



**PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACION DEL ENSAYO DE  
CALENTAMIENTO EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION**

**DIEGO FERNANDO HERRERA ACEVEDO**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA**

**FACULTAD SECCIONAL DUITAMA**

**INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**DUITAMA**

**2020**

**PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACION DEL ENSAYO DE  
CALENTAMIENTO EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION**

**DIEGO FERNANDO HERRERA ACEVEDO**

**Informe final presentado en la modalidad de monografía como requisito para  
obtener el título de:**

**INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**JUAN CARLOS CASTRO GALEANO**

**Director del proyecto**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA**

**FACULTAD SECCIONAL DUITAMA**

**INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**DUITAMA**

**2020**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Firma del presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Duitama, día, mes, año



*Para **MARLEN ACEVEDO**, Madre, Amiga y Confidente quien lamentablemente Dios llamo a su presencia, es gracias a ella, a su esfuerzo y dedicación y el sueño de ver en sus hijos un futuro mejor que es posible ver alcanzada esta meta, espero que desde donde estés te sientas orgullosa de ver este logro que juntos alcanzamos. Tu presencia física no nos puede acompañar, pero tu memoria y tu legado estará siempre presente en nuestros corazones.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco en primer lugar a Dios por permitirme llegar hasta aquí, a mi Madre Marlen quien desde el inicio siempre me brindo su apoyo incondicional y fue el motor de este sueño sin ella nada de esto sería posible.*

*Agradecimiento a Marcela, hermana quien sirvió de apoyo en situaciones difíciles y en quien siempre encontré una palabra de fortaleza para seguir adelante.*

*Agradecimiento a María del Carmen, abuela quien siempre creyó en este sueño.*

*Agradecimiento a la Familia Alvarado Acevedo por su colaboración y apoyo en este camino.*

*Agradecimiento a Mi Director de tesis Juan Carlos Castro por confiar en mi para sacar adelante este proyecto.*

*Agradecimiento a los compañeros de Ingeniería Electromecánica en especial a quienes me acompañaron y con quienes compartimos tantos momentos juntos, Alejandra, Arley, Sonia y Karen.*

*A Todo el conjunto de profesores por transmitirnos sus conocimientos y solo querer forjar profesionales que le aporten al país infinitas gracias.*

## CONTENIDO

<b>1. GENERALIDADES .....</b>	<b>2</b>
1.1 Aplicación .....	2
1.2 Cargabilidad .....	2
1.3 Vida útil del Aislamiento.....	3
1.4 Hot spot .....	4
1.5 Distribución de Temperatura en un transformador .....	5
1.6 Tipos de ensayo .....	7
1.7 Métodos de ensayo .....	8
1.8 Medición de la resistencia en los devanados y pérdidas con carga y corriente sin carga.....	12
1.9 Banco de condensadores: .....	12
1.10 Cromatografía de gases .....	15
<b>2. COMPARACION ENTRE LOS ESTANDARES INTERNACIONALES Y NACIONALES PARA EL ENSAYO DE CALENTAMIENTO. ....</b>	<b>17</b>
2.1 Estándares específicos para el ensayo de calentamiento.....	17
2.2 Ediciones de los estándares en orden cronológico .....	18
2.2.1 INTERNACIONAL STANDARD IEC 60076-2: Power Transformers Part 2: Temperature rise .....	18
2.2.2 IEEE std C57.12.90: IEEE Standard Test Code For Liquid –Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers .....	19
2.2.3 NTC 316 .....	19
2.3 Comparación entre los estándares internacionales y nacionales específicos para el ensayo de calentamiento .....	19
2.3.1 Objeto .....	20
2.3.2 Condiciones generales .....	21
2.3.3 Métodos de ensayo.....	22

2.3.4	Mediciones de temperatura.....	24
2.3.5	Mediciones de resistencia.....	28
2.3.6	Correcciones.....	31
2.3.7	Límites del ensayo.....	34
<b>3.</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE PRUEBA PARA IMPLEMENTAR EL ENSAYO DE CALENTAMIENTO .....</b>	<b>35</b>
3.1	Equipos y elementos necesarios.....	35
3.1.1	Componentes eléctricos .....	35
3.1.2	Equipos de medida .....	35
3.1.3	Elementos necesarios:.....	36
3.2	Diagramas de conexión .....	36
3.3	Procedimiento.....	39
3.3.1	Consideraciones Generales:.....	40
3.3.2	Consideraciones iniciales:.....	41
3.3.3	Etapas 1. ....	42
3.3.4	Etapas 2.....	43
3.3.5	Análisis de datos.....	44
3.3.6	Resultados e Informe.....	45
<b>4.</b>	<b>IMPLEMENTACION DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO PARA EL LABORATORIO DE ENSAYOS DE LA UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA.....</b>	<b>47</b>
4.1	Espacios Disponibles:.....	47
4.2	Componentes eléctricos, equipos de medida y elementos para implementar el ensayo.....	47
4.3	Diagramas de conexión. ....	48



4.3.1 Diagrama Unifilar .....	49
4.3.2 Diagrama Trifilar .....	49
4.4 Presupuesto .....	50
<b>5. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA PARA REALIZAR EL MUESTREO Y LA INTERPRETACION DE RESULTADOS DEL ANALISIS CROMATOGRAFICO EN ACEITE DIELECTRICO DE TRANSFORMADORES .....</b>	<b>51</b>
5.1 Descripción de las etapas.....	52
<b>6. PRUEBA PILOTO DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO .....</b>	<b>55</b>
6.1 Ubicación del transformador y zona de pruebas .....	55
6.2 Ensayo de Calentamiento.....	56
6.3 Prueba piloto del ensayo de calentamiento.....	60
6.3.1 Consideraciones Generales.....	60
6.3.2 Consideraciones iniciales .....	62
6.3.3 Etapa 166	
6.3.4 Etapa 2: .....	71
6.3.5 Análisis de Datos .....	74
6.4 Muestreo e interpretación de resultados del análisis cromatográfico en aceite dieléctrico de transformadores.....	86
6.5 Resultados e informe .....	90
<b>7. PLANTILLA PARA LA PRESENTACION DE INFORMES .....</b>	<b>92</b>
8. CONCLUSIONES.....	99
9. RECOMENDACIONES.....	100
10. BIBLIOGRAFIA.....	101

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1 NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS PARA PERDIDAS Y MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS.....	12
TABLA 2 GASES CLAVE PRESENTES ANTES Y DESPUÉS DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO .....	16
TABLA 3 IEC 60076-2 EDICIONES EN ORDEN CRONOLÓGICO .....	18
TABLA 4 IEEE C57.12.90 EDICIONES EN ORDEN CRONOLÓGICO.....	19
TABLA 5 OBJETO DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO .....	20
TABLA 6 ENSAYO DE CALENTAMIENTO, CONDICIONES GENERALES .....	21
TABLA 7 ENSAYO DE CALENTAMIENTO, MÉTODOS DE ENSAYO CARGA Y REAL Y CARGA INVERSA .....	22
TABLA 8 ENSAYO DE CALENTAMIENTO, MÉTODO DE CORTOCIRCUITO.....	23
TABLA 9 MEDICIONES DE TEMPERATURA, TEMPERATURA AMBIENTE .....	24
TABLA 10. MEDICIONES DE TEMPERATURA, MEDICIÓN DE LA ELEVACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL LÍQUIDO SUPERIOR.....	25
TABLA 11 TEMPERATURA PROMEDIO DEL LIQUIDO .....	26
TABLA 12 OTRAS MEDICIONES DE TEMPERATURA.....	27
TABLA 13 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA EN CALIENTE .....	29
TABLA 14 DETERMINACIÓN DE LA ELEVACIÓN PROMEDIO DE LOS DEVANADOS .....	30
TABLA 15 CORRECCIONES POR DIFERENCIAS DE ALTITUD .....	31
TABLA 16 CORRECCIÓN POR DIFERENCIA ENTRE LA CORRIENTE NOMINAL Y LA CORRIENTE DE ENSAYO .....	32
TABLA 17 CORRECCIÓN POR DIFERENCIA ENTRE LAS PÉRDIDAS TOTALES Y LAS PERDIDAS REQUERIDAS .....	33
TABLA 18 LÍMITES DEL ENSAYO .....	34
TABLA 25 PRESUPUESTO IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO U.P.T.C DUITAMA.....	50
TABLA 44 GASES CLAVE PRESENTES ANTES Y DESPUÉS DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO .....	54
TABLA 26 PARÁMETROS DEL TRANSFORMADOR BAJO ENSAYO .....	55
TABLA 28 VALORES DE PERDIDAS CON CARGA Y VACÍO DEL TRANSFORMADOR BAJO ENSAYO .....	60
TABLA 29 VALORES DE RESISTENCIA ÓHMICA DEL TRANSFORMADOR BAJO ENSAYO.....	61
TABLA 30 PARÁMETROS DEL TRANSFORMADOR AUXILIAR.....	64
TABLA 31 CONDENSADORES DISPONIBLES .....	65
TABLA 32 ERROR ENTRE LAS LECTURAS REALIZADAS CON LA CÁMARA TERMOGRÁFICA Y LOS TERMOPARES .....	69
TABLA 33 VALORES DE ESTABILIZACIÓN A PÉRDIDAS TOTALES. ETAPA ONAN .....	75
TABLA 34 VALORES DE ESTABILIZACIÓN A CORRIENTE NOMINAL. ETAPA ONAN .....	75
TABLA 35 VALORES DE ESTABILIZACIÓN A PÉRDIDAS TOTALES. ETAPA ONAF.....	81
TABLA 36 VALORES DE ESTABILIZACIÓN A CORRIENTE NOMINAL .....	81
TABLA 37 RESULTADOS DEL ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO MUESTRA PREVIA AL ENSAYO .....	87

TABLA 38 RESULTADOS DEL ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO MUESTRA ETAPA ONAN .....	87
TABLA 39 RESULTADOS DEL ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO MUESTRA ETAPA ONAF .....	88
TABLA 40 VALORES NORMALIZADOS DE GASES CLAVE PRESENTES ANTES Y DESPUÉS DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO .....	88
TABLA 41 ANÁLISIS DE DATOS PARA LA MUESTRA PREVIA AL ENSAYO .....	89
TABLA 42 RESULTADOS ETAPA ONAN .....	90
TABLA 43 RESULTADOS ETAPA ONAF .....	91

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 COMPORTAMIENTO TÉRMICO TÍPICO DE UN TRANSFORMADOR.....	5
FIGURA 2 DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA SIMPLIFICADA EN UN TRANSFORMADOR .....	5
FIGURA 3 ENSAYO DE CALENTAMIENTO, MÉTODO DE CARGA REAL .....	8
FIGURA 4 ENSAYO DE CALENTAMIENTO, MÉTODO DE CARGA INVERSA .....	8
FIGURA 5 ENSAYO DE CALENTAMIENTO, MÉTODO DE CORTOCIRCUITO .....	9
FIGURA 6 ENSAYO DE CALENTAMIENTO, MÉTODO DE CORTOCIRCUITO POR ETAPAS.....	11
FIGURA 7 RESISTENCIA VS TIEMPO .....	11
FIGURA 8 BANCO DE CONDENSADORES CONECTADO EN Y .....	14
FIGURA 9 BANCO DE CONDENSADORES CONECTADO EN DELTA.....	15
FIGURA 10 DIAGRAMA UNIFILAR DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO DE ACUERDO AL MÉTODO DE CORTOCIRCUITO .....	37
FIGURA 11 DIAGRAMA TRIFILAR DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO DE ACUERDO AL MÉTODO DE CORTOCIRCUITO .....	38
FIGURA 12 FASES DEL PROCEDIMIENTO DE PRUEBA DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO	39
FIGURA 13 FASE 1. CONSIDERACIONES GENERALES.....	40
FIGURA 14 FASE 2. CONSIDERACIONES INICIALES.....	41
FIGURA 15 FASE 3. ETAPA 1.....	42
FIGURA 16 FASE 4. ETAPA 2.....	43
FIGURA 17 FASE 5. ANÁLISIS DE DATOS.....	44
FIGURA 18 FASE 6. RESULTADOS E INFORME .....	45
FIGURA 19 LABORATORIO DE ENSAYOS ELECTROMECÁNICOS U.P.T.C DUITAMA .....	47
FIGURA 20 DIAGRAMA UNIFILAR PARA LA IMPLEMENTACI3N DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO EN EL LABORATORIO DE ENSAYOS ELECTROMECÁNICOS .....	49
FIGURA 21 DIAGRAMA TRIFILAR PARA LA IMPLEMENTACI3N DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO EN EL LABORATORIO DE ENSAYOS ELECTROMECÁNICOS EN TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.....	49
FIGURA 22 DIAGRAMA TRIFILAR PARA LA IMPLEMENTACI3N DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO EN EL LABORATORIO DE ENSAYOS ELECTROMECÁNICOS EN TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS. ....	50
FIGURA 23 SITIO DE EJECUCI3N DEL ENSAYO .....	55
FIGURA 24 TRANSFORMADOR BAJO ENSAYO .....	56
FIGURA 25 ESQUEMA DE ENSAYO. DIAGRAMA UNIFILAR .....	58
FIGURA 26 ESQUEMA DEL ENSAYO DIAGRAMA TRIFILAR .....	59
FIGURA 27 EQUIPO DE MEDICI3N DE RESISTENCIA 3HMICA.....	61
FIGURA 28 INSTALACI3N DE LOS TERMOPARES PARA EL ENSAYO .....	66
FIGURA 29 INSTALACI3N DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN EL TRANSFORMADOR .....	67
FIGURA 30 UBICACI3N DE LOS TERMOPARES PARA MEDIR LA TEMPERATURA DEL LIQUIDO .....	67
FIGURA 31 MEDICI3N Y REGISTRO DE DATOS PARA LA ETAPA 1 .....	68
FIGURA 32 COMPORTAMIENTO TÉRMICO TÍPICO DE UN TRANSFORMADOR.....	70
FIGURA 33 COMPORTAMIENTO TÉRMICO ATÍPICO ENCONTRADO DURANTE EL ENSAYO	70
FIGURA 34 DIAGRAMA UTILIZADO PARA MEDIR LA RESISTENCIA EN CALIENTE .....	71
FIGURA 35 EQUIPOS UTILIZADOS PARA MEDIR LA RESISTENCIA EN CALIENTE .....	72

FIGURA 36 PREPARATIVOS PREVIOS AL ENSAYO PARA MEDIR LA RESISTENCIA EN CALIENTE .....	72
FIGURA 37 REGISTRO DE DATOS. ETAPA 2 .....	73
FIGURA 38 GRAFICA DE RESISTENCIA / TIEMPO ETAPA ONAN. DEVANADO DE BAJA TENSIÓN .....	74
FIGURA 39 GRAFICA DE RESISTENCIA / TIEMPO ETAPA ONAN. DEVANADO DE ALTA TENSIÓN .....	77
FIGURA 40 GRAFICA DE RESISTENCIA / TIEMPO ETAPA ONAN. DEVANADO DE BAJA TENSIÓN .....	78
FIGURA 41 GRAFICA DE RESISTENCIA / TIEMPO ETAPA ONAF. DEVANADO DE ALTA TENSIÓN .....	82
FIGURA 42 GRAFICA DE RESISTENCIA / TIEMPO ETAPA ONAF. DEVANADO DE BAJA TENSIÓN.....	83
FIGURA 43 OBTENCIÓN DE LA MUESTRA.....	86
FIGURA 44 BOTÓN INGRESAR DATOS, HOJA DE CÁLCULO PARA IMPLEMENTAR EL ENSAYO .....	93
FIGURA 45 VALORES DE TENSIÓN Y CORRIENTE DE PRUEBA PARA IMPLEMENTAR EL ENSAYO ....	94
FIGURA 46 TRANSFORMADOR AUXILIAR VALORES DE PRUEBA Y NOMINALES. ....	95
FIGURA 47 CONDENSADORES NECESARIOS PARA IMPLEMENTAR EL ENSAYO .....	97
FIGURA 48 REGISTRO DE DATOS PARA LA ETAPA 1.....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
FIGURA 49 ETAPA 2 GRAFICA RESISTENCIA / TIEMPO.....	99
FIGURA 50 ANÁLISIS DE DATOS .....	100
FIGURA 51 INFORME REALIZADO POR LA HOJA DE CALCULO .....	101

## LISTA DE ANEXOS

**Anexo A** Medición de la resistencia óhmica de los devanados.

**Anexo B** Medición de las pérdidas con carga.

**Anexo C** Pérdidas en vacío.

**Anexo D** Análisis cromatográfico de análisis de condición del transformador.

**Anexo E** Componentes eléctricos necesarios para implementar el ensayo de calentamiento.

**Anexo F** Equipos de medida necesarios para implementar el ensayo de calentamiento.

**Anexo G** Elementos necesarios para implementar el ensayo de calentamiento.

**Anexo H** Recomendaciones para el procedimiento de prueba para cada fase del ensayo.

**Anexo I** Componentes eléctricos necesarios para implementar el ensayo de calentamiento en el laboratorio de ensayos electromecánicos.

**Anexo J** Cotización del transformador auxiliar ofrecida por nacional de transformadores Tesla SAS.

**Anexo K** Hoja de características del condensador seleccionado para el banco de condensadores.

**Anexo L** Equipos de medida necesarios para implementar el ensayo de calentamiento en el laboratorio de ensayos electromecánicos.

**Anexo M** Comparación entre los multímetros Fluke 116 y 179.

**Anexo N** Cotización Elementos necesarios para implementar el ensayo de calentamiento.

**Anexo O** Procedimiento para el análisis de condición para la interpretación de resultados del análisis cromatográfico en aceite dieléctrico.

**Anexo P** Cortocircuito en alta o baja tensión para la prueba piloto.

**Anexo Q** Dimensionamiento del banco de condensadores.

**Anexo R** Datos de temperatura para las dos etapas.

**Anexo S** Determinación de la resistencia en caliente.

**Anexo T** Análisis de condición para el transformador bajo ensayo de la prueba piloto.

**Anexo U** Informe transformador bajo ensayo prueba piloto.

**Anexo V** Plantilla para la presentación de informes.

**Anexo W** Etapa ONAN.

**Anexo X** Etapa ONAF.

**Anexo Y** Hoja de cálculo para realizar el ensayo de calentamiento.

## GLOSARIO

**Transformador:** Máquina eléctrica utilizada con corriente alterna la cual permite transformar la energía eléctrica de unas magnitudes de Tensión y corriente determinadas a otros valores en la mayoría de los casos diferentes

**Cargabilidad:** Se define como la potencia a la que el transformador va a operar se debe buscar un equilibrio en la cual el transformador no quede sobrecargado evitando daños en el aislamiento o por debajo de su capacidad nominal elevando las pérdidas.

**Aislamiento:** En su mayoría el aislamiento de los transformadores se compone de papel celulosa, este material sirve como aislante dieléctrico funciona como soporte mecánico en los bobinados y permite mejorar la refrigeración del transformador creando conductos para el aceite.

**Hot Spot:** Es el punto donde se presenta la mayor elevación de temperatura en el devanado.

**Ensayos:** En transformadores son pruebas de Fabrica que se realizan a los transformadores para verificar que cumplan con determinados parámetros eléctricos y tengan un funcionamiento óptimo durante su vida útil. Existen ensayos de rutina, Tipo y Especiales.

**Refrigeración:** En transformadores consiste en el medio a través del cual se disipa el calor del transformador al medio ambiente, Para potencias pequeñas, no se emplea ningún liquido refrigerante para su refrigeración, únicamente por medio de convección natural por medio de la superficie externa de la máquina, se logra la evacuación de calor de la máquina. En potencias elevadas se emplea aceite como medio refrigerante este puede circular de forma natural a través de conductos dentro del transformador o a través de una bomba, finalmente por convección natural o forzada con ventiladores y radiación se disipa el calor a través de unas aletas instaladas en la superficie de la máquina.

**Estándar:** Normas elaboradas por organismos de normalización nacional e internacional mediante los cuales se compara los resultados obtenidos en el ensayo con los parámetros planteados en la norma, para Colombia el organismo de normalización nacional es ICONTEC a nivel internacional se encuentran organizaciones como IEEE y IEC.

**Cromatografía:** Es un método físico de separación de mezclas, su aplicación se realiza a través de un cromatógrafo, el resultado obtenido es un cromatograma el cual es un registro grafico donde se indican los componentes de la mezcla y el grado de concentración para realizar una posterior comparación con el estándar correspondiente.



## RESUMEN

La Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, a través del grupo de investigación Gridse desde años anteriores adelanta la creación del Laboratorio de Ensayos Electromecánicos, actualmente dentro del laboratorio se realizan pruebas dieléctricas a elementos de protección personal.

Dentro de una modalidad académica y de extensión se plantea realizar ensayos a transformadores de distribución de hasta 150 kVA, dentro de estos ensayos se encuentran medición de la resistencia de los devanados, medición de pérdidas con carga, vacío y ensayo de calentamiento.

Se inició con la búsqueda bibliográfica de artículos especializados y estándares nacionales e internacionales aplicables al ensayo de calentamiento, seguidamente se compararon los estándares encontrando que son iguales en cuanto al procedimiento de prueba, sin embargo, el análisis de datos y los resultados cambian dependiendo del estándar que se escoja para la aplicación de la prueba.

De acuerdo a la consulta de los estándares aplicables y manuales de prueba se establecieron los equipos necesarios para realizar el ensayo y se elabora el procedimiento de prueba para realizar el ensayo el cual se divide en seis fases.

Teniendo en cuenta una potencia de hasta 150 kVA y un voltaje de 34,5 kV para los transformadores a ensayar y los equipos disponibles actualmente en el laboratorio, se seleccionaron los equipos necesarios para la implementación del ensayo de calentamiento en el Laboratorio de Ensayos Electromecánicos de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Adicionalmente, parte de este proyecto se financió mediante el marco del proyecto "EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO TERMICO DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION CUANDO OPERA A 2600 MSNM en la convocatoria interna de la Dirección de Investigaciones, DIN-2020, SGI 2856, y se realizó una prueba piloto a un transformador de 4.25 MVA en la empresa Industrias Explorer, el cual se documentó, permitiendo validar el procedimiento de prueba y comparar los resultados de acuerdo a los diferentes estándares.

Se elaboro el procedimiento de prueba para realizar el montaje de prueba, instalación de equipos de medida, toma de temperaturas y la interpretación de resultados del análisis cromatográfico en aceite dieléctrico durante el ensayo de calentamiento de transformadores, así como la plantilla para la presentación de informes.

Actualmente, se encuentran en proceso de compra un transformador intermedio de 30 kVA, 220/2400-1385 V y un grupo de termopares para implementar el ensayo en la Universidad. Una vez implementado se buscará realizar el ensayo como un servicio de extensión a empresas y talleres de reparación de transformadores de la región. desde el ámbito académico los estudiantes podrán participar en el desarrollo de los ensayos, complementando su formación profesional y podrán seguir participando en el desarrollo de proyectos de este tipo.



## INTRODUCCION

Desde 1886 cuando se fabricó el primer transformador comercial hasta la fecha, el transformador se ha convertido en un elemento fundamental en la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica.

Antes de ser puestos en servicio se desarrollan pruebas de fabrica para garantizar su fiabilidad y prolongar su vida útil. Una de estas pruebas de fabrica es el ensayo de calentamiento el cual permite determinar los parámetros térmicos del transformador midiendo la temperatura del líquido refrigerante y del devanado y comparando este valor con un parámetro normalizado.

En Colombia de acuerdo a la potencia del transformador se efectúan este tipo de pruebas esto implica que en la mayoría de transformadores de distribución no se realiza este ensayo originando fallas en sus devanados cuando son puestos en servicio.

Una falla de un transformador desde el punto de vista de la corrección de falla implica sobrecostos económicos, pero esta es la parte menos critica ya que en sistemas de distribución puede provocar la suspensión del servicio a los usuarios finales, en el ámbito industrial puede provocar de acuerdo a la criticidad del equipo puede provocar paradas en las producciones y desperdicio de material.

Los Estudiantes de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Actualmente dentro de su formación no cuentan con un laboratorio que les permita realizar este tipo de ensayos por lo que este tipo de temas se desarrollan únicamente de manera teórica.

La implementación del ensayo de calentamiento dentro del laboratorio de ensayos electromecánicos se plantea objetivos a corto, mediano y largo plazo.

A corto plazo los estudiantes de Ingeniería Electromecánica, Administración Industrial y Licenciatura podrán participar de los ensayos, desarrollando este tipo de temas y observando su aplicación laboral e incentivándolos a seguir participando en proyectos de este tipo a través de los grupos de investigación.

A mediano plazo se espera prestar servicios de extensión a empresas del sector eléctrico de la región donde se prueben los transformadores y se ofrezcan cursos a empresas del sector eléctrico.

A largo plazo realizar la ejecución de pruebas a nivel de investigación permitiendo la obtención de datos para análisis y posibles publicaciones además de crear convenios con otros laboratorios como el de la universidad del valle y universidad nacional y con esto pertenecer a la red nacional de laboratorios.

La propuesta para la implementación del ensayo de calentamiento, servirá de apoyo en el desarrollo del laboratorio de ensayos electromecánicos es responsabilidad de estudiantes, docentes y comunidad en general seguir aportando en este proyecto que traerá múltiples beneficios para los estudiantes, el sector eléctrico de la región, la investigación y el sistema de calidad del país.



# **CAPITULO UNO**

*“La parte más difícil de la investigación es siempre encontrar una pregunta que sea lo suficientemente grande como para que valga la pena responderla, pero lo suficientemente poco como para que realmente puedas responderla”*

**Edward Witten.**

En este capítulo se abordaron conceptos generales importantes para implementar el ensayo de calentamiento como aplicación, cargabilidad, vida útil del aislamiento, Hotspot, Rise, Top Oil, distribución de temperatura en un transformador, tipos de ensayo y métodos de ensayo en transformadores de distribución, bancos de condensadores y cromatografía de gases.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 Aplicación.

En los primeros años de la industria eléctrica, la potencia eléctrica era distribuida a través de circuitos de pequeña longitud con corriente directa a bajo voltaje, la caída de voltaje y las pérdidas limitaba su uso solo a las áreas urbanas.

Con la invención del transformador en 1885, los sistemas de transmisión y potencia cambiaron radicalmente, La potencia eléctrica se distribuía con corriente alterna transmitiéndose económicamente a alto voltaje y baja corriente, reduciendo con ello las caídas de voltaje y las pérdidas, permitiendo transmitir potencia a través de cientos de kilómetros de las plantas de generación.

Con el uso de los transformadores fue posible reducir el voltaje recibido de las plantas de generación a un nivel voltaje estandarizado para su uso. Estos niveles de voltaje fueron establecidos de acuerdo a las condiciones de diseño de cada país.<sup>1</sup>

### 1.2 Cargabilidad

En la actualidad los transformadores forman parte de los sistemas de distribución de energía eléctrica, a través de ellos es posible el suministro de energía a los usuarios finales. Por esto resulta importante velar por conservar su integridad y extender su vida útil.<sup>2</sup>

Los cambios del mercado eléctrico han cambiado la organización y operación de los sistemas de distribución y potencia.

Los costos para solventar la infraestructura han cambiado los criterios de carga, la filosofía a seguir es "hacer más con menos". Esto implica una reducción en los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento. Lo cual conlleva a que la sobrecarga en transformadores sea necesaria en los mercados eléctricos por razones económicas o para asegurar la carga a los usuarios finales.

Anteriormente muchos transformadores se sobrecargaban por encima de sus valores nominales elevando los costos de mantenimiento y reposición de los equipos, sin embargo, en la actualidad se han establecido prácticas que permiten esta condición teniendo en cuenta factores como la temperatura ambiente, Temperatura del aceite y los devanados y observar cómo esto afecta de manera directa su vida útil.

---

<sup>1</sup> KULKARNI, S. V., Khaparde, S. A. Transformer Engineering: Design and practice. New York: Marcel Dekker, INC, 2004. 5p.

<sup>2</sup> HOLGUIN TORRES, Yeimi. VILLACOB PINEDA, Karen. Seguimiento a los factores incidentes en la vida útil de transformadores de distribución tipo poste en la ciudad de barranquilla. Barranquilla, 2017, 13p. Trabajo de grado (Ingeniero Eléctrico). Universidad de la costa. Facultad de Ingeniería.

Una de las problemáticas del país es que no se están aprovechando de una manera eficiente los recursos debido a que la carga real del parque de transformadores de distribución se encuentra muy por debajo de sus valores óptimos de operación.<sup>3</sup>

Se deben establecer estrategias técnicas que permitan disminuir los costos de inversión, Operación y mantenimiento debido a que:

- Transformadores con baja carga aumentan los costos de inversión inicial y aumentan los costos de operación de acuerdo a las pérdidas en función de la demanda.
- Transformadores con Sobrecarga pueden fallar antes de completar su vida útil, aumentando el mantenimiento y los costos por reposición.<sup>4</sup>

### 1.3 Vida útil del Aislamiento

Las pérdidas de energía en un transformador son originadas por el calor en el núcleo y en los devanados. Este calor debe ser disipado al medio ambiente, para evitar que la temperatura llegue a niveles críticos y origine un deterioro en el aislamiento afectando de manera directa la vida útil del transformador.

Estas temperaturas determinan hasta qué punto se puede cargar un transformador sin que se vea afectado su aislamiento.

Las Fallas en los transformadores debido a un deterioro en el aislamiento se deben a diversas causas, sobrecargas o accidentes de funcionamiento que pueden provocar la falla de los mismos llevando a pérdidas económicas a las empresas eléctricas.<sup>5</sup>

La duración de la vida útil del transformador depende en alto grado de eventos extraordinarios como sobrecargas o cortocircuitos, las consecuencias de una sobrecarga del transformador conllevan a que las temperaturas de los devanados, aislamiento y aceite incrementen a niveles inaceptables originando:

- **A corto plazo:** La reducción de la resistencia eléctrica del aislamiento debido a la presencia de burbujas de gas en la zona de Alta electricidad (Devanados y cables).

Estas burbujas se originan cuando la temperatura de Hotspot aumenta por encima de los 140°C

- **A largo plazo:** Deterioro acumulativo del aislamiento cuando la temperatura de Hot spot se encuentra entre 110 y 140 °C<sup>6</sup>.

---

<sup>3</sup> MUÑOZ LEUDO, Michael. Metodología para determinar la carga en transformadores de distribución. Santiago de Cali, 2007, p.1. Trabajo de grado (Magister en ingeniería). Universidad del Valle. Facultad de ingeniería. Programa de posgrado en ingeniería eléctrica y electrónica.

<sup>4</sup> Ibid., p.xii

<sup>5</sup> ROBALINO SOTO, Iván. Vida útil del transformador. Quito.1998. Tesis (Ingeniero Eléctrico sistemas de potencia). Escuela politécnica Nacional. Facultad de ingeniería eléctrica.

<sup>6</sup> K. PERERA, J. LUCAS, R. DIAS. Estimation of Optimum Transformer Capacity based on Load Curve. Transactions of IEE Sri Lanka, Vol. 3, No. 1, enero. 2001.

#### 1.4 Hot spot

De acuerdo al estándar ANSI IEEE C.57.12.00 Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers<sup>7</sup>.

El Hot spot no debe exceder los 80°C a potencia nominal para la máxima combinación de conexiones y Taps que entreguen la más alta elevación de la temperatura del devanado y debe ser determinado por una de las siguientes condiciones:

- a) Medir directamente durante un ensayo térmico en concordancia con IEEE C.57.12.90. Un suficiente número de sensores deben ser usados en las ubicaciones esperadas para la máxima elevación de temperatura.
- b) Medición directa en un transformador idéntico.
- c) Cálculos de las temperaturas a través de los devanados activos, los métodos se basarán en los principios de la transferencia de calor y se justificara por pruebas de producción o ensayos a prototipos.

El Hot spot se debe incluir en el informe del ensayo y debe indicarse el método por el que fue evaluado.

IEC 60354 "Loading Guide for oil - immersed power Transformers -1991"<sup>8</sup> Determina que la Temperatura de Hotspot no debe exceder los 78°K.

#### Temperatura de Hot spot del devanado

Se espera que en las puntas de las bobinas se presente el Mayor Hot spot (Punto caliente). Debido a la acumulación de campos electromagnéticos en las mismas, sin embargo, aunque corresponde al valor, no corresponde al valor real, esto se debe al aumento de la pérdida por dispersión causada por el componente horizontal del flujo. Para tomar en cuenta esta no linealidad, el gradiente en la punta de la bobina debe ser multiplicada por el factor H.

Este factor H puede tener una variación entre 1.1 hasta 1.5 dependiendo la potencia del transformador y la impedancia de cortocircuito y este puede ser determinado a través de<sup>9</sup>:

---

<sup>7</sup> AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. IEEE. Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. New York, ANSI, 2002. 23p. IEEE Std C.57.12.00-2006.

<sup>8</sup> INTERNATIONAL STANDARD. IEC. Loading Guide for oil- immersed power Transformers. Switzerland, IEC, 1991. 27p. IEC 60354/1991

<sup>9</sup> ABB BUSINESS AREA POWER TRANSFORMERS. Testing of Power Transformers: Routine Tests, type tests and special tests. Düsseldorf, Pro Print GmbH, 2003. 210p.



$$T_{Hotspot} = t_o + g * H \quad (1)$$

$T_{Hotspot}$  : Temperatura de Hotspot (Elevacion)

$t_o$  : Elevacion de la temperatura superior del liquido (Top oil)

$H = 1.1$  para Transformadores de distribucion ,1.3 Para Transformadores de potencia

### 1.5 Distribución de Temperatura en un transformador

En la figura 1 se presenta el comportamiento térmico típico de un transformador como se observa la temperatura incrementa desde la parte inferior hacia la parte superior. Esto se debe al aumento lineal tanto de la temperatura del liquido como de los devanados de manera lineal (Figura 2).

Este comportamiento lineal permite establecer una diferencia de temperatura entre el líquido y el devanado denominado **gradiente**.

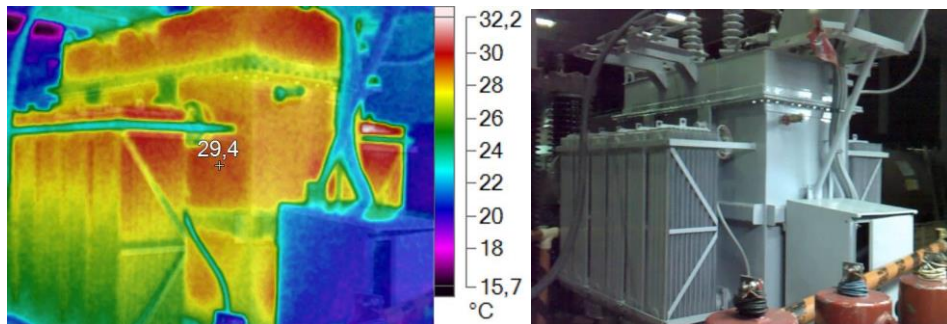
$$g = T - T_{omc} \quad (2)$$

$g$  : Gradiente (diferencia de temp.promedio entre el devanado y el liquido )

$T$  : Temperatura promedio de los devanados

$T_{omc}$  : Temperatura promedio del liquido a corriente nominal

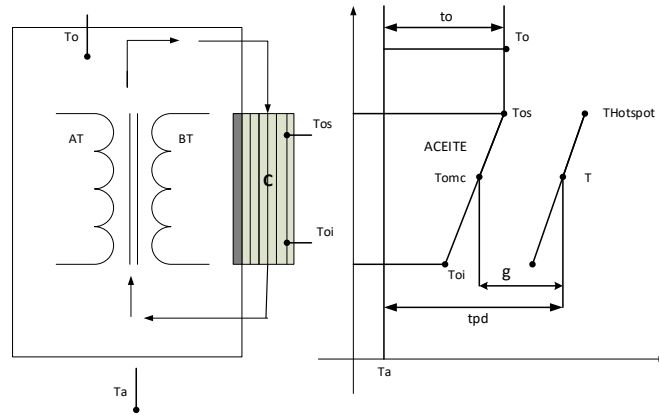
Figura 1 Comportamiento térmico típico de un transformador



Fuente. El Autor

Figura 2 Distribución de temperatura simplificada en un transformador

## Generalidades



**Fuente.** ABB Business Área Power Transformers (2003). Testing of Power Transformers.

Donde,

$t_{pd}$ : Elevación de temperatura promedio del devanado

$T_{os}$ : Temperatura superior del líquido en la parte superior del equipo de enfriamiento

$T_{oi}$ : Temperatura inferior del líquido en la parte inferior del equipo de enfriamiento

$T_a$ : Temperatura ambiente

$C$ : Equipo de enfriamiento

$AT$ : Devanado de Alta Tension

$BT$ : Devanado de Baja Tension

**Rise:** El aumento de la temperatura del líquido y del devanado respecto a la temperatura ambiente es conocido como Rise, este parámetro es de gran importancia durante el ensayo de calentamiento debido a que el aumento de temperatura del líquido y del devanado debe ser comparado con un valor normalizado de acuerdo al estándar seleccionado para la aplicación del ensayo.

$$t_o = T_{os} - T_a \quad (3)$$

$T_{os}$ : Temperatura superior del líquido (Top oil)

$T_a$ : Temperatura Ambiente

**Top oil y Top of Winding:** hace referencia a la temperatura máxima observada en el líquido (Top oil) observada en la parte superior del transformador, como en el devanado (Top of winding) presentada en las puntas de las bobinas de los devanados (Figura 2).

## 1.6 Tipos de ensayo

De acuerdo a la Norma técnica Colombiana NTC 380<sup>10</sup>, los ensayos a los que deben someterse los transformadores de distribución y de potencia son:

**Ensayos de rutina:** Los cuales son efectuados a cada transformador dentro de los cuales se encuentra:

- a) Medición de la resistencia de los devanados.
- b) Medición de la relación de transformación, verificación de la polaridad y relación de fase.
- c) Medición de las tensiones de cortocircuito.
- d) Medición de las pérdidas con carga.
- e) Medición de las pérdidas y corriente sin carga (en vacío).
- f) Tensión aplicada.
- g) Sobretensión inducida.

**Ensayos tipo:** los cuales son efectuados a un transformador el cual es representativo de otros, para validar que cumple con los requisitos no cubiertos por los ensayos de rutina y dentro de los cuales se encuentran:

- a) Tensión de impulso tipo descarga atmosférica
- b) Calentamiento

**Ensayos especiales:** Los cuales son realizados entre mutuo acuerdo entre fabricante y comprador y en esta categoría se encuentra

- a) Aptitud para soportar el cortocircuito

---

<sup>10</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Transformadores eléctricos. Ensayos eléctricos. Generalidades. Bogotá. ICONTEC. 2001. 3p.

### 1.7 Métodos de ensayo

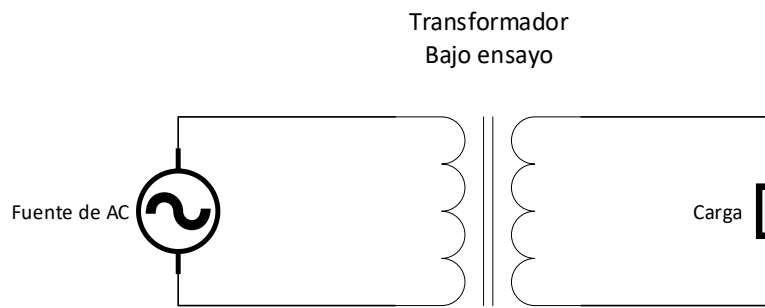
Para implementar el ensayo de calentamiento, inicialmente se debe escoger el método de ensayo, los estándares plantean tres métodos:

#### Carga Real:

Es el método más preciso debido a que se evalúa el transformador bajo condiciones reales de carga, sin embargo, es poco práctico en transformadores de gran y mediana potencia.

En transformadores pequeños se realiza el ensayo ubicando como carga en el secundario del transformador una carga como Reóstatos y bancos de lámparas.<sup>11</sup>

*Figura 3 Ensayo de calentamiento, método de carga real*



Fuente. El autor

#### Carga simulada:

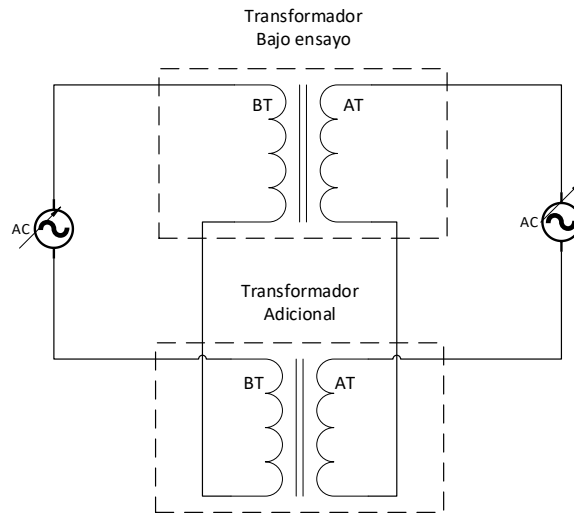
**Método de oposición (Carga inversa):** Consiste en conectar en paralelo dos transformadores de características similares, simulando las condiciones reales de carga. En el devanado de alta tensión se conecta una fuente variable para permitir la circulación de corriente en los devanados.<sup>12</sup>

*Figura 4 Ensayo de calentamiento, método de carga inversa*

---

<sup>11</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Transformadores método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en líquido refrigerante. Bogotá. ICONTEC. 1998. 6p.NTC 316

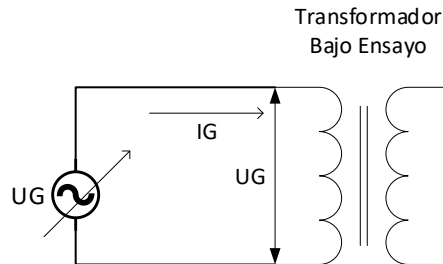
<sup>12</sup> MUÑOZ LEUDO, op. cit, p.17



Fuente. El autor

**Método de cortocircuito:** Es el método más empleado para la realización del ensayo debido a su practicidad.<sup>13</sup>

Figura 5 Ensayo de calentamiento, método de cortocircuito



Fuente. ABB Business Área Power Transformers (2003). Testing of Power Transformers.

El transformador bajo ensayo es cortocircuitado en uno de sus devanados, por razones prácticas en la figura 5 se ha cortocircuitado el devanado secundario, sin embargo, esto se realiza de acuerdo a las características técnicas de cada transformador y los equipos disponibles para la realización del ensayo, previo al ensayo se deben calcular las pérdidas con carga y vacío y medir la resistencia de los devanados.

<sup>13</sup> INTERNATIONAL STANDARD. IEC. Power Transformers: Part. 2 Temperature rise. Switzerland, IEC, 1993.19p. IEC 60076-2/1993

## Generalidades

El ensayo es realizado en dos etapas en la primera etapa, se inyecta una corriente de prueba  $I_G$ , la cual es ligeramente superior a la corriente nominal e incluye las pérdidas totales (carga+ vacío).<sup>14</sup>

Se debe medir la temperatura del aceite en intervalos regulares de tiempo en la parte superior ( $T_o$ ) del líquido y en la parte superior ( $T_{os}$ ) e inferior de los radiadores ( $T_{oi}$ ), hasta que se considere que la temperatura del aceite ha estabilizado.<sup>15</sup>

$$I_G = k * I_r \quad (2)$$

$I_G$ : Corriente de prueba para producir las pérdidas totales en A.

$I_r$ : Corriente nominal del transformador en A.

$P_L$ : Pérdidas con carga a corriente nominal y temp. de referencia (85 °C) en kW.

$P_o$ : Pérdidas en vacío a voltaje nominal y temp. de referencia (20°C) en kW.

$k$ : Factor  $k$ .

$$k = \sqrt{\frac{P_L + P_o}{P_L}} \quad (3)$$

La fuente de voltaje necesaria para realizar el ensayo se calcula a través de:

$$U_G = k * U_{sc} \quad (4)$$

$U_G$ : Fuente de suministro Necesaria en V.

$U_{sc}$ : Voltaje de cortocircuito en V.

La tensión a la que se realiza el ensayo es similar a la de cortocircuito ( $U_G$ ), En ese orden no hay pérdidas en el núcleo de hierro, pero se deben tomar en cuenta las pérdidas Totales para medir la elevación de la temperatura del aceite.<sup>16</sup>

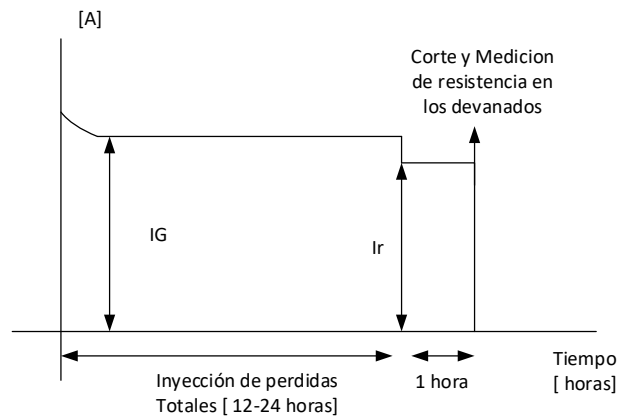
---

<sup>14</sup> ABB BUSINESS AREA POWER TRANSFORMERS, op. cit, p.202

<sup>15</sup> INTERNATIONAL STANDARD.IEC 60076-2. Op. cit. p.19

<sup>16</sup> ABB BUSINESS AREA POWER TRANSFORMERS, op. cit, p.202

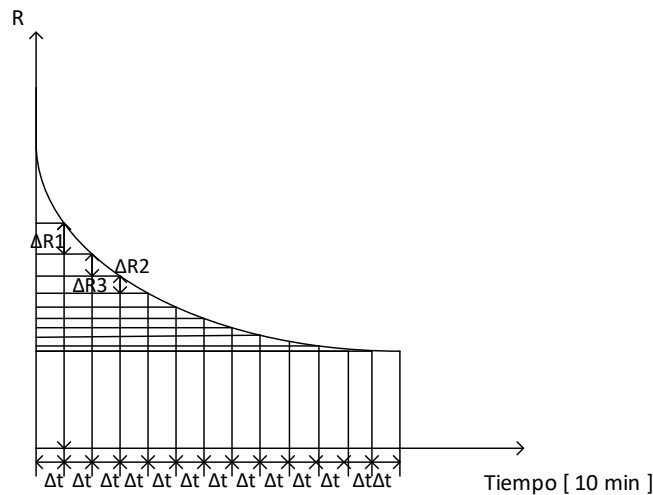
Figura 6 Ensayo de calentamiento, método de cortocircuito por etapas



**Fuente.** ABB Business Área Power Transformers (2003). Testing of Power Transformers.

En la segunda etapa del ensayo se reduce la corriente al valor nominal, se mantiene esta condición por una hora, se realiza el corte ( $t=0$ ). Se mide la resistencia de los devanados durante los 10 minutos posteriores al corte (Resistencia en caliente), con los datos obtenidos se realiza una gráfica coordenada de resistencia vs tiempo y se extrapola hasta el momento del corte ( $t=0$ ). Con el valor de la resistencia en caliente se calcula la temperatura promedio de los devanados y por último se calcula la elevación promedio de temperatura en los devanados.<sup>17</sup>

Figura 7 Resistencia vs tiempo



**Fuente.** ABB Business Área Power Transformers (2003). Testing of Power Transformers.

<sup>17</sup> Ibid., p.207

### 1.8 Medición de la resistencia en los devanados y perdidas con carga y corriente sin carga

Como se mencionó anteriormente previo al ensayo de calentamiento empleando el método de cortocircuito, se deben medir las pérdidas del transformador y la resistencia de los devanados, en la tabla 1 se especifica la norma técnica colombiana que debe ser aplicada para cada procedimiento.

Para información más detallada en el anexo A se especifica la medición de la resistencia óhmica de los devanados, el anexo B y C contiene información respecto a medición de perdidas con carga y vacío.

Tabla 1 Normas Técnicas Colombianas para Perdidas y medición de la resistencia de los devanados.

Ensayo	NTC	ANSI IEEE	IEC
Medición de la resistencia óhmica de los devanados	316	C.57.1290	60076-1
Medición de las perdidas con carga	1005	C.57.1290	60076-1
Medición de las pérdidas y corriente sin carga (Vacío)	1031	C.57.1290	60076-1

Fuente. El autor

### 1.1 Banco de condensadores:

Aplicando el método de cortocircuito la fuente debe suministrar por lo menos la potencia activa debida a las pérdidas totales, la potencia reactiva puede ser compensada empleando bancos de condensadores, esto es utilizado en la mayoría de laboratorios en los que se realiza el ensayo.<sup>18</sup>

#### Requerimiento de potencia reactiva

El requerimiento de potencia reactiva requerida se puede dividir en tres categorías<sup>19</sup>:

#### Requerimiento constante

Cuando la carga reactiva es constante, se puede compensar utilizando un capacitor fijo únicamente

<sup>18</sup> ABB BUSINESS AREA POWER TRANSFORMERS, op. cit, p.202

<sup>19</sup> ESPINOZA TREJOS, Carlos. PEREZ SUAZO, Mauricio. Metodología para el diseño y dimensionamiento adecuado de banco de capacitores para corrección de factor de potencia en la empresa YAMBERSA. Managua,2015, 29p. Trabajo de grado (ingeniero eléctrico). Universidad nacional de ingeniería. Departamento de eléctrica



### Requerimiento variable.

Este caso aplica cuando la carga reactiva varia, pero por razones de costo no puede ser compensada directamente en cada caso de manera independiente. Para este caso se debe usar un capacitor de potencia reactiva variable con la carga. Normalmente se emplea un banco automático de condensadores

**Principio de operación:** Cada banco está constituido por un cierto número de capacitores trifásicos colocados dentro de un gabinete. Los capacitores son arreglados en grupos de paralelo y conmutados con contactores de acuerdo a los requerimientos de energía eléctrica.

**Capacitores en serie:** La capacitancia equivalente de N capacitores conectados en paralelo es la suma de sus capacitancias.

**Capacitores en paralelo:** Los capacitores en serie se combinan de la misma forma que los resistores en paralelo.<sup>20</sup>

El control de los contactores y los capacitores normalmente se realiza a través de un regulador (varmetro).

### Requerimientos instantáneos

Este caso se aplica cuando el requerimiento de potencia necesita de una conmutación rápida en ese caso los capacitores pueden ser controlados por tiristores.<sup>21</sup>

Para establecer el dimensionamiento del banco de condensadores se establece de acuerdo a lo siguiente:

- a) Calcular el valor de la potencia reactiva a corregir:

$$Q_n \cong P_r * \left( \frac{Z_{cc}}{100} \right) \quad (7)$$

$Q_n$  : Potencia reactiva a corregir [kVAR]

$P_r$  : Potencia Transformador Bajo ensayo [kVA ]

$Z_{cc}$ : Impedancia de cortocircuito [%]

- b) De acuerdo a la disponibilidad de equipos se deben obtener los parámetros de los condensadores disponibles:

$P_c$ : Potencia Condensador [kVAR]

$V_{nc}$ : Voltaje nominal del condensador [V]

---

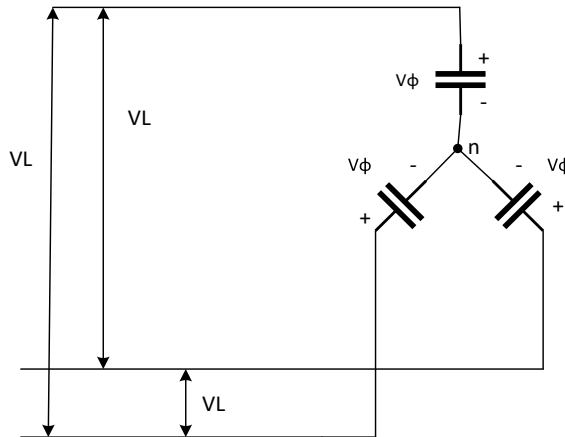
<sup>20</sup> MENDOZA GOMEZ, Eddy. Diseño y construcción de un banco de pruebas para control de factor de potencia, Guayaquil ,2015,10p. Trabajo de grado (Ingeniero eléctrico). Universidad politécnica salesiana.

<sup>21</sup> ESPINOZA TREJOS, Carlos. PEREZ SUAZO, Mauricio., op. cit 28p.

## Generalidades

- c) Se debe definir si el banco de condensadores se va a conectar en Delta o en Y, Cuando una carga balanceada es conectada en Y

Figura 8 Banco de condensadores conectado en Y



Fuente. El autor

El voltaje de la carga es igual al voltaje de fase y es igual a<sup>22</sup>:

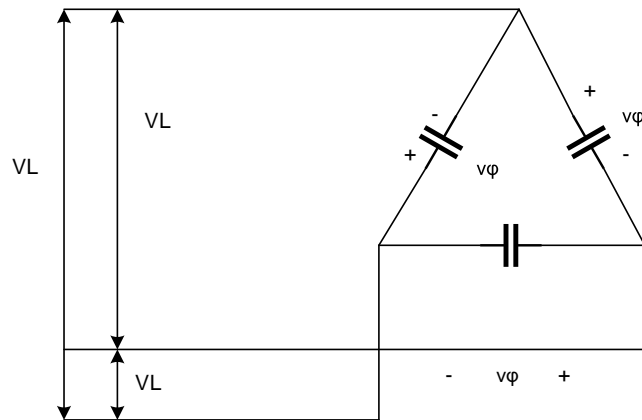
$$V_{\phi} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} [V] \quad (8)$$

En el caso de que la carga sea conectada en delta se considera que el voltaje de línea es igual al voltaje de fase  $V_{\phi} = V_L$ <sup>23</sup>

<sup>22</sup> BOYLESTAD, Robert. Introducción al análisis de circuitos. 10ma edición. Atlacomulco: Pearson Educación de Mexico, 2004. 992.p

<sup>23</sup> Ibid., p.994

Figura 9 Banco de condensadores conectado en Delta



Fuente. El autor

d) Calcular la potencia reactiva que va a ser entregada por cada unidad:

$$Q_{Unidad} = P_c * \left( \frac{V_{alimentacion}}{V_{nc}} \right)^2 \quad (9)$$

e) Calcular el número de unidades necesarias:

$$Unidades_{Necesarias} = \frac{Q_n}{Q_{Unidad}} \quad (5)$$

### 1.10 Cromatografía de gases

La cromatografía es una técnica de separación de mezclas, su capacidad para resolver muestras complejas ha llevado a utilizarla como una técnica analítica, entre todas las técnicas cromatográficas, la cromatografía de gases es la que tiene más aplicación.<sup>24</sup>

La cromatografía de gases puede ser aplicada como un mantenimiento predictivo y preventivo en transformadores de potencia y distribución detectando posibles fallas antes de que estas puedan ocasionar una falla que provoque reparaciones costosas y salidas de servicio, esta prueba tiene un gran reconocimiento en la industria para la detección de fallas mediante el análisis de los gases disueltos del aceite dieléctrico del transformador.

<sup>24</sup> Cromatografía de gases. Internet(

[https://www.mncn.csic.es/docs/repositorio/es\\_ES/investigacion/cromatografia/cromatografia\\_de\\_gases.pdf](https://www.mncn.csic.es/docs/repositorio/es_ES/investigacion/cromatografia/cromatografia_de_gases.pdf))

## Generalidades

Una vez obtenidos los resultados de la muestra, se establece un análisis de condición del transformador teniendo en cuenta los gases clave presentados en la muestra y tres métodos de interpretación del análisis cromatográfico se establecen 4 condiciones de acuerdo al estado del transformador y las posibles fallas detectadas, en el anexo D se presentan de manera detallada los métodos de interpretación y los equipos utilizados para analizar la muestra.<sup>25</sup>

Para el ensayo de calentamiento en específico de acuerdo a la IEC 61181 Mineral oil- filled electrical equipment – application of dissolved gas analysis (DGA) to factory test son electrical equipment<sup>26</sup>, se toman dos muestras del aceite dieléctrico del transformador una antes del ensayo y otra después del ensayo y se comparan los valores de los gases clave [ ppm] con un valor específico o normalizado de acuerdo a la siguiente tabla.

*Tabla 2 gases clave presentes antes y después del ensayo de calentamiento*

<b>Disolved gases</b>	<b>Typical values [ppm]</b>	<b>Before test [ppm]</b>	<b>After test [ppm]</b>
H <sub>2</sub>	15	3,2	3,3
CH <sub>4</sub>	5	0,4	0,4
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5	0,1	0,1
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2	0,2	0,2
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1	0,2	0,1
CO	80	19	27
CO <sub>2</sub>	200	56	46

INTERNATIONAL STANDARD. Mineral oil- filled electrical equipment – application of dissolved gas analysis (DGA) to factory test son electrical equipment. IEC 61818-1 /2007

---

<sup>25</sup> REYES PEREZ. Ignacio. Procedimiento para realizar e interpretar la prueba de cromatografía de gases en transformadores de potencia. México D.F. 2010. p.28. Trabajo de grado (Ingeniero mecánico). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. División de ingeniería Mecánica e Industrial

<sup>26</sup> INTERNATIONAL STANDARD. Mineral oil- filled electrical equipment – application of dissolved gas analysis (DGA) to factory test son electrical equipment. IEC 61818-1 /2007

# **CAPITULO 2**

*“Así como no reinventamos cada día el mundo que nos rodea, en el análisis nos basamos en lo que sabemos para que nos ayude a comprender lo que ignoramos”*

***Strauss y Corbin***

En este capítulo se presenta una comparación detallada de los estándares internacionales y nacionales aplicables al ensayo de calentamiento mediante un cuadro comparativo el objetivo es establecer las diferencias en los resultados al aplicar diferentes estándares durante el ensayo.



## **2. COMPARACION ENTRE LOS ESTANDARES INTERNACIONALES Y NACIONALES PARA EL ENSAYO DE CALENTAMIENTO.**

### **2.1 Estándares específicos para el ensayo de calentamiento**

Para realizar el ensayo de calentamiento a nivel internacional se encuentran organizaciones de normalización como IEC (International Electrotechnical Commission) y IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Encargados de desarrollar, promover y publicar normas internacionales en el área de productos eléctricos y electrónicos<sup>27</sup>, en Colombia ICONTEC es el organismo nacional de normalización<sup>28</sup>.

A nivel internacional para el ensayo de calentamiento se encuentran los siguientes estándares específicos desarrollados por IEC y IEEE:

- INTERNACIONAL STANDARD IEC 60076-2 1: Power Transformers Part 2: Temperature rise
- IEEE std C57.12.90 -2015: IEEE Standard Test Code For Liquid –Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers

A nivel nacional ICONTEC desarrollo el siguiente estándar:

- NTC 316, Transformadores. Método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en liquido refrigerante.

---

<sup>27</sup> IEC. What we do. [en línea] [22/03/20]. Disponible en <https://www.iec.ch/about/activities/?ref=menu>

<sup>28</sup> ICONTEC. Normalización. [en línea]. [22/03/2020]. Disponible en <https://www.icontec.org/normalizacion/>

## 2.2 Ediciones de los estándares en orden cronológico

### 2.2.1 INTERNACIONAL STANDARD IEC 60076-2: Power Transformers Part 2: Temperature rise

Tabla 3 IEC 60076-2 Ediciones en orden cronológico

IEC 60076-2		
Power Transformers Part 2: Temperature rise		
Fecha	Edición	Descripción
1/01/1976	IEC 60076 -2 Edition 1.0	incluye cláusulas de identificación de acuerdo al método de ensayo, límites de calentamiento y tipos de ensayo.
7/04/1993	IEC 60076 -2 Edition 2.0	Se Agregan contenidos y se realizan correcciones pertinentes a la primera edición validadas en 1997.
23/02/2011	IEC 60076 -2 Edition 3.0	Identifica los transformadores de acuerdo al medio de enfriamiento, define límites de calentamiento y métodos de ensayo. Esta edición incluye: a) Hot spot del devanado b) Procedimiento para realizar el ensayo de acuerdo a los nuevos requerimientos térmicos. c) cinco anexos para facilitar la implementación de esta norma.

**Fuente:** IEC. Webstore international Electrotechnical Commission Disponible en <https://webstore.iec.ch/publication/599>



## 2.2.2 IEEE std C57.12.90: IEEE Standard Test Code For Liquid –Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers

Tabla 4 IEEE C57.12.90 Ediciones en orden cronológico

IEEE Std C57.12.90		
IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and regulation Transformers		
Año	Estándar	Descripción
2006.	C57.12.90-2006	Se describen los métodos para realizar los ensayos a los transformadores de distribución y potencia refrigerados por liquido especificados en IEEE Std C.57.12.00 -2006 como: Medida de la resistencia de los devanados polaridad y relación de fase, perdidas en vacío y cortocircuito, ensayos dieléctricos, ensayo de cortocircuito y ensayos de temperatura.
2010.	C57.12.90-2010	Se Agregan contenidos y se realizan correcciones pertinentes a la primera edición.
2015/2017	C57.12.90-2015/Corrección 1 2017	Se realiza una corrección a la constante k (Ecuación 2) agregada en el último párrafo 10.8.2

**Fuente.** IEEE SA. PC57.12.90. Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers Disponible en [https://standards.ieee.org/project/C57\\_12\\_90.html#Standard](https://standards.ieee.org/project/C57_12_90.html#Standard)

## 2.2.3 NTC 316

El estándar nacional para el ensayo de calentamiento es la Norma técnica colombiana, NTC 316 TRANSFORMADORES, METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CALENTAMIENTO PARA TRANSFORMADORES SUMERGIDOS EN LIQUIDO REFRIGERANTE.<sup>29</sup> La cual fue Publicada el 23 de septiembre de 1998.

## 2.3 Comparación entre los estándares internacionales y nacionales específicos para el ensayo de calentamiento.

<sup>29</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN NTC 316. Op. cit. p. 1

A continuación, se realizará una comparación de los diferentes estándares a través de un cuadro comparativo.

### 2.3.1 Objeto

Tabla 5 Objeto del ensayo de calentamiento

ESTANDAR		
IEC 60076-2	IEEE C.57.12.90	NTC 316
<b>Power Transformers Part 2: Temperature rise</b>	<b>Test Code For Liquid – Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers</b>	<b>Transformadores, método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en liquido refrigerante</b>
Segunda edición 04/1993	Segunda Actualización 2015	Primera edición 09/1998
Identifica los transformadores de acuerdo al método de enfriamiento. Establece límites de calentamiento y detalla los métodos de ensayo.	Describe los métodos para efectuar ensayos especificados en IEEE std C57.12.00 y otros, aplicable a transformadores inmersos en liquido refrigerante de distribución, potencia y transformadores de regulación.	Determina el método de ensayo, el cual permite establecer los parámetros térmicos, las temperaturas de los devanados y del líquido de los transformadores. Los resultados sirven como base para determinar la Cargabilidad de los transformadores objeto de este ensayo.

**Fuente.** INTERNATIONAL STANDARD. Power Transformers Part 2: Temperature rise. IEC 60076-2 /1993 p.7

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE IEEE Test Code For Liquid – Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. C.57.12.90 /2015. p.1

ICONTEC. Norma Técnica colombiana, Transformadores, método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en liquido refrigerante. NTC 316/1998. p.1

### 2.3.2 Condiciones generales

Tabla 6 Ensayo de calentamiento, Condiciones generales

ESTANDAR		
IEC 60076-2	IEEE C.57.12.90	NTC 316
El ensayo debe realizarse en el tap donde circule la máxima corriente, para un transformador multidevanado en lo que se refiere a potencia nominal, se debe encontrar la combinación en la cual la potencia nominal de un devanado sea igual a la suma de los otros dos.	el ensayo debe ser realizado con una combinación de conexiones, la cual produzca la más alta elevación promedio de temperatura en los devanados es decir la combinación de conexiones y derivaciones (Taps) que produzcan Las más altas perdidas.	el ensayo debe ser realizado con una combinación de conexiones la cual produzca la más alta elevación promedio de temperatura en los devanados es decir la combinación de conexiones y derivaciones (Taps) que produzcan Las más altas perdidas
Durante el ensayo el transformador debe estar equipado con todos sus dispositivos de protección.	Para realizar el ensayo el transformador debe estar completamente ensamblado y lleno de liquido	El transformador se debe encontrar completamente ensamblado y equipado con sus respectivos indicadores térmicos dado el caso y lleno de líquido refrigerante
Precauciones se deben tomar para minimizar las variaciones de la temperatura del aire y producir condiciones ambientales estables	El ensayo se debe realizar en un cuarto libre de ráfagas de aire definidas con una velocidad del viento menor o igual a 0,5 m/s	El ensayo se debe realizar en un espacio el cual esté libre de ráfagas de aire como sea posible
Una medida de referencia ( $R_1, \theta_1$ ) de todas las resistencias de los devanados es hecha con el transformador a temperatura ambiente en una condición de estado estable	La resistencia en frio debe ser tomada en los devanados de acuerdo al capítulo 5, Tanto la resistencia en frio como la resistencia en caliente deben ser tomadas con el mismo equipo. Normalmente esta medida es tomada antes de empezar el ensayo	Antes de iniciar el ensayo se debe realizar la medida de la resistencia óhmica de los devanados de acuerdo a la NTC 375, esta medida se definirá como resistencia en frio $R_0$

Fuente. INTERNATIONAL STANDARD. Power Transformers Part 2: Temperature rise. IEC 60076-2 /1993 p.11-17-19.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE IEEE Test Code For Liquid – Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. C.57.12.90 /2015. p.58-61.

ICONTEC. Norma Técnica colombiana, Transformadores, método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en liquido refrigerante. NTC 316/1998. p.1

### 2.3.3 Métodos de ensayo

Tabla 7 Ensayo de Calentamiento, Métodos de ensayo Carga y real y carga inversa

	ESTANDAR		
	IEC 60076-2	IEEE C.57.12.90	NTC 316
<b>Métodos de ensayo Carga Real</b>	En casos especiales se puede realizar un ensayo con voltaje y corriente nominal a través de la carga adecuada, esto es principalmente aplicable a transformadores de baja potencia	Es el método más preciso, pero los requerimientos de energía son excesivos en grandes transformadores, para transformadores pequeños se puede realizar el ensayo bajo carga real con reóstatos o bancos de lámparas.	Es el método más preciso sin embargo es poco práctico para transformadores de gran capacidad por los requerimientos de energía necesarios para realizar el ensayo
<b>Métodos de ensayo, Método de carga inversa (Oposición)</b>	En este método, dos transformadores uno de los cuales es el transformador bajo ensayo, son conectados en paralelo y excitados a la tensión nominal del transformador bajo prueba. Mediante diferentes relaciones de voltaje o un voltaje inyectado, la corriente nominal se hace fluir en el transformador bajo prueba	Algunos transformadores pequeños en la mayoría de los casos de distribución, se puede realizar el ensayo conectando sus respectivos terminales de alta y baja tensión en paralelo de la siguiente forma a) Aplicar el voltaje nominal a frecuencia nominal a uno de los devanados, hacer circular la corriente de carga abriendo las conexiones del otro devanado e inyectando un voltaje suficiente para hacer circular la corriente nominal b) medir la temperatura de líquido y determinar la elevación de temperatura en el líquido c) Reducir la corriente al valor nominal, realizar el corte y medir la resistencia en caliente, finalmente determinar la elevación de la temperatura en los devanados.	Dos transformadores idénticos pueden ensayarse conectando sus respectivos devanados de alta y baja tensión en paralelo, se aplica la tensión nominal a frecuencia nominal a un juego de devanados. Se hace circular corriente abriendo las conexiones del otro par de devanados y aplicando una tensión suficiente para obtener la corriente nominal a través de los devanados posteriormente se mide la elevación del nivel superior del líquido se hace el corte y se mide la elevación en los devanados

Fuente. INTERNATIONAL STANDARD. Power Transformers Part 2: Temperature rise. IEC 60076-2/1993 p.19

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE IEEE Test Code For Liquid – Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. C.57.12.90 /2015. p.58-60.

ICONTEC. Norma Técnica colombiana, Transformadores, método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en líquido refrigerante. NTC 316/1998. p.6-9

## Métodos de ensayo, método de cortocircuito

Tabla 8 Ensayo de Calentamiento, método de cortocircuito

ESTANDAR		
IEC 60076-2	IEEE C.57.12.90	NTC 316
<p>Previo al ensayo se deben determinar las pérdidas con carga y vacío a la temperatura de referencia de acuerdo a la IEC 60076-1 Clause 10.1. Este ensayo consiste en dos etapas:</p> <p><b>a) Total loss injection</b> Las temperaturas de Top oil y elevación del aceite promedio se estabilizan cuando el transformador es sujeto a un voltaje de prueba donde la potencia activa es igual a las pérdidas. La temperatura del aceite y el medio de enfriamiento son monitoreadas hasta que la temperatura de Top oil se estabilice.</p> <p><b>b)</b> Cuando la temperatura de top oil se ha estabilizado, el ensayo inmediatamente continúa reduciendo la corriente al valor nominal por una hora, con continua observación de la temperatura del aceite y del medio de enfriamiento. Al finalizar la hora se apaga la fuente y se retira el cortocircuito, después se mide la resistencia de los devanados y se determina el valor del promedio de temperatura en los devanados.</p>	<p><b>a)</b> Antes de realizar el “Total loss Run”, medir las pérdidas con carga a corriente y frecuencia nominal para la combinación de conexiones y taps que genere la más alta elevación de temperatura en los devanados, las pérdidas se deben medir y convertir a la temperatura igual a la elevación promedio de los devanados nominal más 20 °C (85°C) las pérdidas totales requeridas serán la suma de las pérdidas con carga y vacío.</p> <p><b>b)</b> Para el “total loss run”, cortocircuitar uno o más devanados y circular suficiente corriente a frecuencia nominal para producir las pérdidas totales requeridas</p> <p><b>c)</b> Determinar la elevación de la temperatura en el líquido</p> <p><b>d)</b> para el “Rated current run”, reducir la corriente en los devanados a la corriente nominal, mantener esta condición por una hora, medir la temperatura en el líquido, inmediatamente realizar el corte, y medir la resistencia en caliente</p> <p><b>e)</b> Determinar el incremento promedio de la temperatura en los devanados.</p>	<p><b>a)</b> Se debe colocar un devanado en cortocircuito y circular suficiente corriente a frecuencia nominal para producir las pérdidas totales para la conexión y la capacidad nominal, estas pérdidas (Vacío y cortocircuito) deben ser medidas previo al ensayo y en concordancia con la NTC 1005 y 1031 y además convertirse a la elevación de temperatura de diseño de los devanados más 20 °C (85 °C)</p> <p><b>b)</b> determinar la elevación de la temperatura en el líquido.</p> <p><b>c)</b> se reduce la corriente al valor nominal y se mantiene constante por una hora, se mide la temperatura del líquido, se realiza el corte y se realiza la medición de la temperatura promedio en los devanados, cuando el equipo presente limitaciones se puede operar a un valor inferior a la corriente nominal pero no inferior al 85 % de ella.</p>

Fuente. INTERNATIONAL STANDARD. Power Transformers Part 2: Temperature rise. IEC 60076-2 /1993 p.21

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE IEEE Test Code For Liquid – Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. C.57.12.90 /2015. p.61

ICONTEC. Norma Técnica colombiana, Transformadores, método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en líquido refrigerante. NTC 316/1998. p.7

## 2.3.4 Mediciones de temperatura

### 2.3.4.1 Medición de la temperatura ambiente

Tabla 9 Mediciones de Temperatura, Temperatura Ambiente

ESTANDAR		
IEC 60076-2	IEEE C.57.12.90	NTC 316
<p><b>Transformadores refrigerados por aire:</b> El ensayo debe ser realizado por lo menos con 3 sensores, el promedio de estas lecturas será usado para la evaluación del ensayo. Los sensores deben ser distribuidos alrededor del tanque o de los radiadores a 1 o 2 m, a una altura igual a la mitad de la altura de los radiadores.</p>	<p><b>Transformadores refrigerados por aire:</b> La temperatura ambiente se definirá como la temperatura del aire circundante esta debe estar en un rango entre 10 y 40 °C para valores diferentes a esta temperatura se debe aplicar el factor de corrección correspondiente. La temperatura ambiente debe ser medida por lo menos por tres termocuplas o termómetros colocados uniformemente alrededor del transformador localizados a una altura similar a la altura media del transformador y a una distancia de 1 o 2 m alrededor del transformador.</p>	<p><b>Transformadores refrigerados por aire:</b> La temperatura ambiente se definirá como la temperatura del aire circundante esta debe estar en un rango entre 10 y 40 °C para valores diferentes a esta temperatura se debe aplicar el factor de corrección correspondiente. La temperatura ambiente debe ser medida por lo menos por tres termocuplas o termómetros colocados uniformemente alrededor del transformador localizados a una altura similar a la altura media del transformador y a una distancia de 1 o 2 m alrededor del transformador.</p>
<p><b>Transformadores refrigerados por agua:</b> La temperatura ambiente será igual a la temperatura de entrada del agua. Lecturas temperatura y caudal deben ser tomadas en intervalos regulares de tiempo. Se deben tomar precauciones para evitar variaciones de la temperatura durante el ensayo</p>	<p><b>Transformadores refrigerados por agua:</b> La temperatura del agua de entrada y salida, así como el caudal debe ser medido, la temperatura ambiente se definirá como la temperatura de entrada del agua, La cual debe estar entre 20 y 30°C sin aplicar ningún factor de corrección</p>	<p><b>Transformadores refrigerados por agua:</b> La temperatura del agua de entrada y salida, así como el caudal debe ser medido, la temperatura ambiente se definirá como la temperatura de entrada del agua, La cual debe estar entre 20 y 30°C sin aplicar ningún factor de corrección</p>

Fuente. INTERNATIONAL STANDARD. Power Transformers Part 2: Temperature rise. IEC 60076-2 /1993 p.21

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE IEEE Test Code For Liquid – Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. C.57.12.90 /2015. p.63

ICONTEC. Norma Técnica colombiana, Transformadores, método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en liquido refrigerante. NTC 316/1998. p.2

**2.3.4.2 Medición de la elevación de la temperatura de líquido superior**

Tabla 10. Mediciones de Temperatura, medición de la elevación de la temperatura del líquido superior

ESTANDAR		
IEC 60076-2	IEEE C.57.12.90	NTC 316
El ensayo termina su primera etapa (Estado estable) cuando la tasa de cambio de la elevación de temperatura de Top oil (bajo la tapa) ha caído por debajo de 1° K por hora y se ha mantenido allí por un periodo de 3 h. si se toman valores de lecturas discretas en intervalos regulares de tiempo. el valor promedio de las lecturas durante la última hora es tomado para el resultado del ensayo.	La elevación de temperatura del líquido se define como la diferencia entre la temperatura Top (Bajo la tapa) del líquido y la temperatura ambiente. Se considerará una elevación final (Estado estable) cuando la elevación de la temperatura no varíe 2,5 % o 1°C, el que sea mayor durante un periodo consecutivo de 3h, se puede acortar el tiempo del ensayo con el uso de sobrecargas o restricción de la refrigeración	La elevación de temperatura del líquido se define como la diferencia entre la temperatura superior del líquido y la temperatura ambiente. Se considerará una elevación final (Estado estable) cuando la elevación de la temperatura no varíe 2,5 % o 1°C, el que sea mayor durante un periodo consecutivo de 3h, se puede acortar el tiempo del ensayo con el uso de sobrecargas o restricción de la refrigeración.  $to = T_o - Ta (2)$
La temperatura “Top oil” del aceite está determinada por uno o más sensores sumergidos en el aceite en la parte superior del tanque	La Temperatura superior del líquido debe medirse a través de una termocupla o termómetro apropiado inmerso aproximadamente 50 mm (2 in) bajo la superficie superior del líquido	La Temperatura superior del líquido debe medirse a través de una termocupla o termómetro apropiado inmerso aproximadamente 50 mm bajo la superficie superior del líquido

**Fuente.** INTERNATIONAL STANDARD. Power Transformers Part 2: Temperature rise. IEC 60076-2 /1993 p.21

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE IEEE Test Code For Liquid – Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. C.57.12.90 /2015. p.63

ICONTEC. Norma Técnica colombiana, Transformadores, método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en líquido refrigerante. NTC 316/1998. p.3

### 2.3.4.3 Temperatura superior e inferior y promedio del Líquido

Tabla 11 Temperatura promedio del líquido

Fuente. INTERNATIONAL STANDARD. Power Transformers Part 2: Temperature rise. IEC 60076-2 /1993 p.27

ESTANDAR		
IEC 60076-2	IEEE C.57.12.90	NTC 316
<p>“Bottom oil” (Aceite inferior) es un término que hace relevancia a la temperatura del aceite retornando del radiador al tanque, “Average oil” (Aceite promedio), es un término que se utiliza para evaluar el calentamiento y los resultados del ensayo. La temperatura promedio del aceite debe ser en principio la temperatura promedio entre “top oil” y “Bottom oil “</p> $T_{om} = \frac{T_o + T_{os}}{2} \quad (11)$	<p>La temperatura promedio del líquido debe ser determinada y será igual a la temperatura superior (Top) del líquido menos la mitad de la diferencia entre la temperatura superior e inferior de los radiadores</p> <p>La Temperatura inferior de los radiadores debe ser medida a través de los siguientes métodos:</p> <p>a) Los termopares pueden estar sujetos a una varilla aislada de tal forma que se ubiquen dentro del líquido y en la ruta del flujo del líquido desde los radiadores hasta los devanados.</p> <p>b) Los termopares pueden ubicarse en la tubería de los radiadores cuando este cuente con una entrada única al tanque, en el caso de que tenga varias entradas se puede ubicar el termopar en una de las tuberías preferiblemente la que se encuentre ubicada en la mitad del banco de radiadores</p> <p>c) si no es posible ubicar los termopares dentro del tanque se deben ubicar los termopares sobre la superficie de los radiadores a un tercio o la mitad de cada extremo del banco de radiadores , para evitar la afectación de las lecturas los termopares deben estar debidamente aislados y protegidos de las corrientes de aire o el movimiento de los ventiladores de los radiadores</p> <p>Para transformadores sin radiadores ubicar los termopares en la pared del tanque a una altura igual a los extremos de los devanados.</p>	<p>La Temperatura promedio del líquido debe registrarse y será igual a la temperatura superior del líquido menos la mitad entre la diferencia entre la temperatura superior e inferior de los radiadores</p> <p>Cuando el transformador bajo ensayo no posea radiadores se ubican las termocuplas de la siguiente manera</p> <p>Nivel Superior : Altura media entre el nivel superior del aceite y el extremo superior del devanado</p> <p>Nivel inferior : Altura media entre la base y el extremo inferior del devanado</p> $T_{om} = T_o - \frac{T_{os} - T_{oi}}{2} \quad (12)$ <p><math>T_{om}</math> : Temp. promedio del líquido en [°C]</p> <p><math>T_o</math>: Temp. superior del líquido en [°C]</p> <p><math>T_{os}</math> : Temp. liquido en la parte superior en [°C]</p> <p><math>T_{oi}</math> : Temp. liquido en la parte inferior en [°C]</p>

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE IEEE Test Code For Liquid – Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. C.57.12.90 /2015. p.64

ICONTEC. Norma Técnica colombiana, Transformadores, método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en líquido refrigerante. NTC 316/1998. p.3



### 2.3.4.4 Otras mediciones de temperatura

Tabla 12 Otras Mediciones de Temperatura

ESTANDAR		
IEC 60076-2	IEEE C.57.12.90	NTC 316
	Una termocupla es el método preferido cuando se vaya a realizar una medición de temperatura en la superficie. La termocupla puede ser soldada a la superficie sin embargo cuando esto no resulte practico, la termocupla puede soldarse a una placa metálica delgada de aproximadamente de $645 \text{ mm}^2$ . La placa debe mantenerse firme contra la superficie y aislada del medio circundante.	Una termocupla es el método preferido cuando se vaya a realizar una medición de temperatura en la superficie. La termocupla puede ser soldada a la superficie sin embargo cuando esto no resulte practico, la termocupla puede soldarse a una placa metálica delgada de aproximadamente de $25\text{mm} * 25\text{mm}$ ( $625 \text{ mm}^2$ ). La placa debe mantenerse firme contra la superficie y aislada del medio circundante.

**Fuente.** AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE IEEE Test Code For Liquid – Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. C.57.12.90 /2015. p.65

ICONTEC. Norma Técnica colombiana, Transformadores, método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en liquido refrigerante. NTC 316/1998. p.6

### 2.3.5 Mediciones de resistencia

#### 2.3.5.1 Ítem: Medición de la Temperatura promedio de los devanados

ESTANDAR		
IEC 60076-2	IEEE C.57.12.90	NTC 316
<p>La temperatura promedio de los devanados es determinada por el método de la resistencia.</p> <p>Y la elevación (Rise) de la temperatura del devanado es igual a :</p> $\Delta\theta_w = \theta_2 - \theta_a \quad (13)$ <p><math>\theta_2</math> : Temp. promedio de los devanados</p> <p><math>\theta_a</math> : Temp. ambiente en el momento del corte</p> <p>La temperatura promedio de los devanados es igual a:</p> <p>Para cobre</p> $\frac{R_2}{R_1} = \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1}$ <p>Para aluminio se toma como constante 225, Los valores de <math>\theta_1</math> y <math>R_1</math> son los valores de temperatura y resistencia en frio y <math>R_2</math> es la resistencia en caliente</p> <p>Para cobre:</p> $\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} * (235 + \theta_1) - 235 \quad (36)$ <p>De igual manera para aluminio la constante (235) es igual a 225</p>	<p>La temperatura promedio de los devanados de un par de terminales debe ser determinada con la ecuación:</p> $\theta_w = \frac{Rh}{Rc} (\theta_k + \theta_{rc}) - \theta_k \quad (14)$ <p><math>\theta_w</math> : Temp. promedio de los devanados</p> <p><math>Rh</math> : Resistencia en caliente [<math>\Omega</math>]</p> <p><math>Rc</math> : Resistencia en frio [<math>\Omega</math>]</p> <p><math>\theta_{rc}</math> : Temp. en la cual fue medida <math>Rc</math></p> <p><math>\theta_k</math> : 234.5 °C para cobre 225 para aluminio</p>	<p>La Temperatura promedio de los devanados se determinará por el método de la resistencia.</p> $T = \frac{R}{R_o} * (T_k + T_o) - T_k \quad (14)$ <p><math>T</math> :: Temp. promedio de los devanados [°C]</p> <p><math>R</math>: resistencia en caliente</p> <p><math>R_o</math>: resistencia en Frio</p> <p><math>T_o</math>: Temp. a la cual se midio la resistencia en frio [°C]</p> <p><math>T_k</math>: 234.5 °C para cobre 225 °C para aluminio</p> <p>Después del corte y permitiendo que transcurra el tiempo para que desaparezcan los efectos inductivos se deben tomar lecturas de la resistencia de los devanados de acuerdo a la NTC 375. El tiempo que transcurre desde el instante de corte para cada medición de resistencia debe registrarse.</p> <p>Los ventiladores y el agua de enfriamiento deben apagarse durante el corte para la medición de resistencias</p>

Fuente. INTERNATIONAL STANDARD. Power Transformers Part 2: Temperature rise. IEC 60076-2 /1993 p.27

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE IEEE Test Code For Liquid – Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. C.57.12.90 /2015. p.64

ICONTEC. Norma Técnica colombiana, Transformadores, método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en liquido refrigerante. NTC 316/1998. p.4

### 2.3.5.2 Determinación de la resistencia en caliente

Tabla 13 Determinación de la resistencia en caliente

ESTANDAR		
IEC 60076-2	IEEE C.57.12.90	NTC 316
<p>Después del corte y retirar el cortocircuito se debe conectar un medidor de resistencia en DC a la fase del devanado que va a ser medido.</p> <p>Los devanados tienen una gran constante de tiempo eléctrico L/R por lo tanto se obtienen lecturas precisas después de un tiempo.</p> <p>La resistencia del devanado varía con el tiempo esta debe ser medida por un tiempo suficiente para permitir una extrapolación hasta el instante de apagado.</p>	<p>Después del corte, se deben apagar los ventiladores o radiadores, las bombas pueden seguir funcionando.</p> <p>La medida se debe tomar permitiendo que pase un tiempo suficiente para que los efectos inductivos se reduzcan además se deben tomar en cuenta lo siguiente:</p> <p>a) En el momento en que se realice el corte será registrado como el tiempo cero.</p> <p>b) Para transformadores de distribución la medida de la resistencia en frío debe realizarse en todos los terminales sin embargo la medida de la resistencia en caliente se debe realizar por lo menos en uno.</p> <p>c) La primera medida de la resistencia en caliente debe ser medida tan rápido como sea posible después del corte, pero no superior a 4 min.</p> <p>d) Para transformadores de distribución deben ser realizadas en un intervalo entre 10 y 30 seg entre lecturas en un rango máximo de 10 min.</p>	<p>se pueden utilizar dos métodos</p> <p>a) <b>Método empírico:</b> este método solo se puede utilizar cuando las pérdidas del devanado no excedan de 66 W/kg para el cobre o 132 W/kg para el aluminio.</p> <p>se deben tomar lecturas de la resistencia en caliente dentro de los 4 min este valor se asume como el valor de la resistencia en caliente.</p> <p>se reemplaza en la ecuación de la temperatura promedio del devanado y se le suma una corrección de temperatura igual al producto de las pérdidas del devanado por el factor de corrección (Tabla 1, NTC 316, pág. 5) de acuerdo al tiempo en que fue tomada la lectura cuando el tiempo no se encuentre en la tabla se puede hacer uso de interpolación</p> <p><b>b) Método de la curva de enfriamiento:</b> se deben tomar lecturas de tiempo y resistencia mínimo una serie de 4 lecturas.</p> <p>además, la primera lectura se debe realizar dentro de los 4 minutos siguientes al corte y no sobrepasar la toma de las lecturas de 10 min posterior a eso se realiza una curva resistencia vs tiempo se extrapola y de acuerdo a esto se obtiene el valor de la resistencia en caliente</p>

Fuente. INTERNATIONAL STANDARD. Power Transformers Part 2: Temperature rise. IEC 60076-2 /1993 p.29

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE IEEE Test Code For Liquid – Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. C.57.12.90 /2015. p.62

ICONTEC. Norma Técnica colombiana, Transformadores, método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en líquido refrigerante. NTC 316/1998. p.5

### 2.3.5.3 Determinación de la elevación promedio de los devanados

Tabla 14 Determinación de la elevación promedio de los devanados

IEEE C.57.12.90	ESTANDAR NTC 316
<p>La elevación promedio de los devanados de un par de terminales correspondientes a la fase del devanado debe ser determinada a través de la siguiente ecuación</p> $\Delta\theta_w = \Delta\theta_l + \theta_w - \theta_l \quad (15)$ <p><math>\Delta\theta_w</math>: Elevación promedio del devanado</p> $\Delta\theta_l = \theta_{l_{TL}} - \theta_a$ <p><math>\Delta\theta_l</math>: Elevación promedio de la temp. del líquido medida desde el "Total Loss Run"</p> <p><math>\theta_{l_{TL}}</math>: Temp. promedio del líquido al finalizar el "Total loss run"</p> <p><math>\theta_w</math>: Temp. promedio de los devanados</p> <p><math>\theta_l</math>: Temperatura promedio del líquido al momento del corte</p> <p>La elevación promedio del devanado se calculará utilizando dos métodos, la elevación superior del líquido o la elevación promedio del líquido. Cuando se emplee una corriente del devanado distinta a la nominal, se debe usar el método del Aumento de líquido promedio para determinar la elevación en los devanados.</p> <p>a) En la elevación superior del líquido, la elevación promedio del devanado será igual a: La elevación superior de líquido (Top Liquid rise) medida durante el "Total loss run más la cantidad (Temperatura promedio del devanado en el momento del corte menos la temperatura superior del líquido en el momento de apagado)</p> <p>b) En la elevación promedio del líquido, la elevación promedio del devanado es la elevación promedio del líquido medida durante el "Total loss run" más la cantidad (Temperatura promedio del devanado en el momento del corte menos la temperatura promedio del líquido en el momento de apagado)</p>	<p>La elevación promedio de los devanados se debe calcular usando la elevación superior del líquido o la elevación promedio del líquido. Cuando se emplee una corriente en el devanado diferente a la nominal, debe usarse el <b>método de la elevación promedio del líquido para determinar la elevación en los devanados</b></p> <p>1) En el método de la elevación superior del líquido, la elevación de la temperatura promedio de los devanados es igual a la elevación de la temperatura del líquido, medido durante el periodo a pérdidas totales, más la cantidad (Temperatura promedio de los devanados en el momento del corte, menos la temperatura superior de líquido al momento del corte</p> $t = t_{oe} + (T - T_{oc}) \quad (16)$ <p><math>t</math>: elevación de temp. promedio en los devanados [°C]</p> <p><math>t_{oe}</math>: Elevación temp. superior líquido a pérdidas totales (Estabilización)</p> <p><math>T</math>: Temp. promedio de los devanados</p> <p><math>T_{oc}</math> = Temp. superior del líquido al corte [°C]</p> <p>2) En el método de la elevación promedio del líquido la elevación promedio del devanado es:</p> $t = t_{ome} + (T - T_{omc}) \quad (15)$ <p>La elevación promedio del líquido medido a pérdidas totales más la cantidad (Temperatura promedio de los devanados en el momento del corte, menos la temperatura promedio del líquido al momento del corte).</p> <p><math>t_{ome}</math>: Elevación de la temperatura promedio del líquido a pérdidas totales (estabilización) [°C]</p> <p><math>T_{omc}</math> = Temperatura promedio del líquido al corte [°C]</p>

Fuente. AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE IEEE Test Code For Liquid – Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. C.57.12.90 /2015. p.64

ICONTEC. Norma Técnica colombiana, Transformadores, método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en líquido refrigerante. NTC 316/1998. p.7

### 2.3.6 Correcciones

#### 2.3.6.1 Corrección por diferencia de altitud

Tabla 15 Correcciones por diferencias de altitud

ESTANDAR		
IEC	IEEE C.57.12.90	NTC 316
<p>Si el sitio de instalación está por encima de los 1000 msnm, pero la fábrica no, entonces la elevación admisible durante el ensayo debe ser reducida como sigue</p> <p>Para un transformador enfriado naturalmente (.AN), el límite de la elevación promedio del <b>devanado</b> debe ser reducida 1°K por cada intervalo de 400m que el sitio de instalación exceda los 1000m</p> <p>Para un transformador enfriado con aire forzado (.AF), el límite de la elevación promedio del <b>devanado</b> debe ser reducida 1°K por cada intervalo de 250m</p> <p>Una correspondiente corrección inversa debe ser aplicada en casos donde la altitud de la fábrica este por encima de los 1000m de altitud y el sitio de instalación este por debajo o igual a los 1000m</p>	<p>Si los ensayos son realizados a una altitud menor o igual a 1000 m, ninguna corrección debe aplicarse por altitud.</p> <p>Si un transformador se ensaya a una altitud menor o igual a 1000m y va a operarse a una altitud por encima de los 1000m, se deben asumir que las elevaciones de temperatura <b>del líquido</b> incrementen en concordancia con la siguiente formula</p> $\Delta\theta_A = \Delta\theta_o * \left(\frac{A}{A_o} - 1\right) * F \quad (17)$ <p><math>\Delta\theta_A</math>: <i>Incremento de la elevacion de temperatura del liquido una altitud de A metros</i></p> <p><math>\Delta\theta_o</math>: <i>Elevacion de temperatura observada en el liquido</i></p> <p><math>A</math>: <i>Altitud, en metros</i></p> <p><math>A_o</math>: <i>Igual a 1000 metros</i></p> <p><math>F</math>: 0,04 para modo de autoenfriamiento <math>F</math>: 0.06 para refrigeracion por aire forzado</p> <p>Nota: la elevación de la temperatura del devanado por encima del líquido no es afectada por la altitud</p>	<p>Si los ensayos son realizados a una altitud menor o igual a 1000 m, ninguna corrección debe aplicarse por altitud.</p> <p>Si un transformador se ensaya a una altitud menor o igual a 1000m y va a operarse a una altitud por encima de los 1000m, se deben asumir que las <b>elevaciones de temperatura</b> incrementen en concordancia con la siguiente formula</p> $T_A = T_e \left(\frac{A}{A_o} - 1\right) * F \quad (17)$ <p><math>T_A</math>: <i>Incremento de la elevacion de temperatura a una altitud de A metros</i></p> <p><math>T_e</math>: <i>Elevacion de temperatura observada [°C]</i></p> <p><math>A</math>: <i>Altitud, en metros</i></p> <p><math>A_o</math>: <i>Igual a 1000 metros</i></p> <p><math>F</math>: 0,04 para modo de autoenfriamiento <math>F</math>: 0.06 para refrigeracion por aire forzado</p>

Fuente. INTERNATIONAL STANDARD. Power Transformers Part 2: Temperature rise. IEC 60076-2 /1993 p.15

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE IEEE Test Code For Liquid – Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. C.57.12.90 /2015. p.67

ICONTEC. Norma Técnica colombiana, Transformadores, método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en liquido refrigerante. NTC 316/1998. p.10

### 2.3.6.2 Corrección por diferencia entre la corriente nominal y la corriente del ensayo

Tabla 16 Corrección por diferencia entre la corriente nominal y la corriente de ensayo

ESTANDAR		
IEC 60076-2	IEEE C.57.12.90	NTC 316
<p>Cuando los valores específicos de corriente no son obtenidos durante el ensayo, el resultado debe ser corregido de acuerdo a la siguiente relación.</p> <p>Esto es válido con un rango de <math>\pm 10\%</math> del valor específico</p> <p>La diferencia entre la temperatura promedio del devanado y la temperatura promedio del líquido durante el ensayo es multiplicada por:</p> $\left[ \frac{\text{Rated current}}{\text{test current}} \right]^y \quad (18)$ <p><math>y = 1,6</math> para ON y OF</p> <p><math>y = 2.0</math> para OD</p> <p>De acuerdo al método de enfriamiento de cada transformador.</p>	<p>Cuando el equipo de ensayo presente limitaciones, es permisible realizar el ensayo a un valor menor de la corriente nominal pero no menor al 85% de la misma.</p> <p>Cuando la corriente difiere de la corriente nominal las diferencias observadas entre la temperatura promedio del devanado y la temperatura promedio del líquido en el instante de corte debe ser corregida para dar la elevación de la temperatura promedio de los devanados a la corriente nominal usando la ecuación:</p> $\Delta\theta_{w,c} = \Delta\theta_{w,o} * \left( \frac{\text{rated current}}{\text{test current}} \right)^{2m} \quad (19)$ <p><math>\Delta\theta_{w,c}</math> : Es la diferencia corregida entre la temp. promedio del devanado y del liquido en el instante de apagado</p> <p><math>\Delta\theta_{w,o}</math> : Es la diferencia observada entre la temperatura promedio del devanado y del liquido en el instante de apagado</p> <p><math>m</math> : 0.8 para ONAN, ONAF, OFAF OFWF 1 Para ODWF</p>	<p>En el caso de que la corriente mantenida en los devanados se encuentre por debajo del valor nominal, La diferencia observada entre la temperatura promedio del devanado al momento del corte y la temperatura promedio del líquido al momento del corte debe corregirse para dar la elevación de temperatura promedio del devanado a corriente nominal haciendo uso de la siguiente ecuación:</p> $T_c = T_{od} * \left( \frac{\text{Corriente nominal}}{\text{corriente de prueba}} \right)^{2m} \quad (19)$ <p><math>T_c</math>: Diferencia corregida entre la temperatura promedio del devanado referida al momento del corte y la temp. promedio del liquido al corte</p> <p><math>T_{od}</math> : Diferencia observada entre la temperatura promedio del devanado referida al momento del corte y la temp. promedio del liquido al corte</p> <p><math>m</math> : 0,8 Para Transformadores clase OA FA y clase con flujo indirecto FOA FOW 1 para clase con flujo directo FOA y FOW</p> $t = T_{ome} + T_c$

Fuente. INTERNATIONAL STANDARD. Power Transformers Part 2: Temperature rise. IEC 60076-2 /1993 p.29

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE IEEE Test Code For Liquid – Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. C.57.12.90 /2015. p.66

ICONTEC. Norma Técnica colombiana, Transformadores, método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en liquido refrigerante. NTC 316/1998. p.8

**2.3.6.3 Corrección de la elevación del líquido por diferencia entre las pérdidas totales y las perdidas requeridas**

Tabla 17 Corrección por diferencia entre las pérdidas totales y las perdidas requeridas

ESTANDAR		
IEC 60076-2	IEEE C.57.12.90	NTC 316
<p>Si el valor específico de potencia no es alcanzado durante el ensayo el resultado puede ser corregido de acuerdo a la siguiente relación, esto es válido en un rango de <math>\pm 20\%</math> del valor específico de potencia</p> <p>La diferencia entre la temperatura del aceite (Top oil) y la temperatura ambiente es multiplicada por:</p> $\left[ \frac{\text{Total losses}}{\text{Test losses}} \right]^x \quad (20)$ <p><math>x = 0.8</math> para transf. de distribución enfriamiento natural Pot. Max 2500 kVA</p> <p><math>x = 0.9</math> para transf de potencia enfriamiento ON</p> <p><math>x = 1.0</math> Para enfriamiento OF y OD</p>	<p>Este método puede ser aplicado cuando la pérdida real está dentro del 20% de las pérdidas totales requeridas aplicando la ecuación:</p> $\Delta\theta_{I,C} = \Delta\theta_{I,o} \left[ \left( \frac{P_r}{P_T} \right)^n - 1 \right] \quad (21)$ <p><math>\Delta\theta_{I,C}</math>: es la corrección de la elevación del líquido</p> <p><math>\Delta\theta_{I,o}</math>: es la elevación observada del líquido</p> <p><math>P_r</math>: Perdidas requeridas (W)</p> <p><math>P_T</math>: Perdidas totales reales (W)</p> <p><math>n</math>: es 0.8 para clase ONAN</p> <p>0.9 Para ONAF y OFAF</p> <p>1 Para ODAF y ODWF</p> <p>La Elevación corregida del líquido es igual a:</p> <p>Elevación observada de líquido + <math>\Delta\theta_{I,C}</math></p> <p>La elevación corregida del devanado es igual a</p> <p>Elevación observada del devanado + <math>\Delta\theta_{I,C}</math></p>	<p>Este método puede ser utilizado en el caso de que las pérdidas reales estén dentro del 20 % de las pérdidas requeridas</p> $T_d = T_b * \left[ \left( \frac{W}{w} \right)^n - 1 \right] \quad (21)$ <p><math>T_d</math>: Corrección de la elevación del líquido en °C</p> <p><math>T_b</math>: Elevación del líquido observada</p> <p><math>W</math>: Perdidas requeridas (W)</p> <p><math>w</math>: Perdidas reales (W)</p> <p><math>n</math>: es 0.8 para clase OA</p> <p>0.9 Para ONAF y FA</p> <p>1 Para FOA y FOW</p> <p>La Elevación corregida del líquido es igual a:</p> <p>Elevación observada de líquido + <math>\Delta\theta_{I,C}</math></p> <p>La elevación corregida del devanado es igual a</p> <p>Elevación observada del devanado + <math>\Delta\theta_{I,C}</math></p>

Fuente. INTERNATIONAL STANDARD. Power Transformers Part 2: Temperature rise. IEC 60076-2 /1993.p29.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE IEEE Test Code For Liquid – Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. C.57.12.90 /2015. p66.

ICONTEC. Norma Técnica colombiana, Transformadores, método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en líquido refrigerante. NTC 316/1998.p10

### 2.3.7 Límites del ensayo

Tabla 18 límites del ensayo

Ítem	ESTANDAR		
	IEC 60076-2	IEEE C.57.12.00	NTC 316
<b>Límite de elevación del devanado</b>	<p>Los siguientes límites para elevaciones de temperatura en transformadores inmersos en aceite (Código Letra O) aplican a estado estable y potencia nominal:</p> <p>La elevación del devanado promedio para transformadores identificados como ON. O OF... es de 65 °K, Para transformadores como OD. Es de 70 ° K</p>	<p>La elevación del devanado no debe exceder los 65°C a Potencia nominal en kVA, Cuando el ensayo se realice con IEEE C.57.12.90, usando la combinación de conexiones y taps que entreguen la más alta elevación de temperatura en el devanado.</p>	<p>Se considera que el transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo cuando una vez efectuadas las correcciones, el resultado de la elevación promedio de temperatura de los devanados, comparado con el valor normalizado, es menor o igual a 65 °C</p>
<b>Límite de elevación del líquido</b>	<p>La elevación del líquido Top oil será igual a 60°K</p>	<p>La máxima Elevación del líquido aislante no debe exceder los 65 °C cuando se mide cerca de la parte superior del tanque principal</p>	

Ítem	ESTANDAR		
	IEC 60076-2	IEEE C.57.12.00	NTC 316
<b>Hot Spot</b>	<p>De acuerdo a la IEC 60354 de 1991, La Temperatura de Hot spot no debe Exceder los 78 °K</p>	<p>El máximo Hotspot no debe exceder los 80 °C a potencia Nominal</p>	

**Fuente.** INTERNATIONAL STANDARD. Power Transformers Part 2: Temperature rise. IEC 60076-2 /1993.p13

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE IEEE.Standard for standard general Requirements for Liquid- immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. C.57.12.00/2006. p.22-23.



# **CAPITULO TRES**

---

*“El científico no tiene por objeto un resultado inmediato. Él no espera que sus ideas avanzadas sean fácilmente aceptadas. Su deber es sentar las bases para aquellos que están por venir, y señalar el camino.”*

**Nikola Tesla**

En este capítulo se muestra el procedimiento de prueba para realizar el ensayo de calentamiento. Este se desarrolló de acuerdo a los conceptos y la comparación de los estándares aplicables presentados en los capítulos precedentes.

El procedimiento de prueba presenta los componentes eléctricos, equipos de medida, diagramas de conexión necesarios para implementar el ensayo, así como las 6 fases planteadas para el desarrollo del ensayo.



### **3. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA PARA IMPLEMENTAR EL ENSAYO DE CALENTAMIENTO**

La implementación del ensayo, se realiza de acuerdo el método de cortocircuito teniendo en cuenta que es el más práctico y empleado para la realización del ensayo.

#### **3.1 Equipos y elementos necesarios**

##### **3.1.1 Componentes eléctricos**

Para la implementación del ensayo de calentamiento son necesarios los componentes eléctricos listados a continuación <sup>30</sup>. En el anexo E se detallan cada uno de los componentes eléctricos necesarios:

- Fuente de suministro variable AC
- Transformador auxiliar
- Banco de condensadores
- Transformador bajo ensayo

##### **3.1.2 Equipos de medida**

Los equipos de medida necesarios para realizar el ensayo se encuentran listan a continuación <sup>31</sup>. En el anexo F se detallan cada uno de los equipos de medida necesarios para la implementación del ensayo.

- 3 multímetros
- 2 pinzas amperimétricas
- 2 transformadores de potencial
- Vatímetro trifásico
- Medidor de resistencia óhmica
- Termómetro
- 6 termopares
- Cámara termográfica
- Conmutador selector giratorio de termopares

---

<sup>30</sup> BALBUZANO, Mauro. Análisis de las pruebas a realizar en transformadores de potencia. Caracas,2011,58p. Trabajo especial de grado (Ingeniero Electricista). Universidad Central de Venezuela. Facultad de ingeniería. Ingeniería Eléctrica.

<sup>31</sup> BALBUZANO, op. cit, p.58

### **3.1.3 Elementos necesarios:**

Los elementos necesarios para realizar el ensayo se encuentran se listan a continuación. En el anexo G se detallan los elementos necesarios para implementar el ensayo de calentamiento.

- Computador portátil
- Cámara fotográfica
- Cronometro
- Papel aislante térmico
- Laminilla de cobre de 25mm \* 25 mm

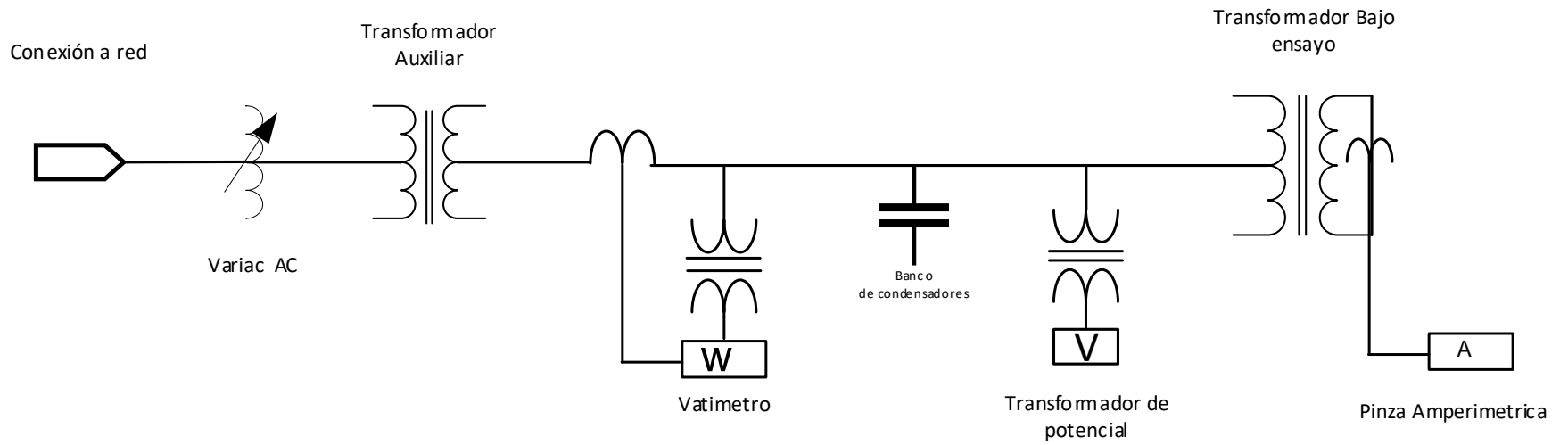
**Fuente.** El Autor.

### **3.2 Diagramas de conexión**

En la figura 10 y 11, se muestran los diagramas de conexión unifilar y trifilar para implementar el ensayo de calentamiento.

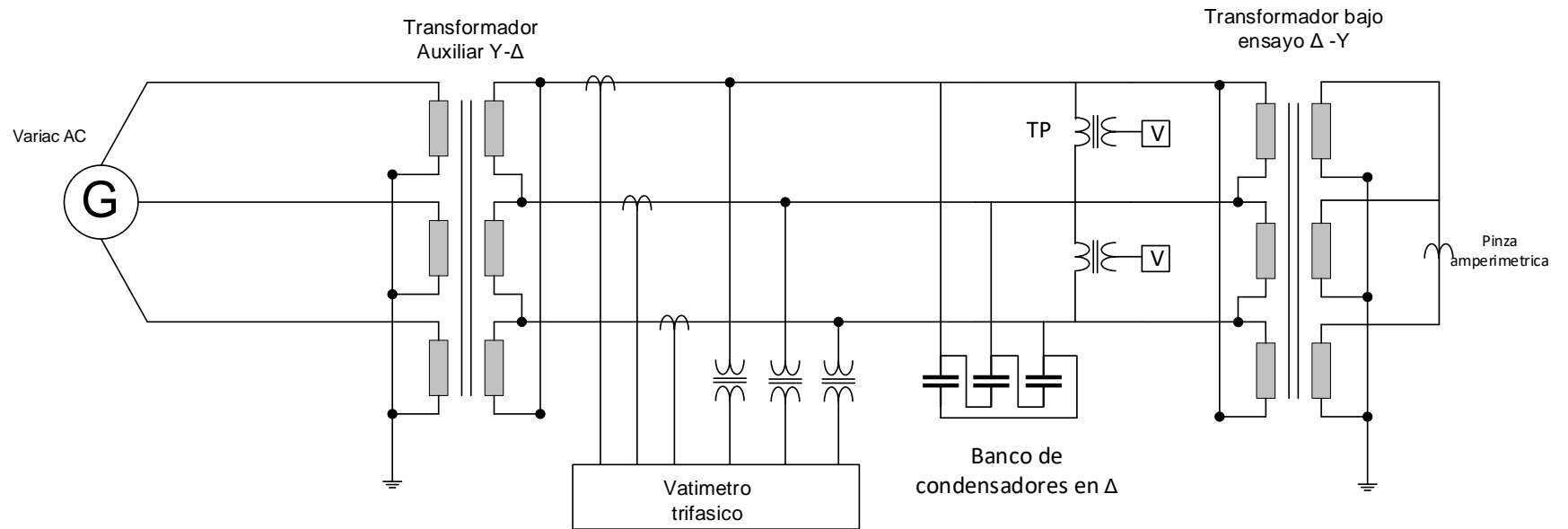
# Procedimiento de prueba para implementar el ensayo de calentamiento

Figura 10 Diagrama unifilar del Ensayo de Calentamiento de acuerdo al método de cortocircuito



Fuente. El Autor

Figura 11 Diagrama trifilar del Ensayo de Calentamiento de acuerdo al método de cortocircuito

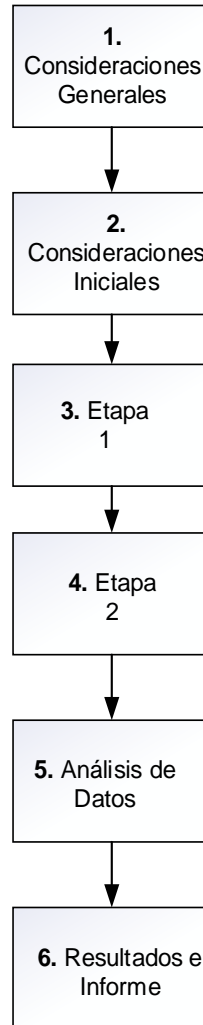


Fuente. El Autor

### 3.3 Procedimiento

El procedimiento de prueba se divide en 6 fases (Figura 12). En el Anexo H se especifican recomendaciones que se deben tener en cuenta en cada fase al implementar el ensayo.

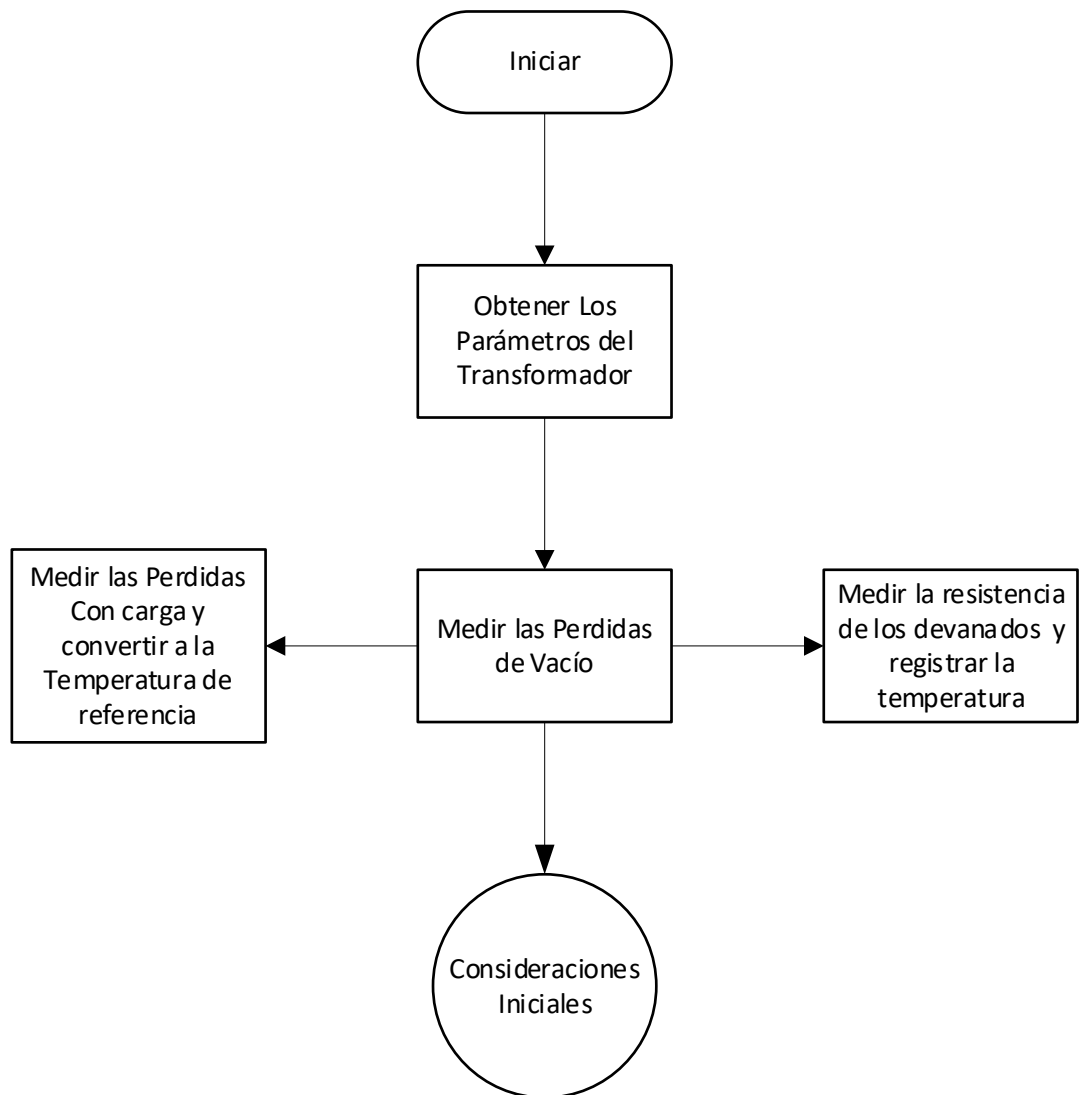
Figura 12 Fases del Procedimiento de prueba del ensayo de calentamiento



Fuente. El Autor

### 3.3.1 Consideraciones Generales:

Figura 13 Fase 1. Consideraciones generales

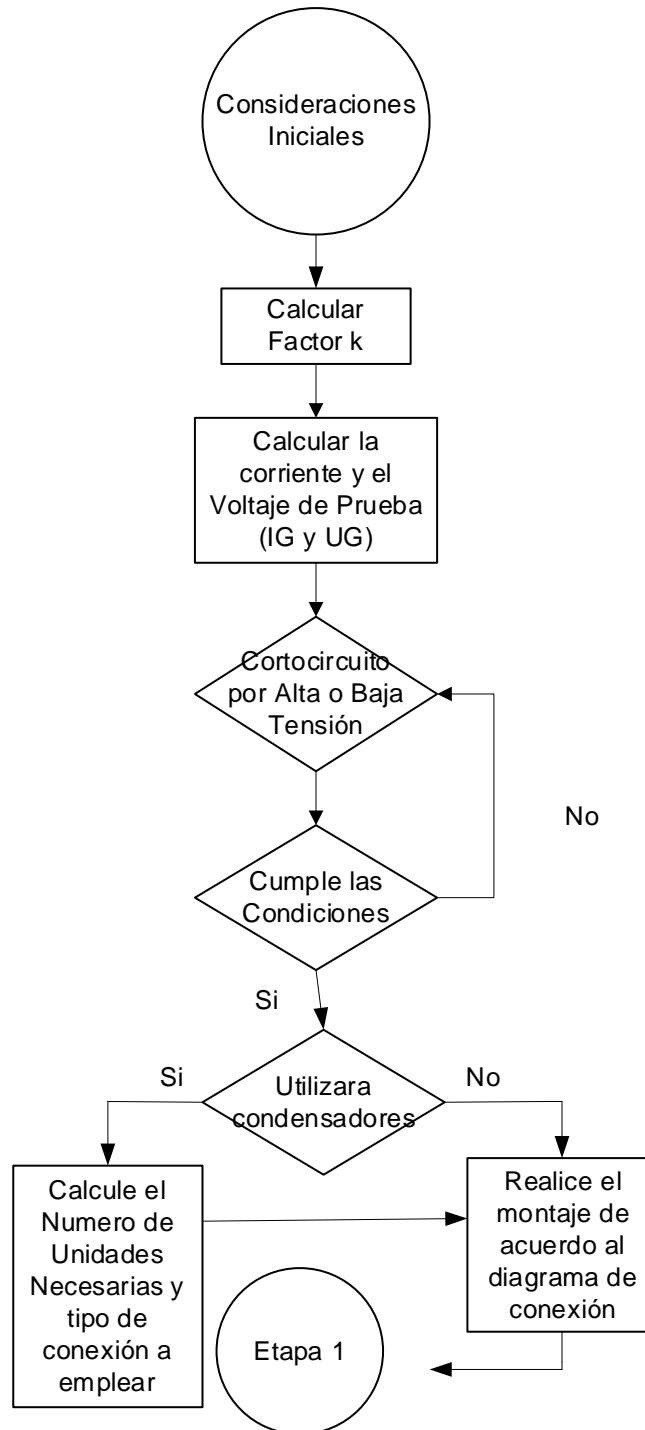


Fuente. El autor



### 3.3.2 Consideraciones iniciales:

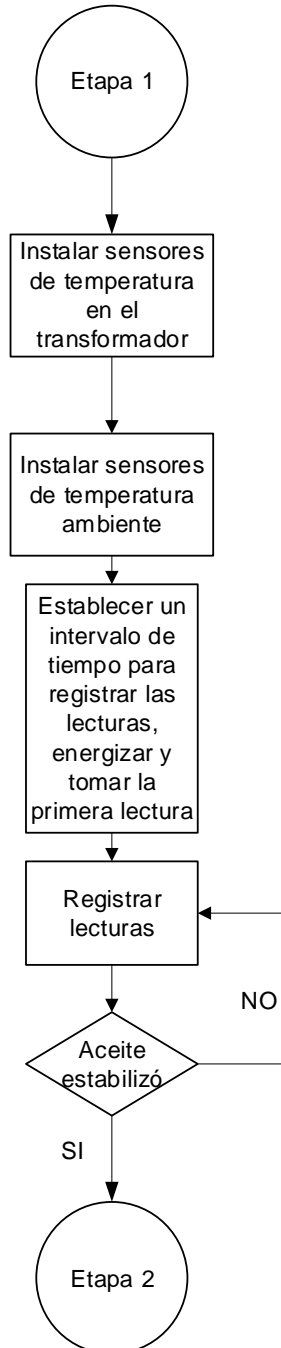
Figura 14 Fase 2. Consideraciones Iniciales.



Fuente. El autor

### 3.3.3 Etapa 1

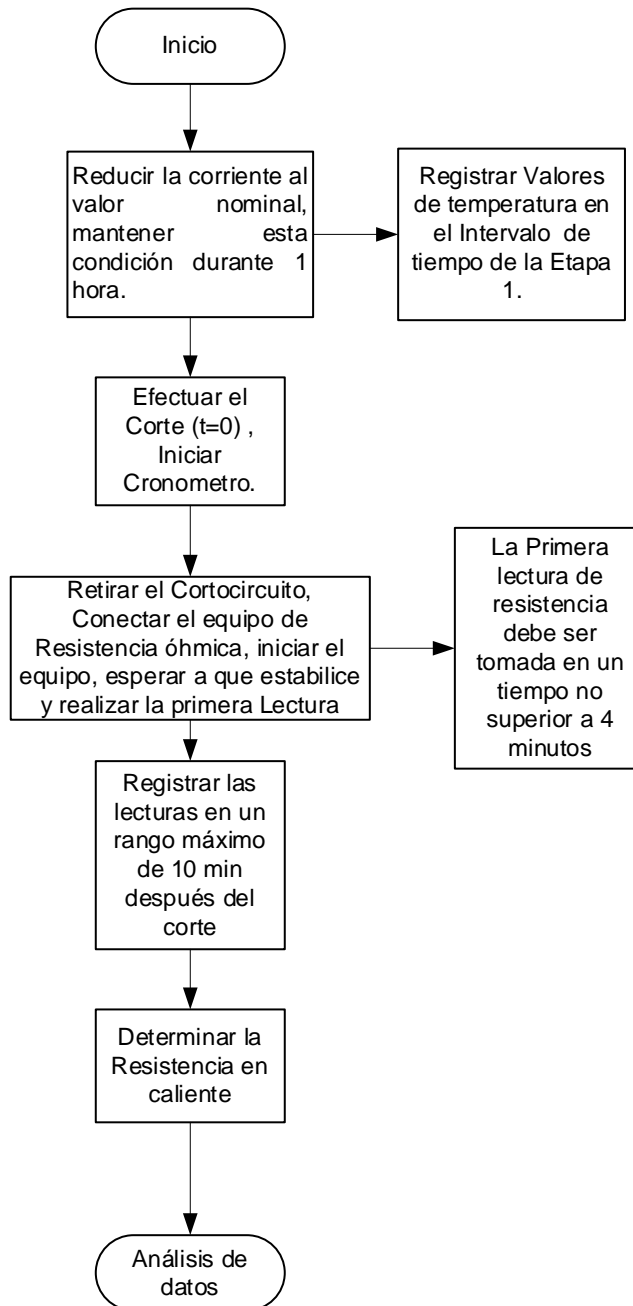
Figura 15 Fase 3. Etapa 1



Fuente. El autor

### 3.3.4 Etapa 2

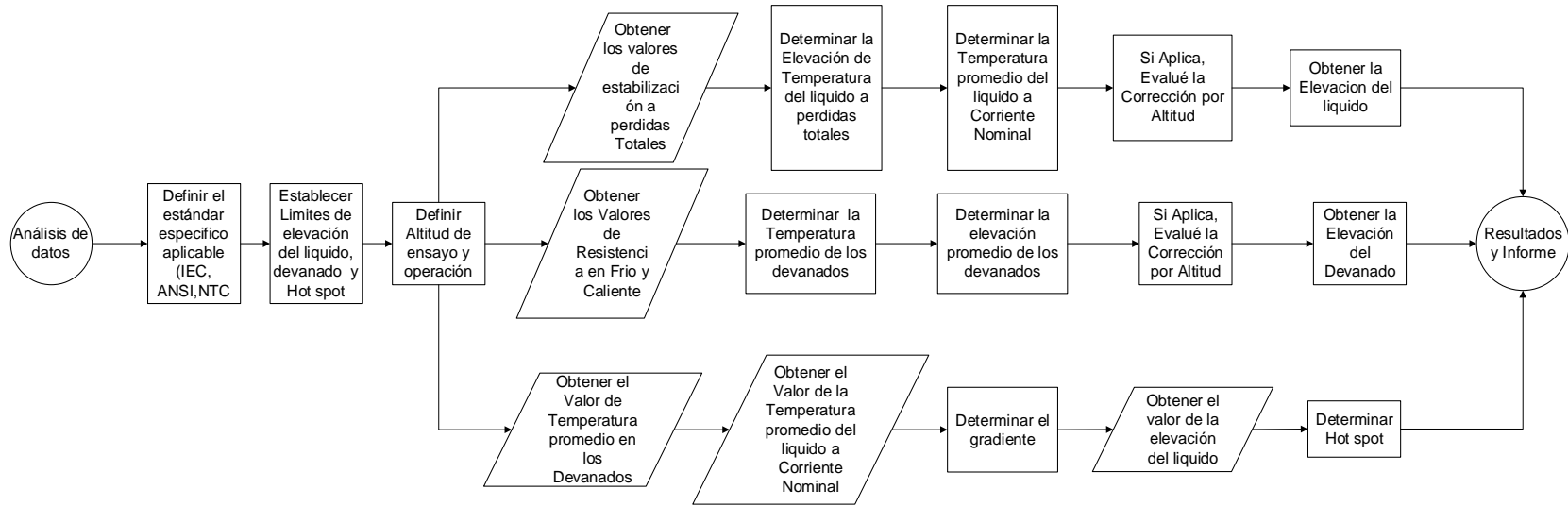
Figura 16 Fase 4. Etapa 2



Fuente. El Autor

### 3.3.5 Análisis de datos

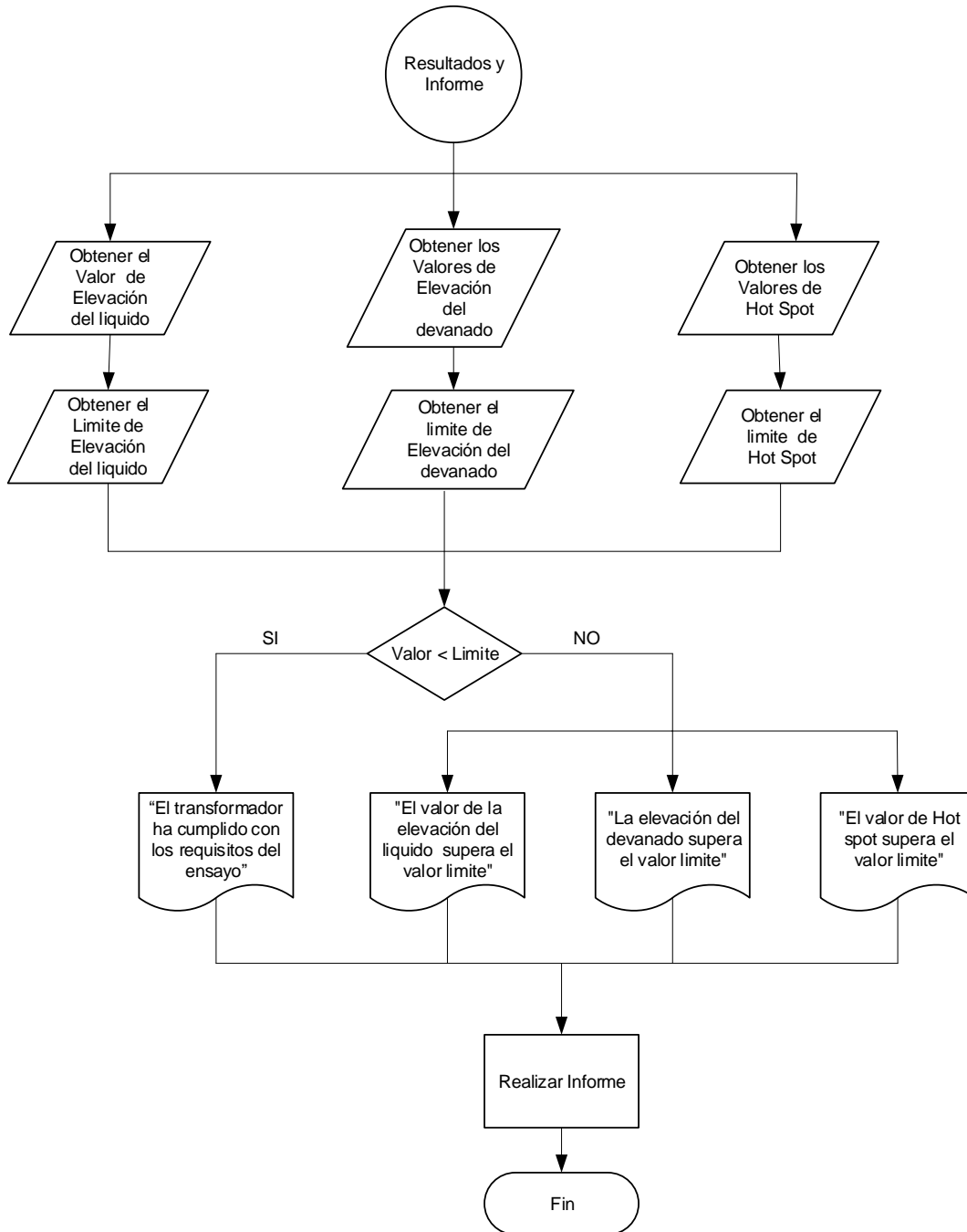
Figura 17 Fase 5. Análisis de datos



Fuente. El Autor

### 3.3.6 Resultados e Informe

Figura 18 Fase 6. Resultados e informe



Fuente. El Autor

# **CAPITULO 4**

*“Los logros de una organización son el resultado de los esfuerzos combinados de cada individuo.”*

***Vince Lombardi.***

En este capítulo se presenta lo relacionado a la implementación del ensayo de calentamiento en el laboratorio de ensayos electromecánicos en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad seccional Duitama

#### **4. IMPLEMENTACION DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO PARA EL LABORATORIO DE ENSAYOS DE LA UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA**

A través del laboratorio de ensayos electromecánicos, de la escuela de Ingeniería Electromecánica, se implementará el ensayo de calentamiento en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Se ensayarán transformadores de distribución de hasta 150 kVA ,34,5 kV. Potencias típicas en redes de distribución en el departamento de Boyacá.

##### **4.1 Espacios Disponibles:**

Para la implementación del ensayo se cuenta con las instalaciones disponibles del laboratorio de ensayos electromecánicos.

*Figura 19 Laboratorio de ensayos electromecánicos U.P.T.C Duitama*



Fuente. El Autor

##### **4.2 Componentes eléctricos, equipos de medida y elementos para implementar el ensayo**

El grupo de investigación Gridse en proyectos realizados desde el año 2011, para el laboratorio de ensayos electromecánicos, ha adquirido equipos de medida y componentes eléctricos que servirán de apoyo en la implementación del ensayo de calentamiento, sin embargo, se hizo necesario adquirir ciertos equipos para poder implementar el ensayo.

### **Componentes eléctricos empleados**

Los componentes eléctricos empleados para implementar el ensayo de calentamiento se listan a continuación. En el anexo I se especifican de manera detallada.

- Variac trifásico 0-230 VAC 60 A, 22 kVA
- Transformador Auxiliar Tipo seco de 30 kVA (en proceso de compra)
- Transformador Bajo ensayo (se cuenta con tres transformadores trifásicos y uno monofásico para realizar el ensayo)
- Banco de condensadores (su implementación es opcional)

### **Equipos de medida empleados**

En el anexo L se especifican de manera detallada los equipos de medida empleados para el ensayo a continuación se listan los equipos de medida empleados para implementar el ensayo.

- 3 multímetros Fluke 179 y 116
- Analizador de calidad de la energía Fluke 438 II
- Pinzas amperimétricas Fluke 376 (2000 A) y Fluke 332 (400 A)
- Medidor de Resistencia Óhmica Metrel 3250
- Cámara Termografica Flir E6
- Conmutador selector giratorio Omega (en proceso de compra)
- 6 termopares (en proceso de compra)

### **Elementos empleados:**

Para la implementación del ensayo se utilizan los siguientes elementos:

- Cámara fotográfica
- Cronometro
- Papel aislante térmico
- Laminilla de cobre

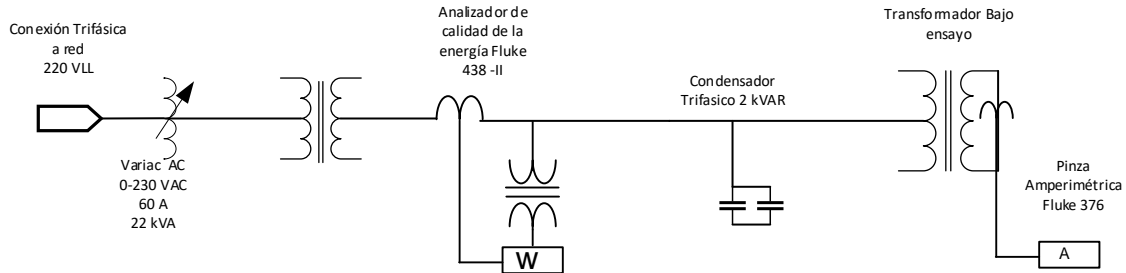
### **4.3 Diagramas de conexión.**

Para implementar el ensayo de calentamiento en el laboratorio de ensayos electromecánicos de la universidad pedagógica y tecnológica de Colombia se emplearán los siguientes diagramas de conexión.



### 4.3.1 Diagrama Unifilar

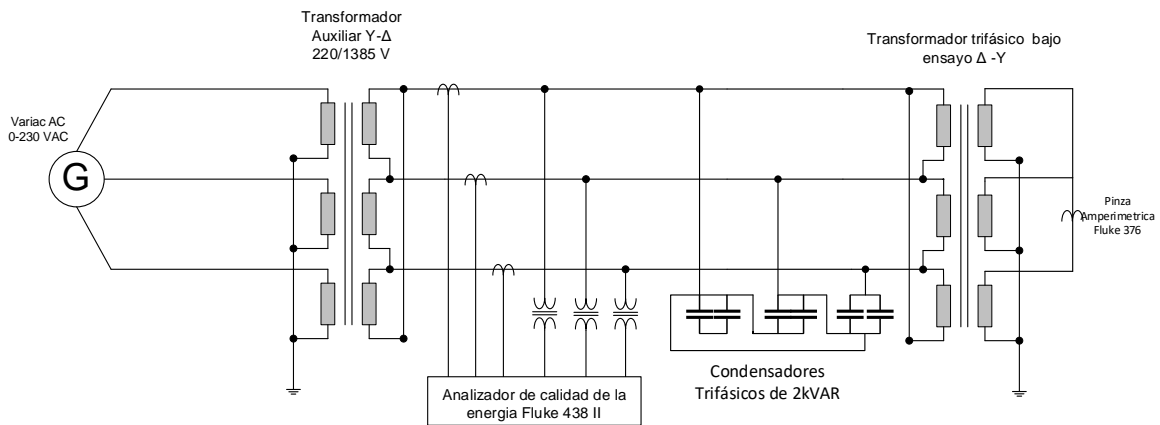
Figura 20 Diagrama unifilar para la implementación del ensayo de calentamiento en el laboratorio de ensayos electromecánicos



Fuente. El Autor

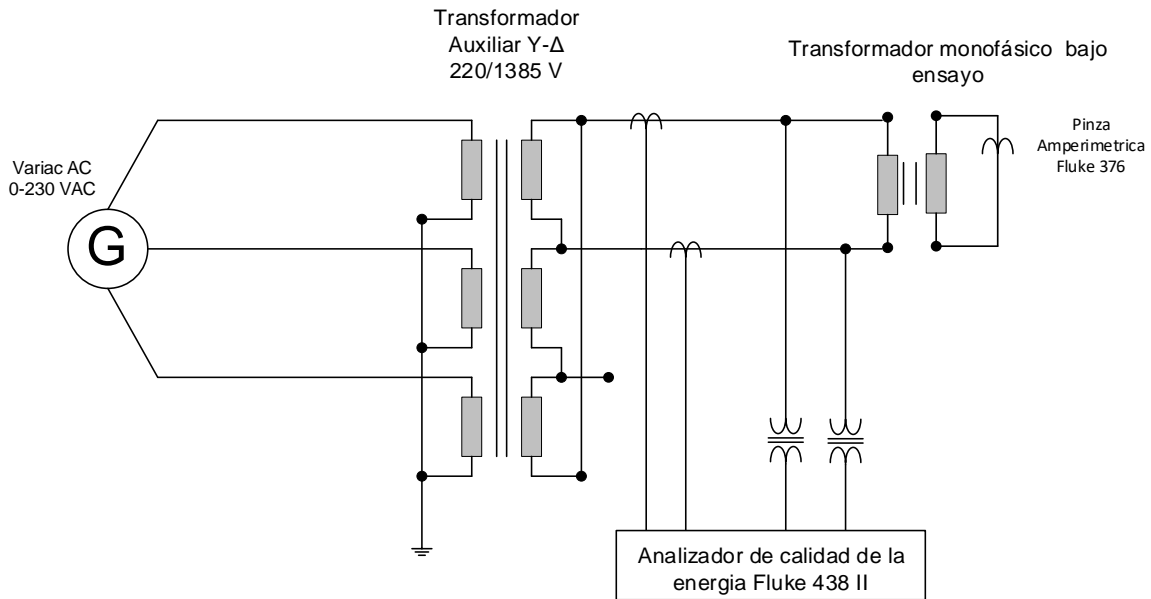
### 4.3.2 Diagrama Trifilar

Figura 21 Diagrama trifilar para la implementación del ensayo de calentamiento en el laboratorio de ensayos electromecánicos en transformadores trifásicos.



Fuente. El Autor

Figura 22 Diagrama trifilar para la implementación del ensayo de calentamiento en el laboratorio de ensayos electromecánicos en transformadores monofásicos.



Fuente. El Autor

#### 4.4 Presupuesto

Tabla 19 Presupuesto implementación del ensayo de calentamiento U.P.T.C Duitama

Equipos, Elementos y Materiales	Cantidad	Costo	Costo Total
		\$	
Transformador auxiliar seco Tipo H	1	11.990.000	\$ 11.990.000
Condensadores Trifásicos 2 kVAR 220V	2	\$250.000	\$500.000
Termopar tipo K de 10 m de longitud	6	\$150.000	\$900.000
Termopar tipo K de 6 m de longitud	6	\$106.000	\$363.000
Conmutador selector giratorio omega	1	\$1.470.000	\$1.470.000
		<b>Total</b>	<b>\$15.223.000</b>

Fuente. El Autor

# **CAPITULO CINCO**

*“Un sutil pensamiento erróneo puede dar lugar a una indagación fructífera que revela verdades de gran valor.”*

***Heráclito de Efeso***

Actualmente la cromatografía de gases es ampliamente utilizada en la detección de fallas en transformadores de distribución y potencia, en este capítulo se presenta el procedimiento para obtener una muestra de aceite dieléctrico y la interpretación de resultados del análisis cromatográfico para el ensayo de calentamiento.



## **5. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA PARA REALIZAR EL MUESTREO Y LA INTERPRETACION DE RESULTADOS DEL ANALISIS CROMATOGRAFICO EN ACEITE DIELECTRICO DE TRANSFORMADORES**

El análisis de los gases permite determinar cualitativamente y cuantitativamente los gases disueltos en el aceite del transformador a partir de ello se pueden diagnosticar fallas incipientes, es decir cuando el transformador se somete a ciertos esfuerzos eléctricos y térmicos se generan ciertos gases los cuales se convierten en una evidencia de un funcionamiento anormal.

La cromatografía de gases es el método más utilizado para realizar análisis periódicos de aceite e identificar cuales gases están fuera de su rango normal.<sup>32</sup>

El procedimiento de prueba para realizar el muestreo es el mismo para todos los análisis así como la evaluación de la muestra para determinar cualitativamente y cuantitativamente los gases disueltos, sin embargo en cuanto a la interpretación de resultados para el análisis de fallas incipientes o de condición se efectúa un análisis en el cual se calcula el total de gases combustibles (TDGC) , de acuerdo a unos valores específicos se establecen 4 condiciones de funcionamiento las que definen un funcionamiento normal o anormal dentro del transformador, posteriormente se evalúa cuantitativamente cada gas presente en la muestra y de igual manera se establece un análisis de condición si bajo los criterios anteriores se establecieron posibles fallas el transformador debe ser sujeto a métodos de interpretación para establecer una posible falla en específico en el anexo O se establece el procedimiento para el análisis de condición para la interpretación de resultados del análisis cromatográfico, en el anexo D se incluye de manera detallada los métodos de interpretación.

Para el ensayo de calentamiento en específico de acuerdo a la IEC 61181 Mineral oil- filled electrical equipment – application of dissolved gas analysis (DGA) to factory test son electrical equipment<sup>33</sup>. Se toman dos muestras del aceite dieléctrico del transformador una antes del ensayo y otra después del ensayo y se comparan los valores de los gases clave [ ppm] con un valor específico o normalizado.

---

<sup>32</sup> REYES PEREZ. Op. Cit.p.28

<sup>33</sup> INTERNATIONAL STANDARD. Mineral oil- filled electrical equipment – application of dissolved gas analysis (DGA) to factory test son electrical equipment. IEC 61818-1 /2007

### 5.1 Descripción de las etapas

Para realizar el muestreo y la interpretación de resultados del análisis cromatográfico en aceite dieléctrico de transformadores el procedimiento se dividirá en etapas las cuales se describirán brevemente <sup>34</sup>

- a) Procedimiento para la obtención de la muestra
- b) Análisis cromatográfico
- c) Análisis de resultados
- d) Diagnostico

#### a) Procedimiento para la obtención de la muestra

Se debe realizar la obtención de una muestra representativa del aceite contenido en el tanque del transformador, se debe tener en cuenta que la muestra debe estar libre de contaminantes como agua o polvo, a su vez se debe procurar que la muestra esté libre de burbujas en el caso que se presenten, no se deben eliminar ya que forman parte del estado actual del aceite.<sup>35</sup>

#### Equipo

- Jeringa de vidrio con capacidad de 50 a 100 ml.
- Válvula de 3 vías ajustable a la jeringa desechable.
- Balde y manta limpia.
- Acoples para conexión de válvulas a los equipos.
- Manguera flexible plástica.
- Herramientas para soltar o apretar componentes del transformador.
- Rotulo para marcación de la muestra.
- Frasco de ámbar de 50 ml para recolección de muestras.<sup>36</sup>

#### Precauciones

- La muestra debe efectuarse en condiciones atmosféricas favorables, sin lluvia y con humedad relativo inferior al 60%.
- La muestra tomada debe ser enviada lo más pronto posible al laboratorio.<sup>37</sup>

#### Procedimiento

1. Ubicar la válvula de muestreo en el transformador y limpiar esta área.
2. Retirar el tapón de la válvula de muestreo y limpiar con una manta limpia.
3. Realizar una conexión entre la manguera y la válvula de muestreo.

---

<sup>34</sup> Ibid., p.44.

<sup>35</sup> Ibid., p.44.

<sup>36</sup> Artech. Toma de muestras de aceite. Manual de usuario.p.2. Internet ([https://www.artech.com/en/cmris/browser?id=workspace://SpacesStore/8322aebc-b667-4b7d-914c-25f18086e16c&entity\\_id=4408](https://www.artech.com/en/cmris/browser?id=workspace://SpacesStore/8322aebc-b667-4b7d-914c-25f18086e16c&entity_id=4408)).

<sup>37</sup> REYES PEREZ. Op. cit.p.44.

4. Abrir la válvula de muestreo y purgar alrededor de 4 litros de aceite, el objetivo de esto es tomar una muestra representativa debido a que en esta área el aceite puede presentar sedimentación.
5. Conectar el conjunto Válvula – Manguera– Jeringa.
6. Realizar un lavado de la jeringa en el propio aceite, para esto se debe permitir el paso del aceite del transformador a la jeringa cuando se llegue a su capacidad máxima, cambiar la posición de la válvula al drenaje y cerrar el paso del aceite del transformador. Al tener la jeringa vacía repetir este paso 2 veces más como mínimo.
7. Se debe procurar obtener una muestra libre de burbujas para esto se debe colocar la jeringa en posición vertical y realizar pequeños movimientos oscilatorios para lograr la expulsión de burbujas a través del conducto de drenaje.
8. Realizar la toma de la muestra permitiendo el paso del aceite del transformador a la jeringa cuando se alcance su capacidad máxima, cerrar el paso de aceite desde el transformador, cerrar la válvula de muestreo y permitir que drene el aceite residual, retirar con cuidado el conjunto manguera – válvula- jeringa.
9. Evaluar la calidad de la muestra si presenta burbujas o sedimentos repetir la muestra
10. Purgar el frasco de muestra llenado con aceite para esto llenar el frasco hasta la mitad y sacudir varias, desechar el aceite.
11. Depositar el aceite de la jeringa en el frasco teniendo cuidado de que quede un espacio entre la cima del recipiente y el líquido para evitar que el frasco explote.
12. Rotular y enviar la muestra al laboratorio.<sup>38</sup>

#### **b) Análisis cromatográfico**

En esta parte a través de un cromatógrafo se inyectará un gas de referencia inerte a través de una columna y a alta temperatura se inyectará la mezcla, el objetivo es determinar el patrón de tiempos de retención, condiciones de operación y tamaño para los componentes de la muestra de aceite a evaluar (Mezcla de referencia).

El resultado obtenido es un cromatograma donde se suministran tres unidades de información para cada pico: posición, altura y anchura, con estos parámetros se realiza una determinación cuantitativa de cada componente, existen varios métodos para el cálculo cuantitativo de cada componente sin embargo los equipos actuales realizan este proceso de manera automática por lo cual no se hará énfasis en esta parte.<sup>39</sup>

#### **c) Análisis de resultados**

Como se mencionó anteriormente se deben tomar dos muestras, una antes del ensayo y otra después del ensayo repitiendo el procedimiento anteriormente descrito para cada muestra, una vez obtenidos los resultados del análisis cromatográfico donde se especifique el valor de los gases clave disueltos en la muestra se compara con la siguiente tabla.

---

<sup>38</sup> Ibid., p.46.

<sup>39</sup> Ibid., p.52.

Procedimiento de prueba para realizar el muestreo y la interpretación de resultados del análisis cromatográfico en aceite dieléctrico de transformadores

*Tabla 20 gases clave presentes antes y después del ensayo de calentamiento*

<b>Disolved gases</b>	<b>Typical values [ppm]</b>	<b>Before test [ppm]</b>	<b>After test [ppm]</b>
H <sub>2</sub>	15	3,2	3,3
CH <sub>4</sub>	5	0,4	0,4
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5	0,1	0,1
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2	0,2	0,2
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1	0,2	0,1
CO	80	19	27
CO <sub>2</sub>	200	56	46

INTERNATIONAL STANDARD. Mineral oil- filled electrical equipment – application of dissolved gas analysis (DGA) to factory test son electrical equipment. IEC 61818-1 /2007

#### **d) Diagnostico**

Una vez realizada la comparación con la tabla anterior si alguna de los valores de algún gas clave supera los valores establecidos en la tabla se debe precisar en el informe para tomar acciones correctivas.



# **CAPITULO SEIS**

*“La práctica no es lo que uno hace cuando es bueno. Es lo que uno hace para volverse bueno.”*

**MALCOLM GLADWELL**

En este capítulo se presenta describe de manera detallada la prueba piloto realizada en Industrias Explorer



## 6. PRUEBA PILOTO DEL ENSAYO DE CALENTAMIENTO

Los datos característicos del transformador bajo ensayo son:

Tabla 21 Parámetros del transformador bajo ensayo

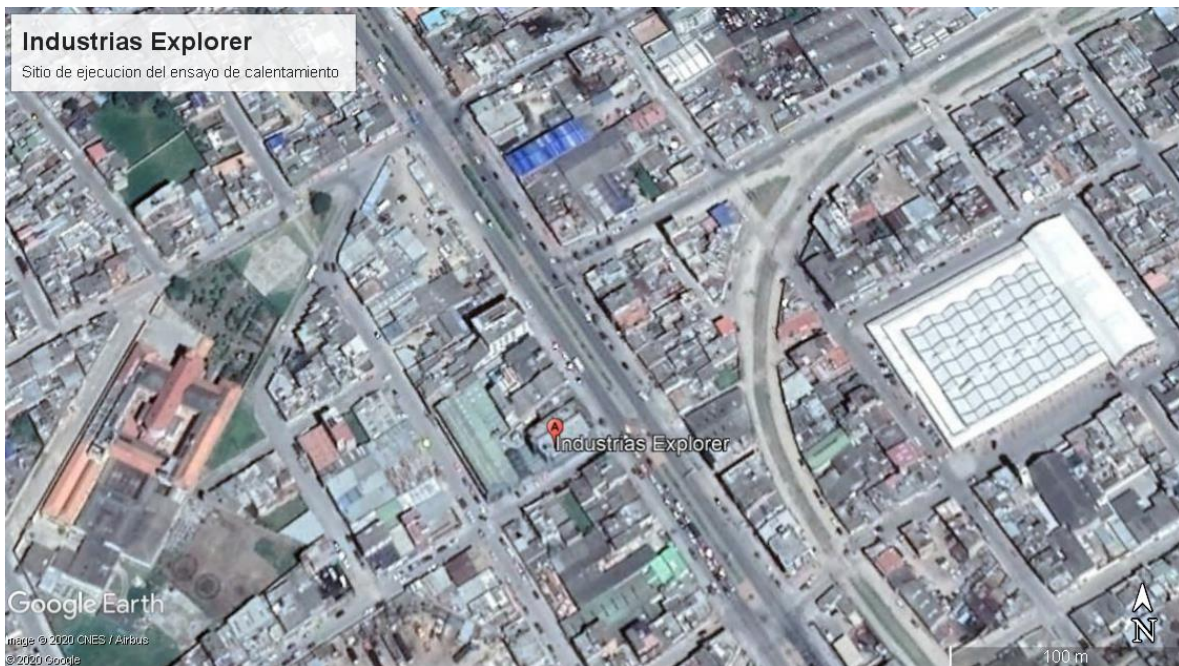
<b>Tipo</b>	Trifásico
<b>Potencia</b>	4,25 /3,95 MVA
<b>Tensión</b>	34,5 / 13,8 kV
<b>Conexión</b>	Y-Δ
<b>Lugar de Ejecución del ensayo</b>	Duitama - Boyacá
<b>Norma a Emplear</b>	IEEE C.57.12.90 - NTC 316
<b>Fecha de Ejecución del ensayo</b>	Septiembre 19 a 21 de 2019

Fuente. El Autor

### 6.1 Ubicación del transformador y zona de pruebas

El ensayo de calentamiento se realizó en Industrias Explorer, ubicado en la ciudad de Duitama.

Figura 23 Sitio de ejecución del ensayo



Fuente. El Autor

Figura 24 Transformador bajo ensayo



Fuente. El Autor

## 6.2 Ensayo de Calentamiento

Previo al ensayo de calentamiento se efectuaron los ensayos de rutina en los cuales el transformador cumplió los requisitos satisfactoriamente.

El objetivo del ensayo es validar si el transformador cumple con los requisitos del ensayo de calentamiento para su potencia nominal de acuerdo a su etapa de refrigeración.

### Normas relacionadas

ANSI IEEE C57.12.90

NTC 316.

### Procedimiento

El ensayo se efectuó de acuerdo al método de cortocircuito para las dos etapas de refrigeración ONAN y ONAF con una potencia nominal de 3.95 /4.25 MVA.

El ensayo se realizó cortocircuitando el devanado de baja tensión y dividiendo en tres etapas principales el ensayo, en la primera etapa se inyectó una corriente ligeramente superior a la nominal que incluía las pérdidas totales, mientras se mantenía esta condición se realizó un monitoreo de la temperatura del aceite y la temperatura ambiente en intervalos regulares de tiempo.

Una vez se estableció que la temperatura del aceite estabilizó, en la segunda etapa se redujo la corriente al valor nominal y se mantuvo esta condición por una hora manteniendo el monitoreo de la temperatura de la primera etapa. Se realizó el corte y se midió el valor de la resistencia de los devanados.

En la tercera etapa con los valores de temperatura del aceite, de la temperatura ambiente y resistencia de los devanados, se calculó la elevación del aceite, de los devanados y el

Hot spot de acuerdo a la norma establecida, se dio un criterio de aceptación del ensayo de acuerdo al estándar establecido.

**Criterio de aceptación.**

El valor de la elevación del aceite y los devanados debe estar por debajo de los 65° C. El Hot spot no debe superar los 80°C.

**Equipamiento**

- Generador trifásico
- Transformador auxiliar 440/4160 V
- Transformadores de potencial 6600/110
- Condensadores de 150 kVA
- Medidor de resistencia óhmica
- Multímetros Fluke 116
- Transformador bajo ensayo 3.95/ 4.25 MVA
- Termopares
- Conmutador selector giratorio Omega
- Termómetro Fluke 54- II

**Esquema de ensayo:**

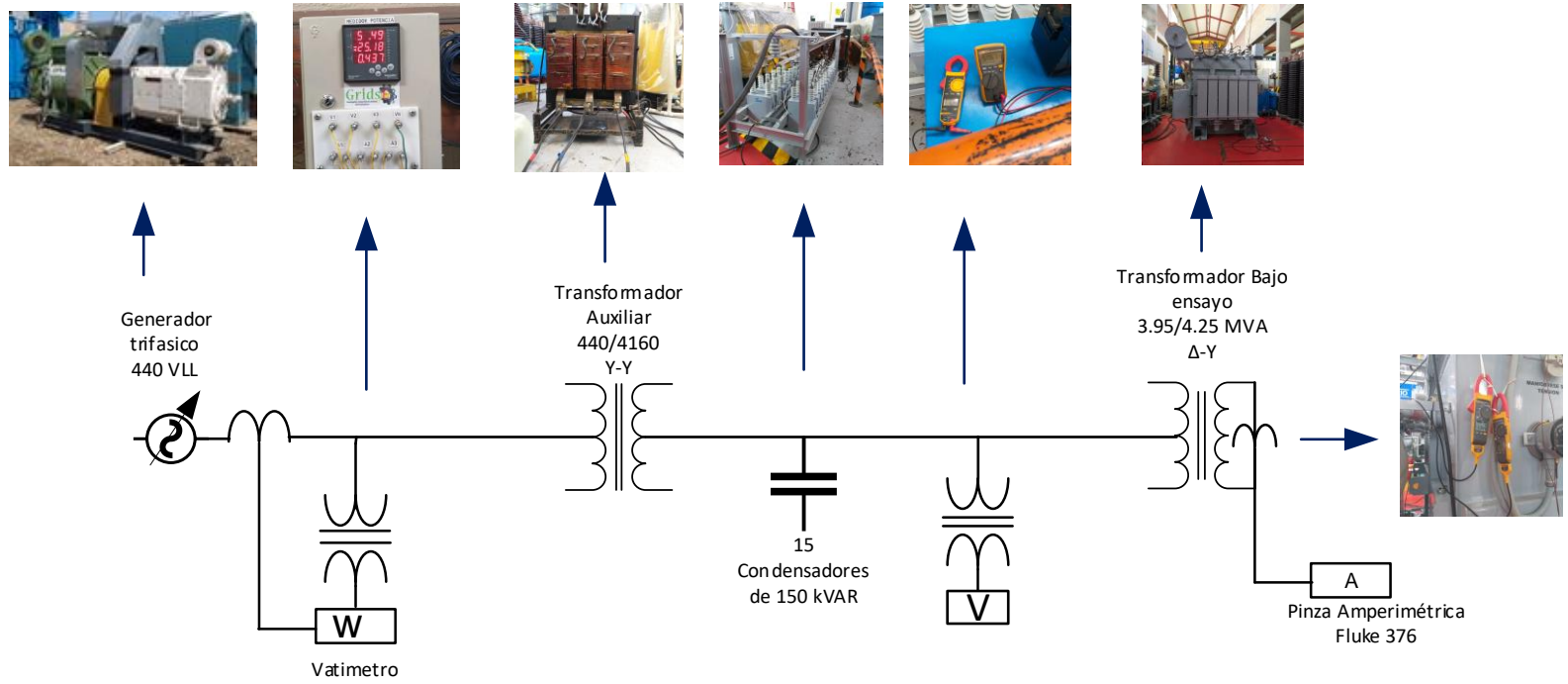
A través del generador y el transformador auxiliar se estableció el voltaje de prueba necesario. Con el banco de condensadores se compenso la potencia reactiva contribuyendo a un menor requerimiento de corriente al generador.

El cortocircuito se realizó para las dos etapas en el devanado de baja tensión. La medición de potencia activa se realizó a través del vatímetro trifásico instalado en el devanado de alta tensión de transformador auxiliar, se midió el voltaje de prueba a través de un transformador de potencial y un multímetro, la corriente se midió con dos pinzas amperimétricas en el devanado de baja tensión del transformador bajo ensayo por razones de seguridad.

En la figura 24 se presenta el esquema unifilar de ensayo, en la figura 25 el diagrama trifilar.

# Propuesta para la implementación del ensayo de calentamiento en transformadores de distribución

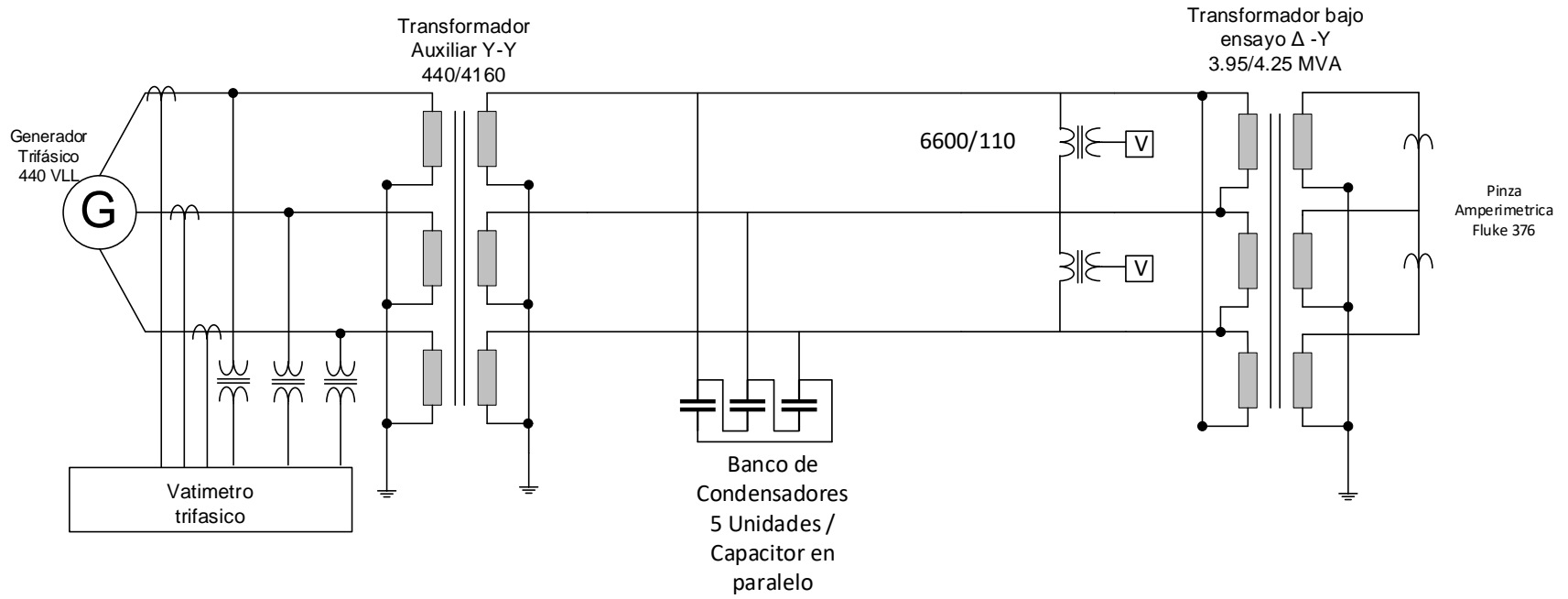
Figura 25 Esquema de ensayo. Diagrama unifilar



Fuente. El Autor

# Prueba piloto del ensayo de calentamiento

Figura 26 Esquema del ensayo diagrama trifilar



Fuente. El Autor

### 6.3 Prueba piloto del ensayo de calentamiento

De acuerdo al procedimiento de prueba planteado en el capítulo 3 se evaluará el desarrollo de la prueba piloto esto permitirá validar sus resultados.

#### 6.3.1 Consideraciones Generales

**Obtener los parámetros del transformador:** Los parámetros del transformador se encuentran en la tabla 26

**Medir las pérdidas y convertir a la temperatura de referencia:** Previo al ensayo de calentamiento se midieron las pérdidas con carga y vacío en la tabla 28 se especifican los valores medidos y convertidos a la temperatura de referencia (85 °C).

Tabla 22 Valores de pérdidas con carga y vacío del transformador bajo ensayo

Etapa	ONAN	ONAF
Perdidas con Carga Valor Medido [kW]	24,056	27,848
Perdidas con carga a Temperatura de referencia 85 °C [kW]	30,07	34,81
Perdidas en vacío [ kW]	5,2	5,2

Fuente. El Autor

#### Medición de la resistencia de los devanados

la resistencia de los devanados se midió de acuerdo a la NTC 375, la cual se denominará resistencia en frío.

Para llevar esto a cabo y de acuerdo a la NTC 375<sup>40</sup> empleando el método de la caída de tensión, en el cual conociendo la intensidad de la corriente que pasa por el devanado y en base a la ley de ohm se determina el valor de la resistencia.

Para realizar este procedimiento se empleó un equipo medidor de resistencia, mediante el cual se puede escoger cual es el valor de la corriente a emplear entre 0.1 y 1 A y el equipo automáticamente entrega el valor de la resistencia.

De igual manera registro la temperatura de líquido el cual se denominó  $T_o$ . en la tabla 29 se describen los datos encontrados.

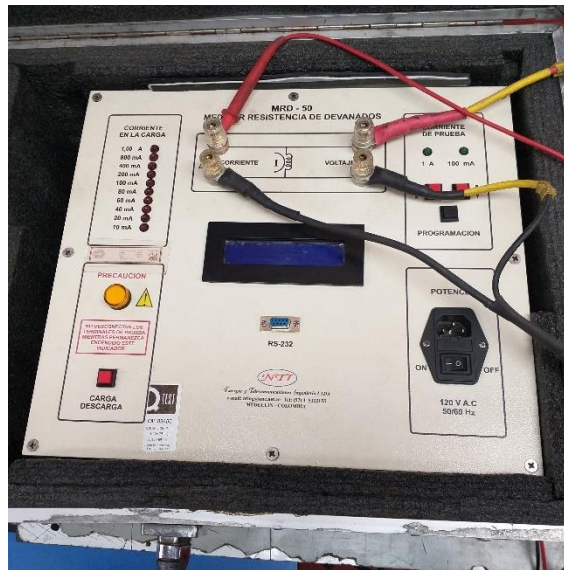
---

<sup>40</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 375. Op. Cit. p.1



## Prueba piloto del ensayo de calentamiento

Figura 27 Equipo de medición de resistencia óhmica



Fuente. El Autor

Los valores obtenidos de la resistencia del devanado de alta tensión [RAT] y de baja tensión son [RBT]:

Tabla 23 Valores de resistencia óhmica del transformador bajo ensayo

RAT [mΩ]	RBT [mΩ]	To [°C]
1723,72372	99,0990991	21 ,1

Fuente. El Autor

### 6.3.2 Consideraciones iniciales

#### Calcular el factor K

Para las dos etapas de refrigeración se calcula el factor k el cual permite establecer el valor de la corriente y voltaje de prueba.

#### a) Calcular el factor K

##### Etapas ONAN 3.95 MVA

$$k = \sqrt{\frac{P_L + P_o}{P_L}} \quad (6)$$

$P_L$ : Perdas con carga a corriente nominal y temp. de referencia (85 °C) en kW.  
 $P_o$ : Perdas en vacio a voltaje nominal y temp. de referencia (20°C) en kW.

$$k = \sqrt{\frac{30.07 \text{ kW} + 5.2 \text{ kW}}{30.07 \text{ kW}}} = 1.0830 \quad (5)$$

##### Etapas ONAF 4.25 MVA

$$k = \sqrt{\frac{34.81 \text{ kW} + 5.2 \text{ kW}}{30.07 \text{ kW}}} = 1.0721 \quad (5)$$

#### b) Calcular la corriente y el voltaje de prueba

##### Etapas ONAN 3.95 MVA

La corriente nominal para el devanado de Alta y baja tensión es igual a:

$$I_{r_{AT}} = \frac{S}{\sqrt{3} * V_{L-L}} = \frac{3950 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 34.5 \text{ kV}} = 66.10 \text{ A}$$

$$I_{r_{BT}} = 165.25 \text{ A}$$

Prueba piloto del ensayo de calentamiento

La corriente de prueba es igual a:

$$I_G = k * I_r \quad (7)$$

$I_G$ : Corriente de prueba para producir las pérdidas totales en A.

$I_r$ : Corriente nominal del transformador en A.

La corriente de prueba para el devanado de alta y baja tensión Etapa ONAN es igual a:

$$I_{G_{AT}} = 1.0830 * 66.10 A = 71.5863 A \quad (4)$$

$$I_{G_{BT}} = 1.0830 * 165.25 A = 178.96 A \quad (4)$$

El voltaje de prueba para el devanado de alta y baja tensión Etapa ONAN es igual a:

$$U_G = k * U_{sc} \quad (8)$$

$U_G$ : Fuente de suministro Necesaria en V.

$U_{sc}$ : Voltaje de cortocircuito en V.

$$U_{sc_{AT}} = 34500 V * \left(\frac{9.14 \%}{100\%}\right) = 3153.3 V$$

$$U_{sc_{BT}} = 13800 V * \left(\frac{9.14 \%}{100\%}\right) = 1261.32 V$$

$$U_{G_{AT}} = 1.0830 * 3153.3 V = 3415.02 V \quad (6)$$

$$U_{G_{BT}} = 1.0830 * 1261.32 V = 1366.00 V \quad (6)$$

### **Etapas ONAF**

Realizando los Cálculos para la Etapa ONAF se obtuvo:

a) la corriente nominal para el devanado de Alta y baja tensión:

$$I_{r_{AT}} = 71,12 A$$

$$I_{r_{BT}} = 177,80 A$$

b) Corriente de prueba para el devanado de alta y baja tensión:

$$I_{G_{AT}} = 76,25 \text{ A} \quad (4)$$

$$I_{G_{BT}} = 190,62 \text{ A} \quad (4)$$

c) Voltaje de prueba  $U_G$  para el devanado de alta y baja tensión:

$$U_{G_{AT}} = 3639,60 \text{ V} \quad (6)$$

$$U_{G_{BT}} = 1455,84 \quad (6)$$

### ¿Cortocircuito en alta o baja tensión?

De acuerdo a lo anterior se procede a determinar de acuerdo a los equipos disponibles, en donde se va a realizar el cortocircuito si en el devanado de alta tensión o en el devanado de baja tensión, se cuenta con un generador trifásico de 440 V, por lo cual para las condiciones iniciales planteadas se debe emplear un transformador auxiliar que permita elevar el voltaje del generador, al voltaje de prueba.

Para este caso se cuenta con un transformador el cual permite cambiar la conexión del secundario entre Ye y Delta obteniéndose los siguientes voltajes 440/4160 V Para la conexión Y-Y y 440/2400 V para la conexión Y-D

El transformador auxiliar cuenta con las siguientes características:

Tabla 24 Parámetros del transformador auxiliar

<b>Transformador Auxiliar</b>		
<b>Conexión</b>	<b>Y-Y</b>	<b>Y-D</b>
<b>Voltaje V.</b>	440/4160	440/2400
<b>Potencia kVA</b>	600	
<b>Ir AT A</b>	787,29	787,29
<b>Ir BT A</b>	83,27	144,33
<b>a</b>	9,45	5,45

Fuente. El Autor

Para las dos etapas se plantea realizar el cortocircuito en el devanado de baja tensión en el anexo P se evalúa cada posibilidad de manera detallada y se explica por qué es más conveniente realizar el ensayo en las dos etapas efectuando el cortocircuito en el devanado de baja tensión.

### **Banco de Condensadores**

Para compensar la potencia reactiva normalmente en el ensayo se utilizan bancos de condensadores, para realizar el ensayo se dispone de tres tipos de condensadores los cuales se detallan sus características en la tabla 31.

*Tabla 25 Condensadores disponibles*

<b>CONDENSADORES DISPONIBLES</b>	
<b>Qc [ Kvar]</b>	<b>Voltaje Nominal [kV]</b>
400	7,2
333	9,96
150	8,32

**Fuente.** El Autor

Se debe seleccionar el tipo de condensador a utilizar, las unidades necesarias y el tipo de conexión, para realizar el ensayo en las dos etapas se emplean 15 unidades de 150 kVAR conectadas en delta, en el anexo Q se especifica de manera detallada el dimensionamiento del banco de condensadores.

### **Montaje de la prueba**

Para realizar el ensayo se realiza el montaje de acuerdo al esquema de la figura 24 y 25, el ensayo se realizó primero en la etapa ONAN y luego en la etapa ONAF.

### 6.3.3 Etapa 1

#### Instalación de sensores de temperatura en el transformador

De acuerdo a la NTC 316 <sup>41</sup> Las termocuplas o termómetros se deben instalar aislados Del medio circundante y fijados con una cinta o laminilla de cobre , para el ensayo se emplearon 10 termopares.

*Figura 28 Instalación de los Termopares para el ensayo*



**Fuente.** El Autor

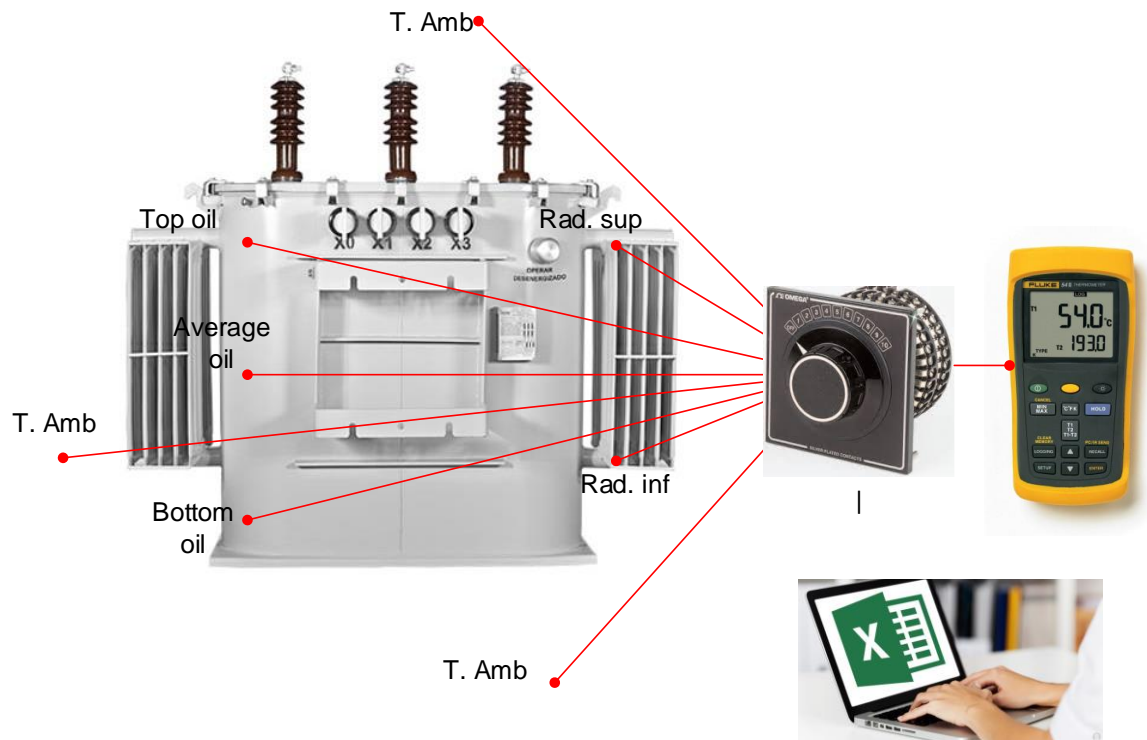
De acuerdo a la NTC 316, ANSI IEEE C.57.12.90 y 60076-2 Las temperaturas del liquido se deben medir con tres sensores de temperatura el primero bajo la tapa del transformador 50 mm bajo la superficie del liquido y los otros dos en la parte superior e inferior de los radiadores.

---

<sup>41</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 316. Op. Cit. p.6

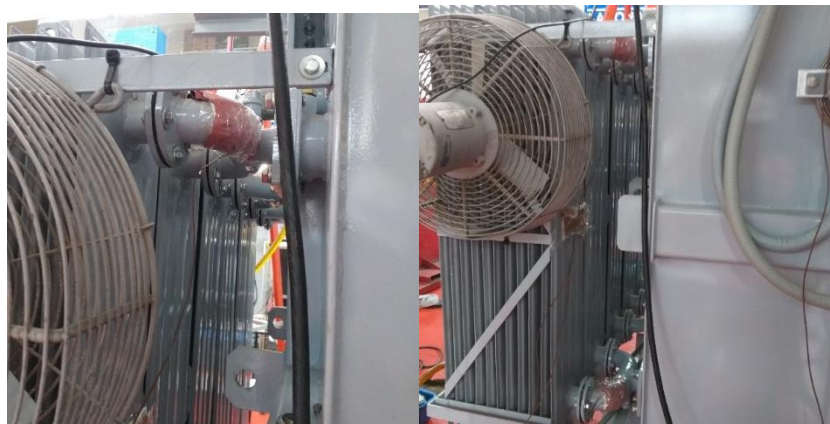
## Prueba piloto del ensayo de calentamiento

Figura 29 Instalación de los sensores de temperatura en el transformador



Fuente. El Autor

Figura 30 Ubicación de los termopares para medir la temperatura del líquido



Fuente. El Autor

### Instalacion de los sensores de temperatura ambiente

De acuerdo a la NTC 316, ANSI IEEE C.57.12.90 y 60076-2 , La temperatura ambiente se debe medir mínimo con 3 sensores de temperatura ubicados alrededor del transformador localizados a una altura media del transformador y a una distancia de 1 o 2 m alrededor del transformador. Para realizar la medición los termopares se deben insertar en un recipiente lleno de aceite de oliva y ubicarlo a 2m de altura.

Para tomar los datos de temperatura se utilizó un conmutador selector giratorio de 12 canales y un termómetro el registro de datos se realizó de forma manual registrando el valor en una hoja de cálculo.

*Figura 31 Medición y registro de datos para la etapa 1*



Fuente. El Autor

Se planteo tomar lecturas de temperatura cada 15 min, se tomaron lecturas en el mismo intervalo de la corriente y la potencia de cortocircuito. El registro de datos se realiza de forma manual a través de una hoja de cálculo en el anexo R se encuentran los datos de temperatura registrados durante el ensayo para las dos etapas de refrigeración.

Antes de empezar la primera etapa del ensayo se realizan pruebas para verificar que los equipos están funcionando de manera adecuada y con una cámara termográfica se verifica que no existan puntos calientes en las conexiones, a su vez se verifica que el generador tenga un comportamiento normal y se procede a registrar la primera lectura.

Se instalaron termopares adicionales en diferentes ubicaciones a las especificadas por el estándar para verificar valores durante el ensayo.

Luego de más de 13h de ensayo se estima que la temperatura del aceite estabilizo evaluando los resultados se observa un incremento menor a 1° C por hora durante un periodo de 3 horas consecutivas.



### Error termopar – cámara termográfica

Adicionalmente a las lecturas de temperatura efectuadas con los termopares, se realizaron dos lecturas con la cámara Termografica en la etapa ONAN. El objetivo es establecer el error entre las dos lecturas. La primera lectura se tomó al finalizar la etapa de estabilización (Etapa 1) y la segunda antes de realizar el corte.

Si un mismo valor es medido a través de dos procedimientos diferentes, se emplea el error relativo, cuando la medida del error absoluto no es suficiente para esto se emplea.<sup>42</sup>

$$\varepsilon_r = \frac{\text{Valor medido} - \text{Valor verdadero}}{\text{Valor verdadero}} \quad (44)$$

los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Etapa 1 (ultima lectura antes de reducir la corriente al valor nominal):

Tabla 26 Error entre las lecturas realizadas con la cámara Termografica y los termopares

Temp. [°C]	Top Oil			Temperatura Ambiente			Radiador	
	1	2	3	1	2	3	Superior	Inferior
<b>Cámara T.</b>	88,5	87,5	85,8	24,7	24,3	24,3	85,5	68,8
<b>Termopar</b>	81,4	76	79,1	24,7	24,3	24,3	84,2	65,5
<b>Error</b>	9%	15%	8%	0%	0%	0%	2%	5%

Fuente. El Autor

Etapa 2 (Ultima lectura antes de realizar el corte)

Temp. [°C]	Top Oil			Temperatura Ambiente			Radiador	
	1	2	3	1	2	3	Superior	Inferior
<b>Cámara T.</b>	89,6	86,7	83,9	24,9	24,3	24,4	84,9	67,4
<b>Termopar</b>	81,3	75,1	78,1	24,9	24,3	24,4	83,6	65
<b>Error</b>	10%	15%	7%	0%	0%	0%	2%	4%

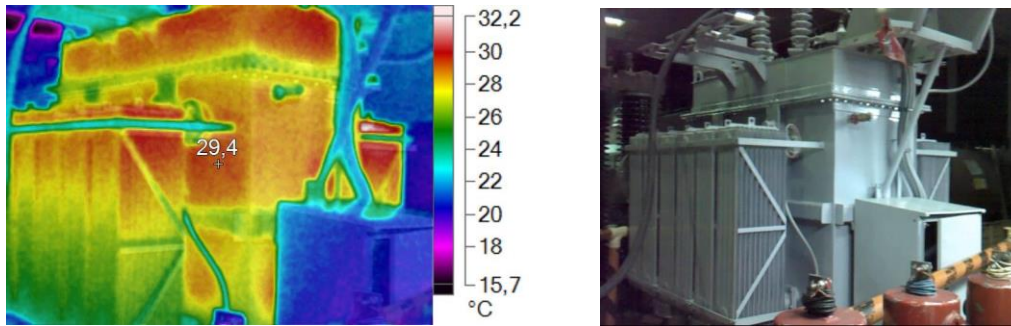
Fuente. El Autor

Como se puede observar en la tabla 34 el valor observado por la cámara termográfica y el termopar esta alrededor del 10% esto puede ocurrir debido a errores en la instalación, fallas en el termopar o mal aislamiento del papel térmico.

Adicionalmente realizando la verificación de puntos calientes en las conexiones, se encontró una falla en el transformador. Se localizo un punto caliente en el tanque, exactamente en el costado izquierdo. En la figura 31 se observa el comportamiento térmico típico de un transformador por otra parte en la figura 32 se observa el comportamiento atípico encontrado en el transformador.

<sup>42</sup> SABATO, Juan. Mediciones Eléctricas. Buenos Aires, ALSINA, 1978. 9p

Figura 32 Comportamiento térmico típico de un transformador

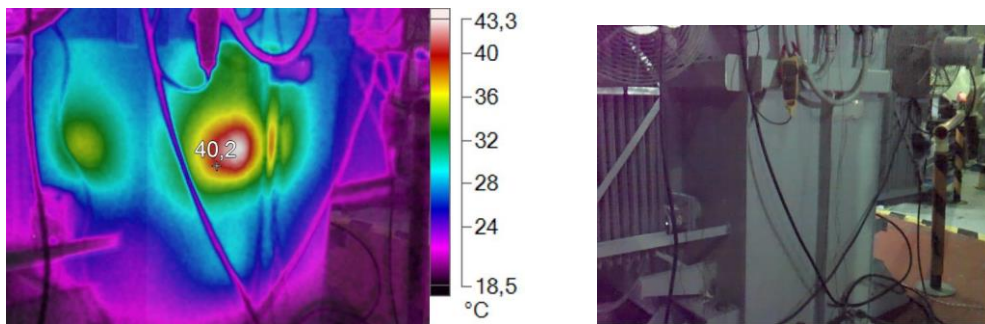


Fuente. El Autor

**Imagen Termografica**

**Fotografía**

Figura 33 Comportamiento Térmico atípico encontrado durante el ensayo



Posterior al ensayo se encontró que el distanciamiento entre la parte activa del transformador y el tanque era muy reducida, razón por la cual se producían flujos de dispersión en el tanque y concentraciones en las paredes de la cuba, produciendo efectos térmicos atípicos y a su vez una elevación en la temperatura del líquido del transformador, afectando de manera directa su vida útil.

En este caso se encuentra un valor adicional en la realización del ensayo de calentamiento en la detección de fallas de tipo térmico en transformadores.

### 6.3.4 Etapa 2:

Inmediatamente se estabiliza la temperatura del líquido se reduce la corriente al valor nominal y se mantiene constante durante una hora.

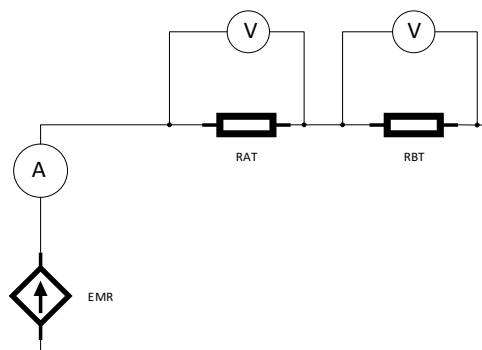
#### **Medición de la resistencia de los devanados en caliente:**

El equipo de medición de resistencia, se prepara con anterioridad, al no realizar la primera lectura de la resistencia en caliente dentro de los cuatro minutos posteriores al corte, se debe esperar otra hora a corriente nominal para volver a realizar el procedimiento.

Para realizar la medida de la resistencia óhmica en caliente, existen varias opciones la primera. es utilizar dos equipos de medición de resistencia óhmica de devanados uno en cada devanado, sin embargo, esta opción se descarta debido a resultados erróneos presentados anteriormente con esta práctica, otra opción es utilizar un solo equipo de medición de resistencia y conectar en un devanado y en otro tomando las lecturas consecutivamente sin embargo también se descarta debido a que el equipo necesita un tiempo para estabilizar de 30 segundos por lo cual las lecturas no son adecuadas y el equipo podría presentar daños.

Finalmente se plantea lo siguiente utilizar un solo equipo de medición de resistencia, el cual inyectara un valor de corriente constante a los devanados, conectar los devanados en serie, luego insertar dos voltímetros uno en cada devanado y un amperímetro para verificar la magnitud exacta de la corriente aplicada por el equipo, Con estos datos posteriormente se calculará la resistencia de cada devanado por medio de la ley de ohm, lo cual concuerda con la NTC 375 ya que se está aplicando el Método de la caída de tensión para efectuar la medida. Sin embargo, se debe tener en cuenta para realizar este procedimiento utilizar equipos de medida (Voltímetros y amperímetros) de gran exactitud y resolución.

*Figura 34 Diagrama utilizado para medir la resistencia en caliente*



**Fuente.** El Autor

*Figura 35 Equipos utilizados para medir la resistencia en caliente*

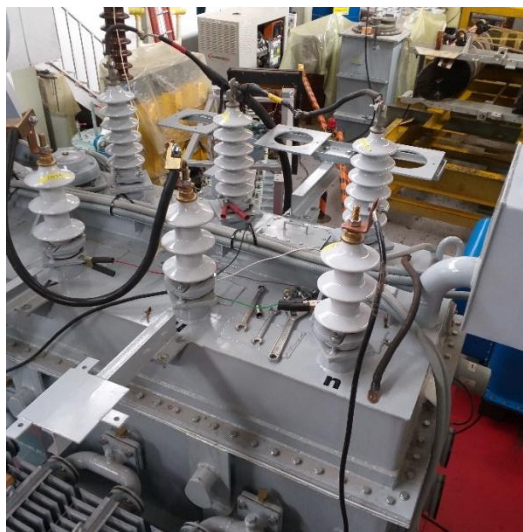


**Fuente.** El Autor

Previo a efectuar el corte se verifico que los equipos estuvieran bien ubicados, se dejó las herramientas de un fácil alcance y se asignaron tareas a los encargados de realizar la maniobra.

Antes de empezar la *Etapa 1* se verifico como realizar la conexión del equipo de resistencia óhmica conectando los devanados en serie, se insertaron caimanes en los cables para una rápida conexión, se dejaron de fácil alcance y se hicieron las pruebas necesarias.

*Figura 36 Preparativos previos al ensayo para medir la resistencia en caliente*



**Fuente.** El Autor

## Prueba piloto del ensayo de calentamiento

Una vez se realiza el corte( $t=0$ ) en primer lugar se inicia el cronometro luego se procede a retirar el cortocircuito, después se conecta el equipo de resistencia óhmica y se da el tiempo necesario para que el equipo estabilice (30 segundos) y se toma la primera lectura.

Se debe tener en cuenta que la primera lectura debe tomarse dentro de los primeros 4 minutos posterior al corte. Es por esta razón que se deben tomar las medidas necesarias para minimizar al máximo el tiempo en que se realice la primera lectura.

Figura 37 Registro de datos. Etapa 2



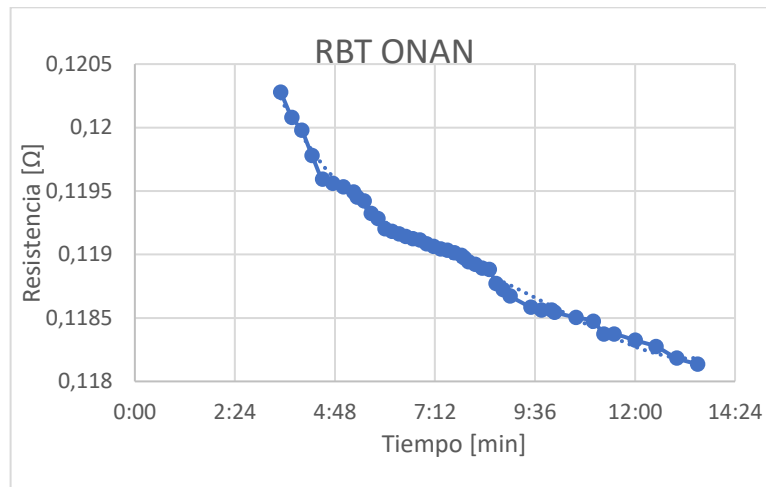
Fuente. El Autor

La primera lectura se realiza a los 3 minutos 30 segundos después del corte, para que el registro de datos sea ágil se realiza a través de fotografías. Se toman lecturas por 20 minutos después del corte( $t=0$ ).

De acuerdo a la NTC 316 la resistencia en caliente se debe determinar graficando los datos de Resistencia /Tiempo en un papel coordinado y la curva resultante debe extrapolarse para obtener el valor de resistencia en el instante de corte.

Una vez terminado el ensayo se tabulan los datos obtenidos por medio de fotografías y se obtiene la curva a través de una hoja de cálculo, y extrapolando se obtiene el valor para el instante de corte ( $t=0$ ).

Figura 38 Grafica de resistencia / Tiempo Etapa ONAN. Devanado de baja tensión



Fuente. El Autor

Inmediatamente se procede a efectuar la Etapa ONAF repitiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente cambiando los parámetros del ensayo y aprovechando la ubicación de los equipos instalados para la Etapa ONAN.

Para esta etapa se cuenta con 4 ventiladores para la refrigeración del transformador, los cuales se encendieron para la realización del ensayo y se apagaron en el momento del corte para efectuar la medida de la resistencia en caliente de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 316.

### 6.3.5 Análisis de Datos

#### 6.3.5.1 Etapa ONAN

#### Normas establecidas:

Para efectuar el análisis de Datos se debe definir el estándar específico que se va a aplicar. Para este ensayo se aplica ANSI IEEE C.57.12.90 debido a que comparte las mismas características con la Norma Técnica Colombiana NTC 316.

#### Limites:

Para este estándar los límites son:

**Elevación del devanado:** 65 °C

**Elevación del líquido:** 65 °C

**Hot spot:** 80 °C

**Altitud:**

El ensayo se realiza a una altura de 2550 msnm y la Altitud de operación o instalación es igual a 1000 msnm.

**Elevación del liquido**

**a) Obtener los valores de estabilización a pérdidas totales**

De la Etapa 1, se obtienen los valores, el valor de la temperatura ambiente es igual al promedio de los 3 sensores instalados

Tabla 27 Valores de estabilización a pérdidas totales. Etapa ONAN

Temp. Ambiente [°C]	Top Oil [°C]	Liquido Superior. [°C]	Liquido Inferior. [°C]
23,48	80,62	83,3	64,6

Fuente. El autor

**b) Determinar la elevación de la Temperatura de liquido**

De acuerdo a la ecuación 2 es igual:

$$to = T_o - Ta \tag{2}$$

*to*: Elevación de temperatura del liquido en [°C]

*T<sub>o</sub>*: Temp. superior del liquido (Top oil ) en [°C]

*T<sub>a</sub>* : Temperatura ambiente

$$to = 80,62 - 23,48 = 57,14 \text{ °C}$$

**c) Determinar la temperatura promedio del líquido a corriente nominal:**

Se deben obtener los valores de estabilización a corriente nominal de la etapa 2

Tabla 28 Valores de estabilización a corriente nominal. Etapa ONAN

Temp. Ambiente [°C]	Top Oil [°C]	Liquido Sup. [°C]	Liquido Inf [°C]
24,53	81,3	83,6	65

Fuente. El autor

De acuerdo a la ecuación 12 la temperatura promedio del líquido a corriente nominal es igual a:

$$T_{om} = T_o - \frac{T_{os} - T_{oi}}{2} \quad (12)$$

$T_{om}$  : Temp. promedio del líquido en [°C]

$T_o$  : Temp. superior del líquido en [°C]

$T_{os}$  : Temp. líquido en la parte superior en [°C]

$T_{oi}$  : Temp. líquido en la parte inferior en [°C]

$$T_{om} = 81,3 - \frac{83,6 - 65}{2} = 72 \text{ °C} \quad (12)$$

#### d) Si aplica evalúe la Corrección por altitud

Al aplicar el estándar IEEE C.57.12.90 es necesario aplicar una corrección por altitud al líquido para esto de acuerdo a la ecuación 17:

$$\Delta\theta A = \Delta\theta_o * \left(\frac{A}{A_o} - 1\right) * F \quad (17)$$

$\Delta\theta A$ : Incremento de la elevación de temperatura del líquido una altitud de A metros

$\Delta\theta_o$  : Elevación de temperatura observada en el líquido

A : Altitud, en metros

$A_o$ : Igual a 1000 metros

F : 0,04 para modo de autoenfriamiento

F: 0.06 para refrigeración por aire forzado

$$\Delta\theta A = 57,14 * \left(\frac{2550}{1000} - 1\right) * 0,04 = 3.54268 \quad (17)$$

#### e) Obtener la elevación del líquido

De acuerdo a la Norma ANSI IEEE C.57.12.90, Si un transformador se ensaya a una altitud menor o igual a 1000m y va a operarse a una altitud por encima de los 1000m, se deben asumir que las elevaciones de temperatura **del líquido** incrementen, de acuerdo a esto se aplica una corrección inversa por lo tanto la elevación del líquido es igual a:

$$t_{oc} = 57.14 - 3.54268 = 53.59$$



Para la **Etapa ONAN** la elevación del líquido es igual a **53 .59 °C**

**Elevación del devanado:**

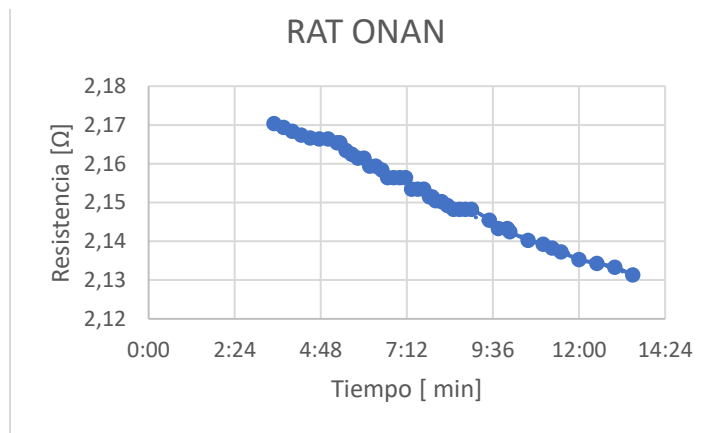
**a) Obtener los valores de la resistencia en frío y Caliente**

Los valores de la resistencia en frío se han obtenido previamente, para obtener los valores de la resistencia en caliente se debe realizar una gráfica de Resistencia / tiempo y extrapolarla hasta el momento de corte ( $t=0$ ), para realizar esto se tabulan los datos en una hoja de cálculo y se obtienen los siguientes resultados.

Para mayor información en el anexo S se incluye la hoja de cálculo con los datos y las curvas extrapoladas donde se obtuvo la resistencia en caliente para el devanado de alta y baja tensión para la etapa ONAN y ONAF.

**Para el devanado de alta Tensión:**

*Figura 39 Grafica de resistencia / Tiempo Etapa ONAN. Devanado de alta tensión*

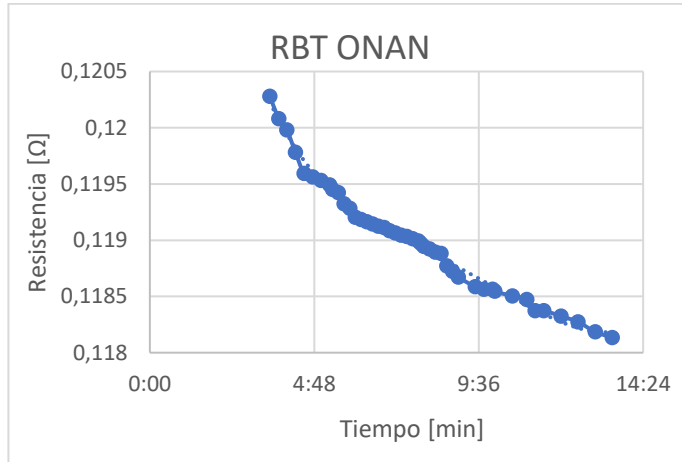


**Fuente.** El autor

*Extrapolando la curva se obtiene el valor de 2155 m $\Omega$  para el devanado de Alta Tensión*

**Para el devanado de baja Tensión:**

Figura 40 Grafica de resistencia / Tiempo Etapa ONAN. Devanado de baja tensión



Fuente. El autor

Extrapolando la curva se obtiene el valor de 125,1 mΩ para el devanado de Baja Tensión

**b) Determinar la temperatura promedio de los devanados**

De acuerdo a la Ecuación 14:

$$\theta_w = \frac{Rh}{Rc} (\theta_k + \theta_{rc}) - \theta_k \tag{14}$$

- $\theta_w$  : Temp. promedio de los devanados
- $Rh$  : Resistencia en caliente [Ω]
- $Rc$  : Resistencia en frio [Ω]
- $\theta_{rc}$  : Temp. en la cual fue medida Ro
- $\theta_k$  : 234,5 °C para cobre 225 para aluminio

**Para el devanado de alta tensión:**

$$\theta_w = \frac{2155}{1723,72} (234,5 + 21,1) - 234,5 = 85,05 \tag{14}$$

**Para el devanado de baja tensión:**

$$\theta_w = 88,19 \tag{14}$$

**c) Determinar la elevación promedio de los devanados**

La elevación promedio de los devanados se puede calcular a través de dos métodos, el método de la elevación superior del líquido o la elevación promedio del líquido, sin embargo, Cuando se emplee una corriente del devanado distinta a la nominal, se debe usar el método de la elevación promedio del líquido para determinar la elevación promedio en los devanados.

En este caso se realizó el ensayo con la corriente nominal, por lo tanto, la elevación promedio del devanado se calculará a través de la elevación superior del líquido de acuerdo a la ecuación 16:

$$t = t_{oe} + (T - T_{oc}) \quad (16)$$

*t*: elevación de temp. promedio en los devanados [°C]

*t<sub>oe</sub>*: Elevación temp. superior líquido a pérdidas totales (Estabilización)

*T*: Temp. promedio de los devanados

*T<sub>oc</sub>* = Temp. superior del líquido al corte [°C]

$$t = 57,14 + (85,05 - 81,3) = 60,89 \quad (16)$$

**Para el devanado de baja tensión:**

$$t = 64,03 \quad (16)$$

**d) Si aplica evalué la corrección por altitud**

Para el estándar ANSI IEEE C.57.12.90 y NTC 316 **NO** se aplica corrección de altitud para el devanado

**e) Obtener la elevación del devanado**

*La elevación del devanado para la etapa ONAN, para el devanado de alta tensión es igual **60,89** y para el devanado de baja tensión es igual a **64,03***

**Hot spot**

**5.3.5.2 Obtener el valor de temperatura promedio en los devanados**

$$\theta_{wAT} = 85,05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{wBT} = 88,19 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**6.3.5.2 Obtener el valor de la temperatura del líquido a corriente nominal**

$$T_{om} = 72 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 7.3.5.2 Determinar el gradiente:

De acuerdo a la ecuación 3:

$$g = T - T_{omc} \quad (3)$$

$T$  : Temperatura promedio de los devanados

$T_{omc}$  : Temperatura promedio del líquido a corriente nominal

Para el devanado de alta tensión:

$$g_{AT} = 85,05 - 72 = 13,05 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

Para el devanado de baja tensión:

$$g_{BT} = 88,19 - 72 = 16,19 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

### 8.3.5.2 Obtener el valor de la elevación del líquido:

Para la Etapa **ONAN** la elevación del líquido es igual a **53 .59 °C**

### 9.3.5.2 Determinar Hot spot

De acuerdo a la ecuación 1 el Hot spot es igual a:

$$T_{Hotspot} = t_o + g * H \quad (1)$$

$T_{Hotspot}$  : Temperatura de Hotspot (Elevacion)

$t_o$ : Elevacion de la temperatura superior del liquido (Top oil)

$H = 1.1$  para Transformadores de distribucion

$H = 1.3$  Para Transformadores de potencia

**Para el devanado de alta tensión:**

$$T_{Hotspot} = 53,59 + 13,05 * 1,3 = 70,56 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

**Para el devanado de baja tensión:**

$$T_{Hotspot} = 53,59 + 16,19 * 1,3 = 74,64 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

### 6.3.5.2 Etapa ONAF

#### Elevación del líquido:

##### a) Obtener los valores de estabilización a pérdidas totales

De la Etapa 1, se obtienen los valores, el valor de la temperatura ambiente es igual al promedio de los 3 sensores instalados.

Tabla 29 Valores de estabilización a pérdidas totales. Etapa ONAF

Temp. Ambiente [°C]	Top Oil [°C]	Líquido Sup. [°C]	Líquido Inf. [°C]
20,7	71,8	73,4	49,9

Fuente. El autor

##### b) Determinar la elevación de la temperatura de líquido

de acuerdo a la ecuación 2 es igual:

$$t_o = 71,8 - 20,7 = 51,1 \text{ °C} \quad (2)$$

##### c) Determinar la temperatura promedio del líquido a corriente nominal:

Se deben obtener los valores de estabilización a corriente nominal de la etapa 2

Tabla 30 Valores de estabilización a corriente nominal

Temp. Ambiente [°C]	Top Oil [°C]	Líquido Sup. [°C]	Líquido Inf [°C]
20	67,7	68,4	45,9

Fuente. El autor

De acuerdo a la ecuación 24 la temperatura promedio del líquido a corriente nominal es igual a:

$$T_{om} = 67,7 - \frac{68,4 - 45,9}{2} = 56,45 \text{ °C} \quad (12)$$

**d) Si aplica evalué la corrección por altitud**

Al aplicar el estándar IEEE C.57.12.90 es necesario aplicar una corrección por altitud al líquido para esto de acuerdo a la ecuación 17:

$$\Delta\theta_A = 51,1 * \left( \frac{2550}{1000} - 1 \right) * 0,06 = 4,7523 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (17)$$

**e) Obtener la elevación del liquido**

$$t_{o_c} = 51,1 - 4,7512 = 46,34 \text{ } ^\circ\text{C}$$

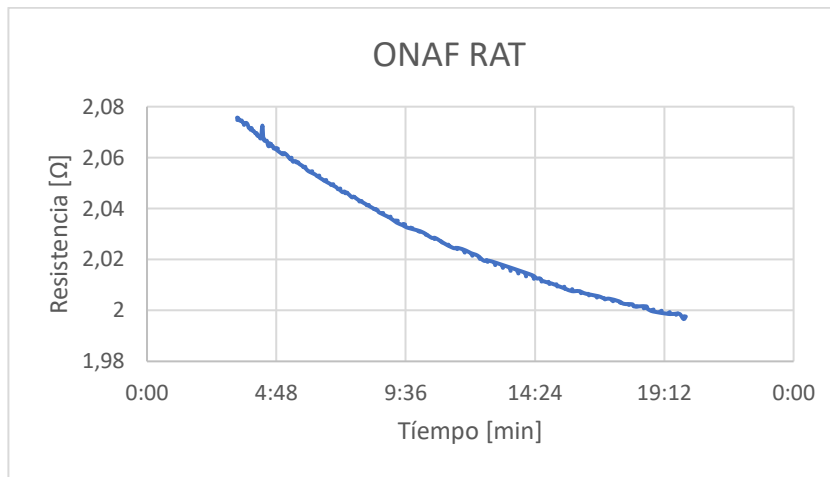
Para la Etapa ONAF la elevación del líquido es igual a **46,34 °C**

**Elevación del devanado:**

**a) Obtener los valores de la resistencia en frio y Caliente**

**Para el devanado de alta Tensión**

Figura 41 Grafica de resistencia / Tiempo Etapa ONAF. Devanado de Alta tensión

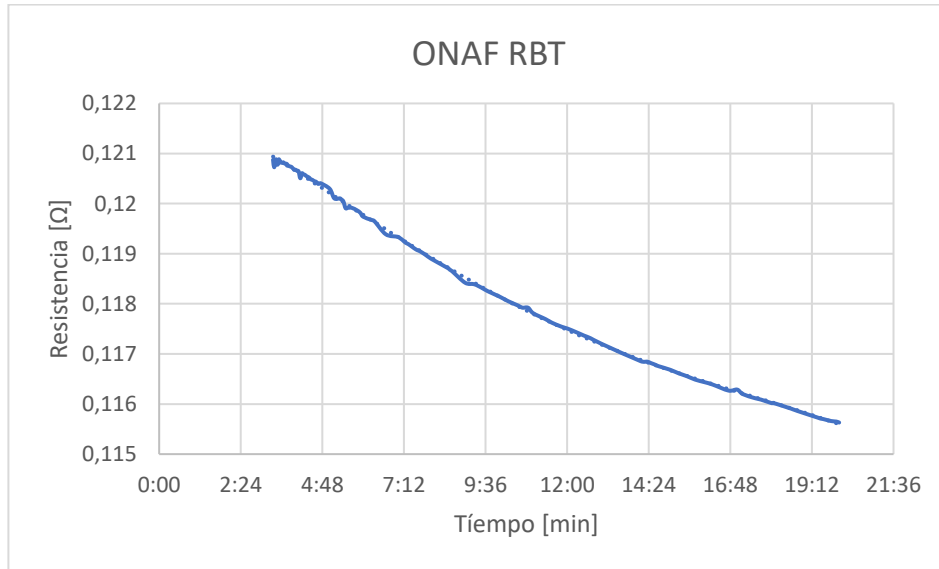


Fuente. El autor

Extrapolando la curva se obtiene el valor de 2111,2 mΩ para el devanado de Alta Tensión

**Para el devanado de baja Tensión:**

Figura 42 Grafica de resistencia / Tiempo Etapa ONAF. Devanado de Baja tensión



Fuente. El autor

Extrapolando la curva se obtiene el valor de 122 mΩ para el devanado de Baja Tensión

**b) Determinar la temperatura promedio de los devanados**

De acuerdo a la Ecuación 14:

**Para el devanado de alta tensión:**

$$\theta_w = \frac{2111}{1723,72}(234,5 + 21,1) - 234,5 = 78,65 \quad (14)$$

**Para el devanado de baja tensión:**

$$\theta_w = 80,19 \quad (14)$$

c) **Determinar la elevación promedio de los devanados**

la elevación promedio de los devanados se calculará a través de la elevación superior del líquido de acuerdo a la ecuación 27:

Para el devanado de Alta tensión:

$$t = 51,1 + (78,65 - 67,7) = 62,05 \quad (16)$$

Para el devanado de baja tensión:

$$t = 63,59 \quad (16)$$

d) **Si aplica evalué la corrección por altitud**

Para el estándar ANSI IEEE C.57.12.90 y NTC 316 **NO** se aplica corrección de altitud para el devanado

e) **Obtener la elevación del devanado**

*La elevación del devanado para la etapa ONAF, para el devanado de alta tensión es igual **62,05** y para el devanado de baja tensión es igual a **63,59***

**Hot spot**

a) **Obtener el valor de temperatura promedio en los devanados**

$$\theta_{w_{AT}} = 78,65^{\circ}C$$

$$\theta_{w_{AT}} = 80,19^{\circ}C$$

b) **Obtener el valor de la temperatura del líquido a corriente nominal**

$$T_{om} = 56,45^{\circ}C$$

c) **Determinar el gradiente:**

De acuerdo a la ecuación 3:

Para el devanado de alta tensión:

$$g_{AT} = 78,65 - 56,45 = 22,2^{\circ}C \quad (3)$$



Prueba piloto del ensayo de calentamiento

Para el devanado de baja tensión:

$$g_{BT} = 80,19 - 56,45 = 23,74 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

d) **Obtener el valor de la elevación del líquido:**

*Para la Etapa ONAF la elevación del líquido es igual a **46,34 °C***

e) **Determinar Hot spot**

De acuerdo a la ecuación 1:

Para el devanado de alta tensión:

$$T_{Hotspot} = 46,34 + 22,20 * 1,3 = 75,23 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

Para el devanado de baja tensión:

$$T_{Hotspot} = 46,34 + 23,74 * 1,3 = 77,23 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

#### **6.4 Muestreo e interpretación de resultados del análisis cromatográfico en aceite dieléctrico de transformadores**

De acuerdo al procedimiento de prueba, el muestreo y la interpretación de los resultados a partir del análisis cromatográfico se divide en las siguientes etapas:

- a) Procedimiento para la obtención de la muestra
- b) Análisis cromatográfico
- c) Análisis de resultados
- d) Diagnostico

##### **a) Procedimiento para la obtención de la muestra**

La obtención de la muestra representativa del aceite se realizó utilizando los elementos y el procedimiento descrito para el desarrollo de esta etapa descrito en el capítulo 5.

Se realizaron tres muestras, una antes de empezar el ensayo en estado estable, y una muestra representativa para cada etapa ONAN y ONAF obtenida al finalizar cada ensayo.

*Figura 43 Obtención de la muestra*



**Fuente.** El autor

##### **b) Análisis cromatográfico**

Una vez obtenida la muestra, se rotula y envía al laboratorio para realizar el análisis cromatográfico, se obtienen los siguientes datos.

### Muestra previa al ensayo

Tabla 31 Resultados del análisis cromatográfico muestra previa al ensayo

<b>Gases disueltos en el aceite</b>	<b>Concentración (µL/L (p.p.m))</b>
Acetileno (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	<0,2
Etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	0,8
Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	1
Metano (CH <sub>4</sub> )	<1
Monóxido de carbono (CO)	21,3
Hidrogeno (H <sub>2</sub> )	12,5
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	112,2

Fuente. El autor.

### Muestra posterior al ensayo

#### Etapas ONAN

Tabla 32 Resultados del análisis cromatográfico muestra Etapa ONAN

<b>Gases disueltos en el aceite</b>	<b>Concentración (µL/L (p.p.m))</b>
Acetileno (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	<0,3
Etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	1
Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	<1
Metano (CH <sub>4</sub> )	1
Monóxido de carbono (CO)	39,9
Hidrogeno (H <sub>2</sub> )	19,7
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	163,3

Fuente. El autor

## Etapa ONAF

Tabla 33 Resultados del análisis cromatográfico muestra Etapa ONAF

Gases disueltos en el aceite	Concentración ( $\mu\text{L/L}$ (p.p.m))
Acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ )	<0,3
Etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ )	2
Etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )	<1
Metano ( $\text{CH}_4$ )	3,9
Monóxido de carbono ( $\text{CO}$ )	189,6
Hidrogeno ( $\text{H}_2$ )	99,6
Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )	395.8

Fuente. El autor

### c) Análisis de resultados

Como se indicó en el capítulo 6, el análisis se puede enfocar al análisis de fallas incipientes o de condición el cual se incluye en el anexo T para este transformador.

Para el ensayo de calentamiento en específico se comparan los valores respecto a los valores normalizados de la tabla 40, en el caso que superen los valores establecidos con la ayuda del análisis de condición se puede empezar a establecer un posible diagnóstico de falla del transformador y aplicar acciones correctivas.

Tabla 34 valores normalizados de gases clave presentes antes y después del ensayo de calentamiento

Disolved gases	Typical values [ppm]	Before test [ppm]	After test [ppm]
$\text{H}_2$	15	3,2	3,3
$\text{CH}_4$	5	0,4	0,4
$\text{C}_2\text{H}_6$	5	0,1	0,1
$\text{C}_2\text{H}_4$	2	0,2	0,2
$\text{C}_2\text{H}_2$	1	0,2	0,1
$\text{CO}$	80	19	27
$\text{CO}_2$	200	56	46

Fuente. El autor

### Muestra previa al ensayo

Tabla 35 Análisis de datos para la muestra previa al ensayo

Gases clave disueltos	Valores típicos [ppm]	Antes del ensayo [ppm]	Muestra [ppm]
H <sub>2</sub>	15	3,2	12,5
CH <sub>4</sub>	5	0,4	<1
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5	0,1	<1
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2	0,2	0,8
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1	0,2	<0,2
CO	80	19	21,3
CO <sub>2</sub>	200	56	112,2

**Diagnóstico:** El transformador está operando satisfactoriamente. ningún gas individual excede los límites individuales especificados. Por lo tanto, no se sugiere ninguna investigación adicional.

### Etapa ONAN

Gases clave disueltos	Valores típicos [ppm]	Antes del ensayo [ppm]	Muestra [ppm]
H <sub>2</sub>	15	3,2	19,7
CH <sub>4</sub>	5	0,4	1
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5	0,1	<1
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2	0,2	1
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1	0,2	<0,3
CO	80	19	39,9
CO <sub>2</sub>	200	56	163,3

**Diagnóstico:** El transformador está operando satisfactoriamente. ningún gas individual excede los límites individuales especificados. Por lo tanto, no se sugiere ninguna investigación adicional.

### Etapa ONAF

Gases clave disueltos	Valores típicos [ppm]	Antes del ensayo [ppm]	Muestra [ppm]
H <sub>2</sub>	15	3,2	99,6
CH <sub>4</sub>	5	0,4	3,9
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5	0,1	<1
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2	0,2	2
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1	0,2	<0,3
CO	80	19	39,9
CO <sub>2</sub>	200	56	395,8

**Diagnóstico:** El transformador no está operando satisfactoriamente. Dos gases individuales exceden los límites individuales especificados .se sugiere una investigación adicional.

### 6.5 Resultados e informe

## RESULTADOS

### Etapa ONAN

Tabla 36 Resultados Etapa ONAN

ELEMENTO	Límite [°C]	Valor [°C]	OBSERVACIÓN
Líquido	65	53.59	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Devanado AT	65	60.89	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Devanado BT	65	64.03	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Hot spot AT	80	70.56	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Hot spot BT	80	74.64	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo

Fuente. El autor

### Etapa ONAF

Tabla 37 Resultados Etapa ONAF

<b>ELEMENTO</b>	<b>Limite [°C]</b>	<b>Valor [°C]</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
Líquido	65	46.34	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Devanado AT	65	62,05	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Devanado BT	65	63.59	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Hot spot AT	80	75,2	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Hot spot BT	80	77,21	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo

Fuente. El autor

**INFORME:** El informe para cada etapa se encuentra como anexo U.





# **CAPITULO SIETE**

*“Ninguna cantidad de experimentación puede probar definitivamente que tengo razón; pero un solo experimento puede probar que estoy equivocado.”*

**Albert Einstein.**

En este capítulo se presenta la plantilla para la presentación de informes desarrollada a través de una hoja de cálculo la cual a su vez sirve de apoyo en la implementación del ensayo.

## 7. PLANTILLA PARA LA PRESENTACION DE INFORMES

La plantilla para la presentación de informes sobre el ensayo de calentamiento contiene los valores de pérdidas de vacío y cortocircuito, valores de corriente inyectados a pérdidas totales, circuitos de prueba utilizados en el ensayo, valores de estabilización del líquido a pérdidas totales, corrección de elevación de temperatura por diferencia de altitud, valores de estabilización del líquido a corriente nominal, valores de resistencia en caliente lo anterior como datos del ensayo.

Como resultados el informe contiene datos sobre la elevación del Líquido y los devanados, Punto caliente (Hot Spot), gradiente.

Finalmente contiene un análisis de resultados donde se compara el valor obtenido en el ensayo con el límite establecido por la norma.

Si lo anterior se cumple se diagnostica que “el transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo”, en caso contrario se establece la no conformidad de acuerdo al parámetro donde el transformador no ha cumplido con los límites establecidos.

Este informe ha sido realizado para ser aplicado utilizando el estándar nacional para el ensayo Norma Técnica Colombiana NTC 316, sin embargo, tiene aplicación de igual manera para la Norma ANSI IEEE C.57.12.90.

La plantilla para la presentación de informes se encuentra como Anexo V en el presente documento.

Adicionalmente se realizó una hoja de cálculo la cual permite realizar la implementación del ensayo, se pueden calcular los valores de corriente y tensión de prueba ingresando los parámetros del transformador, permite determinar los valores de prueba para el transformador auxiliar y compararlos con sus valores nominales, por otra parte, adicionalmente permite guardar los valores de temperatura registrados durante el ensayo.

Con los valores ingresados permite efectuar el análisis de resultados y dar un diagnóstico de aprobación o rechazo para el transformador bajo ensayo. Finalmente, con todos los valores ingresados genera automáticamente el informe de acuerdo a la plantilla para la presentación de informes.

Esta hoja de cálculo se encuentra como anexo W y X. donde se validó su funcionamiento con los datos de la prueba piloto obteniendo resultados iguales a los obtenidos durante el ensayo. La hoja de cálculo para realizar el ensayo de calentamiento se encuentra como anexo Y a este documento.

A continuación, se realiza una descripción más detallada de la misma.

## Plantilla para la presentación de Informes

La hoja de cálculo se realizó de acuerdo al procedimiento de prueba definido en el capítulo 3, para la fase consideraciones generales, se deben obtener los parámetros del transformador, medir las perdidas con carga y vacío, la resistencia óhmica de los devanados y la temperatura a la que se midió esta resistencia óhmica. Estos valores se deben ingresar en la hoja “Menú”, en el botón ingresar datos como se observa en la figura 44 [1] al seleccionar este botón se despliega el menú mostrado en la figura 45.

Figura 44 Botón ingresar datos, Hoja de cálculo para implementar el ensayo

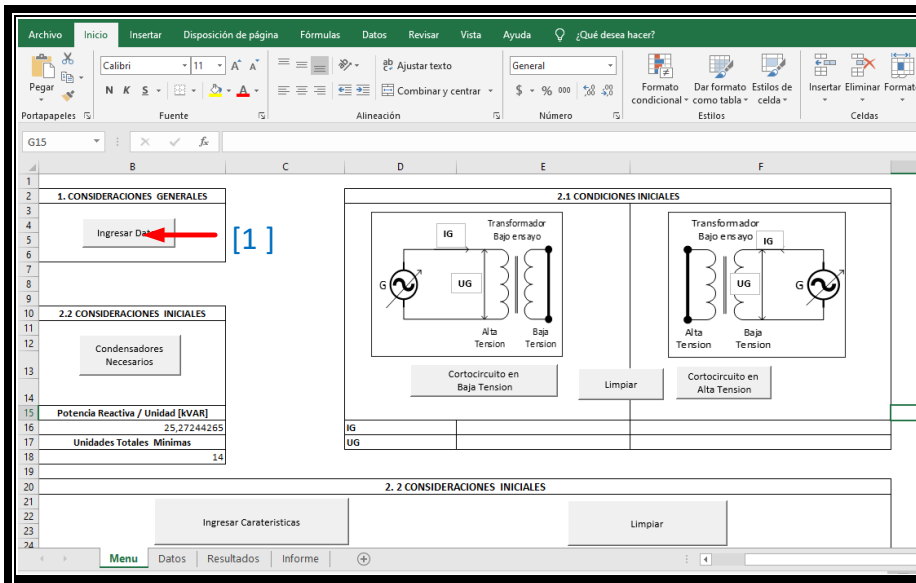
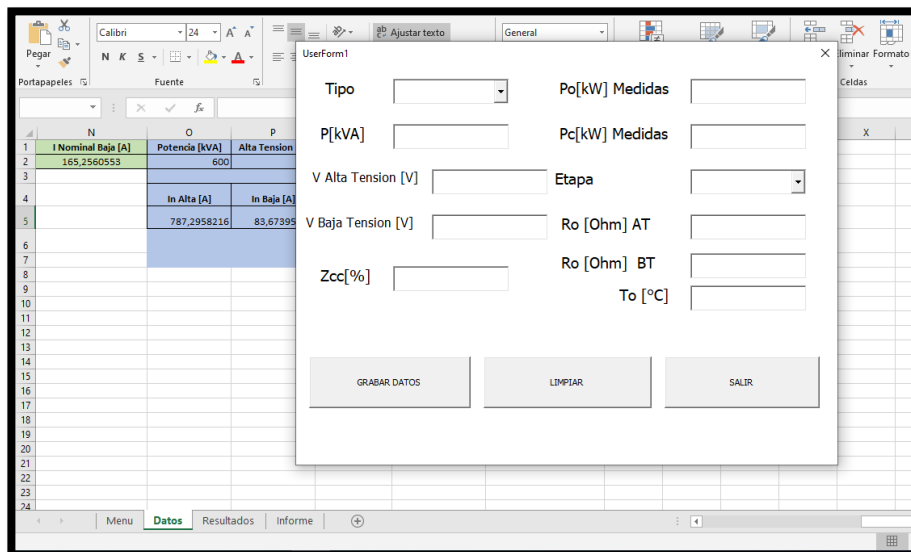


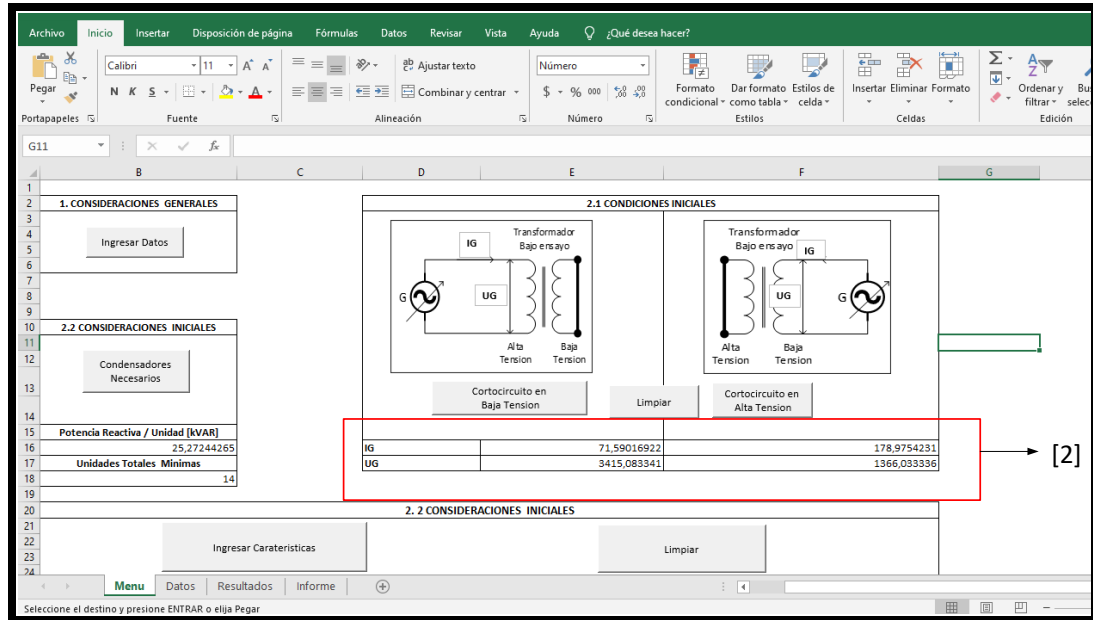
Figura 45 Menú para ingresar los parámetros del transformador



Fuente. El autor

Para implementar la fase consideraciones iniciales de acuerdo a los valores ingresados. La hoja de cálculo determina el factor  $k$  y los valores de tensión (UG) y corriente de prueba (IG) [2] como se observa en la figura 46, tanto para implementar el ensayo en el devanado de baja como el de alta tensión.

Figura 46 valores de tensión y corriente de prueba para implementar el ensayo

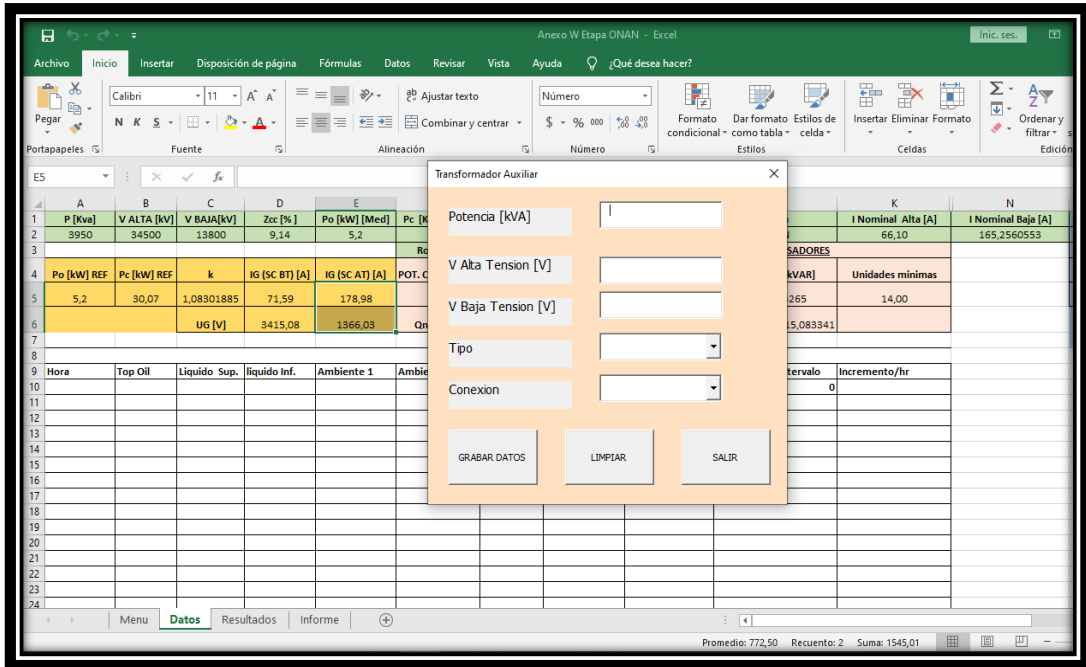
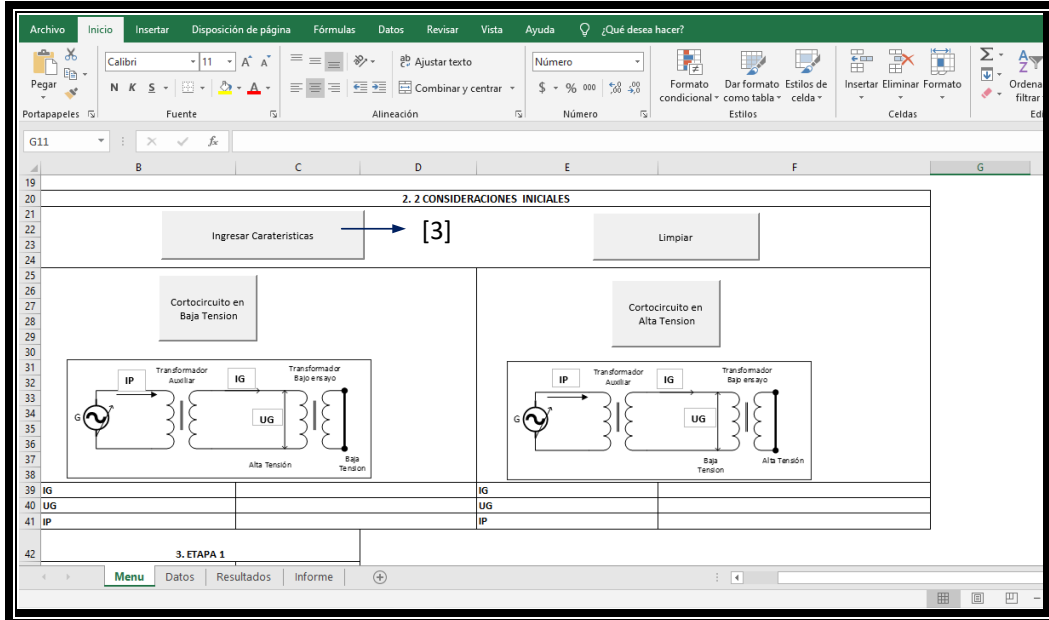


Fuente. El autor

De acuerdo a las características del transformador que vaya a ser ensayado, si es necesario utilizar un transformador intermedio o auxiliar, la hoja de cálculo tiene un botón (figura 47) que permite ingresar las características del transformador auxiliar [3], de acuerdo a esto evalúa la corriente que circularía en el devanado de alta tensión del transformador auxiliar (IP) y observar si supera los valores nominales para el devanado de alta y baja tensión (figura 48).

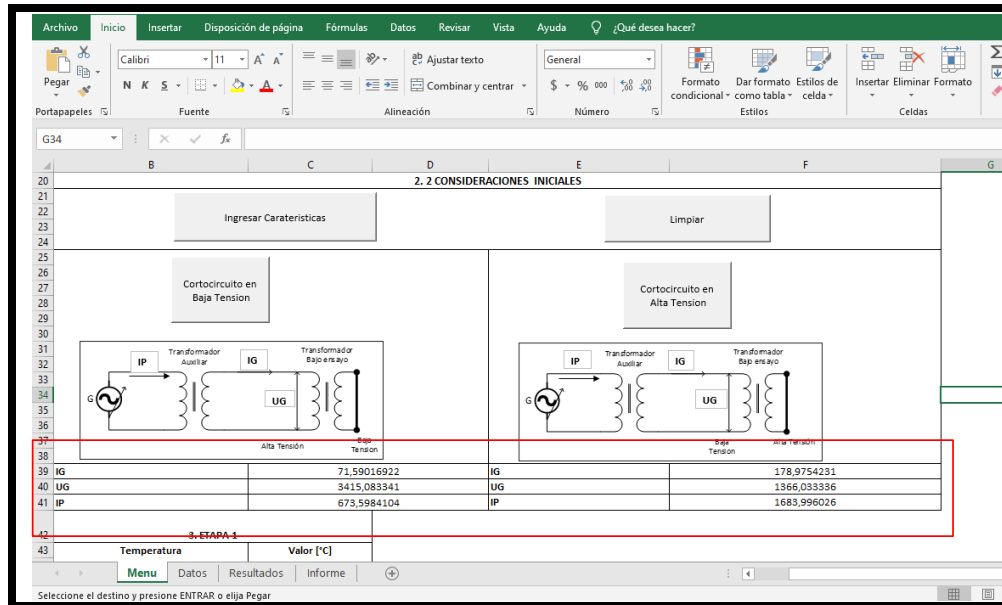
# Plantilla para la presentación de Informes

Figura 47 Botón ingresar características del transformador auxiliar



Fuente. El autor

Figura 48 Valores de prueba utilizando el transformador auxiliar para el devanado de baja y alta tensión

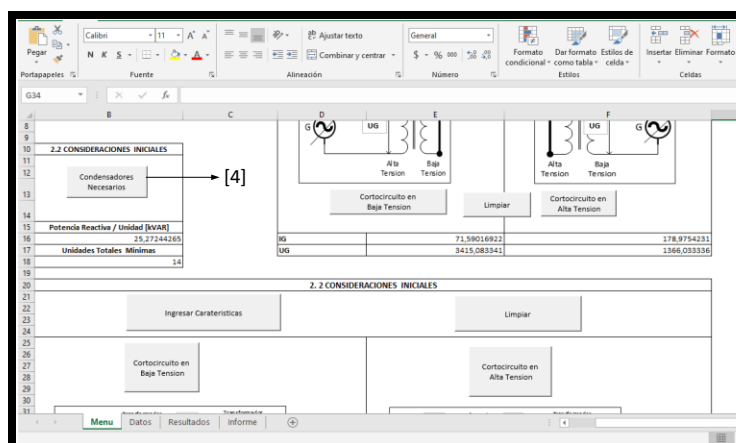


Fuente. El autor

Lo anterior permitirá de acuerdo a los equipos disponibles evaluar en que devanado se debe realizar el cortocircuito dadas las condiciones establecidas para cada caso.

Si en el ensayo se van a utilizar condensadores de acuerdo a las características del transformador bajo ensayo y el tipo de condensadores disponibles y la conexión en que se tiene estimado conectarlas la hoja de cálculo evalúa el número de unidades mínimas mediante el botón condensadores necesarios [4] figura 49 y despliega el menú mostrado en la figura 50.

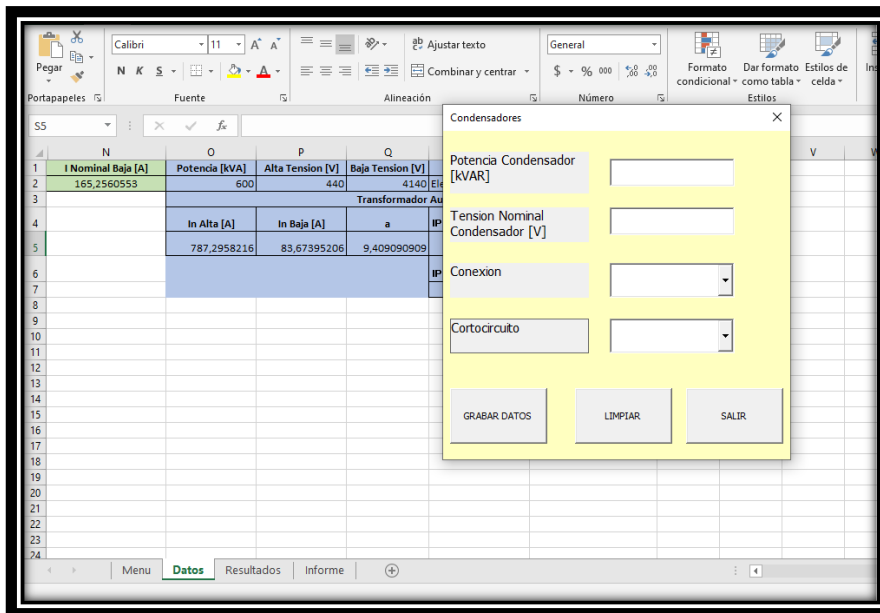
Figura 49 Condensadores necesarios



Fuente. El autor

## Plantilla para la presentación de Informes

Figura 50 Condensadores necesarios para implementar el ensayo



Fuente. El autor

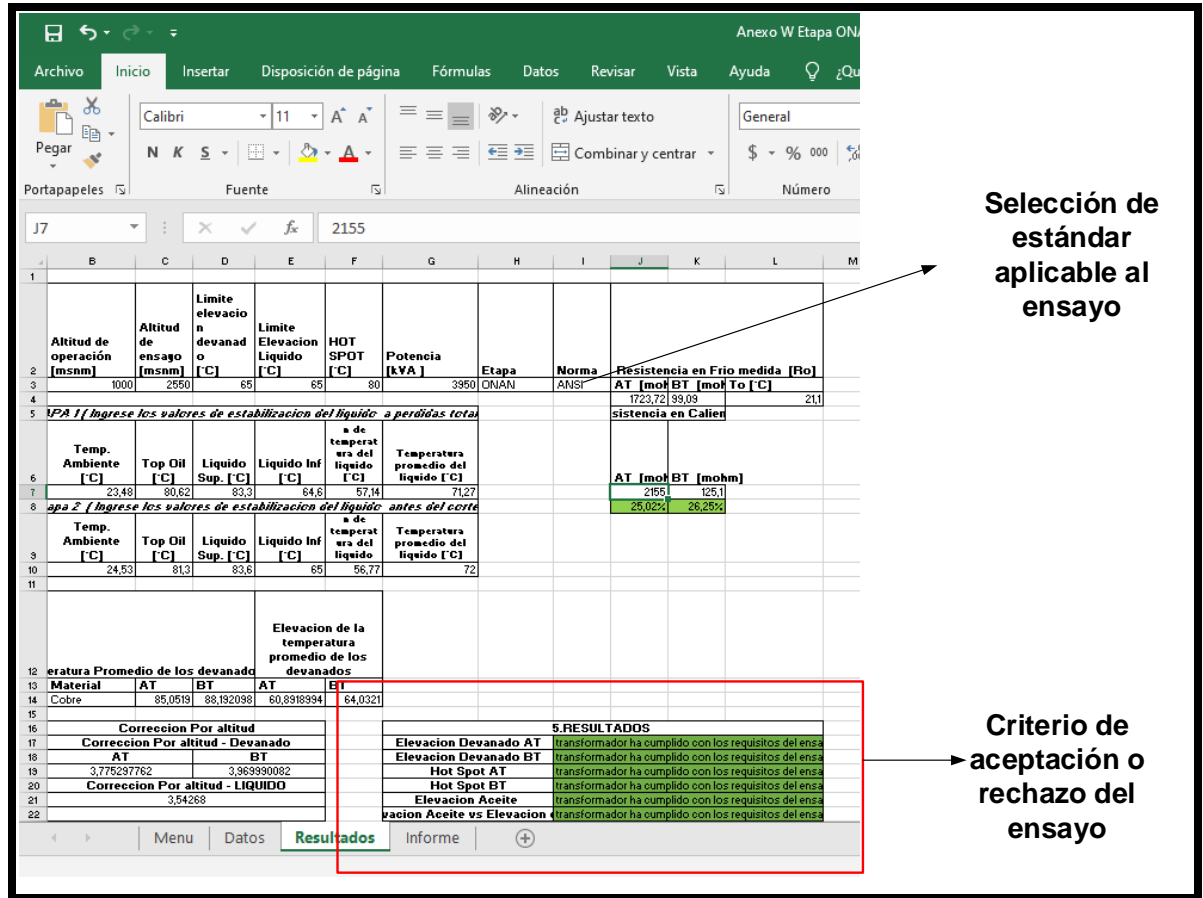
Una vez instalados los sensores de temperatura en el transformador como apoyo en la fase de etapa 1, la hoja de cálculo permite grabar los valores de temperatura obtenidos durante el ensayo para esto cuenta con dos botones de grabar y borrar datos de temperatura (figura 51), los valores registrados se almacenan en la hoja "Datos" así como todos los datos ingresados anteriormente (figura 52).







Figura 54 Análisis de datos



Fuente. El autor

Finalmente, para la fase resultados e informe, de acuerdo a los datos ingresados y los resultados obtenidos se realiza el informe de acuerdo a la Norma IEEE C.57.12.90 o a la NTC 316. Lo anterior en la hoja "Informe" de la hoja de cálculo.

# Plantilla para la presentación de Informes

Figura 55 Informe realizado por la hoja de calculo

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a report template. The spreadsheet is divided into two main sections, each with a header "Agregar encabezado".

**Left Section: INFORME DE PRUEBA ENSAYO DE CALENTAMIENTO**

Objeto	
Marca	
Serie	
Potencia (kW)	3950
Voltaje AT (kV)	34500
Voltaje BT (kV)	13800
Fecha	

**Aplicación de la prueba:** Para la realización del ensayo se emplea el metodo de Contocircuito, antes de iniciar el ensayo se realizo la medida de la resistencia ohmica de los devanados; se midieron las perdidas bajo carga y vacio y se convirtieron al valor de Temperatura de referencia adecuado.

Poc a 20°C (kW)	24,056
Poc a 85°C (kW)	30,07
Pc (kW)	5,2
Resis. Ohmica Dev. AT (m Ω)	1723,72
Resis. Ohmica Dev. BT (m Ω)	39,09

**ETAPA 1: Inspeccion a Perdidas Totales**  
De acuerdo a la Norma Tecnica Colombiana NTC 316, se realizo un contocircuito en el devanado

**Right Section:**

para el momento de corte mediante extrapolacion de tendencia polinomica se calcularon las resistencias de Alta y Baja Tension (justo en el momento del corte (t=0))

Resis. Alta Tension en Caliente (mΩ)	2955,00
Resis. Baja Tension en Caliente (mΩ)	125,10

La temperatura promedio de los devanados se debe determinar a traves del metodo de la Resistencia, para determinarla se emplea la siguiente formula:

$$T = \frac{R}{R_0} \cdot (T_0 + T_1) - T_1$$

T: Temperatura promedio de los devanados [°C]  
R: Resistencia en caliente [Ω]  
R<sub>0</sub>: Resistencia en frio [Ω]  
T<sub>0</sub>: 234.5 Para Cobre, 225 para aluminio  
T<sub>1</sub>: Temp. a la cual se midio la resistencia en frio [°C]

La temperatura promedio en cada devanado en el momento del corte es:

T AT	85,0519
T BT	68,1321

De acuerdo a la Norma Tecnica Colombiana NTC 316 la elevacion promedio de los devanados debe determinarse usando la elevacion superior del liquido o la elevacion

Fuente. El autor



## 8. CONCLUSIONES

Desde años anteriores se adelanta la creación del laboratorio de ensayos electromecánicos en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia actualmente se realizan pruebas dieléctricas dentro del laboratorio. Con el fin de ampliar el portafolio de servicios se planteó realizar una propuesta para la implementación del ensayo de calentamiento en transformadores de distribución.

La implementación del ensayo beneficiara a los estudiantes de Ingeniería Electromecánica, Administración Industrial y Licenciatura en Tecnología permitiendo el desarrollo de los ensayos complementando su formación profesional en asignaturas como Maquinas Eléctricas, Sistemas eléctricos de potencia y Accionamientos Electromecánicos.

La Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia cuenta con el montaje del ensayo de calentamiento el cual puede ser ofrecido a empresas del sector eléctrico y talleres reparadores de transformadores de la región con el fin de apoyar a las empresas en el mejoramiento de su sistema de calidad evaluando el comportamiento térmico del transformador antes de entrar en servicio, aumentando su vida útil, evitando salidas de servicio anticipadas y aumentando la confiabilidad del servicio.

Se implementó el ensayo de calentamiento en transformadores de distribución de hasta 150 kVA incluyendo el procedimiento y los equipos necesarios para implementar el ensayo, todo lo anterior se realizo de acuerdo a los estándares nacionales e internacionales específicos para el ensayo y la realización de una prueba piloto en un transformador de 4.25 MVA.

Se tuvieron en cuenta técnicas como cromatografía de gases, la cual mediante tres muestras obtenidas durante el ensayo y la obtención del cromatograma en donde se especifican en cantidad los gases presentados durante el ensayo, se comparan con un valor normalizado el cual permite establecer un análisis de condición específico para el ensayo de calentamiento. Adicionalmente el laboratorio cuenta con una hoja de cálculo para implementar el ensayo de manera mas eficiente la cual permite calcular los parámetros del ensayo, análisis de resultados y la plantilla para la presentación de informes esto permite una mayor agilidad en la entrega de los informes y reducción de errores de tipo humano en la interpretación e ingreso de los datos durante el ensayo.

## 9. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos de este proyecto se espera incentivar a más estudiantes para seguir desarrollando proyectos de este tipo a través de los grupos de investigación, es necesario seguir trabajando en las siguientes etapas como la implementación del ensayo de calentamiento utilizando aceite vegetal dieléctrico evaluando su comportamiento térmico y optimización del ensayo agregando automatismos y elementos de control, así como un sistema de adquisición de datos.

Se espera que se cree una electiva técnica que vincule todos estos temas afines al laboratorio donde se invite a participar a empresas del sector eléctrico de la región y mediante una modalidad de extensión brindar cursos a empresas con una participación conjunta entre docentes y estudiantes

Se hace necesario seguir trabajando en el desarrollo de proyectos, vinculación de empresas del sector eléctrico para obtener los múltiples beneficios que todo esto puede otorgar a los estudiantes, las empresas del sector eléctrico y el sistema de calidad del país.

## 9. BIBLIOGRAFIA

- ABB BUSINESS AREA POWER TRANSFORMERS. Testing of Power Transformers: Routine Tests, type tests and special tests. Düsseldorf, Pro Print GmbH, 2003.
- AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. IEEE Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed Transformers. New York, ANSI,2008. IEEE std C.57-104-2008.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. IEEE. Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. New York, ANSI,2002. IEEE Std C.57.12.00-2006.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. IEEE. Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution Power, And Regulating Transformers. New York, ANSI,2015. IEEE Std C.57.12.90-2015.
- Artech. Toma de muestras de aceite. Manual de usuario.p.2. Internet ([https://www.artech.com/en/cmis/browser?id=workspace://SpacesStore/8322aebc-b667-4b7d-914c-25f18086e16c&entity\\_id=4408](https://www.artech.com/en/cmis/browser?id=workspace://SpacesStore/8322aebc-b667-4b7d-914c-25f18086e16c&entity_id=4408)).
- BALBUZANO, Mauro. Análisis de las pruebas a realizar en transformadores de potencia. Caracas, 2011. Trabajo especial de grado (Ingeniero Electricista). Universidad Central de Venezuela. Facultad de ingeniería. Ingeniería Eléctrica.
- BOYLESTAD, Robert. Introducción al análisis de circuitos. 10ma edición. Atlacomulco: Pearson Educación de Mexico,2004.
- Cromatografía de gases. Internet([https://www.mncn.csic.es/docs/repositorio/es\\_ES/investigacion/cromatografia/cromatografia\\_de\\_gases.pdf](https://www.mncn.csic.es/docs/repositorio/es_ES/investigacion/cromatografia/cromatografia_de_gases.pdf))
- Curve. Transactions of IEE Sri Lanka, Vol. 3, No. 1, enero. 2001
- ESPINOZA TREJOS, Carlos. PEREZ SUAZO, Mauricio. Metodología para el diseño y dimensionamiento adecuado de banco de capacitores para corrección de factor de potencia en la empresa YAMBERSA. Managua,2015. Trabajo de grado (ingeniero eléctrico). Universidad nacional de ingeniería. Departamento de eléctrica.
- FLUKE. Tres Formas de realizar inspecciones térmicas. Fecha [ 23/03/20]. Disponible. <https://www.fluke-infrared.com/es-la/tres-formas-de-realizar-inspecciones-termicas?lclid=9dabe367-ad07-e811-80c8-00155d027404>.
- HARPER, Enríquez. El ABC de las instalaciones eléctricas industriales.2 Edición. LIMUSA, 2014.
- HOLGUIN TORRES, Yeimi. VILLACOB PINEDA, Karen. Seguimiento a los factores incidentes en la vida útil de transformadores de distribución tipo poste en la ciudad de barranquilla. Barranquilla, 2017. Trabajo de grado (Ingeniero Eléctrico). Universidad de la costa. Facultad de Ingeniería.
- ICONTEC. Normalización. [en línea]. [22/03/2020]. Disponible en <https://www.icontec.org/normalizacion/>
- IEC. What we do. [en línea] [22/03/20]. Disponible en <https://www.iec.ch/about/activities/?ref=menu>
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Electrotecnia Transformadores trifásicos autorefrigerados y sumergidos en líquido. Corriente sin carga, perdidas y tensión de cortocircuito. Bogotá. ICONTEC. 1995.NTC 819.

- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN.  
Transformadores eléctricos. Ensayos eléctricos. Generalidades. Bogotá. ICONTEC. 2001.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN.  
Transformadores método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en liquido refrigerante. Bogotá. ICONTEC. 1998.NTC 316.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN.  
Transformadores Medida de la resistencia de los devanados. Bogotá. ICONTEC. 1970.  
NTC 375.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN.  
Transformadores determinación de la tensión de cortocircuito. Bogotá. ICONTEC. 1975.  
NTC 1005.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN.  
Transformadores ensayos para la determinación de pérdidas y corriente sin carga. Bogotá.  
ICONTEC. 1975.NTC 1031.
- INTERNATIONAL STANDARD.IEC. Loading Guide for oil- immersed power Transformers.  
Switzerland, IEC, 1991. IEC 60354/1991
- INTERNATIONAL STANDARD.IEC. Power Transformers: Part. 1.General. Switzerland,  
IEC, 2000. IEC 60076-1/2000
- INTERNATIONAL STANDARD.IEC. Power Transformers: Part. 2 Temperature rise.  
Switzerland, IEC, 1993. IEC 60076-2/1993.
- K. PERERA, J. LUCAS, R. DIAS. Estimation of Optimum Transformer Capacity based on  
Load
- KULKARNI, S. V, Khaparde, S. A. Transformer Engineering: Design and practice. New  
York: Marcel Dekker, INC, 2004.
- MENDOZA GOMEZ, Eddy. Diseño y construcción de un banco de pruebas para control de  
factor de potencia, Guayaquil ,2015. Trabajo de grado (Ingeniero eléctrico). Universidad  
politécnica salesiana.
- METREL. Resistencia óhmica. Fecha [23/03/2020]. Disponible.  
<https://www.metrel.es/es/shop/HVI/continuity-testers/mi-3250.html>
- MUÑOZ LEUDO, Michael. Metodología para determinar la carga en transformadores de  
distribución. Santiago de Cali, 2007. Trabajo de grado (Magister en ingeniería). Universidad  
del Valle. Facultad de ingeniería. Programa de posgrado en ingeniería eléctrica y  
electrónica.
- NEW LINE. VARIACS- Transformadores variables de voltaje. [en línea]. Fecha [ 23/03/20].  
Disponible en <https://corpnewline.com/variacs.htm>
- OMEGA. Termopar. [En línea] Fecha [2/04/2020]. Disponible  
<https://es.omega.com/prodinfo/termopares.html>
- PROSEA. Unidades capacitivas trifásicas UWCT. [en línea]. Fecha [ 28/03/2020]  
Disponible en <https://www.prosea.com.mx/Productos/banco-de-capacitores-unidad-capacitiva-trifasica>



- REYES PEREZ, Ignacio. Procedimiento para realizar e interpretar la prueba de cromatografía de gases en transformadores de potencia. México D.F. 2010. Trabajo de grado (Ingeniero mecánico). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. División de ingeniería Mecánica e Industrial
- ROBALINO SOTO, Iván. Vida útil del transformador. Quito.1998. Tesis (Ingeniero Eléctrico sistemas de potencia). Escuela politécnica Nacional. Facultad de ingeniería eléctrica.
- SABATO, Juan. Mediciones Eléctricas. Buenos Aires, ALSINA, 1978.
- WEG. Corrección del factor de potencia. [en línea]. Fecha [ 28/03/2020] Disponible en [https://www.weg.net/catalog/weg/GD/es/Controls/Condensadores/Correcci%C3%B3n-del-Factor-de-Potencia/c/GLOBAL\\_WDC\\_CTL\\_PF\\_PFC](https://www.weg.net/catalog/weg/GD/es/Controls/Condensadores/Correcci%C3%B3n-del-Factor-de-Potencia/c/GLOBAL_WDC_CTL_PF_PFC)

## Anexo A medición de la resistencia óhmica de los devanados

De acuerdo a la Norma NTC 316, la Resistencia de los devanados se debe medir antes de iniciar el ensayo y en la segunda etapa luego de realizar el corte, estas medidas deben realizarse de acuerdo a la NTC 375 Medición de la resistencia en los devanados.<sup>1</sup>

**Principio de los métodos:** La medida de la resistencia de los devanados, se efectúa por el método de la caída de tensión o del puente.

**Método de la caída de tensión:** Consiste en a través de la ley de ohm, conociendo la intensidad de la corriente y la tensión aplicada en los terminales determinar el valor de la resistencia del devanado.<sup>2</sup>

$$R_x = \frac{U}{I} \quad (A-1)$$

*U* : Tension aplicada a los terminales del devanado [V].

*I* : intensidad de la corriente que circula por el devanado [A].

*R<sub>x</sub>* : Resistencia del devanado [ $\Omega$ ].

**Método del puente:** La resistencia se determina a través del puente de Wheatstone Donde R, R1 y R2 son resistencias conocidas y Rx representa la resistencia del devanado que debe ser determinada.<sup>3</sup>

$$R_x = \left(\frac{R1}{R2}\right)R \quad (A-2)$$

### Consideraciones:

- La medida se hace con corriente continua
- La resistencia de cada devanado y la temperatura se debe registrar
- El tiempo gastado hasta que la corriente utilizada para determinar la medida se estabilice debe ser observado
  
- **Transformadores tipo seco:** La temperatura registrada debe ser el promedio de varios termómetros (mínimo tres), debe ser aproximadamente la temperatura ambiente

---

<sup>1</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 316, op. cit, p.2

<sup>2</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Transformadores Medida de la resistencia de los devanados. Bogotá. ICONTEC. 1970. 1p. NTC 375

<sup>3</sup> Ibid., p.2

- **Transformadores sumergidos en liquido refrigerante:** Antes de registrar la medida de resistencia el transformador debe hacer estado sin excitación o carga por lo menos durante 3 horas <sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Ibid., p.3

## Anexo B medición de las pérdidas con carga

De acuerdo al estándar ANSI IEEE C.57.12.90<sup>1</sup> las pérdidas con carga se dividen en dos, las pérdidas  $I^2 * R$  o pérdidas de Cortocircuito y las pérdidas adicionales, originadas por las corrientes de Eddy las cuales inducen flujos de dispersión en los devanados.

Las pérdidas con carga son medidas aplicando un cortocircuito en un devanado y aplicando suficiente voltaje en el otro devanado que cause un determinado flujo de corriente en los devanados.

La impedancia de cortocircuito, es el voltaje requerido para circular corriente nominal a través de un devanado con el otro cortocircuitado. La impedancia de cortocircuito se expresa como un porcentaje del voltaje nominal.

De acuerdo a la NTC 1005<sup>2</sup>, La impedancia de cortocircuito o tensión de impedancia de un transformador consta de una componente resistiva y otra inductiva las cuales corresponden respectivamente a las pérdidas de cortocircuito y las pérdidas adicionales.

Estas pueden calcularse midiendo las pérdidas totales y la tensión de cortocircuito. El valor de la tensión de cortocircuito esta entre el 1 % y el 15 % de la tensión nominal del devanado.

De acuerdo al estándar ANSI IEEE C.57.12.90<sup>3</sup> las componentes resistiva e inductiva del voltaje de cortocircuito se puede determinar a través de las siguientes ecuaciones:

$$V_r = \frac{P_L}{I} [V] \quad (B-1)$$

$$V_a = \sqrt{V_{sc}^2 - V_r^2} [V] \quad (B-2)$$

*V<sub>r</sub>*: Componente resistiva del voltaje de cortocircuito

*V<sub>a</sub>* : Componente inductiva del voltaje de cortocircuito

*V<sub>sc</sub>*: Voltaje de cortocircuito

*P<sub>L</sub>* : Pérdidas del transformador medidas

*I*: Corriente de excitación del devanado

De acuerdo a Testing of Power Transformers<sup>4</sup> las pérdidas con carga es la suma de las pérdidas de cortocircuito  $I^2 * R$  y las pérdidas adicionales.

---

<sup>1</sup> AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. IEEE Standard Test Code for Liquid- Immersed Distribution Power, And Regulating Transformers. New York, ANSI,2015.21p. IEEE Std C.57.12.90-2015.

<sup>2</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Transformadores determinación de la tensión de cortocircuito. Bogotá. ICONTEC. 1975. 1p.NTC 1005

<sup>3</sup> AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. IEEE Std C.57.12.90-2015, op. cit, p.32

<sup>4</sup> ABB BUSINESS AREA POWER TRANSFORMERS. Testing of Power Transformers: Routine Tests, type tests and special tests. Düsseldorf, Pro Print GmbH, 2003. 59p.

$$P_L = P_r + P_s \quad (B-3)$$

$$P_L = \sum I^2 R + P_s \quad (B-1)$$

$$P_s = P_L - P_r \quad (B-5)$$

$P_r$ : Perdidas  $I^2 R$

$P_s$ : Perdidas adicionales

$R$ : resistencia del devanado

Las pérdidas de carga son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga:

$$P_L = P_{Lm} * \left(\frac{I_r}{I_m}\right)^2 \quad (B-2)$$

$P_L$ : Perdidas con carga a corriente nominal

$P_{Lm}$ : Perdidas con carga a corriente de ensayo

$I_r$ : Corriente nominal

$I_m$ : Corriente de ensayo

Para implementar el ensayo de calentamiento es fundamental conocer las perdidas con carga, vacío y el voltaje de cortocircuito, sin embargo, las pérdidas se deben convertir a la temperatura de referencia 75 °C<sup>5</sup> para IEC 60076-2 y 85 °C Para ANSI IEEE C.57.12.90<sup>6</sup> y NTC 316.<sup>7</sup>

La componente resistiva de las perdidas con carga incrementa con la temperatura, al contrario, el de las perdidas adicionales decrece con la temperatura. Cuando se desea convertir las pérdidas a una temperatura diferente a la de ensayo se debe aplicar lo siguiente<sup>8</sup>:

$$Pr' = Pr \frac{T1 + T0'}{T1 + T0} \quad (B-3)$$

$Pr'$  = Perdidas activas a la temperatura  $T0'$

$Pr$  = Perdidas activas a la Temperatura  $T0$  ( Medidas)

$T0$  = Temperatura de ensayo en °C

$T0'$  = Temperatura a la cual se desean convertir las perdidas

$T1$  = 234,5 para el cobre y 225 para aluminio

<sup>5</sup> INTERNATIONAL STANDARD. IEC. Power Transformers: Part. 1. General. Switzerland, IEC, 2000. 59p. IEC 60076-1/2000

<sup>6</sup> AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. IEEE Std C.57.12.90-2015, op. cit, p.61

<sup>7</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 316, op. cit, p.7

<sup>8</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 1005, op. cit, p.2

Las pérdidas activas corresponden a la componente resistiva ( $I^2 * R$ ) y las adicionales a las pérdidas relacionadas con la componente inductiva.

$$P_{s'} = P_s \frac{T_1 + T_0}{T_1 + T_0'} \quad (B-4)$$

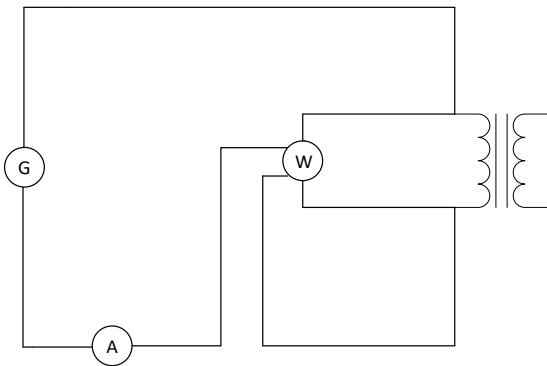
$P_{s'}$  = Pérdidas adicionales a la temperatura  $T_0'$

$P_s$  = Pérdidas adicionales a la temperatura  $T_0$  (Medidas)

## Ensayo

- **Transformadores monofásicos:** se realiza un corto en alguno de los devanados, se aplica tensión en el otro a frecuencia nominal la cual se va variando hasta que circule la corriente nominal, en caso de que no sea posible alcanzar el valor nominal de corriente se puede utilizar una corriente no menor del 25% de la corriente nominal. Aplicando el factor de corrección correspondiente.

Figura 1 Medición de las pérdidas con carga, transformadores monofásicos



**Fuente.** ICONTEC (1975). Norma Técnica Colombiana NTC 1005. Transformadores, determinación de la tensión de cortocircuito

Efectuado el montaje y alcanzada la corriente nominal, se toman lecturas en los equipos de medida, la potencia observada en el vatímetro corresponde a las pérdidas con carga.<sup>9</sup>

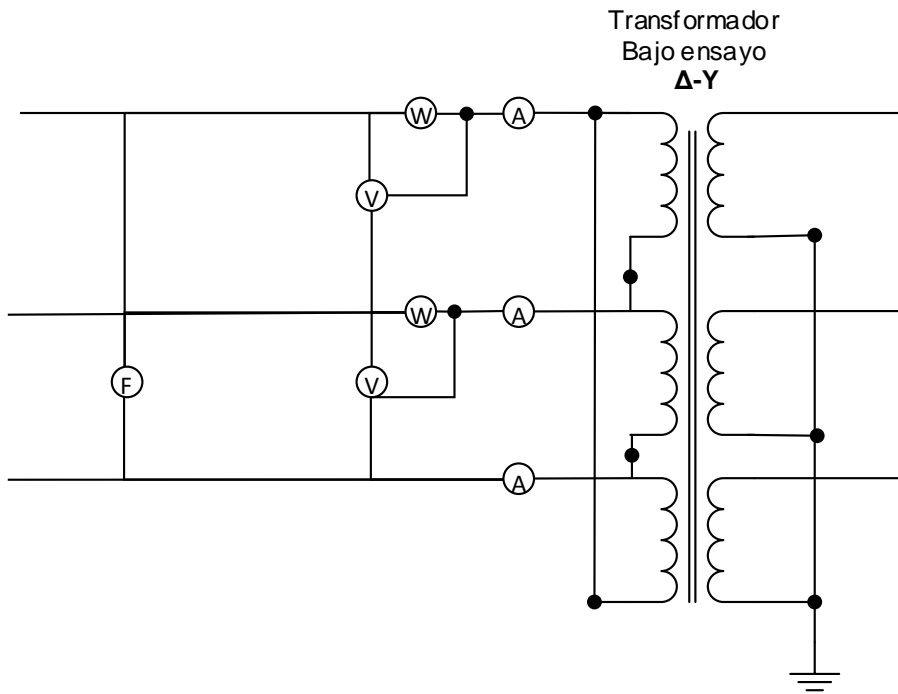
- **Transformadores trifásicos:**

los terminales del transformador del devanado de baja o alta tensión deben colocarse en cortocircuito posteriormente se aplica a los terminales una tensión trifásica balanceada de frecuencia nominal que permitan hacer circular la corriente nominal.<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Ibid., p.4

<sup>10</sup> Ibid., p.5

Figura 2 Medición de las pérdidas con carga, transformadores trifásicos



**Fuente.** ICONTEC (1975). Norma Técnica Colombiana NTC 1005. Transformadores, determinación de la tensión de cortocircuito

## Anexo C pérdidas en vacío

De acuerdo a la Norma NTC 1031<sup>1</sup> las pérdidas sin carga o vacío de un transformador corresponden en gran medida a las pérdidas en el hierro del núcleo, originadas por el campo magnético.

### Ensayos

- **Transformador monofásico:** Se deben conectar dos voltímetros conectados en paralelo, uno debe medir el valor promedio y el otro el valor eficaz. La tensión de ensayo se ajusta de acuerdo al voltímetro de valores promedio. Las lecturas de los dos voltímetros son empleadas para corregir las pérdidas sin carga de acuerdo a la ecuación<sup>2</sup>:

$$P_o(T_m) = \frac{P_m}{P_1 + kP_2} \quad (C-1)$$

$P_o(T_m)$  = Pérdidas en vacío corregidas.

$P_m$  = Pérdidas en vacío medidas a temperatura  $T_m$ .

$P_1$  = Pérdidas por histéresis, referidas a  $P_m$ .

$P_2$  = Pérdidas por corrientes parasitas, referidas a  $P_m$ .

Los valores reales de pérdidas por histéresis y corrientes parasitas por unidad serán utilizados si están disponibles en caso contrario se sugiere que los dos componentes sean asumidos con un valor igual a 0,5 en por unidad.

$T_m$ :

- a) Para transformadores sumergidos en líquido es la temperatura del líquido en el punto superior en el ensayo en °C
- b) Para transformadores secos es la temperatura promedio del núcleo entre la parte superior e inferior

$$k = \left(\frac{U_r}{U_a}\right)^2 \quad (C-2)$$

$U_r$  = Tensión de prueba medida por el voltímetro de lecturas de valor eficaz (rms)

$U_a$  = Tensión de prueba medida por el voltímetro de lecturas de valor promedio

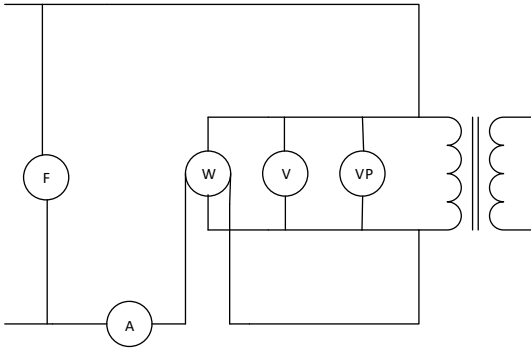
---

<sup>1</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Transformadores ensayos para la determinación de pérdidas y corriente sin carga. Bogotá. ICONTEC. 1975. 1p.NTC 1031

<sup>2</sup> Ibid., p.3



Figura 1 Medición de las pérdidas sin carga, transformadores monofásicos



**Fuente.** ICONTEC (1998). Norma Técnica Colombiana NTC 1031. Transformadores, Ensayos para la determinación de pérdidas y corriente sin carga

*G : generador F: Frecuenciómetro W : Vatímetro V : Voltímetro*

*VP: Voltímetro de Valores promedio*

Se deben utilizar vatímetros análogos o digitales según la NTC 2743, Durante el ensayo se ajusta la frecuencia al valor indicado, sin embargo, este valor no debe estar por debajo del  $\pm 0,5 \%$  de la frecuencia nominal.

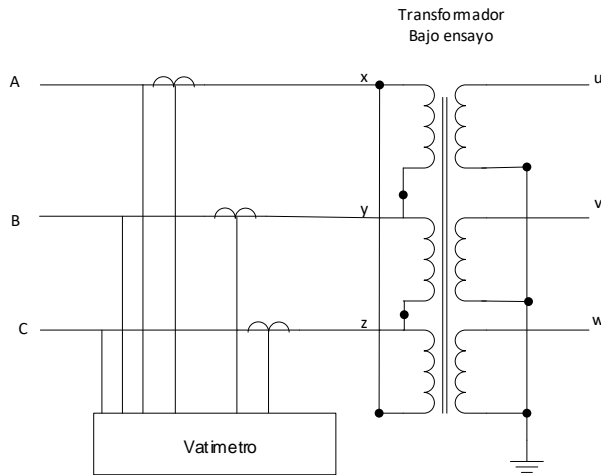
Se toman lecturas de los equipos de frecuencia, valor eficaz, tensión promedio, potencia, corriente y temperatura. Posteriormente se desconecta el transformador bajo ensayo, se observa el valor en el vatímetro, el cual representa las pérdidas de los equipos conectados. Este valor se le resta al primer valor leído obteniéndose así el valor de las pérdidas de vacío del transformador bajo ensayo.

- **Transformadores trifásicos:** Lo anteriormente descrito para transformadores monofásicos aplica para transformadores trifásicos, sin embargo, la determinación de las pérdidas en vacío se debe realizar a través del método de los 3 vatímetros a continuación se presenta el esquema de conexión.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Ibid., 5

Figura 2 Medición de las pérdidas sin carga, transformadores trifásicos



**Fuente.** El autor

Como se mencionó anteriormente la medida de las pérdidas de vacío se realiza con tres vatímetros monofásicos, se debe conectar cada circuito potencial entre una línea y neutro de las tres fases cuando se dispone de este. La suma algebraica es igual a las pérdidas de vacío. Cuando no se disponga de un neutro se puede derivar al punto de conexión a tierra.

Los voltímetros deben ser conectados línea - neutro para devanados conectados en Y, y línea - línea para devanados conectados en delta. La tensión de ensayo se debe ajustar al valor observado por el voltímetro de valor promedio. Para transformadores trifásicos el valor es el promedio de las tres lecturas.

- **Corrección por temperatura:** Cuando se expresan pérdidas en vacío generalmente la temperatura de referencia estándar es 20°C. Variaciones de temperatura presentadas durante la prueba, no afectan las pérdidas en vacío razón por la cual no es necesario realizar correcciones de temperatura si se cumplen lo siguiente: <sup>4</sup>
  - a) La temperatura superior del líquido esta entre  $\pm 10$  °C de la temperatura de referencia
  - b) La diferencia entre las temperaturas del nivel superior e inferior no excede los 5 °C

<sup>4</sup> Ibid., p.6

## **Anexo D Análisis cromatográfico de análisis de condición del transformador**

### **Cromatografía de gases**

La cromatografía de gases es un método físico de separación de mezclas, mediante el cual los componentes a ser separados son distribuidos en dos fases, una estacionaria y otra en movimiento en una dirección definida.

El movimiento de las sustancias es el resultado de dos fuerzas contrarias, la fuerza de arrastre ejercida por la fase móvil y la fuerza resistente o de acción de retardo de la fase estacionaria.<sup>1</sup>

“La fuerza de arrastre mueve las sustancias del origen de la columna en dirección del flujo de la fase móvil, mientras la acción de retardo impide el movimiento de las sustancias arrastrándolas del flujo y adhiriéndolas al adsorbente”.<sup>2</sup>

Para la cromatografía de gases se utiliza para la fase móvil un gas inerte, el cual se denomina gas portador y para la fase estacionaria se utiliza un líquido (CGL) o un sólido (CGS). Usualmente se utiliza la elución como medio de separación mediante el cual el gas portador circula a lo largo de la columna de manera constante, en un momento dado se introduce una muestra de la mezcla a analizar en estado gaseoso a elevada temperatura, El gas portador arrastra los componentes por medio de la columna, donde se producirán paulatinamente los procesos de adsorción y desorción de los componentes de acuerdo al poder que muestre la fase estacionaria sobre cada uno de ellos.<sup>3</sup>

### **Cromatógrafo**

Los principales componentes de un cromatógrafo de gases son<sup>4</sup>:

- Fuente de gas
- Sistema de inyección
- Horno y columna cromatográfica
- Sistema de detección
- Sistema de registro

---

<sup>1</sup> REYES PEREZ. Ignacio. Procedimiento para realizar e interpretar la prueba de cromatografía de gases en transformadores de potencia. México D.F. 2010. p.28. Trabajo de grado (Ingeniero mecánico). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. División de ingeniería Mecánica e Industrial

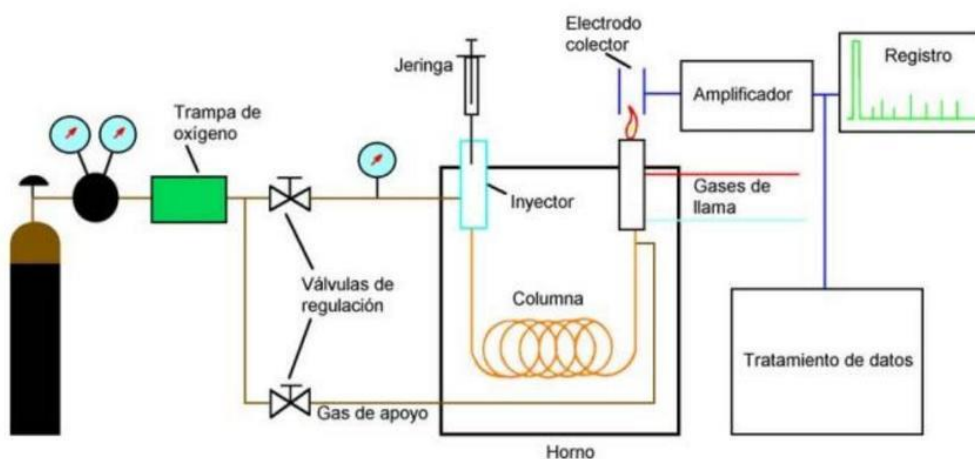
<sup>2</sup> Ibid., p.28.

<sup>3</sup> Ibid., p.29.

<sup>4</sup> Cromatografía de gases. Internet(

[https://www.mncn.csic.es/docs/repositorio/es\\_ES/investigacion/cromatografia/cromatografia\\_de\\_gases.pdf](https://www.mncn.csic.es/docs/repositorio/es_ES/investigacion/cromatografia/cromatografia_de_gases.pdf))

Figura 1 Esquema de un cromatógrafo de gases



**Fuente** Research Gate. John Henry castro. Disponible en [https://www.researchgate.net/figure/Figura-12-Esquema-de-un-cromatografo-de-gases-Tomado-de-Huertas-Greco-Sanchez\\_fig11\\_316148428](https://www.researchgate.net/figure/Figura-12-Esquema-de-un-cromatografo-de-gases-Tomado-de-Huertas-Greco-Sanchez_fig11_316148428)

Es conveniente tener en cuenta dos acciones que se realizan en el cromatógrafo de gases la primera es el tiempo de retención donde un detector informa los momentos en que emergen los componentes de la columna esto da una visión cualitativa de la mezcla. A su vez la visión cuantitativa se debe a un detector que mide la concentración de cada gas en el gas portador.<sup>5</sup>

### **Cromatograma**

Un cromatograma es un registro grafico donde se indican los componentes y el grado de concentración en un determinado tiempo.<sup>6</sup>

### **Métodos de interpretación del análisis cromatográfico**

Establecidas las concentraciones de los gases a través de la cromatografía, existen tres métodos para diagnosticar la condición en que se encuentra el transformador, a partir de las concentraciones de cada gas o por las relaciones entre gases.<sup>7</sup>

<sup>5</sup> Ibid., p.

<sup>6</sup> REYES PEREZ. Op. cit. p.33

<sup>7</sup> Ibid., p.35

- **Relaciones de Doernenburg**

Este método unifica dos tipos de diagnóstico, el primero es comparar las concentraciones independientes de cada gas establecidas en partículas por millón con los valores patrón de la tabla 2.1 de la ANSI IEEE C.57.104 de 1991, Si al menos una de las concentraciones excede el valor del doble de los valores patrón y una de las demás concentraciones de los demás gases excede el límite mostrado, se puede considerar que el transformador presenta fallas.<sup>8</sup>

Tabla 1 límite de los gases principales en p.p.m

Gases disueltos	Concentración de gases (p.p.m)
Hidrogeno $H_2$	100
Metano $CH_4$	120
Acetileno $C_2H_2$	35
Etileno $C_2H_4$	30
Etano $C_2H_6$	65
Monóxido de carbono $Co$	350

**Fuente.** Procedimiento para realizar e interpretar la prueba de cromatografía de gases en transformadores de potencia. Ignacio Reyes Pérez. 2010 p.35

Al determinar que el transformador presenta fallas se procede al segundo diagnóstico en base a 4 relaciones<sup>9</sup>:

$$R1 = \text{Razon 1} = \frac{CH_4}{H_2} \quad (D-1)$$

$$R2 = \text{Razon 2} = \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \quad (D-2)$$

$$R3 = \text{Razon 3} = \frac{C_2H_2}{CH_4} \quad (D-3)$$

$$R4 = \text{Razon 4} = \frac{C_2H_6}{C_2H_2} \quad (D-4)$$

<sup>8</sup> Ibid., p.35

<sup>9</sup> SARRIA ARIAS. Tatiana, GUERRERO BELLO. Natalia, RIVAS TRUJILLO, Edwin. Estado del arte del análisis de gases disueltos en transformadores de potencia. Revista Facultad de Ingeniería.2014. Vol. 23. No.36. p.107. Universidad Distrital Francisco José de caldas.

Tabla 2 Tabla de diagnóstico de Doernenburg

Tipo de Falla	R1	R2	R3	R4
<b>Descomposición Térmica</b>	>1.0	<0.75	<0.3	>0.4
<b>Corona</b>	<0.1	N/A	<0.3	>0.4
<b>Arco</b>	>0.1 y 1.0	>0.75	>0.3	<0.4

**Fuente.** Estado del arte del análisis de gases disueltos en transformadores de potencia. Revista Facultad de Ingeniería.2014. Vol. 23,p.107

**Desventajas:** Únicamente aplicable si existe una cantidad adecuada de gases disueltos en el aceite, algunas combinaciones entre gases no arrojan resultado.<sup>10</sup>

- **Código de Roger**

El método se basa en tres relaciones entre 5 gases, para cada relación se establece cierto rango o límites y de acuerdo a esto se asigna un código, con este código se evalúa el diagnóstico de falla.<sup>11</sup>

$$R1 = \text{Razon 1} = \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \quad (D-5)$$

$$R2 = \text{Razon 2} = \frac{CH_4}{H_2} \quad (D-6)$$

$$R3 = \text{Razon 3} = \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \quad (D-7)$$

---

<sup>10</sup> Ibid., p.107.

<sup>11</sup> Ibid., p.109.

Tabla 3 Tabla de diagnóstico Código de Roger

	Rango de Relaciones	R1	R2	R3
	<0.1	0	1	0
	0.1 - 1	1	0	0
	1-3	1	2	1
	> 3	2	2	2
Caso	Diagnóstico de Falla	Código		
1	Descargas parciales por baja energía	1	1	0
2	Descargas parciales por alta energía	1	1	0
3	Descargas de baja energía, chispeo y arco	1-2	0	1-2
4	Descargas de alta energía arco	1	0	2
5	Falla térmica por Temp. inferiores a 150 °C	0	0	1
6	Falla térmica por Temp. inferiores a 150 y 300 °C	0	2	0
7	Falla térmica por Temp. inferiores a 300 y 700 °C	0	2	1
8	Falla térmica por Temp. superior a 700 °C	0	2	2

**Fuente.** Procedimiento para realizar e interpretar la prueba de cromatografía de gases en transformadores de potencia. Ignacio Reyes Pérez. 2010 p.39

**Desventajas:** las relaciones pueden llevar a resultados que no coincidan con los códigos, se pueden presentar ocurrencia de fallas simultaneas para ello se debe dar mayor a relevancia a las relaciones R1 y R3, el diagnóstico de Roger es cualitativo del tipo de falla ya que no tiene en cuenta la magnitud de las concentraciones de los gases.<sup>12</sup>

- **Triángulo de Duval**

Duval utiliza un triángulo equilátero compuesto por 3 vértices ( %CH<sub>4</sub> ,% C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> y %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) Para determinar el valor de cada vértice propone un sistema de concentraciones en ppm.

$$\%C_2H_2 = 100 \frac{X}{X + Y + Z} \quad (D-8)$$

$$\%CH_4 = 100 \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (D-9)$$

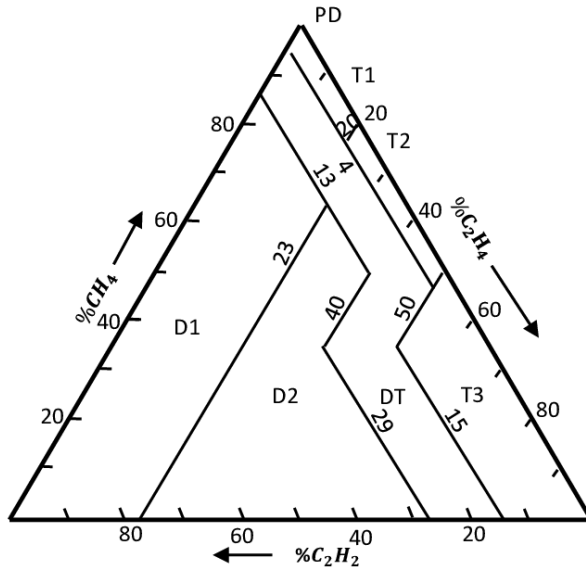
$$\%C_2H_4 = 100 \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (D-10)$$

Donde X es igual a la concentración de ppm de CH<sub>4</sub>, Y concentración de ppm de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> y Z es la concentración en ppm de C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> , y considerando que la suma de las concentraciones de estos tres gases representa un 100 %. Los porcentajes obtenidos se ubican en su respectivo eje luego se debe proyectar una línea perpendicular en cada uno y establecer

<sup>12</sup> REYES PEREZ. Op. Cit.p.38

el punto de intersección entre estas líneas. Este punto se localizará en áreas específicas que darán un diagnóstico de la condición del transformador.<sup>13</sup>

Figura 2 Triangulo de Duval



Fuente. ResearchGate. Osvaldo R. Saavedra. Disponible en [https://www.researchgate.net/figure/Figura-32-Triangulo-de-Duval\\_fig4\\_317640840](https://www.researchgate.net/figure/Figura-32-Triangulo-de-Duval_fig4_317640840)

Tabla 4 Tabla de diagnóstico Triangulo de Duval

	Averías	Valores límite de gases combustible en porcentaje
PD	Descargas parciales	CH4 =98
D1	Descargas de baja energía	C2H4 =23 – C2H2 =13
D2	Descargas de alta energía	C2H4 =23 ;40-C2H2 =13;29
T1	Averías Térmicas T°C > 300°C	CH4 =98 – C2H4=20 -C2H2 =4
T2	Averías Térmicas T°C 300°<T°C<700	C2H4 =20 – C2H4 =50 -C2H2 =4
T3	Averías Térmicas T°C >700	C2H4=50 – C2H2 = 15
DT	Mezcla de averías térmicas y eléctricas	C2H2=13 ;4;29;15 – C2H4 =40,50

Fuente. Estado del arte del análisis de gases disueltos en transformadores de potencia. Revista Facultad de Ingeniería.2014. Vol. 23.p.110

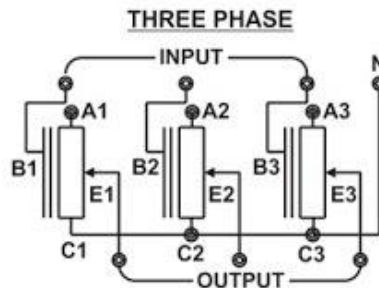
<sup>13</sup> SARRIA ARIAS, GUERRERO BELLO, RIVAS TRUJILLO. Op cit.p.110.



## Anexo E Componentes eléctricos necesarios para implementar el ensayo de calentamiento

**Fuente de suministro Variable AC:** Consiste en una fuente de voltaje alterno variable, En la mayoría de laboratorios se emplea un Variac AC o un generador dependiendo de la potencia del transformador que se vaya a ensayar o de la disponibilidad de equipos del laboratorio.<sup>1</sup>

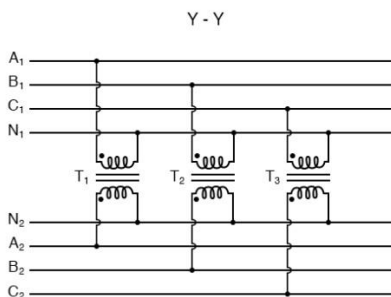
Figura 1 Fuente de suministro variable (Variac).



**Fuente.** Internet. Disponible en <http://www.ravistat.com/variable-transformer-three-phase-close-project-enclosed-type.html>

**Transformador Auxiliar:** Transformador monofásico o trifásico dependiendo del tipo de transformador bajo ensayo, este permite elevar el voltaje de la fuente suministro hasta el voltaje de prueba necesario.<sup>2</sup>

Figura 2 Transformador Auxiliar trifásico



**Fuente.** Internet. Disponible en <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-10/three-phase-transformer-circuits/>

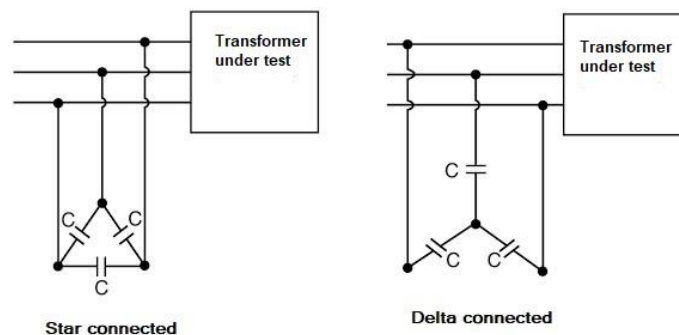
<sup>1</sup> NEW LINE. VARIACS- Transformadores variables de voltaje. [en línea]. Fecha [ 23/03/20]. Disponible en <https://corpnewline.com/variacs.htm>

<sup>2</sup> BALBUZANO, Mauro. Análisis de las pruebas a realizar en transformadores de potencia. Caracas,2011,62p. Trabajo especial de grado (Ingeniero Electricista). Universidad Central de Venezuela. Facultad de ingeniería. Ingeniería Eléctrica.

**Banco de Condensadores:** El uso de bancos de condensadores es opcional para la implementación del ensayo, esto depende de la disponibilidad de los equipos para implementar el ensayo y de la potencia del transformador bajo ensayo. Sin embargo, en la mayoría de los laboratorios se emplean bancos de condensadores con el fin de compensar la potencia reactiva del propio transformador logrando que la fuente únicamente suministre la potencia activa, requiriendo con esto una fuente de menor potencia aparente.

Normalmente la ubicación del banco de condensadores es en el lado de Alta o Baja tensión del transformador auxiliar de acuerdo a sus características.<sup>3</sup>

Figura 3 Banco de Condensadores



**Fuente.** Internet Disponible en <https://www.electrical exams.co/ssc-je-electrical-conventional-paper-solved-2016-17/5/>

**Transformador bajo ensayo:** Transformador al cual va a ser realizada la prueba.

Figura 4 Transformador trifásico



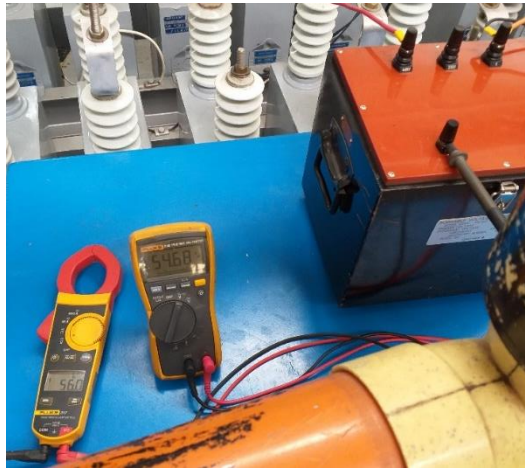
**Fuente.** Internet. Disponible en <https://www.indiamart.com/proddetail/three-phase-transformer-4497502697.html>

<sup>3</sup> ABB BUSINESS AREA POWER TRANSFORMERS. Testing of Power Transformers: Routine Tests, type tests and special tests. Düsseldorf, Pro Print GmbH, 2003. 202p.

## Anexo F Equipos de medida necesarios para implementar el ensayo de calentamiento

El conjunto de equipos de medida como Multímetro, Pinzas amperimétricas y transformadores de potencial, permiten medir las magnitudes de Tensión y Corriente durante el ensayo.

*Figura 1 Equipos de medida Utilizados en el ensayo de Calentamiento*



**Fuente.** El Autor

**Vatímetro trifásico:** Se emplea un vatímetro trifásico de tres elementos para medir las pérdidas en el cobre del transformador bajo ensayo, de acuerdo a *IEC 60076-2 Power Transformers, Part 2 Temperature Rise*, Se considera una elevación final de la temperatura del líquido cuando el transformador sujeto a un voltaje de prueba, la potencia activa medida es igual a las pérdidas totales del transformador.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> INTERNATIONAL STANDARD. IEC. Power Transformers: Part. 2 Temperature rise. Switzerland, IEC, 1993. 21p. IEC 60076-2/1993.

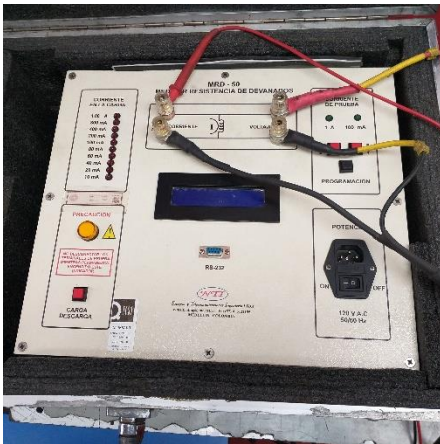
Figura 2 Vatímetros trifásicos



Fuente. El Autor

**Medidor de resistencia Óhmica:** Se emplea para medir la resistencia óhmica de los devanados del transformador tanto en su estado estable (previo al ensayo Resistencia en frío), y después de la estabilización de la temperatura (Etapa 2 del ensayo Resistencia en caliente) <sup>2</sup>

Figura 3 Medidor de resistencia Óhmica



Fuente. El Autor

**Termómetro, Termopares y Conmutador selector giratorio:** Este conjunto permite obtener los valores de temperatura durante el ensayo.

<sup>2</sup> METREL. Resistencia óhmica. Fecha [23/03/2020]. Disponible. <https://www.metrel.es/es/shop/HVI/continuity-testers/mi-3250.html>

Figura 4 Termómetro, termopares y conmutador selector giratorio



Fuente. El Autor.

**Cámara Termográfica:** Se utiliza de manera adicional. es empleado para obtener valores de temperatura durante el ensayo y compararlos con los valores obtenidos con los termopares. Además, sirve para verificar puntos calientes en las conexiones y verificar posibles anomalías presentadas durante el ensayo.<sup>3</sup>

Figura 5 Cámara Termográfica



Fuente. Fluke. Tres formas de realizar inspecciones térmicas. Disponible en <https://www.fluke-infrared.com/es-la/tres-formas-de-realizar-inspecciones-termicas?lcid=9dabe367-ad07-e811-80c8-00155d027404>

<sup>3</sup> FLUKE. Tres Formas de realizar inspecciones térmicas. Fecha [ 23/03/20] .Disponible. <https://www.fluke-infrared.com/es-la/tres-formas-de-realizar-inspecciones-termicas?lcid=9dabe367-ad07-e811-80c8-00155d027404>

## Anexo G Elementos necesarios para implementar el ensayo de calentamiento

**Computador portátil y cámara fotográfica:** Se emplea para registrar los datos del ensayo.

*Figura 1 Computador y cámara fotográfica*



**Cronometro:** Se emplea para cronometrar el tiempo transcurrido después del corte para efectuar la medida de la resistencia en caliente.

*Figura 2 Cronometro*



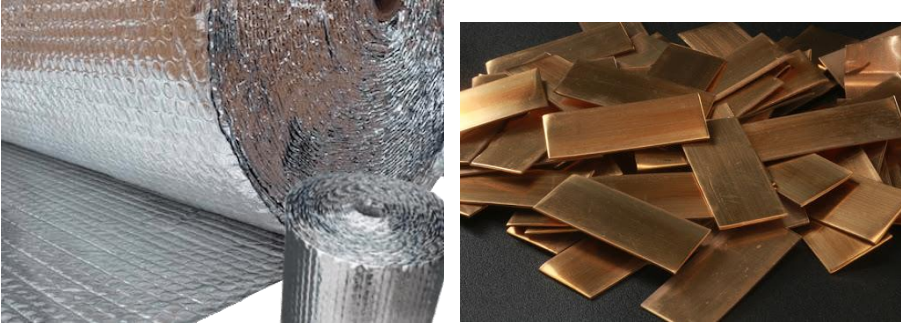
**Papel aislante térmico y placas metálicas:** De acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 316, el termopar para efectuar la medida de temperatura cuando sea aplicado a una superficie se debe fijar con una cinta o laminilla de cobre de 25 mm x 25 mm y mantenerse ajustada y firme, a su vez el termopar debe estar aislado térmicamente del medio circundante<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Transformadores método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en liquido refrigerante. Bogotá. ICONTEC. 1998. 6p.NTC 316



*Figura 3 Papel aislante y laminillas de cobre*



## **Anexo H Recomendaciones para el procedimiento de prueba para cada fase del ensayo**

### **1. Consideraciones generales**

Los parámetros del transformador que se deben obtener son:

- ✓ Tipo de transformador (monofásico o trifásico)
  - ✓ Potencia [ kVA]
  - ✓ Voltaje nominal del devanado de baja y alta tensión
  - ✓ Corriente nominal de alta y baja tensión
  - ✓ Impedancia de cortocircuito en porcentaje
  - ✓ Tipo de refrigeración o etapa (ONAN, ONAF, OFAN, OFAF)
- La resistencia de los devanados debe ser medida con el mismo equipo para las dos etapas<sup>1</sup> y se debe realizar en todos los devanados del transformador de acuerdo a la NTC 375.<sup>2</sup>
  - Para realizar el ensayo el transformador debe estar completamente ensamblado y lleno de líquido.<sup>3</sup>
  - Se debe procurar que el espacio donde se realice el ensayo este en lo posible libre de ráfagas de viento.
  - Durante el ensayo el transformador debe estar equipado con todos sus dispositivos de protección.
  - Las pérdidas en el devanado se deben medir en la combinación de conexiones y taps que generen la mayor elevación de temperatura en los devanados.<sup>4</sup>
  - Las pérdidas se deben convertir a la temperatura de referencia, de acuerdo a IEC 60076-2 75° C para transformadores inmersos en aceite y de acuerdo a IEEE C.57.12.90 y NTC 316, se deben convertir a la temperatura igual a la elevación promedio de los devanados nominal más 20 °C (85°C).
  - Las pérdidas con carga y vacío se deben medir de acuerdo a la NTC 1005 y NTC 1031 respectivamente. <sup>5</sup>

---

<sup>1</sup> AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. IEEE. Standard Test Code for Liquid- Immersed Distribution Power, And Regulating Transformers. New York, ANSI, 2015. 61p. IEEE Std C.57.12.90-2015

<sup>2</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Transformadores método de ensayo para determinar el calentamiento para transformadores sumergidos en liquido refrigerante. Bogotá. ICONTEC. 1998. 2p. NTC 316.

<sup>3</sup> Ibid., p.58

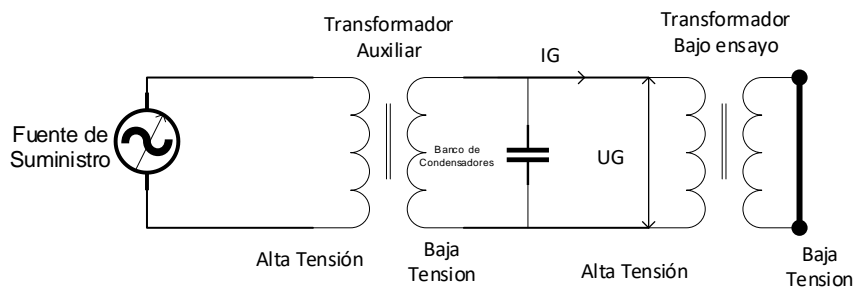
<sup>4</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 316, op. cit, p.1

<sup>5</sup> Ibid., p.7



## 2. Consideraciones iniciales

Figura 1 Esquema de prueba, circuito equivalente monofásico



Fuente. El autor

El voltaje de prueba ( $U_G$ ) necesario para realizar el ensayo es similar al empleado para el ensayo de cortocircuito. Para obtener la correcta elevación de temperatura en el aceite se debe inyectar una Corriente de prueba ( $I_G$ ) a frecuencia nominal que incluya las pérdidas totales ( $P_{\text{Pérdidas Totales}} = P_{\text{Perdidas carga}} + P_{\text{Perdidas vacío}}$ ) para simular esta condición se inyecta una corriente ligeramente superior a la nominal<sup>6</sup>, el valor del voltaje de prueba y la corriente de prueba se obtiene de acuerdo a las ecuaciones 4 y 6.

Como se muestra en la figura 1, es necesario en la mayoría de los casos de acuerdo a la disponibilidad de equipos utilizar un transformador auxiliar que permita establecer el valor del voltaje de prueba necesario para el ensayo ( $U_G$ ).

Se debe verificar que el Lado del transformador bajo ensayo que se vaya a realizar el cortocircuito cumpla con las características del transformador auxiliar y no se sobrepase sus valores nominales, de igual forma se debe procurar no sobrepasar los valores nominales de la fuente.

culminado el montaje se deben revisar las conexiones y energizar para detectar anomalías luego verificar que los parámetros necesarios para realizar el ensayo se están cumpliendo y que los equipos de medida están conectados adecuadamente y midiendo las magnitudes correctas para realizar el ensayo.

<sup>6</sup> ABB BUSINESS AREA POWER TRANSFORMERS. Testing of Power Transformers: Routine Tests, type tests and special tests. Düsseldorf, Pro Print GmbH, 2003. 202p

### 3. Etapa 1

- Se deben instalar tres sensores de temperatura, el primero bajo la tapa del transformador 50 mm bajo la superficie del líquido para medir la temperatura superior del Líquido ( Top oil) y otros dos para en la parte superior e inferior de los radiadores , en caso de que no se puedan ubicar los termopares dentro del tanque se deben ubicar sobre la superficie de los radiadores fijados con una cinta o laminilla de cobre de 25 mm \* 25 mm a un tercio o la mitad de cada extremo del banco de radiadores.

Para evitar la afectación de las lecturas, los termopares deben estar debidamente aislados y protegidos de las corrientes de aire o el movimiento de los ventiladores de los radiadores.

- La temperatura ambiente se debe medir mínimo con 3 sensores de temperatura ubicados alrededor del transformador localizados a una altura media del transformador y a una distancia de 1 o 2 m alrededor del transformador.<sup>7</sup>
- El conjunto de los termopares, el termómetro y el conmutador selector giratorio permitirá obtener los valores de temperatura durante el ensayo, estas se deben registrar de forma manual a través de un computador portátil mediante una hoja de cálculo.
- De acuerdo a IEC 60076-2, Se considera que el aceite estabilizo cuando la tasa de cambio de la elevación de temperatura de Top oil (bajo la tapa) ha caído por debajo de 1° K por hora y se ha mantenido allí por un periodo de 3 horas.<sup>8</sup>

Si se toman valores de lecturas discretas en intervalos regulares de tiempo. el valor promedio de las lecturas durante la última hora es tomado para el resultado del ensayo.

Según la NTC 316 o IEEE C.57.12.90, Se considerará una elevación final (Estado estable) cuando la elevación de la temperatura no varié 2,5 % o 1°C, el que sea mayor durante un periodo consecutivo de 3 horas.<sup>9</sup>

---

<sup>7</sup> AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. IEEE Std C.57.12.90-2015, op. cit, p.63

<sup>8</sup> INTERNATIONAL STANDARD.IEC. Power Transformers: Part. 2 Temperature rise. Switzerland, IEC, 1993.21p. IEC 60076-2/1993

<sup>9</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 316, op. cit, p.2

#### 4. Etapa 2

- Se debe realizar el procedimiento previamente y asignar tareas a los encargados de realizar la maniobra con el fin de minimizar los tiempos, los encargados deben dejar las herramientas necesarias, los cables y los equipos de tal forma que tengan un rápido acceso a ellas.
- Para determinar el valor de la resistencia, se debe graficar en un papel coordenado los valores de resistencia tiempo y extrapolar hasta el momento del corte ( $t=0$ )<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> Ibid., p.5

## 5. Análisis de datos

### Elevación del Líquido

La elevación de temperatura del líquido (sin corrección por altitud) a pérdidas totales se determina con la ecuación 2.

La temperatura promedio del líquido a corriente nominal de acuerdo al estándar aplicado se determina con la ecuación:

- A. IEC 60076-2 Ecuación 11.
  
- B. NTC 316 Ecuación 12.
  
- C. ANSI IEEE C.57.12.90 Ecuación 12.

La corrección por altitud para el líquido se aplica **Únicamente** cuando el estándar aplicado sea NTC 316 o ANSI IEEE C.57.12.90 de acuerdo a las ecuaciones 17 <sup>11</sup>.

Cuando el estándar aplicado sea IEC **No** se aplicará corrección por altitud para la elevación del líquido.<sup>12</sup>

### Elevación del devanado

La elevación del devanado se debe calcular tanto para el devanado de Alta Tensión como el de Baja Tensión.

La Temperatura promedio de los devanados se determina con la ecuación 14, se debe tener en cuenta el material del devanado (cobre o aluminio).

La elevación promedio de los devanados de acuerdo al estándar aplicado se determina con la ecuación.

- A. IEC 60076-2 Ecuación 13.

---

<sup>11</sup> AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. IEEE Std C.57.12.90-2015, op. cit, p.67

<sup>12</sup> INTERNATIONAL STANDARD.IEC 60076-2. Op. cit. p.15

B. NTC 316 Ecuación 15 o 16.

C. ANSI IEEE C.57.12.90 Ecuación 15 o 16.

Para el Caso "B" o "C" Dependerá del método seleccionado, si *método de la elevación superior del líquido (Ecuación 16)* o *método de la elevación promedio del líquido (Ecuación 17)*.

La corrección por altitud para el devanado *Únicamente* se aplicará en el caso que el estándar sea IEC 60076-2 y se aplicará de acuerdo al siguiente criterio:

*"Para un transformador enfriado naturalmente (.AN), el límite de la elevación promedio del **devanado** debe ser reducida 1°K por cada intervalo de 400m que el sitio de instalación exceda los 1000m "*

*"Para un transformador enfriado con aire forzado (.AF), el límite de la elevación promedio del **devanado** debe ser reducida 1°K por cada intervalo de 250m"<sup>13</sup>.*

### Hot Spot

El Hot spot se debe calcular tanto para el devanado de Alta Tensión como el de Baja Tensión

El gradiente se determinará de acuerdo a la ecuación 3

El Hot spot se determina de acuerdo a la ecuación 1

---

<sup>13</sup> Ibid., p.15

## Anexo I componentes eléctricos empleados para implementar el ensayo de calentamiento en el laboratorio de ensayos electromecánicos

- **Fuente de Alimentación:**

El laboratorio de ensayos electromecánicos cuenta con un Variac trifásico 0-230 VAC, 60 A, 22 kVA para implementar el ensayo.

*Figura 1 Fuente variable AC, disponible en el laboratorio de ensayos electromecánicos*



**Fuente.** El Autor

- **Transformador Auxiliar**

Para la implementación del ensayo usando los transformadores trifásicos disponibles. Si el corto circuito es realizado en el devanado de alta tensión y se suministra por baja tensión el uso del transformador auxiliar no es necesario, sin embargo, si se observa la capacidad nominal de la fuente (Variac), la cual es de 60 A y la corriente nominal del devanado de baja tensión en los dos casos (300 para el transformador de 112,5 kVA y 200 A para el transformador de 75 kVA), se observa que el valor nominal de la fuente se supera. Razón por lo cual no es posible realizar el ensayo realizando el cortocircuito en el devanado de alta tensión.

De acuerdo a esto se debe realizar el corto circuito en el devanado de baja tensión y suministrar por alta tensión, para ello se debe emplear el uso de un transformador auxiliar que permita elevar el voltaje de salida de la fuente a la tensión de prueba necesaria para el ensayo.

El transformador auxiliar debe permitir realizar el ensayo a estos dos transformadores inicialmente, se debe tener en cuenta que los dos se encuentran a diferentes niveles de tensión los cuales niveles son típicos en redes de distribución, a partir de esto con la fuente de suministro variable, posteriormente se podrá realizar el ensayo a otros transformadores de características similares.

De acuerdo a los transformadores disponibles en el laboratorio de ensayos electromecánicos y sus características se evaluará cuáles deben ser las características del transformador auxiliar para implementar el ensayo.

**a) Transformador disponible reductor trifásico de 112,5 kVA**

*Tabla 1 Características del transformador bajo ensayo disponible de 112,5 kVA*

<b>Transformador bajo Ensayo</b>	
<b>Tipo</b>	Trifásico
<b>Potencia [kVA]</b>	112,5
<b>V. Alta Tensión [kV]</b>	13,2
<b>V. Baja Tensión [V]</b>	220
<b>Zcc [%]</b>	N/A
<b>I Alta Tensión [A]</b>	4,32
<b>I Baja Tensión [A]</b>	300
<b>Etapa</b>	ONAN

Fuente. El autor

La placa de características del transformador no posee la información disponible sobre la tensión de cortocircuito.

El estándar NTC 819 <sup>1</sup> establece los valores máximos declarados admisibles de corriente sin carga, pérdidas en vacío y con carga y tensión de cortocircuito. De acuerdo a dos criterios:

- a) Desde 15 kVA hasta 3750 kVA con tensión serie Alta Tensión menor o igual a 15 kV y tensión serie Baja Tensión menor o igual a 1,2 kV se aplicarán los valores de la tabla 1.
- b) Desde 75 kVA hasta 10000 kVA con tensión serie Alta Tensión mayor que 15kV y menor o igual a 46 kV y tensión serie Baja Tensión menor o igual a 15 kV, se aplicaran los valores de la tabla 2.

---

<sup>1</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Electrotecnia Transformadores trifásicos autorefrigerados y sumergidos en líquido. Corriente sin carga, pérdidas y tensión de cortocircuito. Bogotá. ICONTEC. 1995. 1p.NTC 819

De acuerdo a las características del transformador se deben aplicar los valores de la tabla 1.

Tabla 2 Valores máximos admisibles para el transformador disponible de prueba de 112, 5 kVA

Valores máximos declarados permisibles de corrientes sin carga ( $I_0$ ), Perdidas sin carga ( $P_0$ ), Perdidas con carga ( $P_c$ ) y Tensión de cortocircuito a 85 °C ( $U_z$ )				
Potencia kVA	$I_0$ % de $I_n$	$P_0$ W	PL W	$U_z$ (%)
112,5	2,6	365	1540	3,5

**Fuente.** NTC 819 Electrotecnia. Transformadores trifásicos auto refrigerados y sumergidos en líquido. Corriente sin carga, perdidas y tensión de cortocircuito

Para determinar el valor de la tensión y corriente de prueba que incluya las pérdidas totales se debe calcular el factor k:

$$k = \sqrt{\frac{P_L + P_o}{P_L}} \quad (I-1)$$

$P_L$ : Perdidas con carga a corriente nominal y temp. de referencia (85 °C) en kW.

$P_o$ : Perdidas en vacio a voltaje nominal y temp. de referencia (20°C) en kW.

$k$ : Factor k.

$$k = \sqrt{\frac{1540 + 365}{1540}} = 1.11 \quad (I-1)$$

La corriente de prueba es igual a:

$$I_G = I_r * k \quad (I-2)$$

$I_r$ : Corriente nominal del transformador en A

$$I_G = 1,11 * 4,32 = 4.79 A \quad (I.2)$$

El voltaje de prueba es igual a:

$$U_G = k * U_{sc} \quad (I-3)$$

$U_G$ : Fuente de suministro Necesaria en V.

$U_{sc}$ : Voltaje de cortocircuito en V.

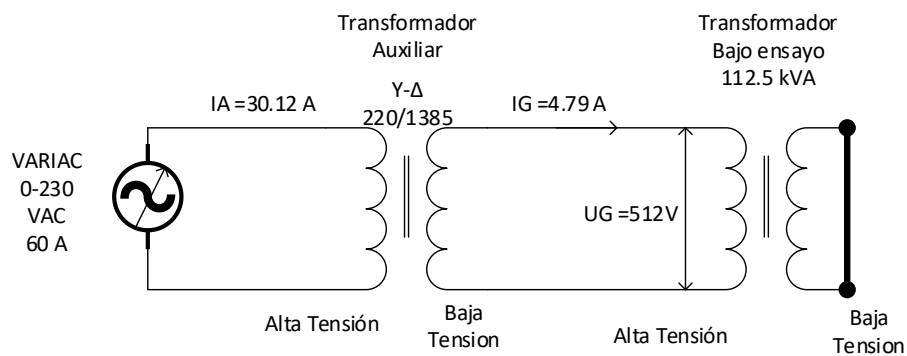


$$U_{sc} = 13200V * \left(\frac{3,5\%}{100\%}\right) = 462 V$$

$$U_G = 1,11 * 462 V = 512,82 V \quad (I-3)$$

De acuerdo a lo anterior para implementar el ensayo en el transformador disponible de 112,5 kVA se deben establecer las condiciones mostradas en la figura 2

Figura 2 Circuito equivalente monofásico Transformador disponible 112,5 kVA



Fuente. El autor

## b) Transformador reductor trifásico disponible de 75 kVA

Tabla 3 Características del transformador bajo ensayo disponible de 75 kVA

Transformador bajo Ensayo	
Tipo	Trifásico
Potencia [kVA]	75
V. Alta Tensión [kV]	34,5
V. Baja Tensión [V]	220
Zcc [%]	5,33
I Alta Tensión [A]	1,25
I Baja Tensión [A]	200
Etapa	ONAN

Fuente. El autor

Teniendo en cuenta los valores de la NTC 819, de acuerdo a las características del transformador se deben aplicar los valores de la tabla 2.

Tabla 4 Valores máximos admisibles para el transformador disponible de prueba de 75 kVA

Valores máximos declarados permisibles de corrientes sin carga ( $I_0$ ), Perdidas sin carga ( $P_0$ ), Perdidas con carga ( $P_c$ ) y Tensión de cortocircuito a 85 °C ( $U_z$ )				
Potencia kVA	$I_0$ % de $I_n$	$P_0$ W	$P_c$ W	$U_z$ (%)
75	3,5	390	1370	6

**Fuente.** NTC 819 Electrotecnia. Transformadores trifásicos autorefrigerados y sumergidos en líquido. Corriente sin carga, perdidas y tensión de cortocircuito

Establecidos los valores de las perdidas máximas que puede presentar un transformador de estas características se debe calcular el valor de la corriente y el voltaje de prueba necesario para implementar el ensayo.

$$k = \sqrt{\frac{1370 + 390}{1370}} = 1,13 \quad (I-1)$$

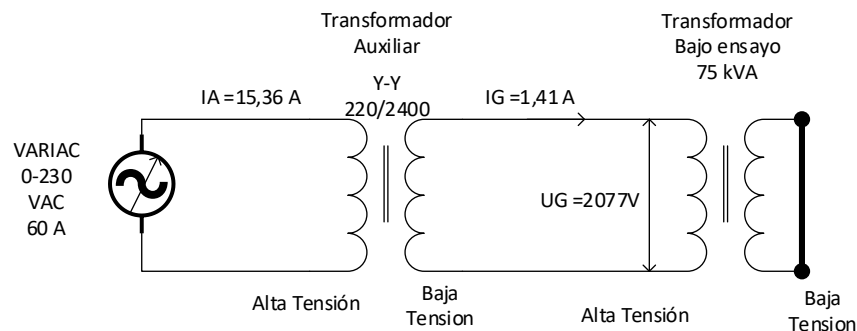
$$I_G = 1,13 * 1,25 = 1,41 \text{ A} \quad (I-2)$$

$$U_{sc} = 34500 \text{ V} * \left(\frac{5,33\%}{100\%}\right) = 1838,85 \text{ V}$$

$$U_G = 1,13 * 1838,85 \text{ V} = 2077 \text{ V} \quad (I-3)$$

De acuerdo a lo anterior para implementar el ensayo en el transformador disponible de 75 kVA se deben establecer las condiciones mostradas en la figura 3

Figura 3 Circuito equivalente monofásico Transformador disponible 75 kVA



**Fuente.** El autor

Para implementar el ensayo se requiere un transformador auxiliar que permita alcanzar el voltaje de prueba durante el ensayo, se selecciona un transformador de 220/2400 V el cual permite cambiar el grupo de conexión del devanado de baja tensión, permitiendo para el nivel de tensión de 13,8 kV utilizar la conexión Y- $\Delta$  y para el nivel de tensión de 34,5 kV utilizar la conexión Y-Y.

Con la adquisición del transformador auxiliar, se podrá implementar el ensayo a los transformadores disponibles en el laboratorio de ensayos electromecánicos con el uso del variac se podrá variar en un amplio rango el valor de la tensión con lo cual se espera realizar el ensayo a transformadores de distribución de hasta 225 kVA

A continuación, se evaluará la posibilidad de ensayar un transformador de 150 kVA, 34,5 kV utilizando un transformador auxiliar de las características mencionadas de la tabla 5.

Tabla 5 Características necesarias del transformador bajo ensayo

<b>Conexión</b>	Y-Y	Y- $\Delta$
<b>Relación de tensión V.</b>	220/2440	220/1385
<b>Potencia kVA</b>	30	
<b>In Alta Tensión A</b>	78,72	
<b>In Baja Tensión A</b>	7,21	12,50
<b>Relación de transformación</b>	10,9	6,29

Fuente. El autor.

### c) Transformador de 150 kVA, 34,5 kV alcance establecido

Tabla 6 Características del transformador de 150 kVA, 34,5 alcance establecido

<b>Transformador bajo Ensayo</b>	
<b>Tipo</b>	Trifásico
<b>Potencia kVA</b>	150
<b>V. Alta Tensión kV</b>	34,5
<b>V. Baja Tensión V</b>	220
<b>Zcc [%]</b>	6%
<b>I Alta Tensión A</b>	2,5
<b>I Baja Tensión A</b>	394
<b>Etapa</b>	ONAN

Fuente. El autor

De acuerdo a la NTC 819 Tabla 2.

Tabla 7 Valores máximos admisibles para el transformador planteado de 150 kVA

Valores máximos declarados permisibles de corrientes sin carga ( $I_0$ ), Perdidas sin carga ( $P_0$ ), Perdidas con carga ( $P_c$ ) y Tensión de cortocircuito a 85 °C ( $U_z$ )				
Potencia kVA	$I_0$ % de $I_n$	$P_0$ W	$P_c$ W	$U_z$ (%)
150	2,5	610	2400	6

Fuente. El autor

De igual manera que en los casos anteriores se debe establecer el factor k para establecer el valor de la corriente y voltaje de prueba para implementar el ensayo en transformadores de estas características.

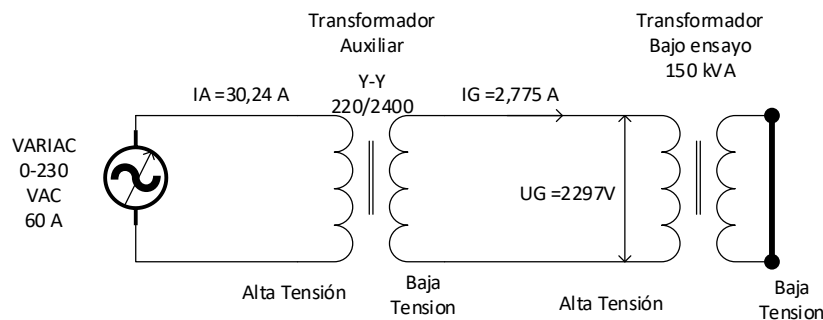
$$k = \sqrt{\frac{610 + 2400}{2400}} = 1,11 \quad (I-1)$$

$$I_G = 1,11 * 2,5 = 2,775 \text{ A} \quad (I-2)$$

$$U_{sc} = 34500 \text{ V} * \left(\frac{6\%}{100\%}\right) = 2070 \text{ V}$$

$$U_G = 1.11 * 2070 \text{ V} = 2297 \text{ V} \quad (I-3)$$

Figura 4 Circuito equivalente monofásico Transformador planteado 150 kVA



Fuente. El autor

Como se observa, *no* se sobrepasan los valores nominales en la fuente y el transformador auxiliar, por lo tanto, es posible realizar el ensayo a transformadores de esta capacidad con este transformador auxiliar.

La potencia del transformador auxiliar se estableció en 30 kVA de acuerdo a cotizaciones con distintos fabricantes de transformadores a nivel nacional, los cuales manifestaron que para un transformador trifásico tipo seco la potencia mínima del transformador para su fabricación es de 30 kVA. Sin embargo, de acuerdo a Testing of Power Transformers<sup>2</sup> la potencia aparente requerida para este ensayo es igual a

<sup>2</sup> ABB BUSINESS AREA POWER TRANSFORMERS. Testing of Power Transformers: Routine Tests, type tests and special tests. Düsseldorf, Pro Print GmbH, 2003. 202p

$$S_G = k^2 * S_r * \left(\frac{Z_{cc}}{100}\right) \text{ en kVA} \quad (I-4)$$

$S_r$  : Potencia nominal del transformador

Para el transformador reductor trifásico de 112,5 kVA

$$S_G = 1,11 * 112,5 * \left(\frac{3,5}{100}\right) = 4,37 \text{ kVA} \quad (I-4)$$

Para el transformador reductor trifásico de 75 kVA

$$S_G = 1,13 * 75 * \left(\frac{5,33}{100}\right) = 4,51 \text{ kVA} \quad (I-4)$$

La potencia del transformador auxiliar de 30 kVA es más que suficiente para cualquiera de los dos casos. Sin embargo, este tipo de transformadores no es común su fabricación por lo cual no todos los fabricantes a nivel nacional se ofrecen a fabricarlo y esto a su vez eleva su costo.

En el Anexo J se encuentra la cotización formal ofrecida por Nacional de Transformadores S.A.S Tesla.

- **Transformador bajo ensayo:**

Inicialmente el ensayo se realizará a los transformadores disponibles en el laboratorio actualmente el laboratorio de ensayos electromecánicos cuenta con tres transformadores de distribución, para realizar la prueba a continuación se mencionan sus características.

**Características:**

Tabla 8 Transformadores disponibles en el laboratorio de ensayos electromecánicos U.P.TC Duitama

Transformador	Potencia [kVA]	Tensión [kV/V]
trifásico	112,5	13,2 /220
trifásico	75	34,5 /220
Monofásico	15	13,2 /220
trifásico	225	13,8/440

Fuente. El Autor

Figura 5 Transformador bajo ensayo de 112,5 kVA y 75 kVA disponibles en el laboratorio de ensayos electromecánicos



Fuente. El Autor

- **Banco de Condensadores**

Como se puede observar en la figura 3 y 4, los valores tanto para la fuente como para el transformador auxiliar en el devanado de alta y baja tensión se encuentran por debajo de sus valores nominales en un rango amplio, sin embargo, si se quieren reducir los valores de corriente esto se puede lograr compensando la potencia reactiva entregada por la fuente, empleando un banco de condensadores.

### **Requerimiento de potencia reactiva**

El requerimiento de potencia reactiva en este caso podría establecerse como fijo e instalar un capacitor de acuerdo a la potencia reactiva a compensar para cada caso, sin embargo, debido a la cantidad de condensadores que sería necesario adquirir y su costo es poco práctico, de acuerdo a esto se dimensionará con un requerimiento de potencia reactiva variable en la cual el capacitor sea variable a través de un arreglo de capacitores en paralelo los cuales se seleccionará su cantidad, de acuerdo a los requerimientos de potencia reactiva para cada caso.

### **Dimensionamiento del banco de condensadores**

Para dimensionar el banco de condensadores se debe establecer la potencia reactiva a compensar para esto se emplea la siguiente ecuación.

$$Q_n \cong S_n * \left( \frac{Z_{cc}}{100} \right) \quad (I - 5)$$

Donde:

*S<sub>n</sub>* : Potencia nominal del transformador en kVA

*Z<sub>cc</sub>* : Impedancia de cortocircuito en %

$$Q_n \cong 150 * \left( \frac{6}{100} \right) = 9 \text{ kVA} \quad (I-5)$$

Establecido este valor se debe seleccionar los condensadores, estos deben ser de preferencia comerciales para facilitar su opción de compra. Para este caso de acuerdo a un catálogo de la empresa WEG<sup>3</sup>. Se realiza la selección de los condensadores disponibles en el mercado, los condensadores se deben seleccionar de acuerdo a dos parámetros principalmente, tensión nominal y potencia reactiva nominal.

---

<sup>3</sup> WEG. Corrección del factor de potencia. [en línea]. Fecha [ 28/03/2020] Disponible en [https://www.weg.net/catalog/weg/GD/es/Controls/Condensadores/Correcci%C3%B3n-del-Factor-de-Potencia/c/GLOBAL\\_WDC\\_CTL\\_PF\\_PFC](https://www.weg.net/catalog/weg/GD/es/Controls/Condensadores/Correcci%C3%B3n-del-Factor-de-Potencia/c/GLOBAL_WDC_CTL_PF_PFC)

Teniendo en cuenta que la tensión en el devanado de baja tensión en el transformador auxiliar va a variar en un mayor rango, se decide insertar el banco de condensadores en el devanado de alta tensión del transformador auxiliar y seleccionar condensadores a 220 V de tensión nominal.

Figura 6 Diagrama unifilar para el ensayo de calentamiento para un transformador de 150 kVA empleando Banco de condensadores

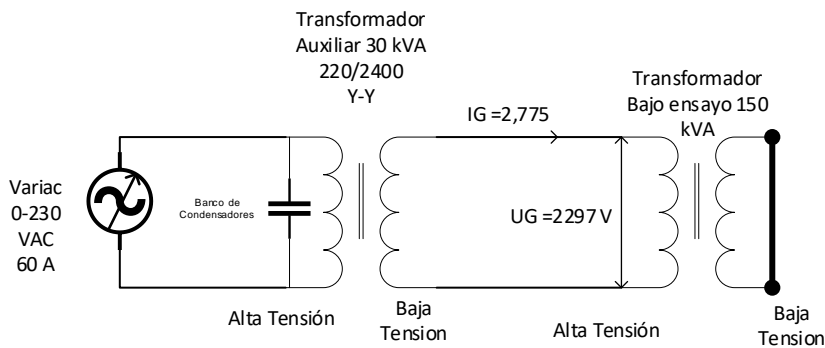
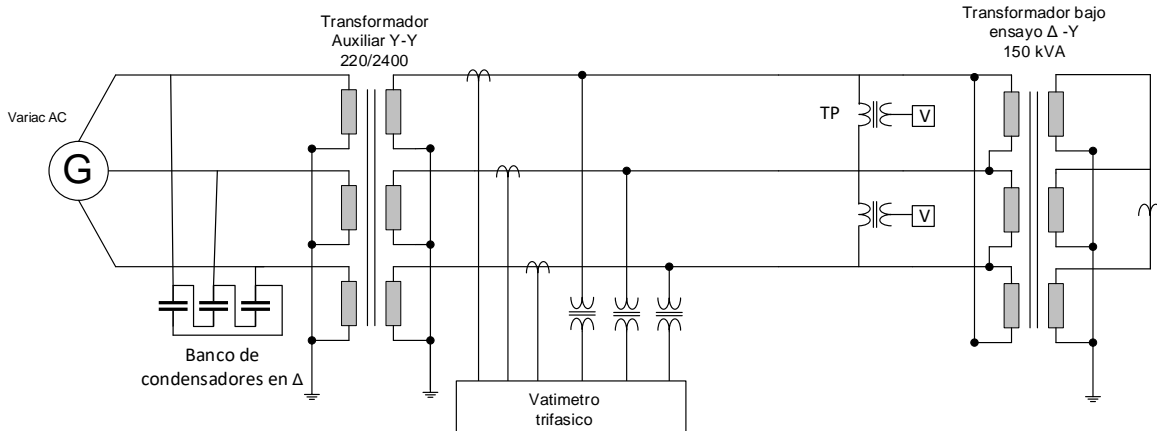


Figura 7 Diagrama trifilar para el ensayo de calentamiento para un transformador de 150 kVA empleando Banco de condensadores



Fuente. El Autor

WEG ofrece capacitores monofásicos y trifásicos, en el caso de las unidades capacitivas trifásicas UWCT, son formadas por tres células capacitivas, conectadas en triángulo y armadas dentro de una botella de aluminio<sup>4</sup> en potencias de 0,37 a 20 kVAR en tensiones de 208 a 240 V.

<sup>4</sup> PROSEA. Unidades capacitivas trifásicas UWCT. [en línea]. Fecha [ 28/03/2020] Disponible en <https://www.prosea.com.mx/Productos/banco-de-capacitores-unidad-capacitiva-trifasica>

Las unidades capacitivas monofásicas UWC, están disponibles en potencias de 0,62 a 6,67 kVAR en tensiones de 208 o 240 V.

La potencia reactiva que puede suministrar cada unidad capacitiva monofásica está en función de la tensión de alimentación y la tensión nominal, para este caso la tensión nominal es constante y es 220 V.

Las unidades capacitivas trifásicas UWCT, están conectadas en triángulo de acuerdo a esto la tensión de alimentación es igual a la tensión de línea. De acuerdo a la figura 6:

$$V_{alimentacion} = 210 V$$

Seleccionando una unidad capacitiva de 2 kVAR

$$Q_{Unidad_{monofasica}} = 2 \text{ kVAR} * \left( \frac{210}{220V} \right)^2 = 1,8223 \frac{\text{kVAR}}{U} \quad (I-7)$$

Por lo tanto, serían necesarias:

$$U_n = \frac{9 \text{ kVAR}}{1,8223 \frac{\text{kVAR}}{U}} = 5 \text{ unidades monofasicas} \quad (I-8)$$

Una unidad trifásica se compone de 3 células capacitivas monofásicas, en ese caso serían necesarias **2 unidades trifásicas de 2 kVAR para este transformador.**

En el anexo K se incluye la hoja de características del condensador seleccionado para el banco de condensadores.



# NACIONAL DE TRANSFORMADORES S.A.S TESLA

OFERTA # V001-331-2019

R126 V1

MOSQUERA, jueves, 29 de agosto de 2019

SEÑORES

UPTC - DUITAMA

Diego Fernando Herrera

Cotizante

3178365843

[Diegofernando.herrera@uptc.edu.co](mailto:Diegofernando.herrera@uptc.edu.co)

Duitama

Agradecemos la confianza depositada en nosotros para la cotización de sus equipos y ponemos a su disposición nuestra propuesta la cual busca cubrir todas sus necesidades técnicas y económicas. En caso de requerir alguna especificación diferente a la presentada, estamos dispuestos a reevaluarla.

## OFERTA TÉCNICA

### Cotización fabricación transformador REDUCTOR TIPO SECO CLASE H

	ÍTEM 1
CAPACIDAD (kVA)	30
TIPO	SECO CLASE H
TENSION PRIMARIA (V)	220/ 127
TENSION SECUNDARIA VACIO (V)	2400/ 1385
FACTOR K	1
CONEXIÓN PRIMARIO	ESTRELLA
CONEXIÓN SECUNDARIO	2400V-ESTRELLA 1385V -
GRUPO DE CONEXIÓN	Yyn0-Dyn5
% REGULACIÓN	+2 -2 * 2,5%
FRECUENCIA (Hz)	60
BIL PRIMARIO /SECUNDARIO (KV)	10/ 20
AUMENTO DE TEMPERATURA °c	125
IMPEDANCIA Uz (%)	6.0
PERDIDAS DEVANADOS REF. A 145 °C(W)	652
PERDIDAS EN EL NUCLEO (W)	260
NIVEL PRESION SONORA LPA (dB)	<45
INSTALACION	<1000 m.s.n.m
REFRIGERACIÓN	ANAN
MATERIAL DE DEVANADOS	Al/ Al
DEVANADO ALTO VOLTAJE (AT)	TIPO GALLETA IMPREGNADO EN BARNIZ DIELECTRICO
DEVANADO BAJO VOLTAJE (BT)	IMPREGNADO AL VACIO
OBSERVACIONES	CONEXIÓN PARA DELTA O ESTRELLA EN EL SECUNDARIO



Nacional de Transformadores S.A.S • TESLA • PBX: (57+1) 893 2308 - Bodega 5



TR- CO177452

• Cra 15 N° 7 -34 Mnz 9 Montana - Mosquera, Cundinamarca, Colombia -site: [www.tesla.com.co](http://www.tesla.com.co)

# NACIONAL DE TRANSFORMADORES S.A.S TESLA

CANTIDAD	1
VALOR UNITARIO	\$ 10,000,000 + IVA
VALOR TOTAL	\$ 10,000,000 + IVA

TENGA EN CUENTA QUE ESTA COTIZACIÓN SE REALIZA SIN NINGÚN ELEMENTO ADICIONAL, POR FAVOR SI TIENE OTRO REQUERIMIENTO COMUNICARLO CON ANTICIPACIÓN.

## ACCESORIOS SUMINISTRADOS CON EL TRANSFORMADOR

- Placa de características
- Dispositivo para levantar o izar
- Puesta a tierra
- Aislador alta tension
- Bases para ruedas orientables
- Puentes atornillables para cambio de taps en bornes
- Terminales de alta tensión DELTA
- Terminales de alta tensión ESTRELLA
- Bornes para cambio de taps
- Terminales de baja tensión
- Puesta a tierra del terminal neutro
- Ruedas planas orientables

## ACCESORIOS OPCIONALES A SOLICITUD

- Monitor de temperatura
- Sondass PT 100 con caja de conexiones
- Descargador de sobretensiones "DPS" - Media Tensión
- Descargador de sobretensiones "DPS" - Baja Tensión
- Ventiladores

**NO INCLUIDO**  
**NO INCLUIDO**  
**NO INCLUIDO**  
**NO INCLUIDO**  
**NO INCLUIDO**



# NACIONAL DE TRANSFORMADORES

## PRUEBAS

A todos nuestros transformadores se les realizan las pruebas de rutina, según las Normas Técnicas Colombianas NTC.

PRUEBAS DE RUTINA SEGÚN NTC (Efectuadas en fábrica. Pueden ser presenciadas por el cliente o su representante previa solicitud)
Medición de la resistencia de los devanados
Medición de la relación de transformación en todas las fases en todas las posiciones del conmutador
Medición de la tensión de cortocircuito
Medición de las pérdidas con carga
Comprobación del grupo vectorial
Medición de las pérdidas y corriente sin carga (en vacío)
Ensayo de tensión aplicada
Ensayo de tensión inducida
Medición de resistencia de aislamiento

PRUEBAS ESPECIALES (A Solicitud del cliente, serán cotizadas por separado sujetas a tarifas y disponibilidad de los laboratorios seleccionados)
Impulso
Calentamiento
Sobrecarga

### **ACLARACIÓN**

Los transformadores se cotizan de acuerdo a nuestra interpretación de las especificaciones y/o requerimientos suministrados por el cliente. Sin embargo, es su responsabilidad revisar que lo cotizado se ajuste exactamente a sus necesidades.

# TESLA

**DESCRIPCIÓN GRADO DE PROTECCIÓN CELDA**

**GRADO PROTECCION IP 0**



## CONDICIONES COMERCIALES

La propuesta comercial es exclusivamente para las cantidades y condiciones aquí expresadas.

### • PRECIOS

Cotizado en Pesos Colombianos

### • Forma de Pago

**50% anticipo y 50% para su despacho** (Si el pago se hace con cheque, el despacho y fabricación se autoriza cuando el cheque haga canje)

### • IVA

Vigente al facturar, no incluido dentro de nuestros precios.

### • Intereses

En caso de incumplimiento en los pagos, se cobrará el interés de mora máximo permitido por la ley.

### • Pólizas

Si requiere póliza de anticipo, cumplimiento y calidad, tendrá un costo adicional. Qué debe ser asumido por el cliente.

### • Garantía

Tiempo: **Doce meses (12)**

El tiempo de garantía es contado a partir de la entrega del equipo, en condiciones normales de servicio. Para garantizar la calidad del producto marca TESLA, se deben seguir las especificaciones encontradas en nuestra carta de garantía y, en el manual de transporte mantenimiento y operación, entregado con el equipo.

### • Tiempo de Entrega

Tiempo **Cuarenta y Cinco días (45)**

El tiempo de entrega es contado a partir del día hábil siguiente de la recepción de la orden de compra y pago de anticipo del 50%.

### • Sitio de Entrega

Los transformadores se entregan Puesto en obra sobre plataforma de camión en la ciudad de **Duitama** . El descargue será por cuenta del Cliente, el cual se debe realizar utilizando un montacargas.



# NACIONAL DE TRANSFORMADORES S.A.S TESLA

## • Despachos

Se programaran el día hábil siguiente a la terminación del proceso de fabricación, previa confirmación del pago.

## • Transporte

**Para fuera de Bogotá:** Adicional al tiempo de fabricación. Tres (3) días después de realizado el pago final. (Tiempo aproximado por estado de carreteras, orden público, despachos antes de festivos, etc.).

**Para Bogotá:** Adicional al tiempo de fabricación. Se realizan despachos los días lunes y miércoles en horario de 8:00 a 5:00 pm. Como rige en nuestra póliza de transporte.

Si el cliente retira el equipo de fábrica, debe enviar una carta de autorización con los datos de la persona que retira el transformador.

## • Bodegaje

Una vez realizado el anuncio de terminación de fabricación del equipo, se almacenará sin ningún costo en nuestra bodega por un tiempo de 2 semanas. Vencido este plazo se iniciará el cobro de bodegaje con un costo por mes o fracción de \$50.000 + IVA por metro cuadrado y deberá ser cancelado previamente al despacho del equipo.

## • Validez de la Oferta

QUINCE días (15)

Cualquier inquietud o sugerencia con gusto la atenderé. En espera de ser favorecidos con su orden.

Cordialmente

**Carolina Martinez**  
**Gerente Comercial**  
3176612957  
ventas@tesla.com.co



Nacional de Transformadores S.A.S • TESLA • PBX: (57+1) 893 2308 - Bodega 5



TR- CO177482

• Cra 15 N° 7 -34 Mnz 9 Montana - Mosquera, Cundinamarca, Colombia -site: [www.tesla.com.co](http://www.tesla.com.co)

# NACIONAL DE TRANSFORMADORES S.A.S TESLA

## Condiciones comerciales para aceptación de orden de compra. V001-331-2019

Las siguientes condiciones establecidas por Nacional de Transformadores S.A.S han sido elaboradas bajo nuestra experiencia de más de 30 años en el mercado de transformadores en Colombia y las cuales sirven como proceso para el conocimiento de compromisos de nuestra negociación.

Estimado cliente favor sírvase en revisar y avalar con su firma de aceptación todos los puntos y precisar lo que considere, ya que estas hacen parte integral de la negociación y al asignar una orden de compra a Nacional de transformadores S.A.S ud como cliente lee y acepta estas condiciones que formalizamos para recibir su orden de compra.

- 1. Alcance de la propuesta:** Nuestra oferta no incluye actividades de instalación y/o supervisión del montaje del
- 2. Documentos:** En caso de adjudicación por favor enviar al Ejecutivo comercial que le atiende: Orden de compra nombrando la referencia de nuestra cotización, Rut, Copia de cedula representante legal, formato R-085 totalmente diligenciado y formato de condiciones comerciales firmado y sellado. También puede escribirnos a tesla@tesla.com.co para formalizar toda su documentación. El flujo y servicio esperado por los clientes se encuentra desarrollado y contemplado en nuestro proceso de calidad para garantizar la satisfacción de nuestros clientes.
- 3. Despachos:** Solo se realizara una vez al destino pactado con el cliente, en caso del cliente no recibir, el cliente acepta cancelar por anticipado todos los sobrecostos generados exonerando a TESLA de todo pago. En caso del cliente no dar solución el transformador retornara a nuestras instalaciones y serán liquidados los sobrecostos del dinero cancelado por el despacho fallido, al cual para la nueva entrega del transformador al cliente tendrá un saldo pendiente con Nacional de
- 4. Especificaciones Técnicas:** Diseños sujetos a exclusividad de nuestro sistema de producción, se contemplan medidas y pesos de acuerdo a nuestros estándares para condiciones especiales favor solicitar una oferta con valores específicos.
- 5. Precios :** Validos por el tiempo indicado y sujetos a cambios sin previo aviso, se mantendrán solo en el caso de que los factores de materia prima se encuentren estables a nuestro juicio en el momento de realizar la negociación y recibir si
- 6. Confirmación de producto:** El cliente una vez asigna la orden de compra entiende y acepta las condiciones comerciales que plantea Nacional de Transformadores S.A.S y enviara firmada y sellada esta cotización para efectos de cumplimiento de términos. (en caso de no enviar este documento firmado y sellado el cliente autoriza a Nacional de Transformadores S.A.S a proceder aceptando los compromisos establecidos en esta oferta).
- 7. Solución de controversias:** El cliente acepta que para todo efecto de revisión de términos se realizara en las instalaciones de Nacional de Transformadores S.A.S en Mosquera Cundinamarca.
- 8. Desistimiento:** El cliente cuenta con 3 días calendarios a partir del reflejo del anticipo en nuestras cuentas para comunicar a Nacional de Transformadores S.A.S que solicita algún cambio o la parada de producción de una orden de compra aceptada por TESLA, entendiéndose que podrá efectuársele un cobro entre el 5% y 20% del valor de la orden de compra si así lo considerase Nacional de Transformadores S.A.S pasado el periodo mencionado de 3 días calendario la penalidad será definida por TESLA entre un 40% a un 100% según lo considere TESLA. No se realiza devoluciones de dinero en su totalidad.
- 9. Fuerza mayor:** El tiempo de entrega descrito en la cotización opera con normalidad para nuestros procesos, sin embargo como Fabricantes estamos expuestos a factores que pueden afectar el tiempo de entrega final al cliente y por el cual podemos suscribirnos a esta condición que ampara en caso de alguna situación que se presentara.
- 10. Garantía:** Al realizar la compra de un transformador TESLA el cliente acepta las recomendaciones e instrucciones del fabricante y se acoge a los procesos de TESLA para la revisión de sus peticiones, quejas, reclamos. Nacional de transformadores S.A.S cuenta con un procedimiento para atender las garantías bajo los estándares de la industria de transformadores en Colombia y atenderá las garantías que resultaren bajo un proceso preliminar de revisión de factores del suceso, el cual se complementa con una revisión en fabrica que será asumida por el cliente si no hubiere causa identificable
- 11. Actualización de protocolos:** Se realizara efectuando pruebas en nuestras instalaciones con cargo adicional al cliente, debido a ser un proceso adicional que depende exclusivamente del avance en la obra del cliente y no incluido dentro de los precios de venta del transformador.
- 12. "MERITO EJECUTIVO:** de conformidad con los anteriores términos cualquier suma que resulte a favor de tesla será facturada al cliente y prestará por este solo hecho y junto con la cotización mérito ejecutivo."
- 13. "El anticipo no será devuelto en ningún caso, conozca nuestras políticas de devolución en anticipo (bonos) en el archivo adjunto"**

---

Carolina Martinez

Gerente Comercial

Tel. 8 93 23 08 Ext 208, Cel: 315-2571030

E-mail: Ventas@tesla.com.co

---

UPTC - DUITAMA

FECHA:



Nacional de Transformadores S.A.S • TESLA • PBX: (57+1) 893 2308 - Bodega 5

TR-CC177452

• Cra 15 N° 7 -34 Mnz 9 Montana - Mosquera, Cundinamarca, Colombia -site: [www.tesla.com.co](http://www.tesla.com.co)



# HOJA DE DATOS

## Condensadores para la Corrección del Factor de Potencia



### Características principales

Referencia	: UCWT
Código del producto	: 10046002
Tensión nominal Ue	: 220V c.a.60Hz
Serie	: D
Potencia reactiva	: 2.0 kVAr
Frecuencia	: 60 Hz

### Datos básicos

Numero de fases	: Trifásica
Serie	: D
Potencia reactiva	: 2.0 kVAr
Frecuencia	: 60 Hz
Tensión nominal Ue	: 220V c.a.60Hz

Tensión de operación	Potencias Reactivas	
	60 Hz	50 Hz
220	2,0	1,7
210	1,8	1,5
127	0,7	0,6

Capacitancia (conexión delta)	: 36.6
Tolerancia de la capacitancia	: $\pm 5\%$
Corriente nominal	: 5,21A
Expectativa de vida	: 150.000 h
Clase de temperatura	: -25/D
Sistema de seguridad	: Film autorregenerativo / Desconexión por sobrepresión
Capacidad de cortocircuito	: 10 kA
Conexión de la resistencia de descarga	: Interno
Resistor de descarga	: Interno
Impregnación	: Resina de poliuretano
Máxima tensión	: 1,3 x Vn
Máximo dv/dt	: <30 V/ $\mu$ s
Máx. corriente (cortos periodos de tiempo)	: 1,3 x In
Máxima corriente de inrush	: <100 x In
Tipo de tapa	: Plástico
Grado de protección	: IP50
Posición de montaje	: Vertical/horizontal
Distancia superior mínima	: 20 mm
Distancia lateral mínima	: 20 mm

### Conexión

Tipo del terminal	: Tornillo
Tipo del tornillo	: M3x2,5 Fresada/Phillips
Calibre de los cables de alimentación	
- IEC Estándar	: 0,5 mm <sup>2</sup> ... 6 mm <sup>2</sup>
- UL Estándar	: No disponible
Par de apriete (terminales)	
- IEC Estándar	: 0,8 N.m ... 1,5 N.m
- UL Estándar	: No disponible
Par de apriete para conexión del capacitor	
- IEC Estándar	: 14 N.m
- UL Estándar	: No disponible

### Condiciones ambientales

Temperatura	
- Operación	: -25°C ... 55°C
- Almacenaje	: No disponible
Maxima temperatura mediana en 24 h	: 45°C
Maxima temperatura mediana en 1 año	: 35°C
Altitud máxima	: 2.000 m

### Dimensiones

Diámetro	: 60mm
Altura	: 156mm
Peso bruto	: 0,594 kg

### Normas

- IEC 60831-1-2
- UL 810

# HOJA DE DATOS

Condensadores para la Corrección del Factor de Potencia



## Certificaciones

- UL/IRAM/S/CE/UL(MX)-NOM

## Notas

1) Image meramente ilustrativa;



## **Anexo L equipos de medida empleados para implementar el ensayo de calentamiento en el laboratorio de ensayos electromecánicos.**

- **Multímetros**

Actualmente el laboratorio de ensayos electromecánicos cuenta con dos multímetros Fluke 179 y 116 disponibles para la implementación del ensayo de calentamiento, sin embargo, se hace necesaria la adquisición de otro multímetro para la implementación del ensayo.

es necesario adquirir un multímetro de precisión principalmente para la medición de la resistencia de los devanados en el instante de corte.

De acuerdo a los equipos disponibles en el laboratorio de ensayos electromecánicos, se debe seleccionar otro de sus mismas características para no tener diferencias entre los datos de un equipo y otro, se debe realizar una comparación entre los dos equipos disponibles y seleccionar la mejor opción.

El equipo que ofrece las mejores características es el Multímetro *digital Fluke 179 de valor eficaz verdadero*, ya que el multímetro digital Fluke 116 está categorizado de acuerdo al fabricante como un equipo compacto. Como anexo M se encuentra la comparación entre los dos equipos características y diferencias

*Figura 1 Multímetro Fluke 179*



**Fuente.** Fluke. Multímetro Digital 179 de valor eficaz verdadero disponible en <https://www.fluke.com/es-co/producto/comprobacion-electrica/multimetros-digitales/fluke-179>

- **Vatímetro Trifásico**

Actualmente el laboratorio de ensayos electromecánicos cuenta con un Analizador de calidad de la energía FLUKE 438 II que será utilizado como Vatímetro para la implementación del ensayo.

Figura 2 Analizador de calidad de la energía Fluke 438 II



**Fuente.** Internet. Disponible en <https://www.amazon.com/-/es/FLUKE-438-ii-Analizador-potencia-Calidad/dp/B01G2EK3T0>

- **Pinzas Amperimétricas**

Para la implementación del ensayo se cuenta con dos pinzas amperimétricas Fluke de 2000 A Fluke 376 y de 400 A Fluke 332

Figura 3 Pinza Amperimétrica Fluke 376



**Fuente.** Internet. Disponible en <https://www.openskycolombia.com/es/equipos-electr%C3%B3nica/266-pinza-amperimetrica-con-sonda-fluke-376.html>

- **Medidor de Resistencia óhmica**

Para la implementación del ensayo se cuenta con un medidor de resistencia óhmica Metrel 3250.

*Figura 4 Medidor de resistencia óhmica Metrel 3250*



**Fuente.** Internet. Disponible en <https://erasmuselectric.com.ec/CMS/index.php/es/marcas-representadas/metrel>

- **Termómetro**

Para la implementación del ensayo el laboratorio cuenta con un Termómetro Digital Fluke 54- II

*Figura 5 Termómetro Digital Fluke 54-II*



**Fuente.** Internet. Disponible en <https://www.cedesa.com.mx/fluke/termometros-digitales/contacto/54-II/>

- **Cámara Termográfica**

Para la implementación del ensayo el laboratorio cuenta con una Cámara Termográfica FLIR E6

*Figura 6 Cámara Termográfica Flir E6*



**Fuente.** Internet. Disponible <https://www.latitudessur.com/camara-termografica-flir-e6-termica-e6xt-maxima-resolucion-1106745638xJM>

- **Termopares:**

El tipo de termopar a utilizar se debe seleccionar de acuerdo al rango de temperatura en que vaya a ser empleado, debido a un mayor rango de temperatura como se observa en la figura 1, para la implementación del ensayo se selecciona el uso de termopares tipo K, para la implementación del ensayo se hace necesario la compra de 12 termopares tipo K de 6 y 10 m.

*Tabla 1 Termopares rango de temperatura*

<b>Tipo</b>	<b>Material + -</b>	<b>Máx. Rango Temp.</b>
<b>J</b>	Acero – Níquel Cobre	0-750° C
<b>K</b>	Níquel Cromo- Níquel Aluminio	-200 – 1250 °C
<b>T</b>	Cobre – Níquel Cobre	-200 -350 °C

**Fuente.** Omega. Termopar Disponible en <https://es.omega.com/prodinfo/termopares.html>

- **Conmutador selector giratorio**

Para obtener los valores de temperatura durante el ensayo es necesario adquirir un conmutador selector giratorio que opera en conjunto con el termómetro y los termopares.

*Figura 7 Conmutador selector giratorio para circuitos de termopar*



**Fuente.** Omega. Conmutador selector giratorios para circuitos de termopar, RTD y termistor. Disponible en [https://es.omega.com/temperature/pdf/OSW\\_SW14.pdf](https://es.omega.com/temperature/pdf/OSW_SW14.pdf)

En el anexo N se encuentra la cotización del conmutador selector giratorio y los termopares tipo K.

[Página principal](#) ▶ [Productos](#) ▶ [Comprobación eléctrica](#) ▶ [Multímetros digitales](#) ▶ [Comparar](#)

[Volver a los productos](#)

## Guía de selección de productos: Multímetros digitales

Utilice nuestra guía de selección de productos para buscar el multímetro digital que mejor se adapte a sus necesidades.



Multímetro digital  
Fluke 179 de valor  
eficaz verdadero

[Compre ahora](#)



Multímetro digital  
Fluke 116

[Compre ahora](#)

Seleccione un prod ▾

### Categoría

Categoría

Aplicación general

Compacto

### Características básicas

Cuentas

6 000

6 000

Lecturas de  
verdadero valor eficaz

CA

CA

Precisión básica de  
tensión CC

0,09 %

0,50 %

Escala automática y  
manual



Dígitos

3,5


3½

### Medidas

Tensión, CA/CC	1000 V	600 V	
Corriente CA/CC	10,0 A	200 $\mu$ A	
Resistencia	50 M $\Omega$	40 M $\Omega$	
Frecuencia	100 kHz	50 kHz	
Capacidad	10.000 $\mu$ F	10.000 $\mu$ F	
Temperatura	+400 °C	+400 °C	
Señal acústica de continuidad	✓	✓	
Comprobación de diodos	✓	✓	
LoZ: baja impedancia de entrada		✓	
Microamperios		✓	
Pantalla			—
gráfico de barras analógico	✓	✓	
Iluminar desde el fondo	✓	✓	
Diagnóstico y datos			—
Min-max grabación	✓	✓	
sostén de lectura	✓	✓	
Auto (tacto) mantener	✓		
Otras características			—
Suavizado	✓		

Estuche sobremoldeado, funda integrada	✓	
Calibración con carcasa cerrada	✓	✓
Batería independiente	✓	✓
Apagado automático	✓	✓
Indicación de batería baja	✓	✓
Rango de temperatura de funcionamiento	-10 °C a +50 °C	-10 °C a +50 °C
Selección automática, voltios CA/CC		✓
Funda extraíble		✓
Garantía y seguridad		—
Garantía	Para toda la vida	3 años
Indicación de tensión peligrosa	✓	✓
EN61010-1 CAT III	1000 V	600 V
EN61010-1 CAT IV	600 V	
Protección IP		IP 42



	<b>COTIZACION</b>	
	F-DC 002	FECHA DE EMISION 2010/05/28
		Version: 02
		PAGINA 1 DE 1



[www.instruelectronic.com](http://www.instruelectronic.com)

[www.chromalox.com](http://www.chromalox.com)

NIT: 830.141.369-8

INSTRU ELECTRONIC COLOMBIA S.A.S.  
Carrera 19 no 82-33 of 203

BOGOTA D.C. COLOMBIA

PBX: 6184734  
Cel: 3184152624

[ventas@instruelectronic.com](mailto:ventas@instruelectronic.com)

<b>CLIENTE/COSTUMER</b>	
<b>U. PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA</b>	
ING :	JUAN CARLOS CASTRO
DPTO:	ING. ELECTROMECANICA
TELEFONO	3102021488
E-MAIL:	<a href="mailto:juan.castrogaleano@uptc.edu.co">juan.castrogaleano@uptc.edu.co</a>

ASUNTO: SELECTOR GIRATORIO Y TERMOPARES.

26/06/2020 13:42

		COTIZACION/QUOTE	687		
Item	Cod	Descripcion/Description			total/Amount
1	9999	TERMOPARES TIPO K DE 10 DE LONGITUD	6	\$ 150,000	\$ 900,000
2	9999	TERMOPARES TIPO DE 6 DE LONGITUD	6	\$ 106,000	\$ 363,000
3	9999	SELECTOR GIRATORIO PARS TERMOPARES OMEGA DE 12 POSICIONES	1	\$ 1,470,000	\$ 1,470,000
<p>NOTA: IMPORTACION BAJO PEDIDO NO SE ACEPTAN DEVOLUCIONES DE MATERIAL, NI CANCELACION DE LA ORDEN DESPUES DE PROCESADA</p>					

Sub-Total \$ 2,733,000

IVA/tax 19% \$ 519,270

**TOTAL Pesos \$ 3,252,270**

item	TIEMPO DE ENTREGA/LEAD TIME
1	8 DIAS
2	8 DIAS
3	5 A 6 SEMANAS

Terminos de pago/payment terms

**CREDITO**

validez de la oferta/valid for

**30 DIAS**

**GLORIA FLOREZ**  
Asesor Comercial

**Mecmesin**  
testing to perfection

## Anexo O procedimiento para el análisis de condición para la interpretación de resultados del análisis cromatográfico en aceite dieléctrico.

El análisis de condición para la interpretación de resultados del cromatograma se realiza en tres etapas:

- A. Primera revisión.
- B. Segunda revisión. Si aplica.
- C. Métodos de interpretación, Si aplica.
- D. Diagnostico

### A. Primera revisión

Calcular el TDCG (Total de gases combustibles), *el cual es la suma de  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$  y  $CO$  en  $\frac{ul}{l}$  (ppm)*

De acuerdo a la tabla 1 de la Norma ANSI IEEE C.57. 104 de 2009, Establecer una condición (C1, C2, C3, C4)

**Condición 1 (C1):** TDCG por debajo de este valor indica que el transformador está operando satisfactoriamente. Cualquier gas combustible que exceda los límites individuales especificados podría ser motivo de investigación adicional.

**Condición 2 (C2):** TDCG dentro de este rango indica un nivel de combustible mayor que el normal. Cualquier gas combustible que exceda los límites individuales deberá ser motivo de investigación. Acciones podrían tomarse para establecer una tendencia, bajo esta condición pueden presentarse fallas

**Condición 3 (C3):** TDCG dentro de este rango indica un alto nivel de descomposición, Cualquier gas combustible que exceda los límites individuales deberá ser motivo de investigación. Acciones inmediatas deben establecerse para establecer una tendencia. Es probable que se presenten fallas

**Condición 4 (C4):** TDCG excediendo este valor indica una excesiva descomposición. La operación continua podría resultar en una falla del transformador, proceda inmediatamente y con precaución.<sup>1</sup>

Comparar individualmente el valor de cada gas combustible, con los límites individuales especificados en la tabla 1 de la Norma ANSI IEEE C.57. 104 de 2009 y respecto a esto establecer una condición.

Si el resultado es Condición 1 se asume un comportamiento normal y se procede al diagnóstico, en el caso de presentarse Condiciones de tipo 2, 3 y 4, podrían presentarse fallas razón por la cual se debe establecer una tendencia.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. IEEE Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed Transformers. New York, ANSI,2008. 10p. IEEE std C.57-104-2008

<sup>2</sup> Ibid., p.7

Para establecer una tendencia se debe determinar la tasa de generación, para ello se debe tomar un remuestreo y calcular la tasa de generación de acuerdo a la ecuación 1 de la Norma ANSI IEEE C.57.104 de 2009. El valor de la primera y segunda muestra es igual al TGDC.

$$R = \frac{(S_T - S_0) * V * 10^{-6}}{T} \quad (O-1)$$

*R : Tasa de generacion en litros /Dia*

*S<sub>0</sub> : Es la primera muestra en ppm*

*S<sub>T</sub>: Es la segunda muestra en ppm*

*V : Es el volumen del tanque*

*T : Es el tiempo en dias*

De acuerdo a la Tasa de generación, la condición evaluada y la Tabla 3 de la Norma ANSI IEEE C.57.104, se establece el intervalo en que deben tomarse las muestras y el procedimiento a ejecutar para cada caso.<sup>3</sup>

## **B. Segunda revisión**

Para establecer posibles tipos de falla, se puede utilizar el método del gas clave, en la Figura 3 de la norma ANSI IEEE C.57.104 de 2009, se pueden establecer 4 tipos de falla de acuerdo a proporciones relativas de gases típicos o predominantes.<sup>4</sup>

## **C. Métodos de interpretación**

Existen tres métodos de interpretación para establecer los posibles tipos de falla entre estos se encuentra las relaciones de Doernenburg, el código de Rogers y el triángulo de Duval.<sup>5</sup>

### **Relaciones de Doernenburg**

1. Calcular las relaciones de acuerdo a la ecuación 23, 24, 25 y 26.
2. De acuerdo a los resultados, efectuar el diagnóstico sobre el posible tipo de falla de acuerdo a la tabla 3.

### **Código de Roger**

1. Calcular las relaciones de acuerdo a las ecuaciones 27 ,28 y 29.

---

<sup>3</sup> Ibid., p.8

<sup>4</sup> Ibid., p.13

<sup>5</sup> Ibid., p.7

2. De acuerdo a los resultados, efectuar el diagnóstico sobre el posible tipo de falla de acuerdo a la tabla 4.

### **Triangulo de Duval**

1. Calcular el porcentaje de Metano etileno y acetileno de acuerdo a las ecuaciones 30, 31 y 32
2. De acuerdo a los resultados, efectuar el diagnóstico sobre el posible tipo de falla de acuerdo a la Figura 15 o la Tabla 5.

### **D. Diagnostico**

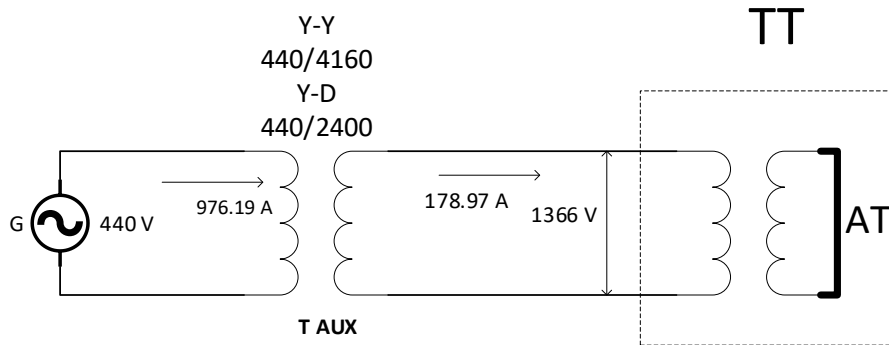
Realizar un informe en el cual se describa el nivel de concentración de los gases disueltos y un diagnóstico de acuerdo al análisis de resultados dado el caso.

## Anexo P Cortocircuito en alta o baja tensión para la prueba piloto

### Etapa ONAN cortocircuito en alta tensión

Se plantea efectuar el cortocircuito en el devanado de alta tensión para la etapa ONAN para alcanzar el voltaje de prueba se puede configurar el transformador en la configuración Y- $\Delta$

Figura 1 Circuito equivalente monofásico para el ensayo. Etapa ONAN. Cortocircuito en Alta Tensión. Y-D



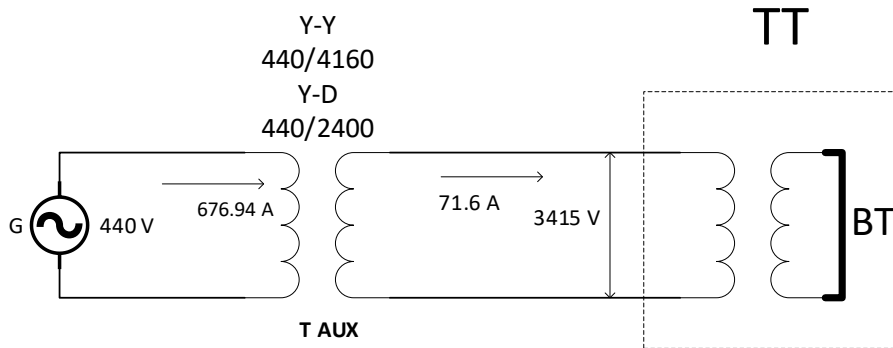
Fuente. El Autor

Al evaluar esta posibilidad se cumplirían los parámetros de tensión, sin embargo, se superarían los valores nominales de corriente en el devanado de alta y baja Tensión del transformador Auxiliar por lo cual **NO** es conveniente.

### Etapa ONAN cortocircuito en baja tensión

Se plantea efectuar el cortocircuito en el devanado de baja tensión para la etapa ONAN para alcanzar el voltaje de prueba se puede configurar el transformador en la configuración Y-Y

Figura 2 Circuito equivalente monofásico para el ensayo. Etapa ONAN. Cortocircuito en Baja Tensión. Y-Y



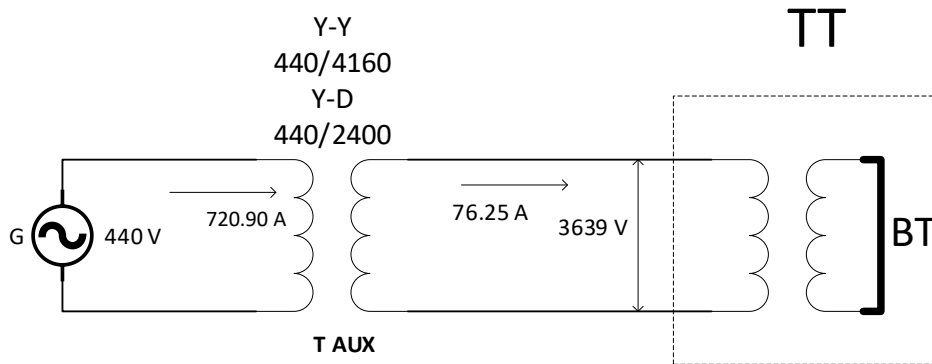
Fuente. El Autor

Al evaluar esta posibilidad se cumplirían los parámetros de tensión y corriente sin superar los valores nominales del transformador auxiliar *por lo cual se determina efectuar el cortocircuito en Baja tensión para la etapa ONAN.*

### Etapa ONAF cortocircuito en baja tensión

Para la etapa ONAF se plantea la misma condición, Realizar el cortocircuito en Baja tensión y utilizar la conexión Y-Y.

Figura 3 Circuito equivalente monofásico para el ensayo. Etapa ONAF. Cortocircuito en Baja Tensión. Y-Y



Fuente. El Autor

En la cual nuevamente se cumplen los parámetros de tensión y corriente adecuados y se determina efectuar el cortocircuito en Baja tensión para esta etapa.

## Anexo Q Dimensionamiento del banco de condensadores

Figura 1 Banco de condensadores empleado para desarrollar el ensayo



Fuente. El Autor

- a) Para dimensionar el banco de condensadores primero se debe evaluar el requerimiento de potencia reactiva a compensar:

$$Q_n \cong S_n * \left( \frac{Z_{cc}}{100} \right) \quad (Q - 1)$$

$S_n$  : Potencia nominal del transformador en kVA

$Z_{cc}$  : Impedancia de cortocircuito en %

**Para la etapa ONAN:**

$$Q_n \approx S_r * Z_{cc} = 3950 \text{ kVA} * \left( \frac{9.14\%}{100\%} \right) = 361.03 \text{ kVAR} \quad (Q-1)$$

**Para la etapa ONAF:**

$$Q_n \approx S_r * Z_{cc} = 4250 \text{ kVA} * \left( \frac{9.84\%}{100\%} \right) = 418.2 \text{ kVAR} \quad (Q-1)$$

- b) Se debe definir el tipo de condensador y su conexión

Se debe calcular cuanta potencia suministrara cada unidad y elegir la opción más adecuada variando el tipo de conexión entre Ye o Delta:

$$Q_{Unidad} = P_c * \left( \frac{V_{alimentacion}}{V_{nc}} \right)^2 \quad (Q-2)$$

Al conectar los condensadores en Delta el voltaje de alimentación de los condensadores es igual al voltaje de línea ( $U_G$ ), Al conectar en Ye el voltaje de alimentación es igual al voltaje de fase es decir  $\frac{U_G}{\sqrt{3}}$

#### **Etapas ONAN:**

##### **Condensadores de 333 Kvar en Ye:**

$$Q_{unidad} = 333 \text{ kVAR} * \left( \frac{\left( \frac{3,415 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \right)^2}{9,96 \text{ kV}} \right) = 13,04 \text{ Kvar /Unidad} \quad (Q-2)$$

##### **Condensadores de 333 Kvar en Delta:**

$$Q_{unidad} = 333 \text{ kVAR} * \left( \frac{3,415 \text{ kV}}{9,96 \text{ kV}} \right)^2 = 39,14 \text{ Kvar /Unidad} \quad (Q-2)$$

#### **Unidades Necesarias:**

##### **Condensadores 333 Kvar en Ye:**

$$Unidades_{Necesarias} = \frac{Q_{unidad}}{Q_{unidad}} \quad (Q-3)$$

$$Unidades_{Necesarias} = \frac{361,03}{13,04} \approx 27 \text{ Unidades Necesarias} \quad (Q-3)$$

##### **Condensadores 333 Kvar en Delta**

$$Unidades_{Necesarias} = \frac{361,03}{39,14} \approx 9 \text{ Unidades Necesarias} \quad (Q-3)$$



Al evaluar para los otros condensadores disponibles se obtuvieron los siguientes resultados

Tabla 1 Condensadores necesarios para la etapa ONAN

ETAPA		ONAN		
Qn [Kvar]	Q. Cond. [Kvar]	Q/Unidad [Kvar]	Unid. Necesarias	Conexión
361,03	400	90	4	Δ
	333	39,14	9	
	<b>150</b>	<b>25,27</b>	<b>14</b>	
	400	30	12	Y
	333	13,04	27	
	150	8,42	42	

Fuente. El Autor

Para la etapa ONAN se decide utilizar 15 Unidades de 150 Kvar conectados en Delta

#### Etapa ONAF:

Tabla 2 Condensadores necesarios para la etapa ONAF

ETAPA		ONAF		
Qn [Kvar]	Q. Cond. [Kvar]	Q/Unidad [Kvar]	Unid. Necesarias	Conexión
418,2	400	102,21	4	Δ
	333	44,46	9	
	150	28,7	15	
	400	34,07	12	Y
	333	14,82	27	
	150	9,56	45	

Fuente. El Autor

Para la etapa ONAF se decide utilizar 15 Unidades de 150 Kvar conectados en Delta

## Anexo T Análisis de condición para el transformador bajo ensayo de la prueba piloto

### Muestra Previa al ensayo

*Tabla 1 Análisis de datos, Muestra previa al ensayo*

Tipo de muestra	Previa al ensayo Concentración (µL/L (p.p.m))	Límites de concentración de gases disueltos (µL/L (p.p.m))				
		C1	C2	C3	C4	Condición
Gases disueltos en el aceite						
Acetileno (C2H2)	<0,2	1	2-9.	10-35.	>35	C1
Etileno (C2H4)	0,8	50	51-100	101-200	>200	C1
Etano (C2H6)	1	65	66-100	101-150	>150	C1
Metano (CH4)	<1	120	121-400	401-1000	>1000	C1
Monóxido de carbono (CO)	21,3	350	351-570	571-1400	>1400	C1
Hidrogeno (H2)	12,5	100	101-700	701-1800	>1800	C1
TGDC	35	720	721-1920	1921-4630	>4630	C1

Fuente. El autor

### Etapa ONAN

*Tabla 2 Análisis de datos, Muestra Etapa ONAN*

Tipo de muestra	Etapa ONAN Concentración (µL/L (p.p.m))	Límites de concentración de gases disueltos (µL/L (p.p.m))				
		C1	C2	C3	C4	Condición
Gases disueltos en el aceite						
Acetileno (C2H2)	<0,3	1	2-9.	10-35.	>35	C1
Etileno (C2H4)	1	50	51-100	101-200	>200	C1
Etano (C2H6)	<1	65	66-100	101-150	>150	C1
Metano (CH4)	1	120	121-400	401-1000	>1000	C1
Monóxido de carbono (CO)	39,9	350	351-570	571-1400	>1400	C1
Hidrogeno (H2)	19,7	100	101-700	701-1800	>1800	C1
TGDC	61	720	721-1920	1921-4630	>4630	C1

Fuente. El autor

## ETAPA ONAF

Tabla 3 Análisis de datos, Muestra Etapa ONAF

Tipo de muestra	Etapa ONAF	Límites de concentración de gases disueltos (µL/L (p.p.m))				
		C1	C2	C3	C4	Condición
Gases disueltos en el aceite	Concentración (µL/L (p.p.m))					
Acetileno (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	<0,3	1	2-9.	10-35.	>35	C1
Etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	2	50	51-100	101-200	>200	C1
Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	<1	65	66-100	101-150	>150	C1
Metano (CH <sub>4</sub> )	3,9	120	121-400	401-1000	>1000	C1
Monóxido de carbono (CO)	189,6	350	351-570	571-1400	>1400	C1
Hidrogeno (H <sub>2</sub> )	99,6	100	101-700	701-1800	>1800	C1
<b>TGDC</b>	<b>295</b>	720	721-1920	1921-4630	>4630	C1

Fuente. El autor

Como se puede observar en las Tablas 1, 2 y 3, el total de gases combustible TGDC y *ningún* gas combustible excede los límites estipulados por la Norma ANSI IEEE C.57.104 de 2009 Tabla 1. De acuerdo a esto para caso se diagnostica una condición C1. Para la cual no es necesario ningún tipo de investigación adicional.

**Diagnóstico:** El transformador está operando satisfactoriamente. El TGDC y ningún gas individual excede los límites, excede los límites individuales especificados .NO se sugiere ninguna investigación adicional.

### INFORME DE PRUEBAS ELECTRICAS FINALES DE FABRICA ENSAYO DE CALENTAMIENTO

<b>OBJETO</b>	PRUEBAS ELECTRICAS FINALES EN PLANTA: ENSAYO DE CALENTAMIENTO
<b>MARCA</b>	ANDINA DE TRANSFORMADORES
<b>PROCEDENCIA</b>	PLANTA TMI CETSA E.S.P.
<b>POTENCIA [MVA]</b>	3,95 / 4,25 MVA
<b>VOLTAJES, [kV]</b>	34,5/13,8
<b>SERIE</b>	25157
<b>ACTA</b>	2
<b>FECHA</b>	08/08/2019

#### Aplicación de la prueba:

Se inyectó al transformador la sumatoria de las pérdidas bajo carga y las pérdidas en vacío incrementando el valor de la corriente esperada en el corto circuito para simular esta condición.

La corriente esperada en el corto d acuerdo a la IEEE C57.119.2001 es:

$$IT_2 = I_R \sqrt{\frac{P_R}{P_R - P_{NL}}}$$

$IT_2$  = Corriente a aplicar para que la temperatura superior del aceite estabilice

$I_R$  = Corriente nominal

$P_R$  = Pérdidas totales en carga ( $P_{cc}$  a 85°C +  $P_{NL}$  a 20°C)

$P_{NL}$  = Pérdidas de vacío (no-load)

4.25MVA		3.95 MVA	
$I_R$	177.80 A	$I_R$	165.25 A
$P_{cc}$ a 20°C	27.848 kW	$P_{cc}$ a 20°C	24.056 kW
$P_{cc}$ a 85° C	34.81 kW	$P_{cc}$ a 85° C	30.07 kW
$P_{NL}$	5.2 kW	$P_{NL}$	5.2 kW
$P_R$	40.01 kW	$P_R$	35.27 kW
$IT_2$	190.62. A	$IT_2$	178.97 A

Circuito de prueba:

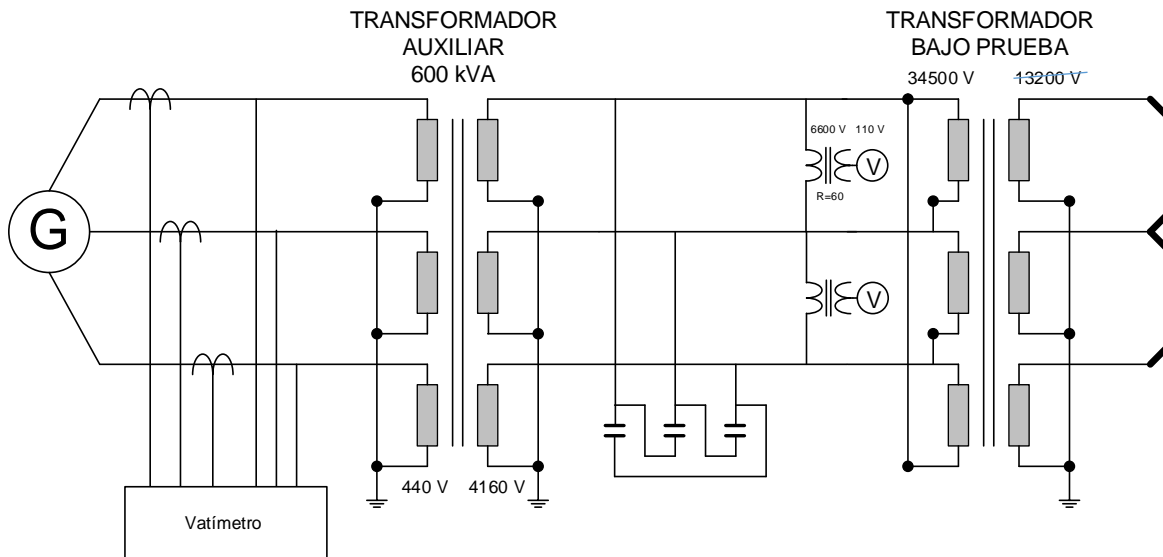


Figura1. Circuito de prueba

## ONAN 3.95 MVA

### Eta 1. TEMPERATURA DEL LIQUIDO.

Luego de 13 horas y sin presentar un incremento mayor a 1°C durante tres horas consecutivas, los valores de temperatura de estabilización fueron:

Temperatura ambiente promedio en la última hora,  $\theta_a = 23.48^\circ C$

Temperatura promedio en la parte superior del aceite,  $\theta_o = 80.62^\circ C$

Incremento de temperatura en la parte superior del aceite,  $\Delta\theta'_o = \theta_o - \theta_a = 57.14^\circ C$

### Corrección por condiciones ambientales de la elevación de temperatura del aceite.

Debido a que la prueba se realizó a 2550 msnm, a esta altura el equipo presenta una elevación de temperatura mayor. Para referenciar la elevación de temperatura a 1000 msnm, se emplea:

$$\Delta\theta_A = \Delta\theta_o \left( \frac{A}{A_0} - 1 \right) F$$

$\Delta\theta_A$  : Incremento en la elevación de temperatura a una altitud de A metros, °C.

$\Delta\theta_o$  : Elevación de temperatura observada, °C.

A : Altitud, m.

$A_0$  : Altitud de referencia igual a 1000 msnm

$F$  : 0,04 para ONAN y 0,06 para ONAF.

$$\Delta\theta_A = 57.14 \left( \frac{2550}{1000} - 1 \right) 0,04$$

$$\Delta\theta_A = 3.5426$$

Por tanto, la elevación de temperatura del aceite referida a 1000 msnm es de  $57.14 - 3.54 = 53.6 \text{ }^\circ\text{C}$

## Etapa 2. TEMPERATURA DE LOS DEVANADOS.

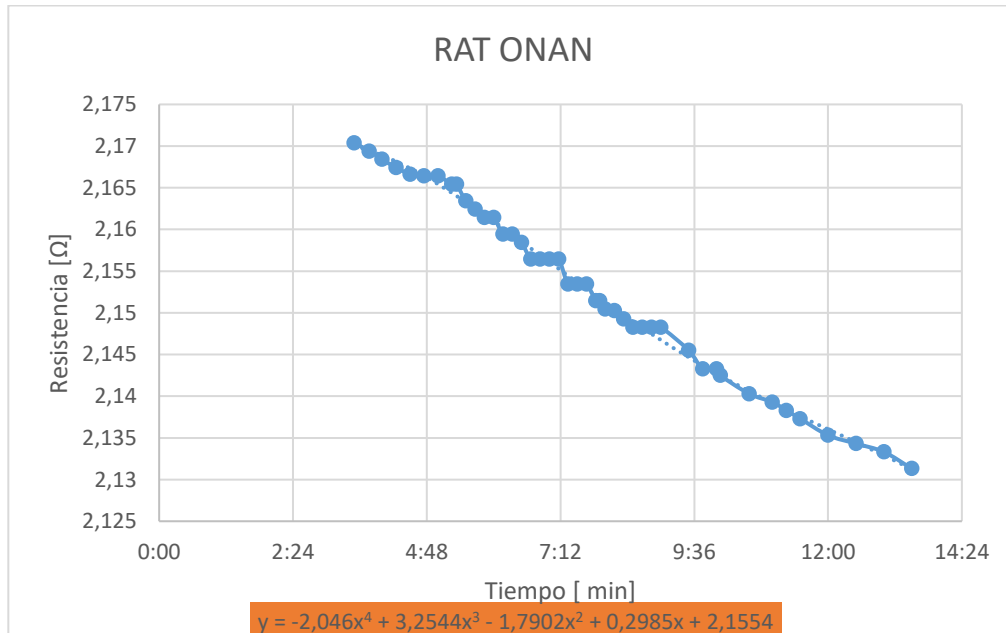
Después de estabilizada la temperatura, se bajó la corriente a la nominal (165.25 A) y se dejó durante 1 hora, antes de hacer el corte.

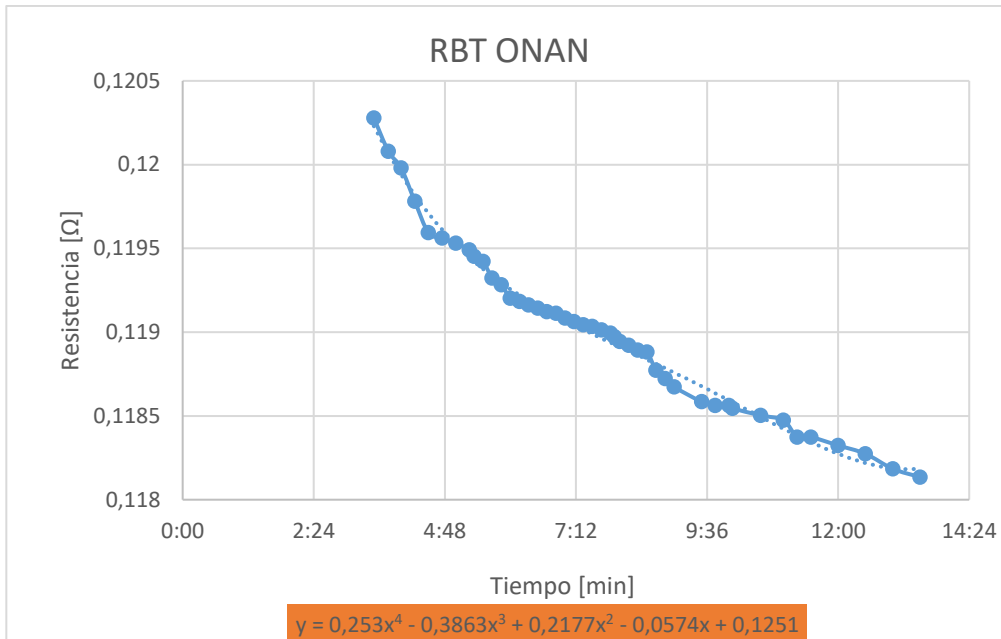
Los valores de temperatura medidos fueron:

Temperatura ambiente al momento del corte  $\theta_a = 24.53^\circ\text{C}$

Temperatura máxima en la parte superior del aceite  $\theta_o = 81.3^\circ\text{C}$

Los datos obtenidos de la medición de resistencia en caliente de los devanados al final de la etapa son:





Para el momento del corte ( $t = 0$ ), mediante extrapolación de tendencia polinómica se calcularon las resistencias de AT y BT justo en el momento del corte:

$$R_{2AT} = 2155.4 \text{ m}\Omega$$

$$R_{2BT} = 125.1 \text{ m}\Omega$$

Tomando como referencia la resistencia en frío medida para cada devanado:

$$\theta_1 = 21.1 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_{1AT} = 1723.72 \text{ m}\Omega$$

$$R_{1BT} = 99.09 \text{ m}\Omega$$

La temperatura media de cada devanado para  $t = 0$  es:  $\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} * [234,5 + \theta_1] - 234,5$

$$\theta'_{2AT} = \frac{2155.4 \text{ m}\Omega}{1723.72 \text{ m}\Omega} * [234,5 + 21.1] - 234,5 = 85.11^\circ\text{C}$$

$$\theta'_{2BT} = \frac{125.1 \text{ m}\Omega}{99.09 \text{ m}\Omega} * [234,5 + 21.1] - 234,5 = 88.19^\circ\text{C}$$

Debido a que la temperatura del aceite decreció durante la hora de energización a la corriente nominal ( $I_r$ ), se corrige la temperatura del devanado encontrando el gradiente aceite-devanados  $g$  durante la operación a la corriente nominal.

$$g = \theta'_2 - \theta_{oil-av(I_r)}$$

$g$  Gradiente de temperatura aceite-devanados durante la hora de energización a  $I_r$

$\theta_2$  Temperatura media del devanado en  $t=0$  en el momento del corte después de 1h de energización a  $I_r$

$\theta_{oil-av(I_r)}$  Temperatura promedio del aceite después de la hora de energización a  $I_r$

$$\theta_{oil-av(Tr)} = \theta_{oil-max} - \frac{1}{2}(\theta_{KE} - \theta_{KA})$$

$\theta_{oil-max}$	Temperatura máxima el aceite	: 81.3 °C
$\theta_{KE}$	Temperatura superior del radiador	: 83.6 °C
$\theta_{KA}$	Temperatura inferior del radiador	: 65 °C
$\theta_a$	Temperatura ambiente	: 24.53 °C

$$\theta_{oil-av(Tr)} = 81.3 - \frac{1}{2}(83.6 - 65)$$

$$\theta_{oil-av(Tr)} = 72^{\circ}C$$

Po tanto,

$$\text{Para AT: } g = 85.11 - 72$$

$$\text{Para BT: } g = 88.19 - 72$$

$$\text{Para AT: } g = 13.11$$

$$\text{Para BT: } g = 16.19$$

Por tanto, la temperatura corregida para cada devanado es:

AT

$$\theta_{2AT} = \theta_{oil-av(Ptot)} + g$$

$$\theta_{oil-av(Ptot)} = 80.62 - \frac{1}{2}(83.34 - 64.6) = 71.25$$

$\theta_{oil-max}$	Temperatura máxima el aceite	: 80.62°C
$\theta_{KE}$	Temperatura superior del radiador	: 83.34 °C
$\theta_{KA}$	Temperatura inferior del radiador	: 64.6 °C

$$\theta_{2AT} = \theta_{oil-av(Ptot)} + g$$

$$\theta_{2AT} = 71.25 + 13.11 = 84.36$$

El aumento para el devanado de AT es igual a:

$$\Delta\theta_{2AT} = \theta_{2AT} - \theta_a = 84.36 - 23.5 = 60.86$$

BT:

$$\theta_{2BT} = \theta_{oil-av(Ptot)} + g$$

$$\theta_{2BT} = 71.25 + 16.11 = 87.36$$

El aumento para el devanado de BT es igual a:



$$\Delta\theta_{2BT} = \theta_{2BT} - \theta_a = 87.36 - 23.5 = 63.86$$

### Etapa 3 HOT SPOT

La temperatura de punto caliente es:

$$\Delta\theta_{Hot-spot} = \Delta\theta_{oil-max} + g \times H$$

$$\Delta\theta_{oil-max} = 53.6$$

Para transformadores de media y alta potencia, se asume un valor H de 1,3

Por tanto, la temperatura de punto caliente para cada devanado es:

$$\Delta\theta_{Hot-spot}AT = 53.6 + 13.11 \times 1,3 = 70.64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_{Hot-spot}BT = 53.6 + 16.11 \times 1,3 = 74.64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### Etapa 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

ELEMENTO	ELEVACIÓN PERMITIDA, [°C]	ELEVACIÓN OBTENIDA, [°C]	OBSERVACIÓN
Aceite	60	53.6	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Devanado AT	65	60.86	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Devanado BT	65	63.86	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Hot spot AT	80	70.64	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Hot spot BT	80	74.64	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo

## ONAF 4.25 MVA

### Etapa 1. TEMPERATURA DEL LIQUIDO.

Luego de 5 horas y sin presentar un incremento mayor a 1°C, los valores de temperatura de estabilización fueron:

Temperatura ambiente promedio en la última hora,  $\theta_a = 20.7$

Temperatura promedio en la parte superior del aceite,  $\theta_o = 71.78^\circ C$

Incremento de temperatura en la parte superior del aceite,  $\Delta\theta'_o = \theta_o - \theta_a = 51.08C$

### Corrección por condiciones ambientales de la elevación de temperatura del aceite.

Debido a que la prueba se realizó a 2550 msnm, a esta altura el equipo presenta una elevación de temperatura mayor. Para referenciar la elevación de temperatura a 1000 msnm, se emplea:

$$\Delta\theta_A = \Delta\theta_o \left( \frac{A}{A_0} - 1 \right) F$$

$\Delta\theta_A$  : Incremento en la elevación de temperatura a una altitud de A metros, °C.

$\Delta\theta_o$  : Elevación de temperatura observada, °C.

A : Altitud, m.

$A_0$  : Altitud de referencia igual a 1000 msnm

F : 0,04 para ONAN y 0,06 para ONAF.

$$\Delta\theta_A = 51.08 \left( \frac{2550}{1000} - 1 \right) 0,06$$

$$\Delta\theta_A = 4.75$$

Por tanto, la elevación de temperatura del aceite referida a 1000 msnm es de  $51.08 - 4.75 = 46.33^\circ C$

### Etapa 2. TEMPERATURA DE LOS DEVANADOS.

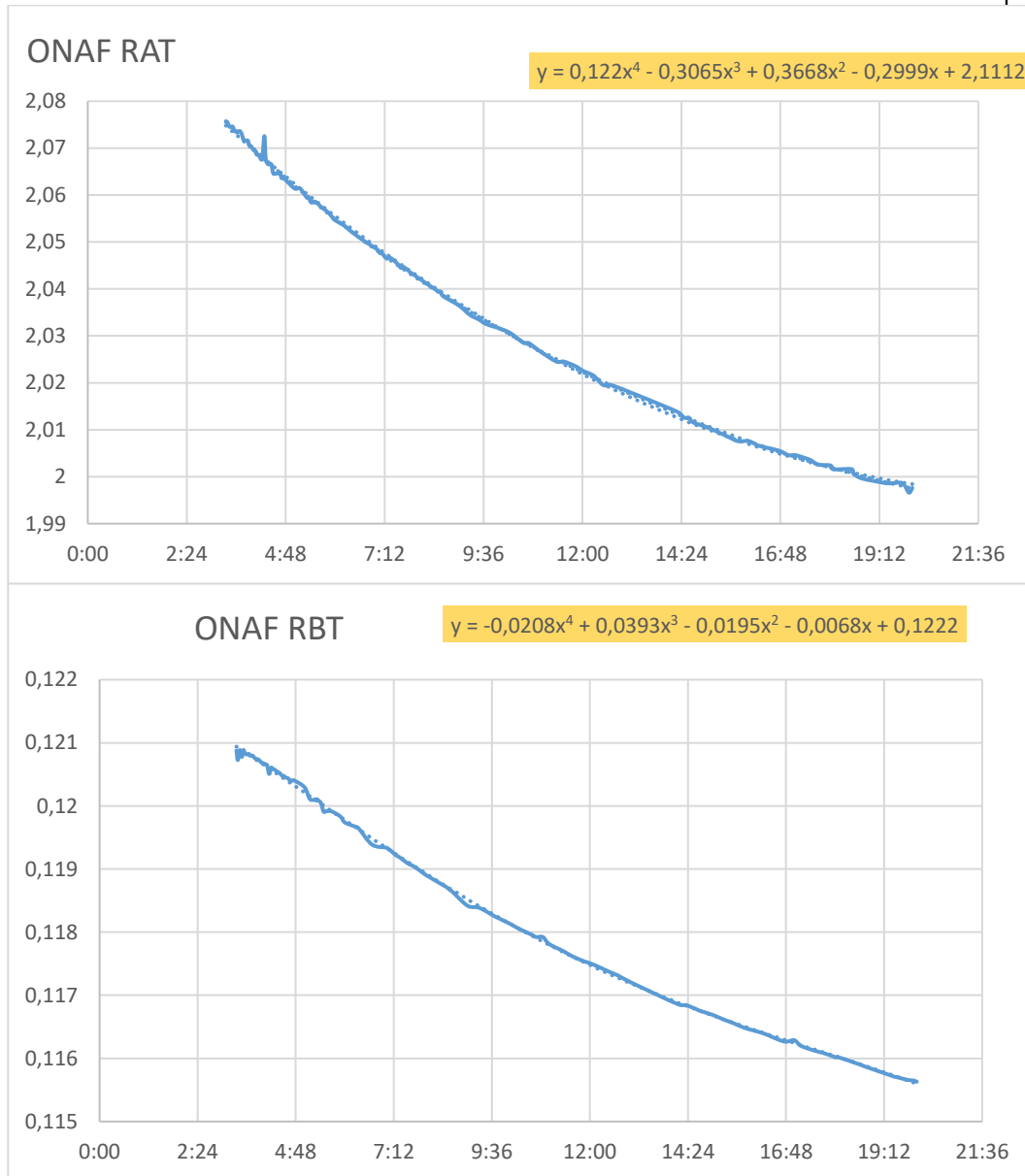
Después de estabilizada la temperatura, se bajó la corriente a la nominal (177.8 A) y se dejó durante 1 hora, antes de hacer el corte.

Los valores de temperatura medidos fueron:

Temperatura ambiente promedio al momento del corte,  $\theta_a = 20^\circ C$

Temperatura máxima en la parte superior del aceite,  $\theta_o = 67,7^\circ C$

Los datos obtenidos de la medición de resistencia en caliente de los devanados al final de la etapa son:



Para el momento del corte ( $t = 0$ ), mediante extrapolación de tendencia polinómica se calcularon las resistencias de AT y BT justo en el momento del corte:

$$R_{2AT} = 2111,2 \text{ m}\Omega$$

$$R_{2BT} = 122 \text{ m}\Omega$$

Tomando como referencia la resistencia en frío medida para cada devanado:

$$\theta_1 = 21.1^\circ\text{C}$$

$$R_{1AT} = 1723.72 \text{ m}\Omega$$

$$R_{1BT} = 99.09 \text{ m}\Omega$$

La temperatura media de cada devanado para  $t = 0$  es:  $\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} * [234,5 + \theta_1] - 234,5$

$$\theta'_{2AT} = \frac{2111,2\text{m}\Omega}{1723.72\text{ m}\Omega} * [234,5 + 21.1] - 234,5 = 78.56^\circ\text{C}$$

$$\theta'_{2BT} = \frac{122}{99.09\text{ m}\Omega} * [234,5 + 21.1] - 234,5 = 80.20^\circ\text{C}$$

Debido a que la temperatura del aceite decreció durante la hora de energización a la corriente nominal ( $I_r$ ), se corrige la temperatura del devanado encontrando el gradiente aceite-devanados  $g$  durante la operación a la corriente nominal.

$$g = \theta'_2 - \theta_{oil-av(I_r)}$$

$g$  Gradiente de temperatura aceite-devanados durante la hora de energización a  $I_r$   
 $\theta_2$  Temperatura media del devanado en  $t=0$  en el momento del corte después de 1h de energización a  $I_r$   
 $\theta_{oil-av(I_r)}$  Temperatura promedio del aceite después de la hora de energización a  $I_r$

$$\theta_{oil-av(I_r)} = \theta_{oil-max} - \frac{1}{2}(\theta_{KE} - \theta_{KA})$$

$\theta_{oil-max}$  Temperatura máxima el aceite : 67.7 °C  
 $\theta_{KE}$  Temperatura superior del radiador : 68.4 °C  
 $\theta_{KA}$  Temperatura inferior del radiador : 45.9 °C  
 $\theta_a$  Temperatura ambiente : 20,0 °C

$$\theta_{oil-av(I_r)} = 67.7 - \frac{1}{2}(68.4 - 45.9)$$

$$\theta_{oil-av(I_r)} = 56,45^\circ\text{C}$$

Po tanto,

Para AT:  $g = 78.56 - 56,45$

Para BT:  $g = 80.20 - 56,45$

Para AT:  $g = 22.11$

Para BT:  $g = 23.75$

Por tanto, la temperatura corregida para cada devanado es:

AT

$$\theta_{2AT} = \theta_{oil-av(Ptot)} + g$$

$$\theta_{oil-av(Ptot)} = 71.8 - \frac{1}{2}(73.4 - 49.9) = 60.05$$

$\theta_{oil-max}$	Temperatura máxima el aceite	: 71.8°C
$\theta_{KE}$	Temperatura superior del radiador	: 73.4 °C
$\theta_{KA}$	Temperatura inferior del radiador	: 49.9 °C

$$\theta_{2AT} = \theta_{oil-av(Ptot)} + g$$

$$\theta_{2AT} = 60.05 + 22.11 = 82.11$$

El aumento para el devanado de AT es igual a:

$$\Delta\theta_{2AT} = \theta_{2AT} - \theta_a = 82.11 - 20.7 = 61.46$$

BT:

$$\theta_{2BT} = \theta_{oil-av(Ptot)} + g$$

$$\theta_{2BT} = 60.05 + 23.75 = 83.8$$

El aumento para el devanado de BT es igual a:

$$\Delta\theta_{2BT} = \theta_{2BT} - \theta_a = 83.8 - 20.7 = 63.1$$

### Etapa 3 HOT SPOT

La temperatura de punto caliente es:

$$\Delta\theta_{Hot-spot} = \Delta\theta_{oil-max} + g \times H$$

$$\Delta\theta_{oil-max} = 46.33$$

Para transformadores de media y alta potencia, se asume un valor H de 1,3

Por tanto, la temperatura de punto caliente para cada devanado es:

$$\Delta\theta_{Hot-spot}AT = 46,33 + 22.15 \times 1,3 = 75.12 \text{ °C}$$

$$\Delta\theta_{Hot-spot}BT = 46,33 + 23.75 \times 1,3 = 77.20 \text{ °C}$$

**Etapa 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

<b>ELEMENTO</b>	<b>ELEVACIÓN PERMITIDA, [°C]</b>	<b>ELEVACIÓN OBTENIDA, [°C]</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
Aceite	60	46.33	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Devanado AT	65	61.46	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Devanado BT	65	63.1	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Hot spot AT	80	77.20	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Hot spot BT	80	75.12	El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo

**INFORME DE PRUEBA  
ENSAYO DE CALENTAMIENTO**

<i>Objeto</i>	
<i>Marca</i>	
<i>Serie</i>	
<i>Potencia [kVA]</i>	
<i>Voltaje AT [kV]</i>	
<i>Voltaje BT [kV]</i>	
<i>Fecha</i>	

**Aplicación de la prueba** : Para la realización del ensayo se emplea el metodo de Cortocircuito, antes de iniciar el ensayo se realizo la medida de la resistencia ohmica de los devanados ,se midieron las perdidas bajo carga y vacio y se convirtieron al valor de Temperatura de referencia adecuado.

<i>Pcc a 20°C [ kW]</i>	
<i>Pcc a 85 °C [kW]</i>	
<i>Po [kW]</i>	
<i>Resis. Ohmica Dev. AT [m Ω ]</i>	
<i>Resis. Ohmica Dev. BT [m Ω ]</i>	

**ETAPA 1 : Inyeccion a Perdidas Totales**

De acuerdo a la Norma Tecnica Colombiana NTC 316, se realizo un cortocircuito en el devanado de Baja Tension y se circulo suficiente corriente con el fin de producir perdidas totales para la conexión y Capacidad Nominal.

De acuerdo a IEEE C.57.11.90 el Valor de la corriente es :

$$I_G = I_r \sqrt{\frac{P_{cc}}{P_{cc} - P_o}}$$

IG: Corriente a aplicar para producir las perdidas requeridas totales

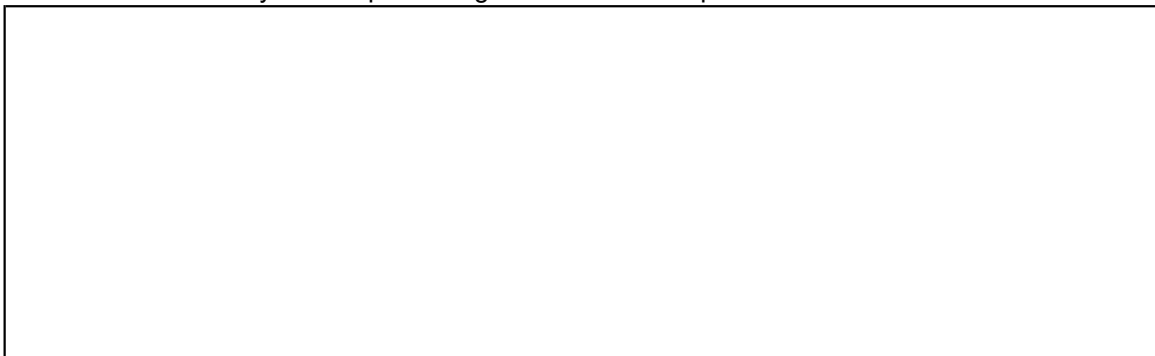
Ir: Corriente nominal

Pcc: Pérdidas totales en carga

Po: Pérdidas de vacío

<i>Ir [A]</i>	
<i>IG [A]</i>	

Para realizar el Ensayo se empleo el siguiente circuito de prueba :



*Figura 1 : Circuito de prueba*

Luego de ## horas sin presentar un incremento mayor a un 1°C durante tres horas seguidas, de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 316 se presenta la elevación final del líquido sobre el ambiente. Los Valores de Temperatura de estabilización obtenidos fueron :

Temperatura ambiente promedio [°C]	
Temperatura superior del líquido [°C]	
Elevación de temperatura del líquido [°C]	

### Corrección de elevación de Temperatura por diferencia de Altitud

Debido a que la prueba se realiza a una altura diferente a la del sitio de instalación, de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 316 para referenciar la elevación de temperatura a la del sitio de instalación (1000 msnm), se emplea :

$$T_A = T_e \left( \frac{A}{A_0} - 1 \right) F$$

TA:	Incremento en la elevación de temperatura a una altitud de A metros °C
Te :	Elevación de temperatura observada °C
A :	Altitud m
Ao :	Altitud de referencia igual a 1000 m
F :	0,04 Para Modo de autoenfriamiento y 0,06 para refrigeración de aire forzado

la corrección de elevación de temperatura por diferencia de altitud para el líquido es :	
<b>la elevación de temperatura del aceite referida a 1000 msnm es igual a :</b>	

### Etapa 2 : Inyección a Corriente Nominal

Después de que el líquido alcanza la elevación final de temperatura de líquido sobre el ambiente De acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 316 inmediatamente se reduce la corriente al valor nominal de la conexión y potencia usada, manteniendo esta condición por una hora.

Los valores de temperatura observados fueron :

Temperatura ambiente promedio [°C]	
Temperatura superior del líquido [°C]	
Elevación de temperatura del líquido [°C]	

Posteriormente se realiza el corte y se mide la temperatura de los devanados, los datos obtenidos de la medición de la resistencia en los devanados (En caliente) Fueron :

--	--



para el momento de corte mediante extrapolacion de tendencia polinomica se calcularon las resistencias de Alta y Baja Tension justo en el momento del corte (t=0)

Resis. Alta Tension en Caliente [mΩ ]	
Resis. Baja Tension en Caliente [mΩ ]	

La temperatura promedio de los devanados se debe determinar a traves del metodo de la Resistencia, para determinarla se emplea la siguiente formula :

$$T = \frac{R}{R_0} * (T_k + T_o) - T_k$$

- T : Temperatura promedio de los devanados [°C]
- R: Resistencia en caliente [Ω]
- Ro: Resistencia en frio [Ω]
- Tk : 234,5 Para Cobre , 225 para aluminio
- To: Temp. a la cual se midio la resistencia en frio [°C]

La temperatura promedio en cada devanado en el momento del corte es :

<b>T AT</b>	
<b>T BT</b>	

De acuerdo a la Norma Tecnica Colombiana NTC 316 la elevacion promedio de los devanados debe determinarse usando la elevacion superior del liquido o la elevacion promedio del liquido , en el caso de que se emplee una corriente en el devanado diferente a la nominal, debe usarse el metodo de la elevacion promedio del liquido.

En el metodo de la elevacion superior del liquido, la elevacion de la temperatura promedio de los devanados es igual a :

$$t = t_{oe} + (T - T_{oc})$$

t:	Elevacion de temperatura promedio En los devanados en °C
toe :	Elevacion de temperatura superior del liquido a perdidas totales °C
T:	Temperatura promedio de los devanados en °C
Toc:	Temperatura superior del liquido al momento del corte en °C

La elevacion de la temperatura promedio en cada devanado es igual a :

t AT	
t BT	

<b>HOT SPOT</b>
-----------------

De acuerdo a IEEE C.57.12. 00 el maximo Hot spot no debe exceder los 80 °C. Testing of Power transformers de ABB Bussiness Area Power Transformers plantea un metodo para obtenerlo a traves de la siguiente ecuacion :

$$\Delta\theta_{Hotspot} = \Delta\theta_{oilmax} + g * H$$

$\Delta\theta_{Hotspot}$  : Hot spot de la Elevacion del devanado sobre el ambiente  
 $\Delta\theta_{Oilmax}$  : Elevacion de la temperatura superior del liquido  
 g: Temperatura gradiente Devanado - Aceite  
 H: 1,1 Para Transformadores de distribucion, 1,3 Transf. De potencia

El gradiente se define como la diferencia entre la Temperatura promedio del devanado y el aceite:

$$g = T - T_{omc}$$

T:	Temperatura promedio de los devanados en °C
Tomc:	Temperatura promedio del liquido a corriente nominal

El gradiente en cada devanado es igual a :

g AT	
g BT	

Por tanto, La temperatura de Hot Spot para cada devanado es igual a :

$\Delta\theta_{Hotspot}$ AT	
$\Delta\theta_{Hotspot}$ BT	

#### ANALISIS DE RESULTADOS

Elemento	Elevacion Permitida	Elevacion Obtenida	Observacion
Aceite	65		El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Devanado AT	65		El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Devanado BT	65		El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Hot spot AT	80		El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo
Hot spot BT	80		El transformador ha cumplido con los requisitos del ensayo