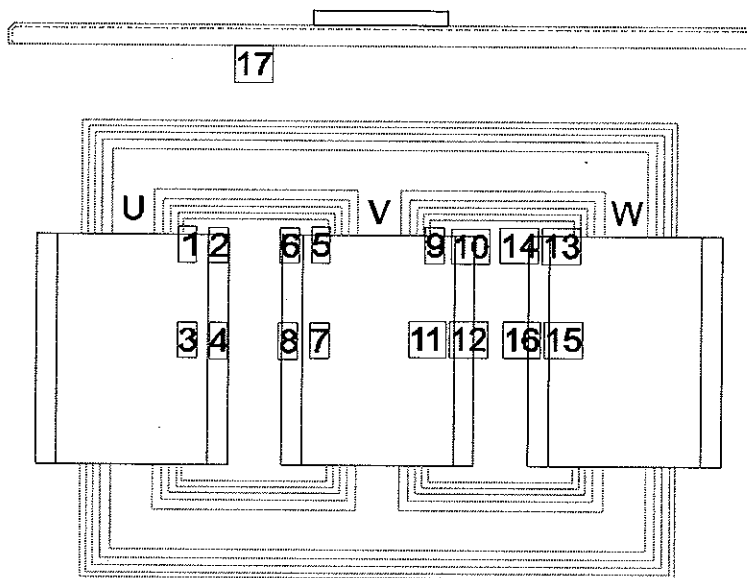
**MEDICION POTENCIA REFRIGERACION ONAF**

**1021** [W]

**MEDICIÓN DE SONDAS DE TEMPERATURA HOT SPOT**

Luego del ensayo de calentamiento se registran las temperaturas de las sondas.

Sonda N°	Temp. [°C]
1	54,8
2	53,6
3	52,1
4	46,4
5	58,3
6	53
7	47,7
8	47,8
9	56,4
10	52,1
11	48,4
12	45,1
13	55,8
14	53,6
15	49,3
16	45,9
17	55,7
T. Oil Tap	51,0
T. Amb	22,0



Ubicación sondas en el transformador



**MAYO TRANSFORMADORES S.R.L.**  
 Ing. Rubén Schallpeter



**MAYO TRANSFORMADORES S.R.L.** - C.U.I.T.: 30-51925561-4 Ing. Bruto: CM 921.750376.9

**Casa Central:** Av. Carranza y 25 de Mayo - Villa Nueva - Córdoba - C.P.: 5903  
 Tel. (0353) 4918601 - Fax (0353) 4918666 E-mail: ventas@gcmayo.com - www.gcmayo.com

**Fábrica y Sucursal Rosario:** Pje. Santa María 3694 - C.P.: 2000 - Rosario - Santa Fe  
 Telefax: (0341) 4320351

**Sucursal Córdoba:** Av. 24 de Septiembre 1212 - C.P.: 5000 - Córdoba Capital - Telefax (0351) 4514343

**Planta Fabril Córdoba:** Defensa s/n - Córdoba Capital - **Planta Impregnadora:** Chacra 101 - Paso de los Libres - Corrientes