

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
ESTUDIO DE PRESENCIA DE HUMEDAD EN EL ACEITE DIELECTRICO  
DEL AUTOTRANSFORMADOR DE POTENCIA UTILIZADO EN  
TRANSMISIÓN PARA ESTIMAR LA VIDA ÚTIL REMANENTE**

**AUTOR:  
SANTIAGO OMAR GALEAS MENDOZA**

**TUTOR:  
JUAN ALBERTO BUCHELI ÁVILA**

**Quito, febrero del 2022**

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, Santiago Omar Galeas Mendoza, con documento de identificación N° 1723620769 manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: Estudio de presencia de humedad en el aceite dieléctrico del autotransformador de potencia utilizado en transmisión para estimar la vida útil remanente, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



-----  
Santiago Omar Galeas Mendoza  
CI. 1723620769

Quito, febrero del 2022.

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Juan Alberto Bucheli Ávila, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico: **Estudio de presencia de humedad en el aceite dieléctrico del autotransformador de potencia utilizado en transmisión para estimar la vida útil remanente**, realizado por Santiago Omar Galeas Mendoza, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, febrero de 2022



---

Juan Alberto Bucheli Ávila

C.I. 1706576210

## **DEDICATORIA**

Primeramente, este trabajo quiero agradecer a Dios, gracias a su voluntad que me ha dado la sabiduría, entendimiento y el conocimiento necesario día a día para permitirme llegar hasta estas instancias de mi vida.

A mi padre y a mi madre, que con su ejemplo, esfuerzo y dedicación desde niño me supieron guiar de la mejor manera, con sus consejos y enseñanzas que me han llenado el alma para hoy ser la persona que soy, y aprender a desafiar retos para que llegue a cumplir mis metas y sueños.

A mi querida esposa Narcisa, que ella sabe los momentos difíciles que pasamos y siempre ha estado allí con todo su amor y cariño, gracias a Dios que la puso en mi vida, muchas gracias por todo el apoyo incondicional y por creer en mi capacidad, más que una meta personal es una meta conyugal, ya que a este paso no llegué solo, una persona especial y maravillosa que ha sido, es y será, la fuerza necesaria para seguir cumpliendo más metas y sueños.

A mis hijos Anthony, Lupita y Sebitas, primeramente, el regalo más grande que Dios y la vida me ha dado, quienes han sido un apoyo importante en mi vida, y el motor para seguir adelante, ya que, con su amor y paciencia, han sabido apoyarme y entenderme en todo momento, las personas que siempre me han dicho y han pedido a Dios que culmine mis estudios.

A mi hermano Abel, que me ha dicho que nunca desmaye ni me rinda, Dios le pague mi hermano por apoyarme y ayudarme cuando más has podido; a mi sobrino Danielito y mi cuñada Joicy, quienes han estado de igual manera deseándome los mejores éxitos para que culmine mis estudios.

**Santiago**

## **AGRADECIMIENTOS**

En el presente escrito quiero agradecer al Ing. Juan Bucheli por la paciencia y el conocimiento que me supo impartir en el presente proyecto técnico.

A la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP – Transelectric por brindarme la información necesaria para llegar a culminar con éxito el proyecto.

A mi compañero Tlgo. Gabriel Aldaz, que de manera desinteresada me supo ayudar cubriéndome los turnos del trabajo para poder avanzar con mis estudios.

A mi jefe, supervisor de operación, de corazón Dios le pague, por ayudarme autorizando los cambios de turno en el trabajo, y al mismo tiempo guiarme en este trabajo suscrito.

A mi amigo, Ing. Esteban Lara, que, con sus amplios conocimientos y experiencia, me supo ayudar de manera desinteresada.

Y finalmente quedo agradecido con la subgerencia de operación y mantenimiento, por autorizarme realizar el proyecto técnico al autotransformador de potencia de la subestación Mulaló.

**Santiago**

## ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
ÍNDICE .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
GLOSARIO .....	xiii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT .....	xvi
INTRODUCCIÓN .....	xvii
CAPÍTULO I.....	1
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	1
1.1    Objetivos .....	1
1.1.1    Objetivo General .....	1
1.1.2    Objetivo Específicos .....	1
1.2    Antecedentes .....	1
1.3    Importancia y Alcances .....	2
1.4    Delimitación del Problema .....	3
CAPÍTULO II .....	4
MARCO TEÓRICO.....	4
2.1    Autotransformador de Potencia.....	4
2.1.1    Concepto .....	4
2.1.2    Funcionamiento de un autotransformador .....	4

2.1.3	Autotransformador Reductor .....	4
2.1.4	Tipo de enfriamiento de autotransformadores sumergidos en aceite.....	5
2.1.5	Pruebas eléctricas del Autotransformador .....	6
2.1.6	Análisis del sistema de aislamiento del autotransformador ATQ.....	6
2.1.6.1	Análisis de medición de espectroscopia dieléctrica del autotransformador ATQ.....	7
2.1.6.2	Análisis de medición de resistencia de devanados del lado de 69 kV del autotransformador ATQ.....	10
2.1.6.3	Análisis de medición de resistencia de devanados del lado de 138 kV del autotransformador ATQ.....	10
2.1.6.4	Análisis de medición de resistencia de devanados del lado terciario 13.8 kV del autotransformador ATQ.....	10
2.1.7	Tipos de aislamiento de un Autotransformador .....	10
2.1.8	Envejecimiento del papel aislante.....	11
2.1.8.1	Hidrólisis.....	12
2.1.8.2	Pirólisis.....	12
2.1.8.3	Oxidación .....	12
2.1.9	Grado de Polimerización del papel aislante .....	13
2.1.10	Cálculo para grado de polimerización del aislamiento del papel basado en la concentración de furfural (2FAL) .....	13
2.1.10.1	Método Chendong.....	14
2.1.10.2	Método Stebbins .....	14
2.1.10.3	Método De Pablo .....	15
2.1.10.4	Método de Pahlavanpour.....	15
2.1.11	Estimación del grado de polimerización en función de la concentración de (2FAL).....	16

2.1.12	Triángulo de Duval .....	16
2.1.12.1	Límites tasas y valores de TDGC (Total Dissolved Combustible Gases) .....	19
2.1.13	Curva de la bañera.....	19
2.1.14	Estimación de vida útil del autotransformador .....	20
2.1.14.1	Vida remanente en años del autotransformador, con la correlación con el grado de polimerización .....	21
CAPÍTULO III .....		23
ALTERNATIVAS DE LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO .....		23
3.1	Mantenimiento del autotransformador de potencia .....	23
3.2	Salida no programada del autotransformador de potencia .....	23
3.3	Procedimiento a seguir ante una salida no programada del autotransformador de potencia .....	23
3.4	Parte fundamental del mantenimiento óptimo.....	24
3.5	Tipos de mantenimiento a realizarse .....	24
3.5.1	Mantenimiento correctivo: .....	24
3.5.1.1	Mantenimiento correctivo planificado .....	24
3.5.1.2	Mantenimiento correctivo no planificado .....	25
3.5.2	Mantenimiento preventivo: .....	25
3.5.2.1	Mantenimiento periódico o preventivo planificado (MPP) .....	25
3.5.2.2	Mantenimiento predictivo (Basado en la condición MBC) .....	27
3.6	Mantenimiento como medio de extensión de vida útil remanente del autotransformador de potencia.....	28
3.7	Válvula de muestras del aceite dieléctrico .....	29
3.8	Contenido de humedad en el papel aislante .....	29
3.9	Tratamientos en el autotransformador durante el mantenimiento .....	30



3.9.1	Recirculación de aceite .....	31
3.9.2	Regeneración del aceite aislante .....	32
3.9.3	Secado del Autotransformador.....	33
CAPÍTULO IV .....		34
METODOLOGÍA Y CÁLCULOS .....		34
4.1	Mathcad software a utilizarse para representar las ecuaciones .....	34
4.2	Matlab software de programación a utilizarse para la interfaz gráfica .....	34
4.3	Valor a utilizarse para el cálculo del grado de polimerización .....	34
4.4	Concepto del furfural.....	34
4.5	Cálculo del grado de polimerización.....	35
4.5.1	Método Chendong.....	35
4.5.2	Método Stebbins .....	36
4.5.3	Método De Pablo .....	36
4.5.4	Método de Pahlavanpour.....	37
4.6	Cálculo para estimar la vida remanente del autotransformador .....	38
4.6.1	Método Chendong.....	38
4.6.2	Método Stebbins .....	38
4.6.3	Método De Pablo .....	38
4.6.4	Método de Pahlavanpour.....	39
4.7	Diagrama de flujo para ejecutar el cálculo de estimación de vida útil remanente .....	39
4.8	Algoritmo técnico de programación para estimar la vida útil remanente del autotransformador en el Software Matlab.....	40
CAPÍTULO V .....		42
COSTOS .....		42
5.1	Costo del análisis de furanos al autotransformador de Mulaló .....	42

CONCLUSIONES .....	44
RECOMENDACIONES .....	46
REFERENCIAS .....	47
ANEXOS .....	50
Anexo 1: Subestación de transmisión eléctrica Mulaló 138/69 kV. ....	50
Anexo 2: Autotransformador ATQ en el patio de maniobras subestación Mulaló 138/69 kV. ....	50
Anexo 3: Autotransformador de potencia ATQ capacidad de 66.7 MVA. ....	51
Anexo 4: Medidores de temperatura de bobinados primario, secundario, terciario, y temperatura de aceite. ....	52
Anexo 5: Radiadores autotransformador ATQ. ....	53
Anexo 6: Bombas para el enfriamiento del aceite del autotransformador ATQ. ....	54
Anexo 7: Ventiladores para el enfriamiento del aceite del autotransformador ATQ. ....	55
Anexo 8: Tablero de control local del autotransformador ATQ. ....	56
Anexo 9: Cambiador de TAP's en el lado de 138 kV ATQ (opera sin carga). ....	57
Anexo 10: Cambiador de TAP's en el lado de 69 kV ATQ (OLTC opera bajo carga). ....	58
Anexo 11: Relé de protección mecánica Buchholz del autotransformador ATQ. ....	59
Anexo 12: Salida para conexión a planta de tratamiento de recirculación de aceite del autotransformador ATQ. ....	59
Anexo 13: Salida para toma de muestra de aceite para análisis de furanos ubicado en lado izquierdo el autotransformador ATQ. ....	60
Anexo 14: Equipo Calisto 5 para análisis cromatográfico de gases de autotransformador ATQ. ....	60
Anexo 15: Tipos de enfriamiento de transformadores y autotransformadores sumergidos en aceite. ....	61

Anexo 16: Resultados obtenidos en la medición de resistencia de devanados lado 69 kV.....	62
Anexo 17: Resultados obtenidos en la medición de resistencia de devanados lado 138 kV.....	64
Anexo 18: Resultados obtenidos en la medición de resistencia de devanados lado terciario 13.8 kV.....	64
Anexo 19: Valor del grado de polimerización con respecto al estado del papel. ....	65
Anexo 20: Tipos de falla en el triángulo de Duval .....	65
Anexo 21: Planta de tratamiento para recirculación de aceite. ....	66
Anexo 22: Resultados del laboratorio de análisis de furanos año (2014) y cromatografía año (2020) del autotransformador ATQ.....	67
Anexo 23: Resultados del laboratorio de análisis de furanos año (2014) y cromatografía año (2019) del autotransformador ATQ.....	68
Anexo 24: Resultados del laboratorio de análisis de furanos año (2014) y cromatografía año (2017) del autotransformador ATQ.....	69
Anexo 25: Resultados del laboratorio de análisis de furanos año (2014) y cromatografía año (2016) del autotransformador ATQ.....	70
Anexo 26: Resultados del laboratorio de análisis de furanos año (2014) y cromatografía año (2015) del autotransformador ATQ.....	71
Anexo 27: Tabla de cantidades y precios para un mantenimiento desde el punto de vista cromatográfico y de furanos.....	72
Anexo 28: Diagrama de flujo del algoritmo desarrollado en Matlab.....	73
Anexo 29: Algoritmo descriptivo de programación para estimar la vida útil remanente de autotransformador de potencia en el Software Matlab.....	73
Anexo 30: Interfaz gráfica para el cálculo de los métodos de estimación de la vida remanente del Autotransformador.....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación subestación Mulaló .....	3
<b>Figura 2.</b> Autotransformador trifásico de potencia de la subestación Mulaló .....	5
<b>Figura 3.</b> Bobinado de un Autotransformador reductor .....	5
<b>Figura 4.</b> Tangente delta en función de la frecuencia .....	8
<b>Figura 5.</b> Papel dieléctrico en varias formas y tamaños .....	11
<b>Figura 6.</b> Degradación de la celulosa .....	12
<b>Figura 7.</b> Relación del DP en función de concentración 2FAL .....	16
<b>Figura 8.</b> Triángulo de Duval.....	17
<b>Figura 9.</b> Construcción de triángulo de Duval .....	19
<b>Figura 10.</b> Curva de la bañera para el mantenimiento .....	20
<b>Figura 11.</b> Coeficiente K en función de la temperatura y la oxidación del papel aislante .....	21
<b>Figura 12.</b> Extracción de muestra de aceite de un transformador .....	29
<b>Figura 13.</b> Centro de investigaciones y pruebas electroenergéticas.....	30
<b>Figura 14.</b> Diagrama de flujo de planta de reacondicionamiento .....	32
<b>Figura 15.</b> Diagrama de flujo de planta de reacondicionamiento y regeneración.....	33

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Datos característicos del Autotransformador en este caso de estudio .....	7
<b>Tabla 2:</b> Resultados obtenidos en la espectroscopía dieléctrica ATQ Mulaló.....	9
<b>Tabla 3:</b> Límites de zonas .....	18
<b>Tabla 4:</b> Resultados de pruebas de Furanos .....	35
<b>Tabla 5:</b> Cálculo del grado de polimerización (DP) .....	37
<b>Tabla 6:</b> Costo de análisis de furanos del autotransformador .....	42

## GLOSARIO

**Autotransformador de potencia:** Es una máquina eléctrica con características similares a los transformadores, con la diferencia que éste utiliza un solo devanado alrededor del núcleo por cada fase.

**OLTC:** Como su nombre lo indica es On Load Tap Changer, osea es un cambiador de tomas bajo carga.

**Permitividad dieléctrica:** Es la relación entre el desplazamiento eléctrico y la intensidad de campo eléctrico, también conocido como constante dieléctrica relativa.

**BIL:** Nivel básico de aislamiento es el valor pico de tensión soportada para impulso tipo rayo.

**Modo UST:** (Ungrounded Specimen Test). Es un cable de puesta a tierra, sirve como mecanismo de protección para desviar la corriente y que no sea medida.

**Devanados:** Es el número de vueltas de alambre conductor distribuidas en una o más capas que tiene una bobina.

**Papel Kraft:** Papel de gran resistencia que está hecho de pulpa de madera.

**Furanos:** Son compuesto químicos heterocíclicos de cinco miembros, que incluye un átomo de oxígenos.

**Aislamiento:** En transformadores o en autotransformadores se compone del aceite desmineralizado y de la celulosa que es el papel kraft.

**Grado de polimerización:** Es el número de unidades que se repiten en una molécula de polímero.

**Vida útil:** Es la duración estimada que un autotransformador puede tener, cumpliendo correctamente la función para el cual ha sido creado.

**Factor de potencia:** Es la medida de eficiencia o rendimiento de nuestro sistema eléctrico, por ende, este indicador mide el aprovechamiento de la energía.

**Frecuencia:** Es el número de veces en el que se repite la onda sinusoidal o completa un ciclo de positivo a negativo.

**Espectroscopía dieléctrica:** También llamado espectroscopía de impedancia y mide las propiedades dieléctricas de un medio como función de la frecuencia.

**Bushing:** Dispositivo de aislamiento principal que se encuentra fuera del transformador, compuesto de porcelana pura.

**Sobrecarga de autotransformadores:** Extralimitación de cargas por encima de la capacidad del transformador.

## RESUMEN

El presente documento, se basa en el cálculo para estimar la vida útil remanente del autotransformador trifásico de potencia de la subestación Mulaló con una capacidad de 66,7 MVA, cuya relación de transformación es de 138 kV/ 69 kV /13.8 kV, cuya operación y mantenimiento está a cargo de la Corporación Eléctrica del Ecuador en su Unidad de Negocio Transelectric, mediante la gestión de la Zona Operativa Nororiental.

Al autotransformador antes mencionado, se lo hace un estudio para determinar la vida remanente en años, específicamente desde la concentración de furanos analizados al aceite dieléctrico y mediante los resultados arrojados del laboratorio previo una muestra de aceite extraída del ATQ, en el cual se considerará los resultados y realizará un seguimiento y un análisis estadístico considerando para observar el comportamiento de la degradación del papel de autotransformador de la subestación Mulaló ya que está expuesto a las altas temperaturas y oxidación, ratificando que estos compuestos se determinan mediante pruebas de laboratorio.

La predicción del tiempo de vida remanente del autotransformador, se asocia directamente con la condición del papel aislante, en conclusión, la vida del autotransformador depende de la vida del papel aislante.

Según los resultados de laboratorio, realizado al autotransformador ATQ de la subestación Mulaló, se determinará que, a pesar de estar en operación muchos años, estos equipos pueden aún aumentar su vida útil, con un buen mantenimiento y condiciones de operación a temperaturas adecuadas.



## **ABSTRACT**

This document is based on the calculation to estimate the remaining useful life of the three-phase power autotransformer of the Mulaló substation with a capacity of 66.7 MVA, whose transformation ratio is 138 kV/ 69 kV /13.8 kV, whose operation and maintenance is in charge of the Corporación Eléctrica del Ecuador in its Transelectric Business Unit, through the management of the Northeastern Operative Zone.

To the above mentioned autotransformer, a study is made to determine the remaining life in years, specifically from the concentration of furans analyzed to the dielectric oil and by means of the results thrown from the previous laboratory a sample of oil extracted from the ATQ, in which the results will be considered and a follow-up and statistical analysis will be made considering to observe the behavior of the degradation of the autotransformer paper of the Mulaló substation since it is exposed to the high temperatures and oxidation, ratifying that these compounds are determined by means of laboratory tests.

The prediction of the remaining life time of the autotransformer is directly associated with the condition of the insulating paper, in conclusion, the life of the autotransformer depends on the life of the insulating paper.

According to the laboratory results, carried out on the ATQ autotransformer of Mulaló substation, it will be determined that, despite being in operation for many years, this equipment can still increase its useful life, with good maintenance and operating conditions at adequate temperatures.

## INTRODUCCIÓN

El autotransformador de potencia se manifiesta como el corazón de la subestación de transmisión eléctrica perteneciente al equipo primario. El funcionamiento de manera correcta se relaciona con la confiabilidad en la que aporta al sistema eléctrico de potencia, he ahí que depende realizar un estudio para conocer la vida útil remanente, tomando en cuenta que un autotransformador de potencia está diseñado a una vida util mínima de 25 años en condiciones operativas con temperaturas que van desde los 65°C hasta los 96°C, considerando que realizando un mantenimiento adecuado los límites de vida útil remanente. [1], [2].

El autotransformador de potencia trabaja con niveles de tensión de 138/69/13.8 Kv, debido a su funcionamiento, tienen un solo devanado por fase y la aislación interna se tiene mediante dos elementos, el papel aislante considerado como elemento sólido y el aceite considerado como elemento líquido que al mismo tiempo cumple la función de refrigerante y evitar el sobrecalentamiento o esfuerzo electrodinámico, ya que el autotransformador que está sumergido en aceite debe operar en condiciones normales y situaciones de falla. [2].

Cabe recalcar que el papel aislante tiene gran higroscopicidad, lo cual tiene gran relación con las propiedades del papel aislante.

Es necesario hacer un análisis al autotransformador desde el punto de vista del grado de deterioro del papel, si se conoce que la vida de los autotransformadores está relacionada directamente con la resistencia del aislamiento de papel.

Al grado de polimerización se considera a una cadena molecular de un polímero, definidos por el número de unidades repetitivas llamados monómeros, por ende, el promedio de las cadenas de monómeros que constituyen el polímero representa una medida de la longitud de la cadena de monómeros.

El grado de polimerización varía dependiendo si se ha dado un adecuado mantenimiento y no se lo forzado desde el punto de vista de la cargabilidad, con esto se dice que si el papel aislante está en excelente estado tiene un valor entre 1000 y

1300, pero si el valor es menor a 200 practicamente se considera que el autotransformador está en riesgo por lo que es muy probable que pierda su nivel de aislamiento eléctrico.[1]

# CAPÍTULO I

## DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

### 1.1 Objetivos

#### 1.1.1 Objetivo General

- Diseñar un modelo analítico y matemático para estimar la vida útil remanente del autotransformador de potencia para determinar el tiempo en el que posiblemente seguirá operando, mediante análisis de resultados arrojados con la herramienta Mathcad.

#### 1.1.2 Objetivo Específicos

- Analizar el historial de las pruebas eléctricas, para la comprobación de que la resistencia de aislamiento y la relación de transformación se mantienen, basado en datos estadísticos.
- Diseñar el estimador de la vida útil remanente del autotransformador mediante el análisis matemático.
- Evaluar el desempeño desde el punto de vista de la gestión del mantenimiento para un autotransformador de potencia de 66,7 MVA de la subestación Mulaló.

### 1.2 Antecedentes

Con el paso del tiempo el autotransformador de potencia de la Subestación Mulaló ha empezado a presentar diferentes desequilibrios, las cuales han llevado al mismo a su deterioro normal por tiempo de uso. De forma más precisa, la vida del autotransformador se toma en cuenta que las variables a considerar serían tiempo en operación, condiciones climáticas, la cargabilidad a la que ha estado expuesta, la temperatura que se ha sometido por varios esfuerzos mecánicos – eléctricos y

finalmente presencia de humedad en el aceite que es en lo se enfocará en el presente trabajo.

Actualmente presenta pequeñas fugas de aceite, y la consecuencia de aquello ha hecho que la humedad ingrese al aceite y en las pruebas de cromatografía de aceite se concluye que el autotransformador de potencia tiene un leve incremento de presencia de humedad, y esto puede llegar a destruir el papel dieléctrico del autotransformador y la idea es corregir esas pequeñas entradas de humedad y disminuir la presencia de humedad para de esa manera prologar la vida útil remanente.

### **1.3 Importancia y Alcances**

Esta investigación está basada en estimar la vida útil remanente del autotransformador de potencia 66,7 MVA de la subestación de transmisión eléctrica Mulaló, ya que el mismo entró en operación en junio de 1999, por ende, se toma en cuenta ciertas variables importantes como es la frecuencia de mantenimiento, cargabilidad al que ha estado sometido el autotransformador, el objetivo de este proyecto técnico sería conseguir una maximización y optimización de la vida útil remanente, ya que en este autotransformador a analizarle se encuentra actualmente presentando pequeñas fugas de aceite.

A lo largo del tiempo se ha realizado mantenimientos preventivos tales como las pruebas eléctricas de los devanados, y relación de transformación, por ende se tiene una base de datos estadísticos que recalcan el comportamiento del autotransformador, se obtiene datos de cargabilidad o mejor conocido datos de la carga suministrada a la empresa eléctrica regional, y también datos del comportamiento de la temperatura, que ha esto se lo podría llevar a un programa o algoritmo en la herramienta matemática Mathcad con el fin de analizar las gráficas y resultados obtenidos y compararlo con tablas estandarizadas como se lo hace en el análisis cromatográfico, físico-químico o análisis de furanos, se cuenta con presencia de humedad en el aceite, lo cual conlleva al deterioro del papel aislante de los bobinados, estudios eléctricos e historial de cargabilidad, con el fin de prolongar la vida útil remanente del mismo.

## 1.4 Delimitación del Problema

De acuerdo con la CELEC, mediante el subgerente de operación y mantenimiento dirigido por el Ing. Fabián Calero Vela, quien me ha permitido y autorizado realizar el estudio al ATQ autotransformador de potencia ubicado en la Subestación Mulaló para lo cual se tomará en cuenta la información emitida por el laboratorio Morgan Schaffer ubicado en Canadá donde arroja resultados de análisis físico químicos y cromatografía de gases, y de acuerdo con los reportes de los últimos años mirar la tendencia de la gráfica para verificar su vida útil remanente mediante el análisis de furanos utilizando métodos para el cálculo del grado de polimerización del papel y tener una estimación de vida útil remanente en porcentajes y años, teniendo como base un software de Mathcad para calcular y analizar los resultados obtenidos.

Cabe recalcar que la Subestación Mulaló está situada en la provincia de Cotopaxi, en la Panamericana sur km 58, ingresando para la parroquia Mulaló como referencia ingreso por la calle frente a la fábrica Novacero. Al momento esta subestación ya lleva operando 22 años por ende requiere más cuidado cuando se trata de mantenimientos ya que es una de las subestaciones más importantes para el suministro de energía a la ELEPCO empresa Eléctrica Cotopaxi, para lo cual se realiza el presente estudio para ir verificando cuanto más podemos sacarle provecho al autotransformador ya que vendría a ser el corazón de la subestación.



**Figura 1.** Ubicación subestación Mulaló

Fuente: Google Earth Pro.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Autotransformador de Potencia**

##### **2.1.1 Concepto**

El autotransformador trifásico de potencia tiene la característica principal de tener un solo devanado o mejor dicho una bobina entre el primario y el secundario por cada fase.

El autotransformador de potencia tiene muchas ventajas, y una de ellas es el hecho que es mucho menos costoso que el transformador norma, y en el lado de baja tiene la particularidad de variar el voltaje en condiciones operativas bajo carga, pero también tiene la desventaja de que, al ser de un solo bobinado por fase, no llevan un aislamiento de devanados entre el primario y el secundario, así como es el transformador de potencia normal.

##### **2.1.2 Funcionamiento de un autotransformador**

El autotransformador al ser un equipamiento primario en subestaciones eléctricas, no está por demás decir que su funcionamiento solo es por corriente alterna, ya que en el tiempo varían los diferentes campos magnéticos.

La dirección del flujo magnético está dada por las láminas del núcleo del autotransformador, también considerado una mayor permeabilidad, su principal ventaja en el principio de funcionamiento del autotransformador es reducir pérdidas producidas por la histéresis magnética y las corrientes Foucault.

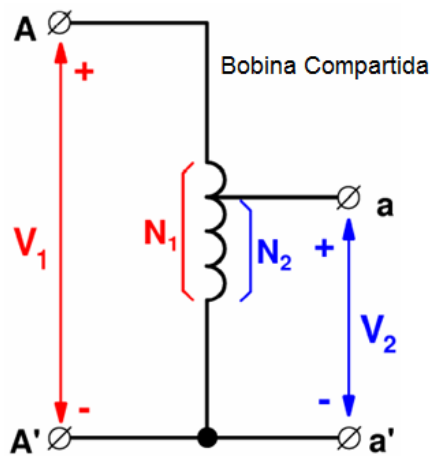
##### **2.1.3 Autotransformador Reductor**

Si el voltaje en corriente alterna es aplicado en el lado de alta, mide el voltaje de salida entre los puntos V2 como se observa en la imagen, lo cual nos indica claramente que es un autotransformador reductor de tensión, lo que se puede claramente decir que cada fase tiene un solo devanado que a la vez actúa como lado primario y secundario. [12]



**Figura 2.** Autotransformador trifásico de potencia de la subestación Mulaló

Fuente: CELEC EP - Transelectric



**Figura 3.** Bobinado de un Autotransformador reductor

Fuente: Omega Electric-servicios industriales S.A.

#### 2.1.4 Tipo de enfriamiento de autotransformadores sumergidos en aceite

Hay que tomar en cuenta que, para conocer los diferentes tipos de enfriamiento de los transformadores, existen muchos tipos, o como es en este caso de estudio en el cual estamos haciendo el estudio que es un autotransformador de potencia con un sistema de enfriamiento de clase ONAN / ONAF / OFAF. Para mirar diferentes tipos de enfriamiento en transformadores y autotransformadores, mirar Anexo 16.



### **2.1.5 Pruebas eléctricas del Autotransformador**

El autotransformador de potencia de la subestación Mulaló de marca CENEMESA, ha sido sometido a varios análisis cromatográficos y físico químicos de aceite, cuyos valores presentados indican unas posibles acciones a tomar ya sea en corto o largo plazo.

En los análisis arrojados se puede evidenciar que el autotransformador ATQ presenta indicios de humedad en su sistema de aislamiento, y para complementar el estudio de lo que se está analizando, osea las pruebas físico químicas en las que aportan a esta conclusión fueron el contenido de humedad, el porcentaje del agua en el aceite, he ahí que la jefatura de la unidad de mantenimiento de subestaciones toman la acción de realizar las respectivas pruebas eléctricas que permitan determinar el grado de humedad y su severidad para tomar acciones a corto o mediano plazo.

El 04 de octubre de 2020 se realizaron las últimas pruebas eléctricas realizadas hasta la fecha, y este es el único registro que CELEC EP me ha podido facilitar para los respectivos análisis, las respectivas pruebas eléctricas que se realizaron nos permiten verificar el sistema de aislamiento para aumentar el criterio de diagnóstico del autotransformador. Adicionalmente, aprovechando la salida de servicio del autotransformador ATQ, adicionalmente los profesionales de CELEC del área de mantenimiento de subestaciones, se realizaron las pruebas de resistencia dinámica y estática en el devanado de media tensión en sus 33 posiciones fase por fase y la medición de resistencia estática de devanados en el lado de alta tensión y terciario.

### **2.1.6 Análisis del sistema de aislamiento del autotransformador ATQ**

El autotransformador con capacidad de 66.7 MVA con niveles de tensión de 138/69/13.8 kV presenta un cambiador de tomas bajo carga OLTC en el lado de 69 kV de 33 posiciones, 5 tomas sin carga en el lado de 138 kV y el lado del terciario en conexión delta.

Tabla 1: Datos característicos del Autotransformador en este caso de estudio [14]

<b>Datos técnicos del autotransformador</b>	
Zona Operativa	Nororiental
Subestación	Mulaló
Tipo	Autotransformador
Fabricante	CENEMESA
Clase	ONAN/ONAF/OFAF
Año	1989
Equipo	ATQ
Modelo	Sellado con conservador
Potencia	40/53.34/66.7 MVA
Voltaje	138/69/13.8 kV
Impedancia 40 MVA base 138/69 KV	3.72%
DETC	Si 5 x 2.5% HV
Grupo de conexión	YNa0d1
OLTC	Si 33 x 0.625% MV

### **2.1.6.1 Análisis de medición de espectroscopia dieléctrica del autotransformador ATQ**

La medición de espectroscopía dieléctrica puede determinar el comportamiento de la tangente delta del aislamiento, a través de la variación de la frecuencia desde 1 kHz hasta la frecuencia de parada que este valor dependerá de la temperatura interna del devanado. Este principio para realizar la prueba consiste en determinar la permisividad compleja del autotransformador y ver el comportamiento del

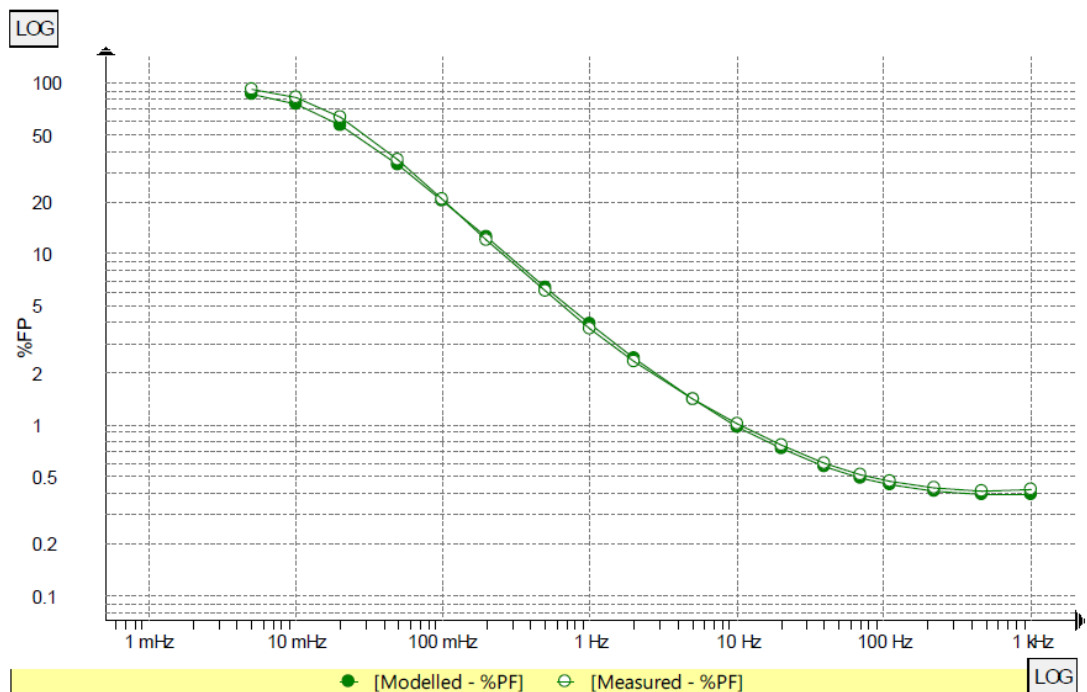
aislamiento ante un campo eléctrico al aplicar un voltaje en un rango de frecuencias, es decir se miden las propiedades dieléctricas del autotransformador como función de la frecuencia.

En esta prueba se determinan tres parámetros de análisis:

- El factor de potencia seteado a 20°C
- El porcentaje de humedad por peso en el papel dieléctrico
- La conductividad del aceite

Esta prueba nos permite analizar adicionalmente la tangente delta en función de la frecuencia en cualquier rango, el comportamiento de la capacitancia según sea el modo de prueba y la dependencia de la temperatura en función del factor de potencia.

En la figura 2.3 se pueden evidenciar los resultados obtenidos en modo UST (ya que en este modo se encuentran concentrados la mayor cantidad de papel y aceite en el transformador).



**Figura 4.** Tangente delta en función de la frecuencia

Fuente: Archivos CELEC EP- Transelectric

En la figura 2.4 se observa los resultados obtenidos en modo UST, resulta que la humedad en porcentaje por peso del papel se encuentra en casi al límite entre el estado seco y moderadamente húmedo. El factor de potencia a 60 Hz y corregido a 20°C se encuentra dentro de la norma IEEE C57.152-2013, la conductividad del aceite se observa en estado bueno, es decir sin que sus propiedades físicas presenten alguna novedad.

Si se traduce este porcentaje de humedad del papel al contenido de agua en el aceite, se vería un aceite con humedad.

Si bien es cierto que los resultados obtenidos se encuentran en buen estado en la norma IEEE C57.152-2013, el porcentaje de humedad del papel está al límite entre el estado seco y moderadamente húmedo, con lo cual el valor es evidente que el aceite del devanado en la prueba, presentaría humedad que debe ser extraída.

Tabla 2: Resultados obtenidos en la espectroscopía dieléctrica ATQ Mulaló

Fuente: Archivos CELEC EP- Transelectric

<b>Análisis de resultados</b>		
<b>% PF a 60 Hz &amp; 20 °C</b>	<b>Humedad % (peso/peso)</b>	<b>Cond. (pS/m) a 25 °C</b>
<b>0.422</b>	<b>1.9</b>	<b>1.07</b>
< 0.30 % Como nuevo	< 1.0 % Como nuevo	< 0.37 pS/m Como nuevo
0.30 – 0.50 % Bueno	1.0 – 2.0 % Seco	0.37 – 3.7 pS/m Bueno
0.50 – 1.0 % Deteriorado	2.0 – 3.0 % Moderadamente húmedo	0.50 – 1.0 pS/m Envejecido por servicio
> 1.0 % Investigar	> 3.0 % Húmedo	> 37 pS/m Deteriorado

### **2.1.6.2 Análisis de medición de resistencia de devanados del lado de 69 kV del autotransformador ATQ**

El análisis de resistencia de devanados en el autotransformador ATQ, fase por fase en las 33 posiciones en el OLTC, mejor dicho es un cambiador de tomas bajo carga. Para esta prueba se inyectaron 10 amperios de corriente continua, de tal forma de magnetizar el núcleo del autotransformador y eliminar la incidencia de la inductancia y obtener el valor de la resistencia óhmica estática, y 10 amperios de corriente continua para determinar la resistencia dinámica entre posiciones seguidas del cambiador de tomas.

Los valores obtenidos de la prueba de resistencia estática del lado de 69 kV en sus 33 posiciones de las fases A, B y C. los valores se encuentran corregidos a 75°C, ya que la temperatura del termómetro de devanados marcó 45°C.

Los valores arrojados por el equipo se pueden evidenciar en el Anexo 16.

### **2.1.6.3 Análisis de medición de resistencia de devanados del lado de 138 kV del autotransformador ATQ**

En el lado de 138 kV del autotransformador ATQ tiene el NLTC o mejor dicho, un cambiador de tomas sin carga con 5 posiciones, en donde en cada una de ellas, se midió la resistencia en las 3 fases. Se realizó una inyección de 10 amperios de corriente continua.

Los resultados se pueden apreciar en el Anexo 17.

### **2.1.6.4 Análisis de medición de resistencia de devanados del lado terciario 13.8 kV del autotransformador ATQ**

De la misma forma se realizó la medición de resistencia de devanados en el lado terciario, igual que las pruebas anteriores se inyectó 10 A de corriente continua y se realizó las mediciones que se muestran en el Anexo 18.

### **2.1.7 Tipos de aislamiento de un Autotransformador**

En un autotransformador de Potencia tenemos dos tipos de aislamiento:

- Aislamiento sólido: está representado por el papel aislante o papel Kraf impregnado en aceite.
- Aislamiento líquido: como su nombre lo dice, no es más que el aceite dieléctrico que se encuentra en la cuba del autotransformador.



**Figura 5.** Papel dieléctrico en varias formas y tamaños

Fuente: [www.power-technology.com](http://www.power-technology.com)

### **2.1.8 Envejecimiento del papel aislante**

Con el pasar el tiempo el papel aislante entra en un proceso de envejecimiento llamado esencialmente una despolimerización, el grado de polimerización (DP) y los vínculos de la cadena de la celulosa del papel aislante tienden a romperse cuando la resistencia mecánica.

Cuando el grado de polimerización (DP) que presenta el papel aislante está entre los límites de 1000 a 1300, pasa por un proceso de secado en la misma fábrica, donde el grado de polimerización (DP) se reduce a 800-1000 extrayendo un contenido en agua de 0,5%. [5].

Cuando el grado de polimerización está por debajo de 200, su resistencia mecánica es baja, en el cual el autotransformador no será capaz de soportar los esfuerzos de repulsión de cortocircuitos. [5].

Varios tipos de reacciones químicas pueden provocar la despolimerización de la celulosa son la hidrólisis, pirólisis y la oxidación.

Por ende, los factores principales que influyen en el envejecimiento del papel aislante en los autotransformadores y transformadores son la humedad, temperatura el oxígeno [6].

### 2.1.8.1 Hidrólisis

Es un proceso donde la celulosa tiende a degradarse por medio de la humedad, y da lugar a tres moléculas de agua ( $H_2O$ ) el cual da paso a una degradación del aislamiento sólido, por lo general menos del 1% de la cantidad de agua total se disuelve en el aceite. La presencia de humedad aumenta el envejecimiento del transformador, al principio su aislamiento sólido (papel Kraft) posee un 0.5% de agua, estos niveles pueden incrementarse hasta el 5% durante su vida útil, lo cual aumenta la degradación del papel aislante [16], en la Figura No.5, se puede observar este proceso.

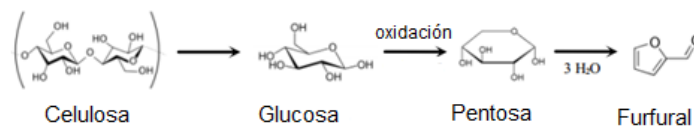


Figura 6. Degradación de la celulosa [15]

### 2.1.8.2 Pirólisis

Se da por las altas temperaturas, descartando la humedad, oxígeno u oxígeno u otro agente que provoque la descomposición. A temperatura normal o sobrecarga ( $\leq 140^\circ C$ ) este proceso no es significativo, pero en altas temperaturas ocurren defectos que pueden generar  $H_2O$ , 2-furfural,  $CO$  y  $CO_2$ .

### 2.1.8.3 Oxidación

Es la formación de oxígeno y es principalmente una forma de provocar una degradación de la celulosa de forma lenta, debido a que genera humedad y dióxido de carbono. Estos productos son el:

- 5-metil
- 2-furaldehído
- 2-acetil-fúrano y
- alcohol furfurílico.

Los radicales de hidroxilo (HO) catalizan la despolimerización oxidativa, esta se produce cuando se descompone el peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

### **2.1.9 Grado de Polimerización del papel aislante**

El nivel del aislamiento de papel en un autotransformador depende del grado de polimerización (DP), que en una cadena es representada por el número de anillos de glucosa en una cadena. Cual entra en el proceso de envejecimiento del autotransformador, los anillos glucósicos se rompen, disminuyen la resistencia mecánica del papel aislante, lo cual genera subproductos como humedad, gases, grupos aldehído, grupos de carboxilo, furanos.

Los compuestos furánicos disueltos en el aceite aislante son producto de la degradación del papel y no de la degradación del aceite. Por lo general son cinco los compuestos furánicos que podemos encontrar disueltos en el aceite, ellos son:

- Furfurol (FOL)
- 2 furfural (2FAL)
- 2 acetilfurano (AF)
- 5 metil-2 furfural (MF)
- 5 hidroximetil-2 furfural (HMF)

De los antes mencionados compuestos furánicos, suele emplearse para la correlación con el grado de polimerización *DP* la concentración de 2-furfural (2-FAL), ya que ha sido demostrado que es el único compuesto que permanece estable a temperaturas de funcionamiento normal.

### **2.1.10 Cálculo para grado de polimerización del aislamiento del papel basado en la concentración de furfural (2FAL)**

Durante el proceso de degradación del aislamiento sólido aparecen los compuestos furánicos, y pueden medirse tomando una muestra de aceite del autotransformador sin la necesidad de abrirlo.



Varios métodos han sido desarrollados para expresar por una fórmula la relación entre furanos y el grado de polimerización DP. En este trabajo se analizan cuatro métodos.

- Método Chendong
- Método de Stebbins
- Método De Pablo
- Método Pahlavanpour

Con base a los valores obtenidos en el cálculo del grado de polimerización (DP) mediante las ecuaciones anteriores es posible la vida remante considerando los cambios que se generan en el grado de polimerización (DP) de aislamiento de papel, que tienen correlación con la resistencia mecánica y otras propiedades físicas de ese elemento.

#### **2.1.10.1 Método Chendong**

El método de Chendong se propone una fórmula desarrollada para transformadores sin papel mejorado térmicamente.

$$DP = \frac{\log_{10}[2FAL_{ppm}] - 1.51}{-0.0035} \quad (2.1)$$

Donde la concentración de 2FAL es en ppm (partes por millón).

Esta ecuación se desarrolló en base a datos recopilados de los transformadores que tienen papel Kraft normal y conservadores de respiración libre.

#### **2.1.10.2 Método Stebbins**

El método de Stebbins propuso la ecuación, que es la modificación del método de Chendong, en el cual esta se usará para el papel mejorado térmicamente.

$$DP = \frac{\log_{10}[2FAL_{ppb} * 0.88] - 4.51}{-0.0035} \quad (2.2)$$

Donde la concentración de 2FAL es en ppb (partes por billón).

La principal observación de estos métodos (Chendong y Stebbins) es que tiene sus limitaciones para cálculos solo a algunos transformadores, es decir, según el tipo de aislamiento.

Estos modelos se utilizan únicamente para calcular el grado de polimerización mediante la concentración de furanos en el aceite. Se considera que el estudio de furanos es mejor que el uso de un gradiente puramente de punto caliente, porque el primero se basa en un subproducto del proceso de envejecimiento.

Pero hay que tomar en cuenta que el principal contratiempo con estos modelos es que en el caso de que el aceite sea reemplazado o regenerado, lo que variará la concentración de furanos.

#### **2.1.10.3 Método De Pablo**

El método De Pablo es un modelo matemático en el que se puede obtener un resultado para saber la resistencia mecánica que provoca la degradación de papel aislante, esta investigación es formada por un grupo de trabajo 15.01.03 de la CIGRE, por lo que el modelo De Pablo encuentra una correlación para el grado de polimerización.

$$DP = \frac{7100}{8.8 + [2FAL_{ppm}]} \quad (2.3)$$

Donde la concentración de 2FAL es en ppm (partes por millón).

#### **2.1.10.4 Método de Pahlavanpour**

El modelo de Pahlavanpour está basado en el mejoramiento del modelo de De Pablo, en el que toma en cuenta que el envejecimiento del papel no es uniforme y la suposición de que el 20% de las capas interna de papel en el devanado tiende a degradarse rápidamente que el resto del papel de aislamiento.

La correlación que encuentra para el grado de polimerización es:

$$DP = \frac{800}{(0.186*[2FAL_{ppm}])+1} \quad (2.4)$$

Donde la concentración de 2FAL es en ppm (partes por millón).

### 2.1.11 Estimación del grado de polimerización en función de la concentración de (2FAL)

Al utilizar los diferentes métodos matemáticos antes mencionados, los cálculos de estimación para el grado de polimerización (DP), en relación a la concentración de 2FAL por cualquiera de los métodos matemáticos expuestos tienen una similitud en el envejecimiento del papel considerado su primera etapa. Pero mientras aumenta la concentración de 2FAL quiere decir que las condiciones de envejecimiento van a cambiar por cada ecuación ya que fueron definidas de manera diferente.

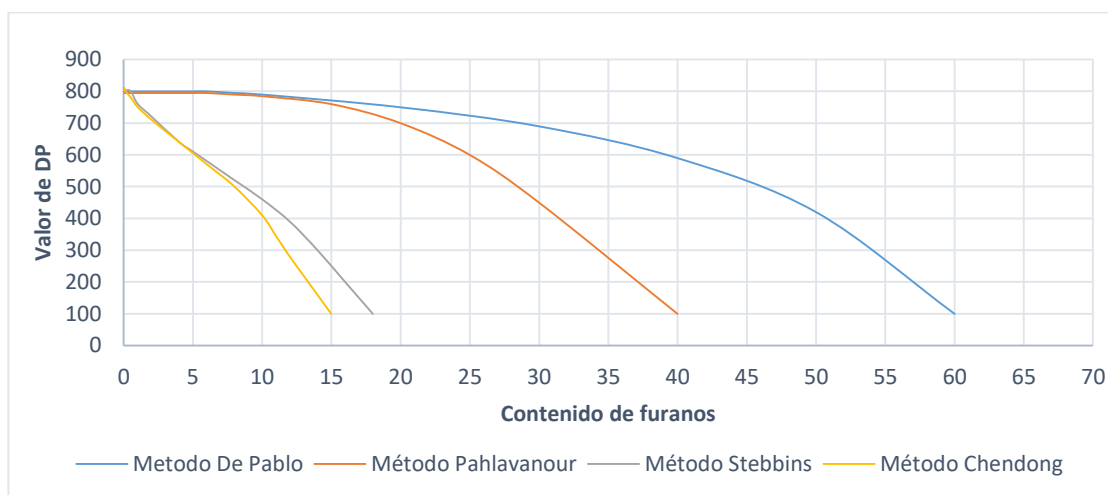


Figura 7. Relación del DP en función de concentración 2FAL [21]

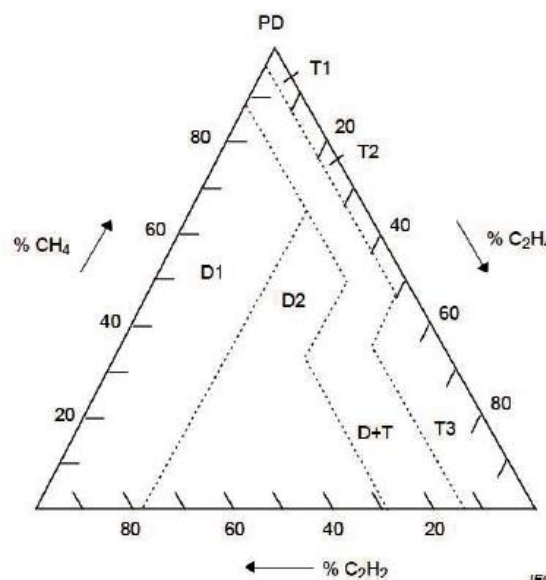
Una vez que se obtiene el grado de polimerización, se procede a realizar un diagnóstico del mismo con la información de la tabla 4, en el que nos da parámetros para evaluar el estado del papel aislante. Como se puede apreciar en el Anexo 19.

### 2.1.12 Triángulo de Duval

Es un método muy eficiente desarrollado por Michael Duval en 1974, el cual fue desarrollado para determinar posibles inconvenientes presentando diferentes gases, básicamente con una estructura molecular enfocado en el carbono y el hidrógeno, este método es muy utilizado para hacer diagnósticos en aceites aislados en

transformadores. Este método del triángulo de Duval consiste en hacer un estudio a los 3 tipos de gases que tiene un transformador o autotransformador como son: CH<sub>4</sub> (Metano), C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (Acetileno), C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (Etileno). [13]

Varios estudios afirman que este método es muy confiable, ya que una de las ventajas de éste método es que los resultados de sus diagnósticos cuentan con un error de porcentajes bajos. Este método se realiza dibujando un triángulo en el cual se van localizando las diferentes concentraciones de gases disueltos en el aceite dieléctrico. [13]



**Figura 8.** Triángulo de Duval [13]

En donde:

PD: Descargas parciales

D1: Descargas de baja energía

D2: Descargas de alta energía

T1: Falla térmica ( $t \leq 300 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

T2: Falla térmica ( $300 \text{ } ^\circ\text{C} < t < 700 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

T3: Falla térmica ( $t > 700 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

Cuando se hayan detectado los diferentes tipos de gases que se presentan en el triángulo de Duval, se calcula un valor total acumulado de los tres gases como se observa en las ecuaciones 2.5, 2.6 ,2.7 y se divide cada gas por el total, para determinar el porcentaje de cada gas y poder ubicarle en el triángulo. Las ecuaciones suscritas permiten obtener el valor en porcentaje de los gases:

$$\%C_2H_2 = \frac{100*x}{x+y+z} \quad (2.5)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{100*y}{x+y+z} \quad (2.6)$$

$$\%CH_4 = \frac{100*z}{x+y+z} \quad (2.7)$$

En donde:

x:  $\%C_2H_2$  (ppm, partes por millón)

y:  $\%C_2H_4$  (ppm, partes por millón)

z:  $\%CH_4$  (ppm, partes por millón)

Los límites que se encuentran marcados en el triángulo de Duval se encuentran en la siguiente tabla: en el cual nos ayuda a detectar tres tipos de fallas, como son:

- Fallas Parciales
- Falla eléctrica
- Fallas térmicas

Tabla 3: Límites de zonas [13]

<b>Límites de zonas</b>				
<b>PD</b>	98% $CH_4$			
<b>D1</b>	23% $C_2H_4$	13% $C_2H_2$	38% $C_2H_2$	29% $C_2H_2$
<b>D2</b>	23% $C_2H_4$	13% $C_2H_2$		
<b>T1</b>	4% $C_2H_2$	10% $C_2H_4$	50% $C_2H_4$	
<b>T2</b>	4% $C_2H_2$	10% $C_2H_4$		
<b>T3</b>	15% $C_2H_2$	50% $C_2H_4$		

Las fallas se clasifican en 6 zonas denominadas como fallas individuales (PD, D1, D2, T1, T2, T3). Como se conoce este método cuenta con los tres componentes a saber P1, P2 y P3, los cuales se determinan por tres puntos como se muestra en la figura 7.

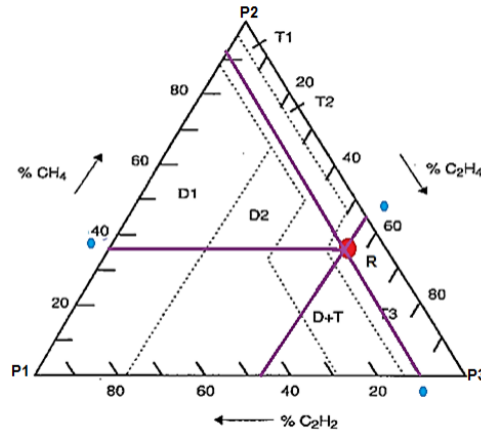


Figura 9. Construcción de triángulo de Duval [13]

### 2.1.12.1 Límites tasas y valores de TDGC (Total Dissolved Combustible Gases)

La descomposición del aceite desde 150 °C a 500 °C, produce grandes cantidades de gases de bajo peso molecular como son el Hidrógeno ( $H_2$ ) y el Metano ( $CH_4$ ), así como también se encuentran diferentes tipos de gases como el Etano ( $C_2H_6$ ), Etileno ( $C_2H_4$ ).

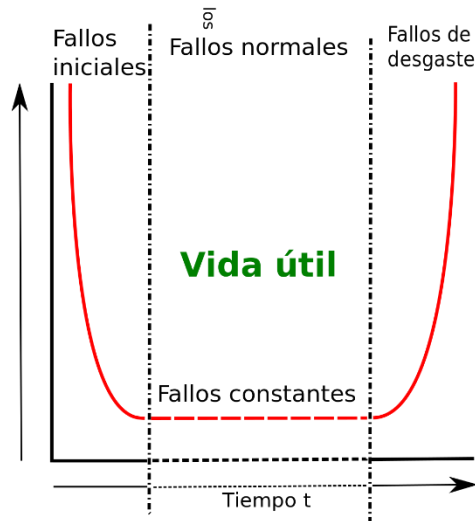
Los diferentes tipos de falla del triángulo de Duval con varios ejemplos podemos observar en el Anexo 20.

### 2.1.13 Curva de la bañera

Esta gráfica es muy importante ya que podemos tomar como base una representación de la probabilidad de que un activo como por ejemplo el autotransformador a analizarse se averíe a lo largo del período de su vida útil. [7]

El funcionamiento del autotransformador varía a lo largo de ciclo de vida, por ende, para garantizar una alta eficiencia y disponibilidad es necesario adaptar su

mantenimiento a cada fase. Pero para aquello existen algunos indicadores que permiten monitorizar la evolución de un activo, por lo que uno de los métodos es la curva de la bañera en mantenimiento. [7]



**Figura 10.** Curva de la bañera para el mantenimiento [7]

#### 2.1.14 Estimación de vida útil del autotransformador

Este término está definido básicamente a la vida útil del aislamiento del autotransformador, mas no a la vida real del autotransformador, una terminología basada a la guía de carga de la IEEE, pero todavía existe la incógnita de relacionar la vida del aislamiento del papel y la vida del transformador, ya que la vida del transformador como tal puede superar la vida del aislamiento interno del autotransformador. [7].

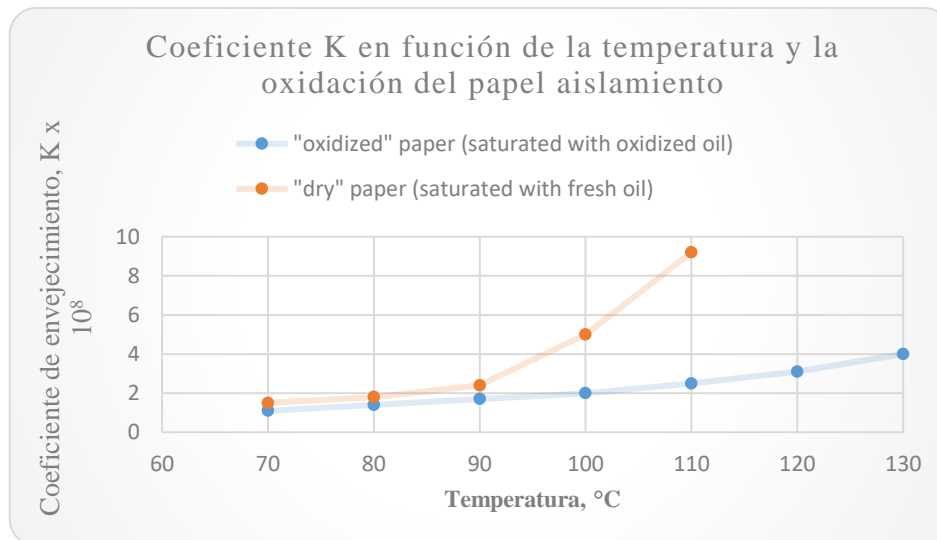
La vida útil utilizada del autotransformador nos permite palpar cuanta vida ha consumido el transformador de potencia, es el diagnóstico de todo lo que compete al autotransformador desde su funcionamiento hasta la actualidad, existen fórmulas que nos ayudan a calcular la vida utilizada del autotransformador de potencia de la subestación Mulaló, tomando en cuenta el grado de polimerización [7].

### 2.1.14.1 Vida remanente en años del autotransformador, con la correlación con el grado de polimerización

Cabe tomar en cuenta que es muy compleja la forma de estimar la vida remanente de un equipo, debido a que las suposiciones están latentes y son varias, especialmente por la falta de definiciones en relación con algunas definiciones como por ejemplo fin de vida en relación a las condiciones operativas del autotransformador [21].

Todavía el aislamiento del autotransformador tiene la gran incógnita como el final de vida hasta la fecha, debido a que existe debates y discusiones generadas a los valores a calcularse tanto de vida normal y también el criterio de final de vida [21].

$$\text{Vida remanente (años)} = \frac{1}{K} * \left( \frac{1}{DP_k} - \frac{1}{DP_t} \right) \quad (2.8)$$



**Figura 11.** Coeficiente K en función de la temperatura y la oxidación del papel aislante [21]

Donde:

K: es el coeficiente empírico de envejecimiento que depende de temperatura y condición del aislamiento del papel [2].



$DP_t$ : es el valor de DP del autotransformador que ha funcionado durante t horas [2].

$DP_k$ : es el 0.04458 % menos del valor de DP como consideración, para determinar la variable del final de la vida útil del autotransformador [2].

Sin embargo, el valor del coeficiente K debe leerse del gráfico. La lectura se realiza en funcionamiento normal temperatura (80°C), pero en diferentes condiciones del papel aislamiento. Si la condición de aislamiento se establece como:

- Seco:  $K=1.5 \times 10^{-8}$
- Oxidado:  $K=2 \times 10^{-8}$

Por lo que se establece que los valores de la vida remanente no son iguales.

## **CAPÍTULO III**

### **ALTERNATIVAS DE LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO**

#### **3.1 Mantenimiento del autotransformador de potencia**

El mantenimiento del autotransformador es requisito indispensable para el correcto funcionamiento de una máquina, sus objetivos fundamentales son:

- Asegurar la disponibilidad del equipo en el mínimo tiempo posible.
- Maximizar la vida residual de la máquina.
- Optimizar los costos de operación

#### **3.2 Salida no programada del autotransformador de potencia**

Cuando ocurre una salida no programada debe tenerse mucho cuidado al intentar determinar la causa de la falla. Una energización prematura del equipo puede provocar mayores daños al autotransformador. También se puede estar poniendo en peligro al personal.

Una salida no programada ocurre cuando:

- Hay operación del interruptor o fusible
- Hay operación del relé de presión elevada
- Hay operación de la válvula de sobrepresión

#### **3.3 Procedimiento a seguir ante una salida no programada del autotransformador de potencia**

Es necesario buscar la causa de la operación de las protecciones, teniendo en cuenta que puede haber fallado el autotransformador o el dispositivo protector. Se debe realizar una inspección externa como por ejemplo buscar deformaciones de la cuba, juntas rotas o con fugas de aceite.

A través de un acceso, buscar celulosa quemada, partes metálicas fundidas, aceite quemado u olores anormales. A continuación, se debe realizar una inspección interna, tomando las precauciones necesarias por los posibles gases combustibles.

Como todo esto conlleva a una cadena de procedimientos, después se debe realizar pruebas al aceite, pruebas eléctricas al autotransformador, es necesario evitar pruebas de alta tensión, después de que el transformador no fue la causa de la desenergización se puede energizar con seguridad.

### **3.4 Parte fundamental del mantenimiento óptimo**

El mantenimiento con mayor profundidad es indispensable como por ejemplo las pruebas eléctricas a realizarse, las cuales son:

- Resistencia del aislamiento
- Aislamiento núcleo-tierra
- Resistencia de los devanados
- Relación de transformación
- Medición del factor de potencia

### **3.5 Tipos de mantenimiento a realizarse**

#### **3.5.1 Mantenimiento correctivo:**

- Planificado
- No planificado

##### **3.5.1.1 Mantenimiento correctivo planificado**

Cuando el resultado de una inspección muestra que el autotransformador posee problemas de humedad, gases combustibles, productos de la oxidación, fugas de aceite y otros, deben realizarse trabajos correctivos, tales como la desgasificación o reducción del nivel de humedad en el transformador y la remoción de sedimentos (desenlazar el aceite). Lo cual va dirigido a:

- Eliminar humedad en el autotransformador.
- Restaurar las propiedades del aceite.
- Corregir eventuales fallas del aceite.
- Disminuir las temperaturas de trabajo del autotransformador
- Rehabilitar el transformador
- Correcciones de pintura

### **3.5.1.2 Mantenimiento correctivo no planificado**

Si el mantenimiento se efectúa fuera de un período planificado, eso quiere decir que va dirigido a restaurar la operación del autotransformador luego de haber ocurrido una salida no programada.

### **3.5.2 Mantenimiento preventivo:**

- Mantenimiento periódico o preventivo planificado, MPP (Mantenimiento basado en el tiempo).
- Mantenimiento predictivo (Mantenimiento basado en la condición, MBC).

#### **3.5.2.1 Mantenimiento periódico o preventivo planificado (MPP)**

La clasificación de este tipo de mantenimiento está dada por un grupo de mantenimiento como son:

- Inspecciones periódicas diarias
- Inspecciones periódicas semestrales
- Mantenimiento parcial anual
- Mantenimiento parcial cada tres años
- Mantenimiento capital

##### **3.5.2.1.1 Inspecciones periódicas diarias**

Deben ser obtenidos registros operacionales a través rutinas diarias tomando un registro de valores de los instrumentos indicadores del autotransformador, que va de la con la operación del ATQ y en caso de

valores fuera de rango reportar ya que puede afectar las condiciones operativas en el desempeño del equipo.

#### **3.5.2.1.2 Inspecciones periódicas semestrales**

Las inspecciones periódicas semestrales que deben ser realizadas son:

- a) Bushings
- b) Tanque y radiadores
- c) Tanque conservador
- d) Control de temperaturas
- e) Sistema de ventilación
- f) Sistema de circulación de aceite
- g) Dispositivo purificador y secador de aire
- h) Dispositivo de alivio de presión
- i) Relé de Buchholz
- j) Relé de presión
- k) Conmutador de derivaciones manual y bajo carga, así como también el dispositivo de control OLTC
- l) Caja de terminales de alambre de control y protección
- m) Conexiones externas

#### **3.5.2.1.3 Mantenimiento parcial anual**

El mantenimiento del autotransformador debe efectuarse durante quince días, una vez al año, aunque dependiendo de la necesidad su necesidad se multiplica en función de los daños que podría ocasionar su parada por avería. Se recomienda hacer una cromatografía gaseosa y termovisión, con el objetivo de detectar calentamientos anormales en los conectores y estando atento a síntomas de temperatura anormal en cualquier lugar del autotransformador.

Las acciones del mantenimiento anual constan de:

- a) Limpieza general
- b) Análisis físico-químico del aceite

- c) Mantener el nivel de aceite
- d) Mantenimiento a los filtros de sílica gel
- e) Ensayos del relé de gas o Buchholz
- f) Realizar cambios de componentes de corta vida
- g) Eliminar los defectos detectados durante la operación

En este caso como hay conmutación bajo carga, para anular las consecuencias de los arcos internos que se producen durante su funcionamiento, el sistema de conmutación es sometido a mantenimiento, extrayéndose para su revisión, limpieza, reparación y cambio de aceite.

#### **3.5.2.1.4 Mantenimiento parcial cada tres años**

Además de las acciones del mantenimiento anual, cada tres años deben ser realizados los siguientes ensayos al aislamiento, como es la medición del factor de potencia del autotransformador y de los bushings capacitivos y resistencia de aislamiento al transformador.

Durante el período de desconexión para la ejecución de estos ensayos, deben ser hechas las reparaciones posibles, detectadas en las inspecciones anteriores.

#### **3.5.2.2 Mantenimiento predictivo (Basado en la condición MBC)**

Caracterizado por menores costos y menos tiempo de aplicación, pero con equipos más costosos y especialistas muy calificados.

Este método agrupa técnicas basadas en efectuar un seguimiento periódico o continuo del estado de un dispositivo, permitiendo diagnosticar con cierta anticipación averías o anomalías para justificar y hacer segura su intervención.

Es decir que, en este caso, al mantenimiento se funden las funciones del diagnóstico como parte integral del mantenimiento predictivo, pero con la

desventaja de que se hace costoso preparar un especialista que abarque todas las técnicas y funciones relativas a esta definición por lo complejo de las mismas.

### **3.6 Mantenimiento como medio de extensión de vida útil remanente del autotransformador de potencia**

Las actividades del mantenimiento al autotransformador se encuentran lo que es el diagnóstico al autotransformador y el diagnóstico al equipo asociado al autotransformador, si existiera algún tipo de eventualidad se procede al mantenimiento como es el proceso al aceite, secado de la parte activa y acciones del mantenimiento en general.

Como parte del diagnóstico, quiere decir que se encarga de determinar por los síntomas, la causa y la característica de una posible avería, envejecimiento, rotura de un dispositivo en cuestión.

El diagnóstico al autotransformador abarca el diagnóstico al aceite y a la parte activa del mismo.

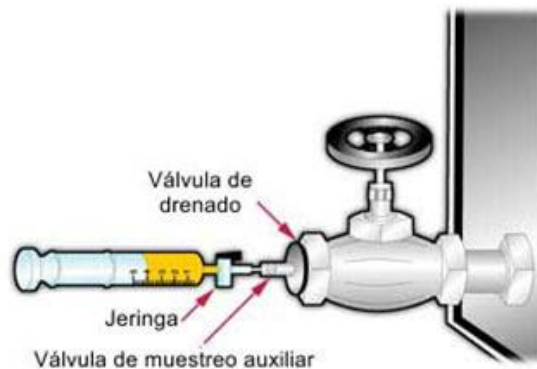
Como objetivo del diagnóstico tenemos las siguientes características:

- Detectar fallos incipientes
- Disminuir el tiempo de parada por rotura, el tiempo fuera de servicio de dispositivos y evitarla destrucción total de dispositivos y procesos.
- Conocer de forma periódica el estado de un dispositivo o proceso como una forma de retroalimentación operacional de los sistemas.
- Aumentar la confiabilidad de los procesos o sistemas.
- Permitir el trabajo de equipos y dispositivos en los niveles óptimos de funcionamiento.

### 3.7 Válvula de muestras del aceite dieléctrico

Para la realización de los ensayos es necesario que la válvula de muestras de aceite se realice con el siguiente procedimiento:

- Limpiar cuidadosamente la válvula o dispositivo existente para la toma de aceite.
- Acoplar un adaptador a la abertura principal de la válvula.
- Purgar medio litro de aceite aproximadamente.
- Acoplar un dispositivo a una manguera para este fin.
- Usar un recipiente de vidrio transparente con capacidad de un litro, debiendo ser lavado con agua y secado, posterior a eso limpiar con alcohol.
- Llenar le recipiente evitando la entrada de cualquier impureza.
- Sellar herméticamente el recipiente con un tapón de vidrio impregnado.



**Figura 12.** Extracción de muestra de aceite de un transformador [22]

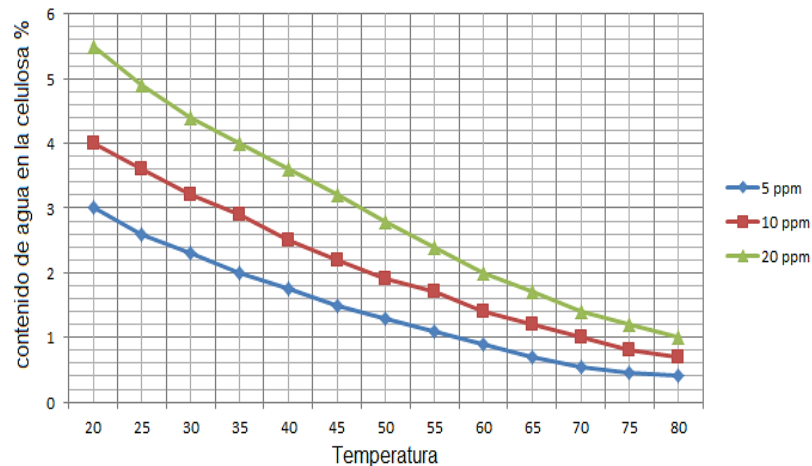
### 3.8 Contenido de humedad en el papel aislante

Un nivel alto de humedad en el aceite demuestra gran cantidad de humedad en el papel aislante, pero no basta para determinar la cantidad de agua del mismo.

La concentración de humedad en el autotransformador varía con la temperatura de operación de este, debido a la termodinámica que se desarrolla permanentemente dentro del equipo:



- Si la temperatura asciende, el sistema transfiere la humedad del papel hacia el aceite.
- Si la temperatura desciende, el sistema transfiere agua del aceite hacia el papel aislante.
- El equilibrio se logra cuando la presión de vapor de agua es igual en el papel y el aceite y por tanto no hay transferencia de humedad.



**Figura 13.** Centro de investigaciones y pruebas electroenergéticas [22]

La norma IEEE Std.62 plantea una guía general de interpretación de los resultados relacionando la condición del aislamiento sólido en función de % de saturación de aceite, partiendo del principio de equilibrio entre la humedad contenida en el aceite y la contenida en el aislamiento sólido.

### 3.9 Tratamientos en el autotransformador durante el mantenimiento

Los tratamientos a realizarse en el autotransformador se emplean de diferentes maneras como son:

- Recirculación de aceite.
- Reacondicionamiento del aceite aislante.
- Regeneración del aceite aislante.
- Secado del autotransformador

### **3.9.1 Recirculación de aceite**

Este proceso de recirculación de se hace circular el líquido aislante continuamente a través de una planta de tratamiento con vacío con tratamiento adicional de calor por un tiempo mínimo de 8 horas o 2 volúmenes, para quitar la humedad y gases disueltos. Durante el tratamiento se permite que se mantenga operando todas las bombas del transformador, pero no los ventiladores.

El tiempo de la recirculación del aceite puede variar, dependiendo de las recomendaciones de los fabricantes, tensión y BIL.

La humedad y el contenido de gases disueltos deben ser monitoreados regularmente. Si el proceso de llenado del transformador se realiza con el adecuado procedimiento de vacío y desgasificación, puede que no sea necesario aplicar el proceso de recirculación. Cuando termina este proceso el autotransformador no debe ser energizado por al menos 24h.

También se puede realizar este proceso con el aceite en el autotransformador estando en funcionamiento o después de pasar el aceite a tanques cisterna mediante un secado de la parte activa.

El sistema de reacondicionamiento del aceite consta de las siguientes etapas:

1. Etapa de calefacción para calentamiento del aceite entre (20°C – 60°C).
2. Etapa de desgasificación y deshumidificación del aceite. mediante un proceso de atomización y aplicación de vacío; en una cámara de desgasificación, previo calentamiento.
3. Etapa de filtraje. Remoción de pequeñas partículas y separación de mecánica de contaminantes insolubles pasándolos por filtros micrométricos y de suficiente área de exposición.

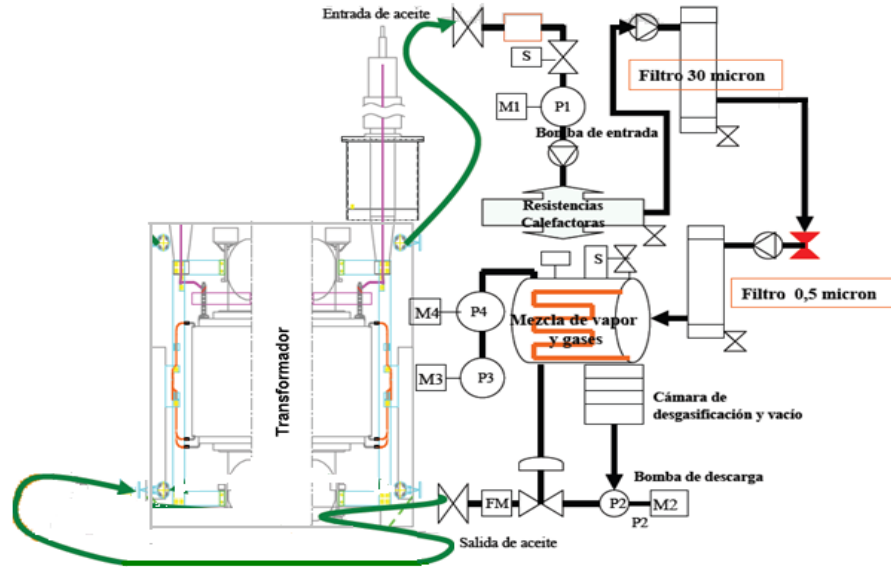


Figura 14. Diagrama de flujo de planta de reacondicionamiento [22]

Esto debe cumplir con algunas condiciones para el reacondicionamiento del aceite:

1. Calentamiento: el aceite debe ser calentado cuidadosamente para evitar sobrecalentamiento del mismo y su deterioro.
2. Buena filtración: se debe tener mucho cuidado en mantener la limpieza de los filtros de la instalación.
3. Deshidratación y desgasificación: se llevan a cabo en el tanque desgasificador. La estructura interna del tanque hace que la superficie de aceite expuesta al mayor vacío posible sea la máxima.

### 3.9.2 Regeneración del aceite aislante

La regeneración significa devolver sus características físicas y químicas originales mediante procesos fisicoquímicos de lavado, neutralizado, desgasificación y eliminación de la humedad. Los medios típicamente empleados para hacer esta regeneración son tratamientos con agentes adsorbentes.

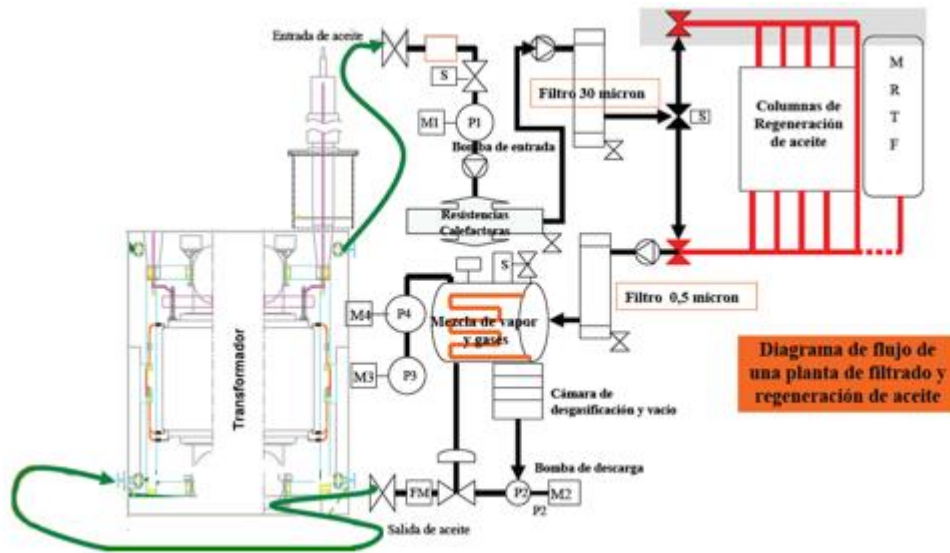


Figura 15. Diagrama de flujo de planta de reacondicionamiento y regeneración [22]

### 3.9.3 Secado del Autotransformador

El buen funcionamiento de un autotransformador depende en gran medida de la calidad con que se haya realizado su secado. La mayor parte de los materiales aislantes utilizados en los autotransformadores son higroscópicos en alguna medida, o que dificulta mantener seco el aislamiento.

El objetivo principal del secado es el de extraer, tanto como sea posible, la humedad y el aire contenidos en el aceite, en los intersticios de las bobinas y en las chapas.

En esencia, el secado consiste en el movimiento de la humedad de las capas interiores hacia las exteriores del material, y desde su superficie hacia el medio ambiente. Este movimiento ocurre debido a las diferencias de presiones de los diferentes medios.

El movimiento de la humedad en el material ocurre de las capas más húmedas a las menos húmedas, y de las más calientes a las menos calientes.

## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGÍA Y CÁLCULOS**

#### **4.1 Mathcad software a utilizarse para representar las ecuaciones**

El software Mathcad es un asistente matemático, la herramienta más viable para este tipo de cálculos complejos, como es el caso de este análisis técnico, ya que principalmente sirve para introducir las variables e ir relacionando las ecuaciones respectivas, con las cuales se verificará y se validará los valores introducidos, para los cálculos de ingeniería a utilizarse. [24]

#### **4.2 Matlab software de programación a utilizarse para la interfaz gráfica**

Con el fin de establecer una programación amigable y rápida, también se ha utilizado la herramienta “Guide” perteneciente a un paquete del software de Matlab, para dar paso a un diseño de una interfaz gráfica confiable y permitir arrojar valores de manera instantánea. [24]

#### **4.3 Valor a utilizarse para el cálculo del grado de polimerización**

De acuerdo a lo mencionado y estudiado en los inicios de este proyecto, lo que se quiere es estimar la vida útil remanente del autotransformador de potencia de la subestación Mulaló, para el cálculo del grado de polimerización se toma en cuenta únicamente el valor del furfural (ppb), que nos indica los anexos adjuntos de los resultados arrojados en las últimas pruebas que se le ha realizado al autotransformador realizadas por el laboratorio canadiense Morgan Schaffer.

#### **4.4 Concepto del furfural**

El furfural se considera como un líquido móvil incoloro o a su vez de color marrón-rojiza con un olor desagradable. El punto de inflamación es de 140 °F. El furfural es un aldehído que es furano que en la posición 2 del hidrógeno encontrado en la familia

de un grupo formilo. Es miembro de los furanos y un aldehído, que se deriva de un furano.

#### 4.5 Cálculo del grado de polimerización

Para los cuatro métodos del cálculo del grado de polimerización se requiere el valor del furfural, que se encuentra en los resultados de las pruebas emitidas por el laboratorio Morgan Schaffer, ver Anexos 22 hasta la 26 para visualizar los resultados de laboratorio.

Tabla 4: Resultados de pruebas de Furanos

<b>Resultados de pruebas de furanos</b>	
Subestación	Mulaló
Código	Autotransformador ATQ
5-metil-2-furfural (MF) (ppb)	< 5
Furfurol (ppb)	< 5
2-furfural (2FAL) (ppb)	12
2-acetil-furano (AF) (ppb)	< 5
5-hidroximetil-2furfural (HMF) (ppb)	< 5

$$2FAL_{ppb} = 12$$

$$2FAL_{ppm} = 0.012$$

##### 4.5.1 Método Chendong

$$DP = \frac{\log_{10}[2FAL_{ppm}] - 1.51}{-0.0035}$$

$$DP = \frac{\log_{10}[0.012] - 1.51}{-0.0035}$$

$$DP = \frac{-1.9208 - 1.51}{-0.0035}$$

$$DP = \frac{-3.4308}{-0.0035}$$

$$DP = 980.23 \sim 980$$

#### 4.5.2 Método Stebbins

$$DP = \frac{\log_{10}[2FAL_{ppb} * 0.88] - 4.51}{-0.0035}$$

$$DP = \frac{\log_{10}[12 * 0.88] - 4.51}{-0.0035}$$

$$DP = \frac{1.0237 - 4.51}{-0.0035}$$

$$DP = \frac{-3.4863}{-0.0035}$$

$$DP = 996.1 \sim 996$$

#### 4.5.3 Método De Pablo

$$DP = \frac{7100}{8.8 + [2FAL_{ppm}]}$$

$$DP = \frac{7100}{8.8 + 0.012}$$

$$DP = \frac{7100}{8.812}$$

$$DP = 805.72 \sim 805$$

#### 4.5.4 Método de Pahlavanpour

$$DP = \frac{800}{(0.186 * [2FAL_{ppm}]) + 1}$$

$$DP = \frac{800}{(0.186 * 0.012) + 1}$$

$$DP = \frac{800}{(0.002232) + 1}$$

$$DP = \frac{800}{1.002232}$$

$$DP = 798.22 \sim 798$$

De acuerdo a los métodos planteados se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 5: Cálculo del grado de polimerización (DP)

Método de cálculo	Grado de Polimerización DP
	Autotransformador ATQ Mulaló
FURANOS (2FAL) - ppb	12
Chendong (ppm)	980
Stebbins (ppb)	996
De Pablo (ppm)	805
Pahlavanpour (ppm)	798

De acuerdo a los resultados arrojados en la Tabla 4.2, y lo comparamos con los rangos antes mencionados en la Tabla 2.1, podemos observar que el grado de polimerización del autotransformador de la Subestación Mulaló se encuentra en estado saludable.



#### 4.6 Cálculo para estimar la vida remanente del autotransformador

$$Vida\ remanente\ (a\tilde{nos}) = \frac{1}{K} * \left( \frac{1}{DP_k} - \frac{1}{DP_t} \right)$$

El cálculo para estimar la vida remanente del autotransformador de estudio se calcula mediante los resultados obtenidos en el cálculo del grado de polimerización.

##### 4.6.1 Método Chendong

$$Vida\ remanente\ (a\tilde{nos}) = \frac{1}{K} * \left( \frac{1}{DP_k} - \frac{1}{DP_t} \right)$$

$$Vida\ remanente\ (a\tilde{nos}) = \frac{1}{2x10^{-8}} * \left( \frac{1}{979.793} - \frac{1}{980.23} \right)$$

$$Vida\ remanente\ (a\tilde{nos}) = \frac{1}{2x10^{-8}} * (4.55008x10^{-7})$$

$$Vida\ remanente\ (a\tilde{nos}) = 22.75$$

##### 4.6.2 Método Stebbins

$$Vida\ remanente\ (a\tilde{nos}) = \frac{1}{K} * \left( \frac{1}{DP_k} - \frac{1}{DP_t} \right)$$

$$Vida\ remanente\ (a\tilde{nos}) = \frac{1}{2x10^{-8}} * \left( \frac{1}{995.655} - \frac{1}{996.1} \right)$$

$$Vida\ remanente\ (a\tilde{nos}) = \frac{1}{2x10^{-8}} * (4.486918x10^{-7})$$

$$Vida\ remanente\ (a\tilde{nos}) = 22.43$$

##### 4.6.3 Método De Pablo

$$Vida\ remanente\ (a\tilde{nos}) = \frac{1}{K} * \left( \frac{1}{DP_k} - \frac{1}{DP_t} \right)$$

$$Vida\ remanente\ (a\tilde{nos}) = \frac{1}{2x10^{-8}} * \left( \frac{1}{805.36} - \frac{1}{805.72} \right)$$

$$Vida\ remanente\ (a\tilde{nos}) = \frac{1}{2x10^{-8}} * (5.547895x10^{-7})$$

$$\text{Vida remanente (años)} = 27.73$$

#### 4.6.4 Método de Pahlavanpour

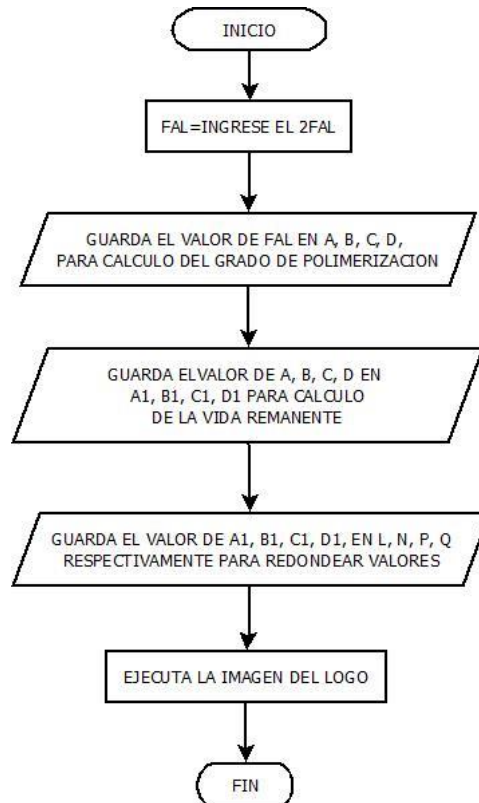
$$\text{Vida remanente (años)} = \frac{1}{K} * \left( \frac{1}{DP_k} - \frac{1}{DP_t} \right)$$

$$\text{Vida remanente (años)} = \frac{1}{2 \times 10^{-8}} * \left( \frac{1}{797.864} - \frac{1}{798.22} \right)$$

$$\text{Vida remanente (años)} = \frac{1}{2 \times 10^{-8}} * (5.58982 \times 10^{-7})$$

$$\text{Vida remanente (años)} = 27.94$$

#### 4.7 Diagrama de flujo para ejecutar el cálculo de estimación de vida útil remanente



#### 4.8 Algoritmo técnico de programación para estimar la vida útil remanente del autotransformador en el Software Matlab

Declaración de variables para el cálculo del grado de polimerización:

*/\*Declaración de variables globales para cálculo del grado de polimerización: \*/*

FAL→ real */\*ingreso de valor 2-furaldehyde emitido en \*/*

A→ real */\* grado de polimerización mediante el método Chendong \*/*

B→ real */\* grado de polimerización mediante el método Stebbins \*/*

C→ real */\* grado de polimerización mediante el método De Pablo \*/*

D→ real */\* grado de polimerización mediante el método Pahlavanpour \*/*

*/\*Declaración de variables globales para cálculo de vida útil remanente del autotransformador de potencia \*/*

A1→ real */\* guarda la vida útil remanente mediante el método Chendong \*/*

L→ real */\* guarda el valor absoluto de A1 sin redondear \*/*

B1→ real */\* guarda la vida útil remanente mediante el método Stebbins \*/*

N→ real */\* guarda el valor absoluto de B1 sin redondear \*/*

C1→ real */\* guarda la vida útil remanente mediante el método De Pablo \*/*

P→ real */\* guarda el valor absoluto de C1 sin redondear \*/*

D1→ real */\* guarda la vida útil remanente mediante el método Pahlavanpour \*/*

P→ real */\* guarda el valor absoluto de D1 sin redondear \*/*

*/\* Cálculo del grado de polimerización Método Chendong \*/*

$A = ((\log_{10}(FAL * 0.001)) - 1.51) / (-0.0035)$

*/\* Cálculo del grado de polimerización Método Stebbins \*/*

$B = ((\log_{10}(FAL * 0.88)) - 4.51) / (-0.0035)$

*/\* Cálculo del grado de polimerización Método De Pablo \*/*

$C = (7100) / (8.8 + (FAL * 0.001))$

*/\* Cálculo del grado de polimerización Método Pahlavanpour \*/*

$D = (800) / ((0.186 * FAL * 0.001) + 1)$

*/\* Vida útil remanente mediante Método Chendong \*/*

$A1 = (1 / 0.00000002) * ((1 / (A * 0.9995542)) - (1 / A))$

```
/* Vida útil remanente mediante Método Stebbins */  
B1=(1/0.00000002)*((1/(B*0.9995542))-(1/(B)))  
/* Vida útil remanente mediante Método De Pablo */  
C1=(1/0.00000002)*((1/(C*0.9995542))-(1/(C)))  
/* Vida útil remanente mediante Método Pahlavanpour */  
D1=(1/0.00000002)*((1/(D*0.9995542))-(1/(D)))  
  
x=imread('logo.jpg') /* lee la imagen con el nombre de “logo” */
```

## CAPÍTULO V COSTOS

### 5.1 Costo del análisis de furanos al autotransformador de Mulaló

Básicamente el costo es similar en todas las ocasiones donde se realiza una muestra de análisis de furanos, cabe recalcar que el análisis de furanos se la realiza cada 5 años como en el caso del autotransformador el cual sea realizado un estudio, es decir que solo la cromatografía y el mantenimiento anual, así como las rutinas diarias, todo esto de acuerdo a un cronograma de acuerdo a lo establecido por la CELEC EP- Transelectric. Mirar tabla completa en el Anexo 27.

Tabla 6: Costo de análisis de furanos del autotransformador

Fuente: CELEC EP - Transelectric

<b>TABLA DE COSTOS</b>				
<b>ITEM</b>	<b>OBSERVACIONES</b>	<b>CANT.</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>PRECIO TOTAL</b>
1	Análisis físico-químico de aceite dieléctrico Rigidez dieléctrica Número de acidez Tensión interfacial Gravedad Específica Contenido de humedad Examen de color	1	\$ 150	\$150
2	Cromatografía de gases disueltos (DGA) en aceite dieléctrico del autotransformador de potencia	1	\$ 151	\$ 151

3	Análisis de contenido de inhibidores en aceite dieléctrico del autotransformador de potencia	1	\$ 130	\$ 130
4	Análisis de contenido de sulfuro corrosivo en aceite dieléctrico del autotransformador de potencia	1	\$ 130	\$ 130
5	Análisis de contenido de furanos en aceite dieléctrico del autotransformador de potencia	1	\$ 150	\$ 150
6	Análisis cromatográfico de contenido de PCBs en aceite dieléctrico del autotransformador de potencia	1	\$132.05	\$132.05
<b>TOTALES</b>				<b>\$ 843.05</b>

## CONCLUSIONES

El análisis de este estudio permitió estimar la vida útil remanente del autotransformador ATQ de la subestación de transmisión eléctrica Mulaló, conocer cuánto ha consumido este recurso hasta la actualidad y establecer que aún le quedan 22 años en promedio aproximadamente para una operación en condiciones normales y óptimas, antes de que llegue a su fin el ciclo de vida del autotransformador y al final tenga que ser retirado.

Con estos resultados se considera que el aislamiento de este equipo todavía se encuentra en óptimas condiciones, a pesar de tener 32 años desde su fabricación y 22 años en operación, sin embargo, es importante que se continúe con el adecuado mantenimiento y condiciones operativas dentro de sus límites de cargabilidad.

Algunos autores consideran que la aún existe una gran incógnita sin resolver que relaciona a la vida útil del aislamiento del papel y la vida del autotransformador como tal, ya que, tomando en cuenta ciertas condiciones operativas, la vida del autotransformador, puede superar a la vida del aislamiento del papel, como se evidencia en el presente proyecto técnico.

Al ser un autotransformador de potencia, la despolimerización de la celulosa es: la hidrólisis, pirólisis y la oxidación producida por varias reacciones químicas, osea, que los factores principales que influyen en el deterioro de la celulosa son la temperatura, la humedad y el oxígeno, que deben ser controlados para tratar de contrarrestar el envejecimiento del aislamiento.

Al conocer desde cierto criterio técnico la condición de que el papel aislante llegue a su estado de envejecimiento de este equipo, permitirá una estimación de vida del autotransformador ATQ.

Uno de los compuestos furánicos más importantes en el 2furfural (2FAL), debido a sus principales características como es la tasa de formación en el autotransformador y su

gran estabilidad. Por lo tanto, el valor absoluto y su valor de generación son variables muy utilizadas para la estimación del envejecimiento del autotransformador ATQ, ya que la vida útil es prácticamente el fin de la vida útil del papel aislante.

La vida remanente de un autotransformador puede diferir según los métodos empleados.



## RECOMENDACIONES

Por una parte, desde el punto de vista de la gestión del mantenimiento, es necesario ser cauto en realizar inspecciones visuales, en lo que concierne a empaques, válvulas, pegamento u otros componentes donde se pueda presentar fugas de aceite, ya que, al tener un contacto del exterior al interior, está muy propenso a que ingresen partículas que tiendan a degradar el aceite y afecten al autotransformador.

Por lo general se hace una prueba de cromatografía anualmente, pero con respecto al análisis de furanos se la realiza cada cinco años, al laboratorio Morgan Schaffer, y después de cierto tiempo remiten los resultados de los análisis del aceite dieléctrico, y de acuerdo con lo mencionado se debe intervenir de la manera correcta y responsable, para mantener al autotransformador en óptimas condiciones y alargar su vida útil.

En una base de datos global se debe estructurar todos los parámetros, incluido lo que hemos analizado, que son furanos, que se evalúan en los análisis del aceite dieléctrico del autotransformador, tanto en estado normal como en condiciones de falla.

Cabe resaltar que, para realizar un mantenimiento adecuado del autotransformador de potencia en este caso de estudio, la más viable es la instalación de la planta de recirculación del aceite, que mediante el calentamiento de las resistencias a 75°C se cumple el objetivo de reducir el índice de humedad.

Es claro que, para estimar la vida útil remanente del autotransformador de potencia, no es el único método el resultado del análisis de furanos, sino también se puede presentar un caso de estudio mediante la cromatografía de gases, que de igual manera existe una tendencia de valores, que requieren ser analizados los resultados que nos entrega el laboratorio Morgan Schaffer o ya sea también el equipo Calisto que es un analizador de gases.

## REFERENCIAS

- [1] CAECEDO, M. Tsuchie y J. M. E. Corp., «"Recent diagnostic technology on oil-immersed power transformers in Japan",» de Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, Japan, Oct. 2002.
  
- [2] MONTSINGER, V. M.; Thermal Characteristics of Transformers. Transformers Engineering: A Treatise on the Theory, Operation and Application of Transformers, Wiley, New York, 1951.
  
- [3] FABRE, J.; and PICHON, A. Deteriorating Processes and Products of Paper in Oil. Application to Transformers. CIGRE Conference on Large High Voltage Electric Systems, 1960.
  
- [4] M. Tsuchie y J. M. E. Corp., «"Recent diagnostic technology on oil-immersed power transformers in Japan",» de Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, Japan, Oct. 2002.
  
- [5] T. K. Saha, "Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 10, no. 5, pp. 903–916, 2003.
  
- [6] I. M. Gasco, «"Diagnóstico del Consumo de Vida de un Transformador a través del Análisis de Compuestos Furánicos"».
  
- [7] W. Flores, E. Mombello, G. Rattá y J. Jardini, «"Vida de transformadores de potencia sumergidos en aceite: Situación actual. Parte II. Correlación entre resultados de ensayos físico-químico",» p. 8.

- [8] C. Homagk, K. Mössner y T. Leibfried, «"Investigation on degradation of power transformer solid insulation material",» de 2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena.
- [9] I. M. Gasco, «"Diagnóstico del Consumo de Vida de un Transformador a través del Análisis de Compuestos Furánicos"».
- [10] Badune, J., Vitolina, S., Maskalonok, V., Riga Technical University, Amish , R., & Saha, T. (2013). Methods for Predicting Remaining Service Life of Power Transformers and Their Components. Riga Letonia Alemania: Power and Electrical Engineering.
- [11] Google Earth Pro. Google, 2021.
- [12] Sector Electricidad. (enero 2015). El autotransformador: ventajas y desventajas. <http://www.sectorelectricidad.com/11001/el-autotransformador-ventajas-y-desventajas/>
- [13] Brambila, D., Gijón, V., Instituto Politécnico Nacional, (2015). Predicción de fallas en los transformadores de potencia mediante la Técnica de Cromatografía de Gases. D.F.México.
- [14] Allan, D. (1997). Recent advances in the analysis and interpretation of aged insulation from operating power transformers. 5h International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Korea: Seoul .
- [15] ABB. (2007). Manual del Usuario . Operación y Mantenimiento de Transformadores de Potencia. Copyright.

- [16] Abu-Siada, A., & Islam, S. (2012). A new approach to identify power transformer criticality and asset management decision based on dissolved gas-in-oil analysis. *Dielectrics and Electrical Insulation IEEE Transactions on*, 1007-1012.
- [17] Allan, D. (2001). Recent advances on analysis and explanation of aged insulation in operating power Transformers. *Proceedings of 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*.
- [18] J. Badune, S. Vitolina, V. Maskalonok, "Methods for Predicting Remaining Service Life Power Transformers and Their Components", Riga Technical University, *Power and Electrical Engineering* (2013).
- [19] Brochure, C. (2012). *Furanic Compounds for Diagnosis*. Working Group D1.01 (TF13).
- [20] Cheim, L., Platts, D., Prevost, T., & Shuzen, X. (2012). furan analysis for liquid power transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. IEEE .
- [21] Calero, F. (2019). Determinar la vida útil de un transformador de potencia con base a la concentración de furanos en el aceite dieléctrico. XXXIV Seminario Nacional del Sector Eléctrico.
- [22] Dorrberket, D. S.A. *Introducción al Estudio de las Descargas Parciales*. Edición 1, Volumen 1, CIPEL, C. de la Habana Cuba, (1999).
- [23] American National Standard ANSI/IEEE C57.104-2008. *Guide for the interpretation of gases in oil-immersed transformes*.
- [24] Y. Morales, R. Blanco, (2019), "Análisis del uso de software para la enseñanza de la matemática de las carreras de ingeniería", Universidad de Camagüey, Camagüey Cuba.

## ANEXOS

### Anexo 1: Subestación de transmisión eléctrica Mulaló 138/69 kV.

Ingreso a la subestación Mulaló Ubicada en la parroquia Mulaló, provincia de Cotopaxi



### Anexo 2: Autotransformador ATQ en el patio de maniobras subestación Mulaló 138/69 kV.

Patio donde se encuentra ubicado el autotransformador el cual abastece en gran proporción energía a la provincia de Cotopaxi



### **Anexo 3: Autotransformador de potencia ATQ capacidad de 66.7 MVA.**

Autotransformador de potencia que es analizado en este caso de estudio, con el fin de estimar la esperanza de vida útil que proporcionará el mismo.





**Anexo 4: Medidores de temperatura de bobinados primario, secundario, terciario, y temperatura de aceite.**

Medidores en el cual se conoce la temperatura de los bobinados de alta, baja y terciario al igual que el manómetro de temperatura del aceite, aquí se toma la lectura para las rutinas diarias de operación.



### **Anexo 5: Radiadores autotransformador ATQ.**

Radiador para el respectivo enfriamiento del aceite, la circulación del aceite funciona automáticamente cuando detecta altas cargas a nivel del lado de baja.





**Anexo 6: Bombas para el enfriamiento del aceite del autotransformador ATQ.**

Sistema de enfriamiento por circulación de aceite mediante la impulsión de las bombas



**Anexo 7: Ventiladores para el enfriamiento del aceite del autotransformador  
ATQ.**

Sistema de enfriamiento mediante aire forzado, producido por los ventiladores





### **Anexo 8: Tablero de control local del autotransformador ATQ.**

Tablero de control local, se manipula en esta sección en caso de que no obedezca el mando desde la sala de control



**Anexo 9: Cambiador de TAP's en el lado de 138 kV ATQ (opera sin carga).**

En este anexo podemos ver el lugar para el cambio de TAP en el lado de alta, cabe recalcar que este procedimiento solo se realiza con el autotransformador fuera de servicio, y para manipular necesita una llave y una palanca de fuerza.



**Anexo 10: Cambiador de TAP's en el lado de 69 kV ATQ (OLTC opera bajo carga).**

Este es el tablero de control local para manipular la salida de voltaje en el lado de baja, cabe recalcar aquí es lo contrario del anexo anterior, osea si se puede manipular los voltajes bajo carga.





**Anexo 11: Relé de protección mecánica Buchholz del autotransformador ATQ.**

Podemos evidenciar de manera clara al relé de protección mecánica Buchholz, este detecta pequeñas burbujas de aire, lo que internamente manipula un flotador, y de ser así, deja al autotransformador fuera de servicio.



**Anexo 12: Salida para conexión a planta de tratamiento de recirculación de aceite del autotransformador ATQ.**

Cuando requiere el respectivo mantenimiento y conexión a la planta de recirculación de aceite, esta es la toma de salida del aceite, este tipo de mantenimiento se lo puede hacer estando el autotransformador fuera de servicio o bajo carga.



**Anexo 13: Salida para toma de muestra de aceite para análisis de furanos  
ubicado en lado izquierdo el autotransformador ATQ.**

En este anexo se evidencia claramente una toma de salida de aceite con una válvula más pequeña, de tal forma que aquí sirva para toma de muestras pequeñas de aceite o a su vez para conectar a un equipo Calisto el cual analiza la cromatografía de gases



**Anexo 14: Equipo Calisto 5 para análisis cromatográfico de gases de  
autotransformador ATQ.**

En esta imagen se puede apreciar claramente que es un equipo analizador de gases Calisto 5, el cual analiza 5 de los principales gases producidos por el autotransformador.



**Anexo 15: Tipos de enfriamiento de transformadores y autotransformadores  
sumergidos en aceite.**

---

**AUTOTRANSFORMADORES SUMERGIDOS EN ACEITE AISLANTE**

---

Tipo de enfriamiento	Descripción
ONAN	Auto-enfriado
ONAN / ONAF	Auto-enfriado y enfriado por aire forzado
ONAN / ODAF / OFAF	Auto-enfriado y con dos pasos de enfriamiento por aire forzado
ONAN / ONAF / OFAF	Auto-enfriamiento, enfriado por aire forzado y enfriado por aire y líquido aislante forzado
ONAN / OFAF / OFAF	Auto-enfriado y con dos pasos de enfriamiento por aire y líquidos aislantes forzados
ONWF	Enfriado por agua forzada
OFWF	Enfriado por agua y líquido aislante forzados
ODWF	Enfriado por agua forzada y líquido aislante forzado y dirigido

---



**Anexo 16: Resultados obtenidos en la medición de resistencia de devanados lado 69 kV.**

LV	R (45°C) [mΩ]			R (75°C) [mΩ]			I [A]			V [mV]			ΔR[mΩ]		
	an	bn	cn	an	bn	cn	an	bn	cn	an	bn	cn	an	bn	cn
<b>Tap Position</b>															
1	226.1	225.3	228.2	250.3	249.5	252.7	10.8	9.96	10.6	2440	2240	2420	-	0.02	0.03
2	224.7	224.6	224.7	248.8	248.7	248.8	10.9	9.96	10.7	2440	2240	2400	0	0.14	0.38
3	224.2	224	224.9	248.3	248	249	10.9	10	10.7	2440	2240	2400	0.08	0.2	0.03
4	223.4	223.1	222.9	247.4	247.1	246.8	10.9	10	10.7	2440	2240	2390	0.15	0.18	0.23
5	221.3	222.3	221.5	245	246.1	246.1	10.9	10.1	10.7	2420	2230	2380	0.16	0.32	0.1
6	220.3	220.2	219.4	244	245.3	245.3	11	10.1	10.7	2420	2220	2380	0.11	0.33	0.08
7	219.4	219.7	219.5	243	243	243	11	10.1	10.8	2410	2220	2370	0.13	0.22	0
8	218.9	218.9	218.2	242.4	243.1	243.1	11	10.1	10.8	2410	2220	2370	0.14	0.2	0.03
9	218.2	217.9	217.5	241.6	241.6	241.6	11.1	10.2	10.8	2410	2210	2360	0.16	0.25	0.24
10	216.9	215.5	215.8	240.2	240.8	240.8	11.1	10.2	10.8	2400	2190	2360	0.27	0.11	0.24
11	215.6	214.7	215.8	238.7	239	239	11.1	10.2	10.9	2400	2190	2350	0.33	0.12	0.22
12	214.4	213.4	215.2	237.4	236.3	238.3	11.1	10.2	10.9	2390	2180	2340	0.29	0.14	0.21
13	212.6	212.5	213.7	235.4	235.3	236.6	11.2	10.2	10.9	2370	2180	2330	0.01	0.12	0.22
14	212.2	211.2	213.1	235	233.9	235.9	11.2	10.3	11	2370	2170	2330	0.06	0.11	0.18
15	211.2	210.9	211	233.8	233.5	233.7	11.2	10.3	11	2370	2170	2320	0.19	0.03	0.11

---

16	209.4	210	212.9	231.9	232.5	235.8	11.2	10.3	10.9	2350	2170	2330	0.16	0.18	0.26
17b	207.4	206.8	211.8	229.7	229	234.6	11.2	10.3	11	2340	2140	2320	0.24	0.29	0.16
18	208.1	207.2	210.5	230.4	229.4	233	11.3	10.4	11	2340	2140	2320	0.05	0.13	0.23
19	209.1	207.9	210.3	231.5	230.2	232.9	11.3	10.3	11	2350	2140	2310	0.22	0.22	0.2
20	210.7	209.5	210.9	233.3	231.9	233.5	11.2	10.3	11	2360	2150	2310	0.25	0.46	0.12
21	211.4	210.7	211.8	234.1	233.3	234.6	11.2	10.3	10.9	2370	2160	2320	0.18	0.5	0.24
22	212	212	212.7	234.7	234.8	235.6	11.2	10.2	10.9	2370	2170	2320	0.18	0.39	0.32
23	213.1	212.6	213.6	236	235.4	235.6	11.1	10.2	10.9	2370	2170	2330	0.32	0.34	0.3
24	214.2	214.9	214.9	237.2	237.9	236.5	11.1	10.2	10.9	2380	2190	2330	0.31	0.27	0.42
25	215.3	215.2	215.7	238.4	238.3	237.9	11.1	10.2	10.9	2390	2190	2340	0.33	0.19	0.42
26	216.4	216.7	216.5	239.7	239.9	238.8	11.1	10.1	10.8	2390	2200	2340	0.33	0.24	0.41
27	217.5	217.5	217.3	240.8	240.9	240.6	11	10.1	10.8	2400	2200	2350	0.31	0.24	0.41
28	218.4	218.4	218.5	241.9	241.9	242	11	10.1	10.8	2410	2200	2350	0.28	0.17	0.39
29	219.8	219.2	220.6	243.2	242.7	244.3	11	10.1	10.8	2410	2210	2370	0.32	0.25	0.49
30	220.5	220.1	221.2	244.1	243.7	244.9	11	10	10.7	2420	2210	2370	0	0.28	0.32
31	221.3	221.2	222	245.1	245	245.8	10.9	10	10.7	2420	2220	2380	0	0.36	0.31
32	222.1	222.3	222.9	245.9	246.1	246.9	10.9	10	10.6	2420	2220	2370	0.33	0.39	0.29
33	223.3	222.9	224.6	247.3	246.6	246.7	10.9	9.95	10.6	2430	2220	2390	0.38	0.36	0.49

---

**Anexo 17: Resultados obtenidos en la medición de resistencia de devanados lado 138 kV.**

HV	R (45°C) [mΩ]			R (75°C) [mΩ]			I [A]			V [mV]			ΔR[mΩ]		
	an	bn	cn	an	bn	cn	an	bn	cn	an	bn	cn	an	bn	cn
Tap Position															
1	590.4	594.5	594.4	653.8	658.3	658.2	10.8	10.5	10.6	6350	6220	6280	0.001	0	0.01
2	569.7	568.7	567.4	630.8	629.7	628.3	10.1	10.5	10.7	5730	5960	6080	0	0	0.01
3	550.5	549.6	550	609.5	608.6	609	10.7	10.5	10.7	5920	5780	5880	0	0	0.01
4	533.2	531.9	532.6	590.5	589	589.7	10.6	10.5	10.6	5640	5570	5650	0.01	0	0.01
5	516.8	515.3	516.8	572.2	570.6	572.2	10.6	10.4	10.7	5460	5360	5550	0.04	0	0.09

**Anexo 18: Resultados obtenidos en la medición de resistencia de devanados lado terciario 13.8 kV.**

No	R (45°C) [mΩ]			R (75°C) [mΩ]			I [A]			V [mV]			ΔR[mΩ]		
	ab	bc	ca	ab	bc	ca	ab	bc	ca	ab	bc	ca	ab	bc	ca
1	31.1	31	30.96	34.44	34.33	34.28	9.59	9.83	9.65	298	305	299	-	0.09	0.22

**Anexo 19: Valor del grado de polimerización con respecto al estado del papel.**

<b>Grado de Polimerización (DP)</b>	<b>Diagnóstico (estado del papel)</b>
1200 a 700	Aislamiento saludable
700 a 450	Deterioro moderado
450 a 200	Deterioro excesivo
<200	Final de vida útil

**Anexo 20: Tipos de falla en el triángulo de Duval**

<b>Símbolo</b>	<b>Falla</b>	<b>Ejemplos</b>
PD	Descargas parciales	Descargas de tipo parcial en las burbujas o huecos
D1	Descargas de baja energía	Las descargas parciales de la emisión de chispas, las descargas de agujeros que inducen bajos pinchazos carbonizados. Bajo consumo de energía un arco, o la formación de partículas de aceite
D2	Descargas de alta energía	Las descargas en el papel o aceite con potencia, las descargas de seguimiento, daños de alta de energía para el papel o la formación de grandes partículas de carbono en la fusión de metal en el aceite y de disparo en los equipos y alarmas de gas

T1	Falla térmica ( $t \leq 300 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Lo demuestra el papel carbonizado con una temperatura mayor a $300^\circ\text{C}$
T2	T2: Falla térmica ( $300 \text{ }^\circ\text{C} < t < 700 \text{ }^\circ\text{C}$ )	La carbonización del papel, la formación de partículas en el aceite
T3	T3: Falla térmica ( $t > 700 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Extensa formación de partículas de carbono en el aceite, la coloración de metal a $800^\circ\text{C}$

### **Anexo 21: Planta de tratamiento para recirculación de aceite.**

En esta imagen se puede notar que esta es la planta de tratamiento de recirculación de aceite, el cual calienta a cierta temperatura para bajar los niveles de humedad y al mismo tiempo evitar que se malogre el aceite dieléctrico.



## Anexo 22: Resultados del laboratorio de análisis de furanos año (2014) y cromatografía año (2020) del autotransformador ATQ



### REPORTE ANALISIS ACEITE

#### REFERENCIA

Cliente:	Mr. James Gonzales (ZSD01)	Orden Compra	SBSTR 130720	No. Muestra:	M0971055
Correo electrónico:		Orden Trabajo	SBSTR 130720	Autorizado por:	
Compañía:	Sistemas Digitales de Control			Fecha envío:	2020-08-18

#### EQUIPO

Tipo Aparato:	TRN	KV:	138	Punto de Muestreo:	MAN
Ubicación:	S/EMULALO	MVA:	66.7	Temp. Aceite (°C):	32
No. Equipo:	62488	Tipo Aceite:	Mineral Oil	Tomada por:	Transelectric
No. Serie:	62488	Fabricación:	1989	Fecha Muestreo:	2020-07-06
Info adicional:					
Descripción:	ATQ				

#### AGD

2019-05-29	2020-07-06	Parámetros	Código de Alerta (T/R)	Método Prueba
15	< 10	Hidrógeno		D3612-17
7	5	Aceiteno		ppm (V/V)
7	4	Etano		a 273 K
6	3	Etileno		y 760 Torr
6	2	Metano		
385	227	Monóxido de Carbono		
4187	3488	Dióxido de Carbono		
82632	58258	Nitrógeno		
12649	16808	Oxígeno		
426	250	TDCG (ppm)		
9.99	7.88	Total Gas Disuelto (%)		

#### CALIDAD ACEITE

Anteriores	2020-07-06	Parámetros	Código de Alerta (T/R)	Método Prueba
		Agua en Aceite (ppm)		W1017-00
2019-05-29	21	Agua en Aceite (ppm)		D 1533-12
2019-05-29	25.0	Tensión Interfacial (mN/m)		D 971-20
2019-05-29	0.01	Acidez (mg KOH/g)		D 974-14e2
2019-05-29	<2.0	Color		D1500-12
2019-05-29	Pasar	Apariencia Visual		D 1524-15
2019-05-29	41	Ruptura Dieléctrica (kV)		D 877M-19
		Ruptura Dieléctrica 2 mm (kV)		D 1816-19
		Ruptura Dieléctrica 2.5 mm (kV)		IEC 60156
		Factor de Potencia @ 25 °C (%)		D 924-15
		Factor de Potencia @ 90 °C		IEC 60247
		Factor de Potencia @ 100 °C (%)		D 924-15
2019-05-29	0.8589	Gravedad Específica		D 1298-12b
2014-11-25	< 0.02	Inhibidor de Oxidación DBP (wt. %)		D 4768-11(2019)
		Inhibidor de Oxidación DBPC (wt. %)		D 4768-11(2019)
		PCB - Contenido Total Aroclor (ppm)		D 4059-2018
		Método Sulfuro Cobre		D 1275-15
2014-11-25	< 5	5-Hydroxymethyl-2-Furaldehyde (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	< 5	Furfuryl alcohol (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	12	2-Furaldehyde (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	< 5	2-Acetylfuran (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	< 5	5-Methyl-2-Furaldehyde (ppb)		D 5837-15

COMENTARIOS: Contrato de Análisis de Aceite Dieléctrico, Transelectric.  
Muestras correspondientes al año 2020 Admín. de Contr.: Ing. Francisco Oñate  
S/E Mulalo, ATQ, N° lista 8

\*\*\* Morgan Schaffer es un laboratorio acreditado ISO/IEC 17025 \*\*\*

Los análisis y códigos de selección en este reporte se basan en material e información suministrada por el cliente. Morgan Schaffer Ltd no se responsabiliza o garantiza implícita o explícitamente que el contenido de la muestra recibida en este laboratorio es el mismo que todo el material en el cual se tomó la muestra. Nuestros resultados se relacionan solo con la muestra(s) examinada(s). Morgan Schaffer Ltd no se responsabiliza y no garantiza, o representa, expresa o implícitamente la condición, productividad o buen funcionamiento del equipo u otros bienes para los que este reporte sea utilizado o invocado por cualquier motivo. Este reporte no puede ser copiado, al menos en su totalidad, sin autorización por escrito de Morgan Schaffer Ltd. (\* Subcontratado, † Análisis no acreditado)

## Anexo 23: Resultados del laboratorio de análisis de furanos año (2014) y cromatografía año (2019) del autotransformador ATQ



### REPORTE ANALISIS ACEITE

#### REFERENCIA

Cliente:	Mr. James González (ZSD01)	Orden Compra	SBSTR-180627	No. Muestra:	M0775649
Correo electrónico:		Orden Trabajo	SBSTR-180627	Autorizado por:	
Compañía:	Sistemas Digitales de Control			Fecha envío:	2019-07-23

#### EQUIPO

Tipo Aparato:	TRN	KV:	138	Punto de Muestreo:	MAIN
Ubicación:	S/E MULALO	MVA:	66.7	Temp. Aceite (°C):	21
No. Equipo:	62488	Tipo Aceite:	Mineral Oil	Tomada por:	Transelectric
No. Serie:	62488	Fabricación:	1989	Fecha Muestreo:	2019-05-29
Info adicional:					
Descripción:	ATQ TRANSELECTRIC				

#### AGD

2019-05-21	2019-05-29	Parámetros	Código de Alerta (TR)	Método Prueba
< 10	15	Hidrógeno		D3612-17
4	7	Aceiteno		ppm (V/V)
5	7	Etano		a 273 K
3	6	Etileno		y 760 Torr
3	6	Metano		
252	385	Monóxido de Carbono		
2894	4187	Dióxido de Carbono		
63543	82632	Nitrógeno		
17815	12649	Oxígeno		
272	426	TDCC (ppm)		
8.45	9.99	Total Gas Disuelto (%)		

#### CALIDAD ACEITE

Anteriores	2019-05-29	Parámetros	Código de Alerta (TR)	Método Prueba
		Agua en Aceite (ppm)		W1017-00
2019-05-21	19	21		D 1533-12
2016-11-01	24.0	25.0		D 971-12
2016-11-01	0.01	0.01		D 974-14e2
2016-11-01	<2.5	<2.0		D1500-12
		<b>Passar</b>		
		Apariencia Visual		D 1524-15
2016-11-01	50	41		D 877-13
		45		D 1816-12
		Ruptura Dieléctrica 2 mm (kV)		IEC 60156
		Ruptura Dieléctrica 2.5 mm (kV)		D 924-15
		Factor de Potencia @ 25 °C (%)		IEC 60247
		Factor de Potencia @ 90 °C		D 924-15
		Factor de Potencia @ 100 °C (%)		D 1298-12b
2016-11-01	0.8599	0.8589		D 4768-11
2014-11-25	< 0.02			D 4768-11
		Inhibidor de Oxidación DBP (wt. %)		D 4059-2018
		Inhibidor de Oxidación DBPC (wt. %)		D 1275-15
		PCB - Contenido Total Aroclor (ppm)		D 5837-15
		Método Sulfuro Cobre		D 5837-15
2014-11-25	< 5	5-Hydroxymethyl-2-Furaldehyde (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	< 5	Furfuryl alcohol (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	12	2-Furaldehyde (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	< 5	2-Acetylfuran (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	< 5	5-Methyl-2-Furaldehyde (ppb)		D 5837-15

COMENTARIOS: Contrato de Análisis de Aceite Dieléctrico, Transelectric.  
Muestras del año 2019  
ATQ S/E MULALO.

\*\*\* Morgan Schaffer es un laboratorio acreditado ISO/IEC 17025 \*\*\*

Los análisis y códigos de selección en este reporte se basan en material e información suministrada por el cliente. Morgan Schaffer Ltd no se responsabiliza o garantiza implícita o explícitamente que el contenido de la muestra recibida en este laboratorio es el mismo que todo el material en el cual se tomó la muestra. Nuestros resultados se relacionan solo con la muestra(s) examinadas. Morgan Schaffer Ltd no se responsabiliza y no garantiza, o representa, expresa o implícitamente la condición, productividad o buen funcionamiento del equipo u otros bienes para los que este reporte sea utilizado o invocado por cualquier motivo. Este reporte no puede ser copiado, al menos en su totalidad, sin autorización por escrito de Morgan Schaffer Ltd. (\* Subcontratado, † Análisis no acreditado)

## Anexo 24: Resultados del laboratorio de análisis de furanos año (2014) y cromatografía año (2017) del autotransformador ATQ



### REPORTE ANALISIS ACEITE

#### REFERENCIA

Cliente:	Mr. James González (ZSD01)	Orden Compra	SBS-08 1217-3	No. Muestra:	M0513677
Correo electrónico:		Orden Trabajo	SBS-08 1217-3	Autorizado por:	
Compañía:	Sistemas Digitales de Control			Fecha envío:	2017-12-21

#### EQUIPO

Tipo Aparato:	TRN	KV:	138	Punto de Muestreo:	MAIN
Ubicación:	S/E MULALO	MVA:	66.7	Temp. Aceite (°C):	
No. Equipo:	62488	Tipo Aceite:	Mineral Oil	Tomada por:	subESTRANSA
No. Serie:	62488	Fabricación:	1989	Fecha Muestreo:	2017-11-29
Info adicional:					
Descripción:	ATQ TRANSELECTRIC				

#### AGD

2016-11-01	2017-11-29	Parámetros	Código de Alerta (TR)	Método Prueba
< 10	10	Hidrógeno		D3612-17
5	6	Aceileno		ppm (V/V)
7	6	Etano		a 273 K
3	3	Etileno		y 760 Torr
< 5	< 5	Metano		
291	266	Monóxido de Carbono		
3990	3980	Dióxido de Carbono		
44800	52300	Nitrógeno		
3300	11400	Oxígeno		
319	293	TDCG (ppm)		
5.21	6.77	Total Gas Disuelto (%)		

#### CALIDAD ACEITE

Anteriores	2017-11-29	Parámetros	Código de Alerta (TR)	Método Prueba
2016-11-01	19	13 Agua en Aceite (ppm)		W1017-00
		13 Agua en Aceite (ppm)		D 1533-12
2016-11-01	24.0	Tensión Interfacial (mN/m)		D 971-12
2016-11-01	0.01	Acidez (mg KOH/g)		D 974-14e2
2016-11-01	<2.5	Color		D1 500-12
		Apariencia Visual		D 1524-15
2016-11-01	50	Ruptura Dieléctrica (kV)		D 877-13
		Ruptura Dieléctrica 2 mm (kV)		D 1816-12
		Ruptura Dieléctrica 2.5 mm (kV)		IEC 60156 †
		Factor de Potencia @ 25 °C (%)		D 924-15
		Factor de Potencia @ 90 °C		IEC 60247 †
		Factor de Potencia @ 100 °C (%)		D 924-15
		Gravedad Específica		D 1298-12b
2014-11-25	< 0.02	Inhibidor de Oxidación DBP (wt. %)		D 4768-11
		Inhibidor de Oxidación DBPC (wt. %)		D 4768-11
		PCB - Comienzo Total Aroclor (ppm)		D 4059-00
		Método Sulfuro Corrosivo B		D 1275-15
2014-11-25	< 5	5-Hydroxymethyl-2-Furaldehyde (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	< 5	Parfuryl alcohol (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	12	2-Furaldehyde (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	< 5	2-Acetylfuran (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	< 5	5-Methyl-2-Furaldehyde (ppb)		D 5837-15

COMENTARIOS: CBLEC EP TRANSELECTRIC  
CALISTO 9 CONTRASTE 2017  
S/E MULALO

\*\*\* Morgan Schaffer es un laboratorio acreditado ISO/IEC 17025 \*\*\*

Los análisis y códigos de selección en este reporte se basan en material e información suministrada por el cliente. Morgan Schaffer Ltd no se responsabiliza o garantiza implícita o explícitamente que el contenido de la muestra recibida en este laboratorio es el mismo que todo el material en el cual se tomó la muestra. Nuestros resultados se relacionan solo con la muestra(s) examinadas. Morgan Schaffer Ltd no se responsabiliza y no garantiza, expresa o implícitamente la condición, productividad o buen funcionamiento del equipo u otros bienes para los que este reporte sea utilizado o invocado por cualquier motivo. Este reporte no puede ser copiado, al menos en su totalidad, sin autorización por escrito de Morgan Schaffer Ltd. (\* Subcontratado, † Análisis no acreditado)



## Anexo 25: Resultados del laboratorio de análisis de furanos año (2014) y cromatografía año (2016) del autotransformador ATQ



### REPORTE ANALISIS ACEITE

#### REFERENCIA

Cliente:	Mr. James Gonzalez (ZSD01)	Orden Compra	SDC25112016-1	No. Muestra:	M0331 832A
Correo electrónico:		Orden Trabajo	SDC25112016-1	Autorizado por:	ll
Compañía:	Sistemas Digitales de Control			Fecha envío:	2016-12-02

#### EQUIPO

Tipo Aparato:	TRN	KV:	138	Punto de Muestreo:	MAIN
Ubicación:	SE MULALO	MVA:	66.7	Temp. Aceite (°C):	40
No. Equipo:	62488	Tipo Aceite:	Mineral Oil	Tomada por:	Transelectric ZNO
No. Serie:	62488	Fabricación:	1989	Fecha Muestreo:	2016-11-01
Info adicional:					
Descripción:	ATQ TRANSELECTRIC				

#### AGD

2016-09-06	2016-11-01	Parámetros	Código de Alerta (TR)	Método Prueba
< 10	< 10	Hidrógeno		D3612-02
5	5	Acetileno		ppm (V/V)
7	7	Etano		a 273 K
4	3	Etileno		y 760 Torr
< 5	< 5	Metano		
258	291	Monóxido de Carbono		
4310	3990	Dióxido de Carbono		
47400	44800	Nitrógeno		
12400	3300	Oxígeno		
285	319	TDCC (ppm)		
6.4	5.21	Total Gas Disuelto (%)		

#### CALIDAD ACEITE

	Anteriores	2016-11-01	Parámetros	Código de Alerta (TR)	Método Prueba
2016-09-06	15	19	Agua en Aceite (ppm)		SOP 5.5-03-01
			Agua en Aceite (ppm)		D 1533-12
2015-11-10	25.3	24.0	Tensión Interfacial (mN/m)		D 971-12
2015-11-10	0.01	0.01	Acidez (mg KOH/g)		D 974-14e2
2015-11-10	2.0	<2.5	Color		D1 500-12
2015-11-10	Ninguno	Ninguno	Agua Libre		D 1524-15
2015-11-10	Claro	Claro	Apariencia Visual		D 1524-15
2015-11-10	Ninguno	Pequeña Cant.	Apariencia Sedimentos		D 1524-15
2015-11-10	49	50	Ruptura Dieléctrica (kV)		D 877-13
			Ruptura Dieléctrica 2 mm (kV)		D 1816-12
			Ruptura Dieléctrica 2.5 mm (kV)		IEC 60156 †
			Factor de Potencia @ 25 °C (%)		D 924-15
			Factor de Potencia @ 90 °C		IEC 60247 †
			Factor de Potencia @ 100 °C (%)		D 924-15
2015-11-10	0.8601	0.8599	Gravedad Específica		D 1298-12b
2014-11-25	< 0.02		Inhibidor de Oxidación DBP (wt. %)		D 4768-11
			Inhibidor de Oxidación DBPC (wt. %)		D 4768-11
			PCB - Contenido Total Aroclor (ppm)		D 4059-00
			Método Sulfuro Corrosivo B		D 1275-15
2014-11-25	< 5		5-Hydroxymethyl-2-Furaldehyde (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	< 5		Furfuryl alcohol (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	12		2-Furaldehyde (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	< 5		2-Acetylfuran (ppb)		D 5837-15
2014-11-25	< 5		5-Methyl-2-Furaldehyde (ppb)		D 5837-15

COMENTARIOS: Contrato No. 102-14 Transelectric

Muestras del año 2016

ATQ SE Mulalo Número de Lista: 8

**Morgan Schaffer es un laboratorio acreditado ISO/IEC 17025 \*\*\***

Los análisis y códigos de selección en este reporte se basan en material e información suministrada por el cliente. Morgan Schaffer Ltd no se responsabiliza o garantiza implícita o explícitamente que el contenido de la muestra recibida en este laboratorio es el mismo que todo el material en el cual se tomó la muestra. Nuestros resultados se relacionan solo con la muestra(s) examinadas. Morgan Schaffer Ltd no se responsabiliza y no garantiza, o representa, expresa o implícitamente la condición, productividad o buen funcionamiento del equipo u otros bienes para los que este reporte sea utilizado o invocado por cualquier motivo. Este reporte no puede ser copiado, al menos en su totalidad, sin autorización por escrito de Morgan Schaffer Ltd. (\* Subcontratado, † Análisis no acreditado)

## Anexo 26: Resultados del laboratorio de análisis de furanos año (2014) y cromatografía año (2015) del autotransformador ATQ



### REPORTE ANALISIS ACEITE

#### REFERENCIA

Cliente:	Mr. James González (ZSD01)	Orden Compra	SDC20112015-1	No. Muestra:	M0299412A
Correo electrónico:		Orden Trabajo	SDC20112015-1	Autorizado por:	GGC
Compañía:	Sistemas Digitales de Control			Fecha envío:	2015-12-01

#### EQUIPO

Tipo Aparato:	TRN	KV:	138	Punto de Muestreo:	MAIN
Ubicación:	S/E MULALO	MVA:	66.7	Temp. Aceite (°C):	27
No. Equipo:	62488	Tipo Aceite:	Mineral Oil	Tomada por:	TRANSELECTRIC
No. Serie:	62488	Fabricación:	1989	Fecha Muestreo:	2015-11-10
Info adicional:					
Descripción:	ATQ LISTA 8				

#### AGD

2015-07-21	2015-11-10	Parámetros	Código de Alerta (T/R)	Método Prueba
10	< 10	Hidrógeno		D3612-02
5	5	Aceitileno		ppm (V/V)
7	8	Etano		a 273 K
2	< 2	Etileno		y 760 Torr
< 5	< 5	Metano		
328	322	Monóxido de Carbono		
4520	4720	Dióxido de Carbono		
44100	45800	Nitrógeno		
8530	9010	Oxígeno		
354	346	TDCG (ppm)		
5.72	5.95	Total Gas Disuelto (%)		

#### CALIDAD ACEITE

Anteriores	2015-11-10	Parámetros	Código de Alerta (T/R)	Método Prueba
2015-07-21	15	14	Agua en Aceite (ppm)	SOP 5.5-03-01
			Agua en Aceite (ppm)	D 1533-12
2014-11-25	24.6	25.3	Tensión Interfacial (mNm)	D 971-12
2014-11-25	0.02	0.01	Acidez (mg KOH/g)	D 974-14e1
2014-11-25	2.0	2.0	Color	D1500-12
2014-11-25	Ninguno	Ninguno	Agua Libre	D 1524-94
2014-11-25	Claro	Claro	Apariencia Visual	D 1524-94
2014-11-25	Ninguno	Ninguno	Apariencia Sedimentos	D 1524-94
2014-11-25	47	49	Ruptura Dieléctrica (kV)	D 877-13
			Ruptura Dieléctrica 2 mm (kV)	D 1816-12
			Ruptura Dieléctrica 2.5 mm (kV)	IEC 60156 †
			Factor de Potencia @ 25 °C (%)	D 924-15
			Factor de Potencia @ 90 °C	IEC 60247 †
			Factor de Potencia @ 100 °C (%)	D 924-15
2014-11-25	0.8574	0.8601	Gravedad Específica	D 1298-12b
2014-11-25	< 0.02		Inhibidor de Oxidación DBP (wt. %)	D 4768-11
			Inhibidor de Oxidación DBPC (wt. %)	D 4768-11
			PCB - Contenido Total Aroclor (ppm)	D 4059-00
			Método Sulfuro Corrosivo B	D 1275-06
2014-11-25	< 5		5-Hydroxymethyl-2-Furaldehyde (ppb)	D 5837-15
2014-11-25	< 5		Furfuryl alcohol (ppb)	D 5837-15
2014-11-25	12		2-Furaldehyde (ppb)	D 5837-15
2014-11-25	< 5		2-Acetylfuran (ppb)	D 5837-15
2014-11-25	< 5		5-Methyl-2-Furaldehyde (ppb)	D 5837-15

#### COMENTARIOS: TRANSELECTRIC

Contrato 2015

S/E MULALO ATQ LISTA No. 8

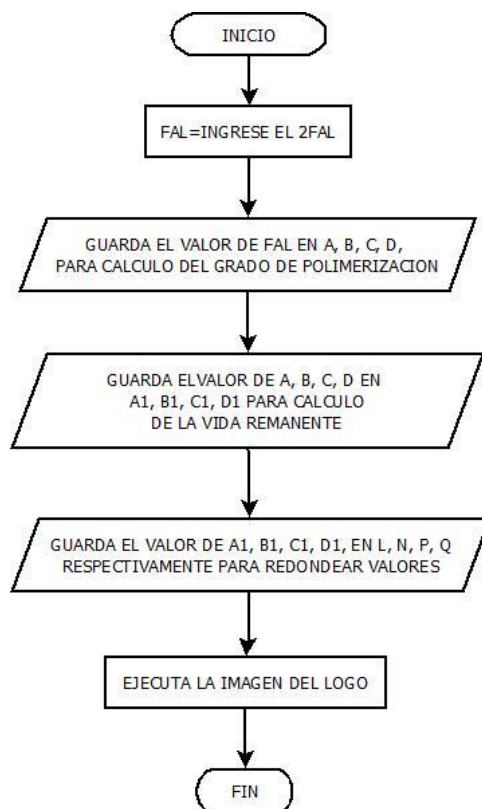
\*\*\* Morgan Schaffer es un laboratorio acreditado ISO/IEC 17025 \*\*\*

Los análisis y códigos de selección en este reporte se basan en material e información suministrada por el cliente. Morgan Schaffer Ltd no se responsabiliza o garantiza implícita o explícitamente que el contenido de la muestra recibida en este laboratorio es el mismo que todo el material en el cual se tomó la muestra. Nuestros resultados se relacionan solo con la muestra(s) examinadas. Morgan Schaffer Ltd no se responsabiliza y no garantiza, o representa, expresa o implícitamente la condición, productividad o buen funcionamiento del equipo o otros bienes para los que este reporte sea utilizado o invocado por cualquier motivo. Este reporte no puede ser copiado, al menos en su totalidad, sin autorización por escrito de Morgan Schaffer Ltd. (\* Subcontratado, † Análisis no acreditado)

**Anexo 27: Tabla de cantidades y precios para un mantenimiento desde el punto de vista cromatográfico y de furanos.**

<b>TABLA DE COSTOS</b>				
<b>ITEM</b>	<b>OBSERVACIONES</b>	<b>CANT.</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>PRECIO TOTAL</b>
1	Análisis físico-químico de aceite dieléctrico Rigidez dieléctrica Número de acidez Tensión interfacial Gravedad Específica Contenido de humedad	1	\$ 150	\$150
2	Cromatografía de gases disueltos (DGA) en aceite dieléctrico del autotransformador de potencia	1	\$ 151	\$ 151
3	Análisis de contenido de inhibidores en aceite dieléctrico del autotransformador de potencia	1	\$ 130	\$ 130
4	Análisis de contenido de sulfuro corrosivo en aceite dieléctrico del autotransformador de potencia	1	\$ 130	\$ 130
5	Análisis de contenido de furanos en aceite dieléctrico del autotransformador de potencia	1	\$ 150	\$ 150
6	Análisis cromatográfico de contenido de PCBs en aceite dieléctrico del autotransformador de potencia	1	\$132.05	\$132.05
<b>TOTALES</b>				<b>\$ 843.05</b>

## Anexo 28: Diagrama de flujo del algoritmo desarrollado en Matlab



## Anexo 29: Algoritmo descriptivo de programación para estimar la vida útil remanente de autotransformador de potencia en el Software Matlab

Inicio

Para realizar el programa de para estimar la vida útil remanente del autotransformador de potencia se debe declarar las siguientes variables:

Declaración de variables para cálculo del grado de polimerización:

- global FAL; ingreso de valor 2-furaldehyde emitido en el resultado de laboratorio
- global A; guarda el valor en A del cálculo de grado de polimerización mediante el método Chendong
- global B; guarda el valor en B del cálculo de grado de polimerización mediante el método Stebbins
- global C; guarda el valor en C del cálculo de grado de polimerización mediante el método De Pablo

global D; guarda el valor en D del cálculo de grado de polimerización mediante el método Pahlavanpour

Declaración de variables para cálculo de vida útil remanente de autotransformador de potencia:

global A1; guarda el valor en A1 del cálculo de vida útil remanente mediante el método Chendong

global B1; guarda el valor en B1 del cálculo de vida útil remanente mediante el método Stebbins

global C1; guarda el valor en C1 del cálculo de vida útil remanente mediante el método De Pablo

global D1; guarda el valor en D1 del cálculo de vida útil remanente mediante el método Pahlavanpour

Declaración de variables para o de vida útil remanente de autotransformador de potencia:

global L; guarda el valor absoluto de A1 sin redondear para calcular los años de vida útil remanente mediante el método Chendong

global N; guarda el valor absoluto de B1 sin redondear para calcular los años de vida útil remanente mediante el método Stebbins

global P; guarda el valor absoluto de C1 sin redondear para calcular los años de vida útil remanente mediante el método De Pablo

global Q; guarda el valor absoluto de D1 sin redondear para calcular los años de vida útil remanente mediante el método Pahlavanpour

Luego el programa realiza el cálculo del grado de polimerización mediante los cuatro métodos de estudio previo el ingreso del valor de 2-furaldehyde, posterior aquello se presiona el botón “grado de polimerización”:

Calculo del grado de Polimerización Método Chendong

$$A = \frac{((\log_{10}(\text{FAL} * 0.001)) - 1.51)}{-0.0033}$$

captura el valor de FAL “furfural” y guarda el valor de este método en la variable A

Calculo del grado de Polimerización Método Stebbins

$$B = \frac{((\log_{10}(FAL * 0.88)) - 4.51)}{-0.0035}$$

captura el valor de FAL “furfural” y guarda el valor de este método en la variable B

Calculo del grado de Polimerización Método De Pablo

$$C = \frac{7100}{(8.8 + (FAL * 0.001) + 1)}$$

captura el valor de FAL “furfural” y guarda el valor de este método en la variable C

Calculo del grado de Polimerización Método Pahlavanpour

$$D = \frac{800}{((0.186 * FAL * 0.001) + 1)}$$

captura el valor de FAL “furfural” y guarda el valor de este método en la variable D

Posterior de haber obtenido los resultados el programa realiza el cálculo de los años de la vida útil remanente del autotransformador de potencia mediante los cuatro métodos con solo presionar el boton “cálculo”:

Vida remanente en años Método Chendong

$$A1 = \frac{1}{0.00000002} * \left[ \left( \frac{1}{(A * 0.9995542)} \right) - \frac{1}{A} \right]$$

guarda el valor de este método en A1

$$L = \text{fix}(A1)$$

posteriormente captura el valor absoluto de A1 sin redondear y lo guarda en la variable L

Vida remanente en años Método Stebbins

$$B1 = \frac{1}{0.00000002} * \left[ \left( \frac{1}{(B * 0.9995542)} \right) - \frac{1}{B} \right]$$

guarda el valor de este método en B1

$$N = \text{fix}(B1)$$

posteriormente captura el valor absoluto de B1 sin redondear y lo guarda en la variable N

Vida remanente en años Método De Pablo

$$C1 = \frac{1}{0.00000002} * \left[ \left( \frac{1}{C * 0.9995542} \right) - \frac{1}{C} \right]$$

guarda el valor de este método en C1

$$P = \text{fix}(C1)$$

posteriormente captura el valor absoluto de C1 sin redondear y lo guarda en la variable P

Vida remanente en años Método Pahlavanpour

$$D1 = \frac{1}{0.00000002} * \left[ \left( \frac{1}{D * 0.9995542} \right) - \frac{1}{D} \right]$$

guarda el valor de este método en D1

$$Q = \text{fix}(D1)$$

posteriormente captura el valor absoluto de D1 sin redondear y lo guarda en la variable Q

$$x = \text{imread}('logo.jpg')$$

en el mismo proceso, instantáneamente manda a leer la imagen con el nombre de “logo”, para decorar la interfaz gráfica del programa con el logo de la Universidad Politécnica Salesiana


Por último, al presionar el botón “limpiar valores”, borra todos los datos que han arrojado anteriormente, con el fin de ingresar el valor del 2-furaldehide, que nos emite los resultados de laboratorio.

Fin

## Anexo 30: Interfaz gráfica para el cálculo de los métodos de estimación de la vida remanente del Autotransformador

ALGORITMO\_TESIS1

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
ESTUDIO DE PRESENCIA DE HUMEDAD EN EL ACEITE  
DIELÉCTRICO DEL AUTOTRANSFORMADOR DE  
POTENCIA UTILIZADO EN TRANSMISIÓN PARA  
ESTIMAR LA VIDA ÚTIL REMANENTE



### Cálculo del Grado de Polimerización del papel del Autotransformador de Potencia

Ingrese 2FAL (ppb)

Grado de Polimerización

Método Chendong

Método Stebbins

Método De Pablo

Método Pahlavanpour

### Cálculo de la Vida Remanente del Autotransformador

Método Chendong  años

Método Stebbins  años

Método De  años

Método Pahlavanpour  años