

**UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y**  
**ELÉCTRICA**



**“UTILIZACIÓN DEL SISTEMA DE SECADO TRANSEC EN LÍNEA, PARA  
REDUCIR LA HUMEDAD DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE  
7MVA DE LA SET PUQUIO - AYACUCHO”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

Para optar el Título Profesional de

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER**

BLACIDO QUISPE, JOEL

**ASESOR**

PFUYO MUÑOZ, ROBERTO

**Villa El Salvador**

**2021**

## **Dedicatoria**

A mis padres quienes me han apoyado para poder llegar a esta instancia de mis estudios, ya que ellos siempre han estado presentes para apoyarme incondicionalmente.

## **Agradecimiento**

A Dios por salvarme de toda adversidad y protegerme, a mi familia por su aliento, a la empresa CANTALLOC.S.R.L. por la confianza para laborar y a la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur por la educación adquirida en mi formación profesional.

## ÍNDICE

Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento .....	iii
ÍNDICE .....	iv
LISTADO DE TABLAS .....	vi
RESUMEN .....	ix
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I .....	2
ASPECTOS GENERALES.....	2
1.1. Contexto .....	2
1.2. Delimitación temporal y espacial del trabajo.....	2
1.2.1. Delimitación temporal.....	2
1.2.2. Delimitación espacial .....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos .....	3
CAPÍTULO II .....	4
MARCO TEÓRICO .....	4
2.1. Antecedentes.....	4
2.1.1. Antecedentes nacionales .....	4
2.1.2. Antecedentes internacionales .....	5
2.2. Bases teóricas .....	6
2.2.1. Transformador de potencia .....	6
2.2.2. Aislamiento Líquido.....	17
2.2.3. Aislamiento Sólido.....	23
2.2.4. Humedad en el aislamiento del transformador.....	33

2.3. Definición de términos básicos .....	45
CAPÍTULO III .....	47
DESARROLLO DEL TRABAJO PROFESIONAL.....	47
3.1. Determinación y análisis del problema .....	47
3.1.1. Problema General .....	48
3.1.2. Problemas Específicos.....	48
3.2. Modelo de solución propuesto.....	48
3.2.1. Toma de muestra de aceite .....	48
3.2.2. Cuantificación de la humedad.....	51
3.2.3. Prueba de rigidez dieléctrica del aceite.....	54
3.2.4. Principio operacional del equipo TRANSEC .....	56
3.2.5. Estructura del equipo TRANSEC .....	59
3.2.6. Datos técnicos del equipo TRANSEC .....	60
3.2.7. Instalación del equipo TRANSEC .....	60
3.2.8. Monitoreo de la humedad .....	63
3.2.9. Cambio de Cilindros de extracción.....	65
3.2.10. Determinación de la vida útil del transformador de potencia.....	66
3.3. Resultados.....	67
3.3.1. Humedad en el transformador de potencia .....	68
3.3.2. Expectativa de la vida útil del transformador.....	70
CONCLUSIONES .....	72
RECOMENDACIONES .....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
ANEXOS .....	75
ANEXO 1 Datos de la placa del transformador.....	74
ANEXO 2 Medición de la válvula inferior del Transformador .....	75

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Pruebas ASTM para aceites aislantes en operación. ....	22
<b>Tabla 2:</b> Temperatura y Aumentos de Temperatura para Aislamientos de 55°C y 65°C. ....	27
<b>Tabla 3:</b> Permitividad del cartón prensado impregnado con aceite mineral.....	32
<b>Tabla 4:</b> Datos del Transformador de la subestación Puquio. ....	52
<b>Tabla 5:</b> Resumen de Normas para pruebas de aceites dieléctricos.....	55
<b>Tabla 6:</b> Datos técnicos del equipo TRANSEC.....	60
<b>Tabla 7:</b> Tiempo para reemplazar los cilindros saturados. ....	65
<b>Tabla 8:</b> Relación del contenido de 2-Furaldehído y DP.....	66
<b>Tabla 9:</b> Datos de monitoreo después de la instalación del equipo TRANSEC...	68
<b>Tabla 10:</b> Datos semanales obtenidos después de la instalación del equipo TRANSEC. ....	69
<b>Tabla 11:</b> Resultados obtenidos para la expectativa de vida útil del transformador.....	70

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Ubicación de la subestación.....	3
<b>Figura 2:</b> <i>Estructura interna y externa de un Transformador.</i> .....	7
<b>Figura 3:</b> Transformador tipo columna. ....	8
<b>Figura 4:</b> Transformador tipo Acorazado. ....	9
<b>Figura 5:</b> Cuba o Tanque del Transformador de Potencia. ....	10
<b>Figura 6:</b> Bushing Pasatapas. ....	11
<b>Figura 7:</b> Cambiador de Tomas.....	12
<b>Figura 8:</b> Transformador con Pararrayos Montados.....	14
<b>Figura 9:</b> Medidor de Nivel serie "p" de la marca Qualitrol empleado en Transformadores Pad Mounted.....	15
<b>Figura 10:</b> Medidor de Nivel tipo Universal de la marca Qualitrol.....	15
<b>Figura 11:</b> Secador de Silica Gel montado en un Transformador.....	16
<b>Figura 12:</b> Válvula para Muestreo, Filtrado y Llenado de aceite.....	17
<b>Figura 13:</b> Estructura de madera.....	24
<b>Figura 14:</b> Estructura Química de la Celulosa. ....	25
<b>Figura 15:</b> Fuerzas de Corto Circuito del Transformador. ....	30
<b>Figura 16:</b> Fabre-Pichon del PPM curva para el equilibrio de la humedad del complejo del aire – aceite - papel en función del aire y del aceite que rodean el papel. ....	38
<b>Figura 17:</b> Redrawn de las curvas de EHV-Weidmann-Weidmann para el equilibrio de la humedad del sistema del aceite – papel.....	39
<b>Figura 18:</b> Curva de Oomen. Humedad en el papel frente a humedad en el aceite para sistemas de aislamiento papel/aceite en equilibrio. ....	40
<b>Figura 19:</b> % HR en el papel en función del % de la HR del ambiente.....	41
<b>Figura 20:</b> Humedad en el papel en % en función de la humedad en el aceite en PPM. ....	42
<b>Figura 21:</b> Presión de vapor en función de la humedad en el papel en % por Oommen.....	43
<b>Figura 22:</b> Curvas de Griffin. Curvas para el contenido de agua en sistemas papel/aceite mineral en equilibrio. ....	44
<b>Figura 23:</b> Humedad en el papel (%) frente a humedad relativa (%) de Fessler. ....	45
<b>Figura 24:</b> Drenado de aceite.....	50

<b>Figura 25:</b> Llenado de jeringa.....	50
<b>Figura 26:</b> Liberación de burbujas.....	51
<b>Figura 27:</b> Curvas de Oomen.....	52
<b>Figura 28:</b> Estimación de la humedad según el porcentaje de agua en el papel aislante.....	53
<b>Figura 29:</b> Gradientes Temperatura-Tensión de ruptura-Tiempo según el porcentaje de humedad en el papel.....	56
<b>Figura 30:</b> Principio de Funcionamiento del equipo TRANSEC.....	57
<b>Figura 31:</b> Condiciones iniciales del transformador de potencia sin utilizar el equipo.....	58
<b>Figura 32:</b> Condiciones finales del transformador de potencia utilizando el equipo.....	58
<b>Figura 33:</b> Componentes del equipo TRANSEC CL3.....	59
<b>Figura 34:</b> Equipo TRANSEC instalado en el transformador de potencia.....	61
<b>Figura 35:</b> Unidad de monitoreo.....	63
<b>Figura 36:</b> Sensor VAISALA MMT162.....	65
<b>Figura 37:</b> Correlación de 2-FAL (ppm) y DP.....	67
<b>Figura 38:</b> Estimación de la extensión de la vida residual del transformador.....	71



## **RESUMEN**

El presente trabajo de suficiencia profesional que se realizó con la empresa CANTALLOC S.R.L., se dirigió con el objetivo de determinar si la utilización del sistema de secado TRANSEC en línea, prolongará el tiempo de vida útil del transformador de potencia de 7MVA de la SET Puquio-Ayacucho.

En el presente trabajo se aplicó la metodología de secado en línea que se realizó con el instrumento TRANSEC CL3 el cual está especializado para dar un secado efectivo y continuo sin interrupciones dando así un mantenimiento fácil para controlar la humedad en general durante la operación del transformador de potencia 7MVA de la subestación Puquio- Ayacucho.

Se concluyó que el tamiz TRANSEC CL3 aumentó la expectativa de vida del transformador de potencia como también controla y monitorea en PPM la humedad existente en el mismo por ende dando un mantenimiento continuo al transformador de potencia de 7MVA de la subestación Puquio.

El transformador viene trabajando correctamente una vez realizado el trabajo de secado con el sistema TRANSEC CL3.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de suficiencia “Utilización del sistema de secado TRANSEC, para reducir la humedad del transformador de potencia de 7MVA en línea de la subestación Puquio - Ayacucho” se originó debido al problema de la humedad en el aislamiento líquido y sólido que es una de las principales causas de las fallas de los transformadores de potencia y uno de los principales factores de degradación del papel aislante.

El sector eléctrico crece constantemente por un aumento de población y un aumento en el sector de la industria que necesitan utilizar la energía eléctrica continuamente sin interrupciones, por tal motivo estamos en la necesidad de mejorar el servicio eléctrico realizando mantenimientos a los equipos eléctricos como los transformadores de potencia que es amenazada por la humedad. Por estas razones nos vemos en la necesidad de tener un sistema de secado en línea que realice el mantenimiento de la humedad y controle eficazmente algunos parámetros del transformador.

El contenido del presente trabajo está realizado en 3 capítulos:

En el capítulo 1, Mencionaremos el contexto de la empresa que fue aplicado el proyecto, la delimitación temporal y espacial del trabajo como también los objetivos generales y específicos del presente trabajo.

En el capítulo 2, Presentamos las bases teóricas que son los conocimientos de diferentes autores, los cuales dieron estudio con buenos resultados en la praxis y también se brinda una definición de términos específicos, lo que son términos técnicos relacionados a nuestra especialidad.

En el capítulo 3, Se muestra en donde se realizó el presente proyecto, como fue el desarrollo de trabajo, como se fue ejecutando y como se llega a la conclusión que el sistema de secado en línea con el tamiz TRANSEC CL3 optimiza al transformador.

Por último, se muestra los resultados y parámetros obtenidos de la utilización del tamiz TRANSEC CL3 para determinar su eficacia para alargar la vida útil del transformador de potencia de 7MVA de la subestación Puquio.

# **CAPÍTULO I**

## **ASPECTOS GENERALES**

### **1.1 Contexto**

La institución CANTALLOC S.R.L. es una empresa lqueña que forma parte del grupo de Energía Bogotá, dedicada a desarrollar actividades relacionadas con la elaboración y ejecución de estudios, proyectos, obras y actividades de servicios relacionados con los sectores de energía, minas, industria y construcción, saneamiento, infraestructura y telecomunicaciones.

La realidad problemática consiste en que la cantidad de humedad en el transformador de potencia resultó elevada, por lo cual se instaló el tamiz de secado en línea TRANSEC la cual filtra, controla y monitorea la humedad del aceite continuamente durante la operación del transformador.

Participé del siguiente proyecto en el área de Ingeniería como auxiliar de supervisión del mantenimiento al transformador de potencia de 7MVA de la subestación Puquio – Ayacucho, el mismo que actualmente está en perfecto funcionamiento.

### **1.2 Delimitación temporal y espacial del trabajo**

#### **1.2.1 Delimitación temporal**

El presente trabajo se realizó durante desde el mes de agosto hasta el mes de diciembre, duración que se realizó el V programa de Titulación por modalidad de Suficiencia Profesional.

#### **1.2.2 Delimitación espacial**

La delimitación espacial de este trabajo profesional, se ejecutó en la Subestación Puquio perteneciente a la empresa ElectroDunas el cual se ubica en el distrito de Puquio, provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho – Perú.



**Figura 1: Ubicación de la subestación**

Fuente: [www.google.maps.com.pe](http://www.google.maps.com.pe) Consulta: 14 de septiembre del 2021

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo general

Determinar el tiempo de vida útil y la humedad del transformador de potencia de 7MVA de la SET Puquio-Ayacucho con el uso del sistema de secado TRANSEC en línea.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

1. Verificar si la utilización del sistema de secado TRANSEC en línea, realiza un secado continuo que disminuirá el porcentaje de humedad en el papel aislante del transformador de potencia de 7MVA de la SET Puquio-Ayacucho.
2. Determinar si la utilización del sistema de secado TRANSEC en línea, realiza un control de la humedad que mejorará el rendimiento del transformador de potencia de 7MVA de la SET Puquio-Ayacucho.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes

##### 2.1.1 Antecedentes nacionales

(Cáceres Pizarro, 2017) Realizó la investigación titulada *“Análisis Físicoquímico y Cromatógrafo en transformadores de potencia y de distribución en la planta de licuefacción de gas Melchorita- Perú”* en la Universidad Nacional del Altiplano–Puno-Perú. La investigación establece como objetivo lo siguiente: Determinar los efectos de cada análisis Físicoquímico y Cromatógrafo en el funcionamiento del transformador; La metodología utilizada fue de análisis ya que les permitió la adecuada detección de fallas de incipientes en transformadores mediante el análisis de los gases generados en el interior del transformador, el mismo que llegó a los siguientes resultados de que los gases que predominan la mayor concentración son el acetileno y monóxido de carbono. Ambos gases son muy perjudiciales, el transformador podría presentar un sobrecalentamiento que involucra al papel y posteriormente a consecuencia de esto salir de servicio. Al desarrollo de la investigación se concluye que habiendo hecho un estudio de los diferentes procesos que ayudan a eliminar la humedad del sistema de aislamiento de un transformador, siendo esto más efectivo es aquel que aplica calor y vacío a dicho sistema.

(Castrejón Chappa & Ramirez Guerra, 2016) Realizó la investigación titulada *“Gestión de activos y mantenimiento de Set’s: Transformadores de potencia”* en la Universidad Nacional del Callao-Lima-Perú. La investigación establece como objetivo lo siguiente: Realizar una evaluación que involucre los costos de operación y mantenimiento proponiendo estrategias de gestión de activos y de mantenimiento para la repotenciación y/o reemplazo de transformadores de potencias en Set’s; La metodología utilizada corresponde al tipo explicativa y descriptiva por la naturaleza de la investigación, el mismo que llegó a los siguientes resultados de evaluar inspeccionando las condiciones y diseño y analizando la vida útil de los transformadores de potencia de la muestra final; Al desarrollo de la investigación se concluye que la repotenciación de un transformador de potencia resultó ser más rentable

que la adquisición de una nueva unidad y al mismo tiempo brinda una mejor confiabilidad al sistema ya que reinicia su vida útil.

### **2.1.2 Antecedentes internacionales**

(Mazariegos Bámaca, 2019) Realizó la investigación titulada "*Uso de técnicas avanzadas no destructivas FDS/PDC para el diagnóstico del aislamiento de transformadores de potencia*" en la Universidad San Carlos de Guatemala-Guatemala. La investigación establece como objetivo lo siguiente: Exponer debates técnicos con el uso de criterios que se consideren como referencia basada en información obtenida de fabricantes de equipos de pruebas, publicaciones internacionales y experiencias vivenciales de campo, para coadyuvar al desarrollo profesional de ingenieros y técnicos en el mantenimiento de transformadores de potencia; La metodología utilizada fue descriptivo el mismo que llegó a los resultados de que el sistema de análisis y medición FDS/PDC es un método no destructivo que proporciona información confiable sobre el estado del sistema de aislamiento de un transformador de potencia. Al desarrollo de la investigación se concluye que la mayor cantidad de humedad en un sistema de aislamiento de un transformador de potencia está alojada en el aislamiento de sólido, por lo que se deduce que el secado del aislamiento líquido por sí solo no reducirá de forma permanente el contenido de la humedad del sistema, y por tanto se corresponderá eliminar la humedad principalmente en el aislamiento sólido.

(Muñoz Pérez, 2018) Realizó la investigación titulada "*Metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) aplicada en transformadores de potencia*" en la Universidad San Carlos de Guatemala-Guatemala. La investigación establece como objetivo lo siguiente: Prolongar la vida útil de los componentes con el cuidadoso énfasis que se hace en el uso de técnicas de mantenimiento basadas en la condición de transformadores de potencia; La metodología utilizada fue descriptivo, el mismo que llegó a los siguientes resultados que el transformador se encuentra en la categoría de seco, por lo tanto no presenta ninguna anomalía y trabajará adecuadamente. Al desarrollo de la investigación se concluye que describe de manera general una serie de

procedimientos que permiten realizar las labores de mantenimiento de transformadores en aceite los cuales ayudan a preservar su vida útil.

## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 Transformador de potencia**

#### **2.2.1.1 Introducción de transformadores de potencia**

Los transformadores de potencia se utilizan para la transformación de energía eléctrica de un nivel de tensión a otro nivel de tensión. Su funcionamiento se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética. La importancia de estas máquinas radica en que han propiciado el desarrollo significativo en el uso de energía eléctrica porque la transportan más fácilmente a distancias remotas. De esta manera, a la potencia eléctrica alterna que se genera en una central de generación, se le eleva el voltaje para transmitirla a lugares lejanos con pocas pérdidas (puesto que se maneja menos corriente) posteriormente se reduce, para dejarla nuevamente en el nivel de utilización final para los clientes de consumo. (Ruano Rivera, 2020).

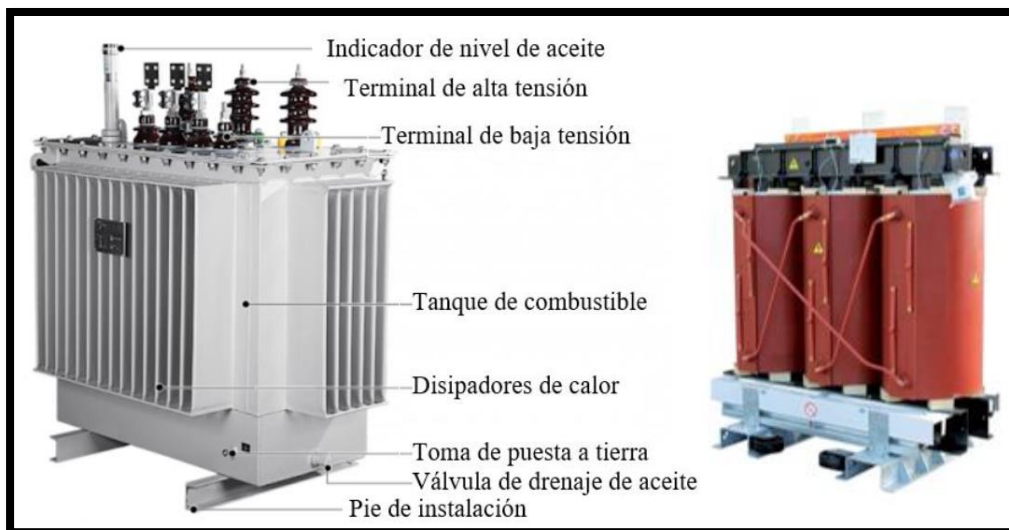
Los transformadores de potencia son esenciales para que las redes eléctricas transmitan energía eléctrica al disminuir las pérdidas del efecto de Joule utilizando alta tensión en largas distancias. Su disponibilidad y fiabilidad es una preocupación importante para los usuarios que necesitan energía eléctrica y de mayor importancia para los propietarios de estos activos. (Ruano Rivera, 2020)

#### **2.2.1.2 Diseño constructivo**

El transformador de potencia es una máquina eléctrica estática, generalmente, constituida por dos o más arrollamientos o devanados. Transforma la energía eléctrica mediante el aumento o disminución de las magnitudes de tensión y corriente en un circuito eléctrico de corriente alterna. Mantiene la frecuencia constante, sin afectar la potencia que se suministra. Dependiendo del diseño y tamaño, entre otras características del transformador, se presenta un pequeño

porcentaje de pérdidas de potencia, en general su eficiencia fluctúa entre el 98 % al 99 %. (Ruano Rivera, 2020)

Los transformadores de potencia sumergidos en aceite se caracterizan porque el núcleo ferromagnético con los devanados se encuentra totalmente sumergidos en aceite mineral; esto favorece en la transferencia de calor, la conservación del núcleo, así como en el conjunto de la bobina al llenar los espacios vacíos en la celulosa, minimizando así el contacto del oxígeno con el papel y otros materiales susceptibles a la oxidación. (Ruano Rivera, 2020)



**Figura 2:** Estructura interna y externa de un Transformador.

Fuente: (Ruano Rivera, 2020)

El transformador de potencia sumergido en aceite consta de las siguientes partes principales.

#### 2.2.1.2.1 Núcleo

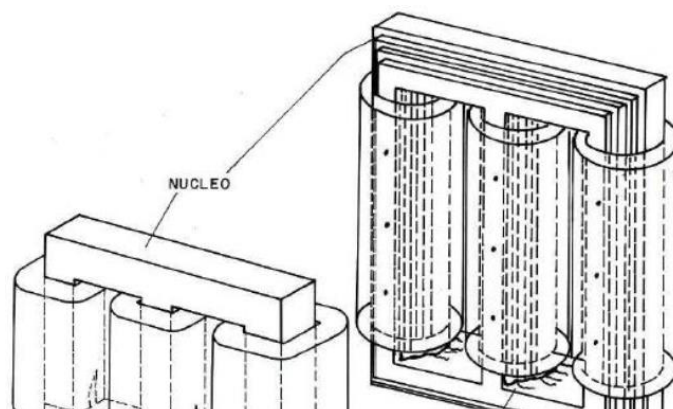
El núcleo de un transformador de potencia consiste básicamente de un laminado de acero al silicio; para los devanados primario, secundario y terciario donde aplique. Este núcleo está constituido de una gran cantidad de placas de acero al silicio de granos orientados acoplados en superposición, estas chapas de acero tienen un



espesor variable y se fabrican de acuerdo con estándares internacionales. (Muñoz Pérez, 2018).

Las placas de acero al silicio son aleaciones que contienen alrededor del 5 % de silicio, cuya función es reducir las pérdidas por histéresis y aumentar la resistencia del acero, permitiendo con esto reducir las corrientes parásitas. Las placas de acero al silicio son laminadas en frío, seguidas de un tratamiento térmico adecuado que permite que los granos magnéticos se orienten en el sentido de la laminación; están revestidas por una fina capa de material aislante y se fabrican dentro de los límites máximos de pérdidas electromagnéticas, que varían entre 1,28 W/kg y una densidad de flujo de 1,50 Tesla a 1,83 W/kg, que corresponde a una densidad de flujo de 1,7 Tesla a la frecuencia industrial (60 Hz). (Muñoz Pérez, 2018).

Los transformadores de potencia se crean de dos maneras, según sea el lugar relativo entre el núcleo con los devanados. El transformador tipo columna es el más manejado en la región. En este tipo de construcción el núcleo es un solo circuito magnético, formado por un yugo superior y tres columnas verticales (para los trifásicos). Las bobinas son ensambladas concéntricamente en cada una de las columnas, de modo que envuelven todo el núcleo. (Muñoz Pérez, 2018).

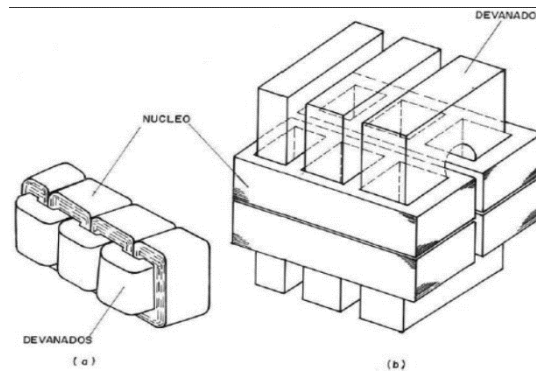


**Figura 3:** Transformador tipo columna.

Fuente: Comisión federal de Electricidad de Guatemala.

Mantenimiento de transformadores. Cap.2 p.10

El tipo acorazado se usa poco en la región. En esta construcción los devanados forman 1 o 3 anillos, para 1 o 3 fases respectivamente y el núcleo se ensambla alrededor de ellos, a modo de que envuelve a las bobinas.



**Figura 4:** *Transformador tipo Acorazado.*

Fuente: Comisión federal de Electricidad de Guatemala.

Mantenimiento de transformadores. Cap.2 p.10

#### **2.2.1.2.2 Devanados**

(Muñoz Pérez, 2018) Están formados por bobinas primaria, secundaria y en algunos casos de terciarias. Los conductores son normalmente de cobre electrolítico, aislados con esmalte y cubiertos con derivados básicamente de celulosa, compuestos aislantes, eventualmente, se usa conductor de aluminio.

#### **2.2.1.2.3 Cuba**

La cuba tiene que soportar el vacío absoluto sin presentar deformación permanente, proteger eléctrica y mecánicamente los devanados y aceite, ofrecer puntos de apoyo para el transporte y la carga del mismo, soportar los radiadores, ventiladores y los accesorios especiales. La base del tanque es reforzada para soportar el peso estando lo más hermético posible. La cuba no tiene que tener fugas de aceite, esto causaría que el transformador deje de funcionar por bajo nivel de aceite. El bajo nivel de aceite se observa en el medidor de nivel de aceite. (Muñoz Pérez, 2018).

Se construyen de placa o lámina de acero común y según la capacidad de disipación deseada logran ser lisos, con paredes onduladas o con tubos radiadores. El tanque está sujeto a un proceso acelerado de corrosión, por lo cual se usan recubrimientos (pinturas) adecuados a las condiciones ambientales y atmosféricas locales; además, el recubrimiento tiene que permitir una rápida radiación del calor interno y ser capaz de reflejar la radiación solar. (Muñoz Pérez, 2018).



**Figura 5:** *Cuba o Tanque del Transformador de Potencia.*

Fuente: Schneider. Transformador limitador de falta a tierra.

<https://www.schneider-electric.es/es/product-range-presentation/60727-minera-e/>. Consulta: 12 de Septiembre del 2021.

#### **2.2.1.2.4 Bushing**

Los bushings están diseñados para: soportar las tensiones de operación normal y anormal, mantener la humedad fuera del transformador y resistir los esfuerzos mecánicos debido al peso y tensión de los conductores conectados a ellos. Los bushing son de forma cilíndrica, cubiertos con un esmalte especial para evitar la adherencia de humedad y contaminantes. Están provistos de “faldas” con el objeto de aumentar la distancia de fuga (distancia entre el

terminal del bushing y su base acoplada al tanque) y así disminuir la posibilidad de un arco debido a sobre tensiones. (Cáceres Pizarro, 2017).



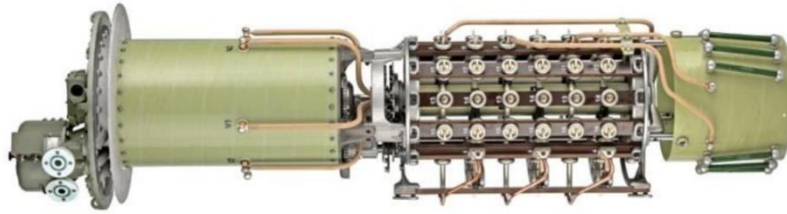
**Figura 6:** *Bushing Pasatapas.*

Fuente: Tajal. Boquillas de alta tensión.

<http://www.tajal.com.mx/materiales/boquillas-alta-y-baja-tension/attachment/boquillas-alta-tension/> Consulta: 13 de septiembre del 2021.

#### **2.2.1.2.5 Cambiador de tap**

También llamado cambiador de tomas. La mayoría de los transformadores tienen giros adicionales agregados a los devanados de alta tensión y algunos de esos giros están vinculados a un dispositivo llamado "Cambiador de Tap". Permite un rango específico de la variación de tensión durante la vida útil del transformador. El circuito eléctrico de los devanados y el cambiador de tomas tienen algunos contactos móviles. Los dos tipos principales de cambiadores de tomas son el cambiador de tomas sin activación, un tipo mecánicamente bastante simple que cambia la tensión mientras el transformador no está cargado; y el cambiador de tomas en carga, es un tipo más complejo que funciona cuando el transformador alimenta la carga. (Ruano Rivera, 2020).



**Figura 7:** Cambiador de Tomas.

Fuente: Maschinenfabrik Reinhausen "MR". Cambiador de tomas bajo carga

[https://www.reinhausen.com/es/desktopdefault.aspx/tabid-2539/3777\\_read-9527/](https://www.reinhausen.com/es/desktopdefault.aspx/tabid-2539/3777_read-9527/)

Consulta: 13 de septiembre del 2021

#### **2.2.1.2.6 Sistema de refrigeración**

En un transformador de potencia existen pérdidas que se convierten en calor y contribuyen al calentamiento de la máquina. Es conveniente otorgar al transformador con un adecuado sistema de refrigeración, que evite las consignas de estas altas temperaturas que puedan afectar la vida útil de los aislamientos del devanado. Naturalmente por convección, el aceite dieléctrico ayuda en la refrigeración del transformador. (Ruano Rivera, 2020).

La sobretemperatura contribuye a que el aceite experimente un proceso de envejecimiento acelerado. Esto indica que se está oxidando y creando lodos. Este proceso logra ser más severo en presencia de humedad y oxígeno dentro del transformador. Un adecuado sistema de enfriamiento retarda el envejecimiento del aceite dieléctrico. Para disminuir este problema, se tiene que tener controlado el contenido de humedad, así como el oxígeno que existe dentro del transformador. (Ruano Rivera, 2020).

Dentro de su sistema de refrigeración, un transformador está equipado de radiadores que, a mayor potencia, mayor es la cantidad de radiadores externos para aumentar la superficie de enfriamiento de la cuba llena de aceite. Por convección el aceite circula alrededor

de los arrollamientos hacia los radiadores, en donde el calor es entregado al aire exterior. (Ruano Rivera, 2020)

Según las normas IEC se designa el tipo de enfriamiento para los transformadores mediante cuatro letras. La primera letra se refiere al tipo de refrigerante en contacto con los devanados, la segunda letra a la naturaleza en que considera circular. Las siguientes dos letras se refieren al refrigerante en contacto con el sistema de refrigeración exterior y a su modo de circulación. Según la norma IEC 60076-7 se designan los siguientes tipos de enfriamiento: (Ruano Rivera, 2020)

- OA (ONAN): aceite y aire que circulan por convección natural.
- FA (ONAF): aceite que circula por convección natural y aire forzado con moto-ventiladores.
- FOA (OFAF): aceite con circulación forzada, usando motobombas y aire forzado con motobombas.
- OW (ONWF): aceite que circula por convección natural y agua con circulación forzada, usando motobombas.
- FOW (OFWF): aceite y agua con circulación forzada, usando motobombas.

#### **2.2.1.2.7 Pararrayos**

Las instalaciones donde se encuentran montados los transformadores (Subestaciones) están sujetas a sobretensiones debidas a descargas atmosféricas, maniobras o a fallas en los circuitos del sistema al cual el transformador está conectado. (Cáceres Pizarro, 2017).

Los pararrayos son los primordiales medios para proteger no solo al transformador, sino a los demás equipos contra dichas sobretensiones. Estos elementos de protección, están divididos en tres clasificaciones: Tipo Subestación (684 KV), Intermedios (hasta 120 KV) y Tipo distribución (hasta 30 KV), siendo los de tipo subestación los más caros y los que presenta mayor protección. El

tipo de pararrayo más empleado es el Tipo Válvula. (Cáceres Pizarro, 2017)

La figura N° 8 muestra un transformador con los pararrayos montados en el lado de alta tensión.



**Figura 8:** *Transformador con Pararrayos Montados.*

Fuente: (Cáceres Pizarro, 2017)

#### **2.2.1.2.8 Medidores de nivel**

El indicador de nivel de aceite marca el nivel del líquido aislante contenido en el tanque principal del transformador o en compartimentos asociados. En los transformadores con tanque de conservación el medidor de nivel se localiza instalado a un costado del mismo. En los transformadores sellados el medidor de nivel es instalado a un costado del tanque, justo a la altura del nivel de aceite. (Cáceres Pizarro, 2017).

Como se muestra en las figuras a continuación, los medidores de nivel poseen tres posiciones definidas: HI (nivel máximo), 25°C que corresponde al nivel de aceite a la temperatura ambiente y LO (nivel mínimo). Tomando en consideración estos niveles de referencia, se considera llenar de aceite el transformador de acuerdo a la temperatura ambiente existente al momento del llenado. (Cáceres Pizarro, 2017).



**Figura 9:** *Medidor de Nivel serie "p" de la marca Qualitrol empleado en Transformadores Pad Mounted.*

Fuente: (Cáceres Pizarro, 2017)



**Figura 10:** *Medidor de Nivel tipo Universal de la marca Qualitrol.*

Fuente: (Cáceres Pizarro, 2017)



### 2.2.1.2.9 Respirador de Silica Gel

Este mecanismo está fabricado para eliminar la humedad y el polvo que ingresan al transformador con el movimiento del aire resultante de la variación de la temperatura del aceite del transformador. Este dispositivo es utilizado en transformadores con tanque conservador y está instalado entre el paso de aire del transformador y la atmósfera. (Cáceres Pizarro, 2017)

El respirador de Silica Gel está formado por un depósito, generalmente uno o dos cilindros de cristal, con un agente deshidratante (Sílica Gel) y aceite, así como de las partes metálicas para su fijación. La Sílica gel que se utiliza consiste de gránulos de silicato de aluminio puro, coloreada de azul con cloruro de cobalto, químicamente casi neutral y de gran capacidad de absorción. Cuando la absorción de humedad llega a un 30 o 40 %, el color cambia de azul a rosa. (Cáceres Pizarro, 2017)

En la figura N° 11 se observa el respirador de sílica gel instalado en el transformador.



**Figura 11:** *Secador de Silica Gel montado en un Transformador.*

Fuente: (Cáceres Pizarro, 2017)

#### 2.2.1.2.10 Válvula para filtrado y muestreo de aceite

La válvula de diafragma se encuentra localizada en la parte superior, a un costado del tanque dispone de una pequeña válvula para muestreo de aceite de la parte superior, similar a la descrita en la válvula combinada inferior. (Cáceres Pizarro, 2017).



**Figura 12:** *Válvula para Muestreo, Filtrado y Llenado de aceite.*

Fuente: (Cáceres Pizarro, 2017)

### 2.2.2 Aislamiento Líquido

Es un fluido o líquido aislante que no conduce electricidad fácilmente. Los fluidos que son aislantes eléctricos, por lo general, ofrecen tanto aislamiento eléctrico, como transferencia de calor en el equipo eléctrico. Habitualmente, el aceite dieléctrico es de origen mineral, refinado de petróleo crudo que posee propiedades eléctricas aislantes y está formado por hidrocarburos con una aceptable estabilidad a la oxidación. (Ruano Rivera, 2020).

#### 2.2.2.1 Las cuatro funciones del aceite mineral

A medida que se ha desarrollado el uso del aceite mineral como líquido o fluido aislante en transformadores de potencia, se ha comprobado que cumple cuatro funciones que contribuyen a la operación de estos.

#### **2.2.2.1.1 Aceite como aislante dieléctrico**

El aceite proporciona rigidez dieléctrica; actúa como un material aislante y dieléctrico. Es en el aislamiento líquido sobre el que recae el mayor esfuerzo dieléctrico (soporta mayor campo eléctrico) debido a su menor constante dieléctrica, en comparación con la constante del papel aislante. Por este motivo, se intercalan capas de cartón o de papel impregnado en grandes espacios de aceite, de esta forma crea una interfaz papel-aceite que aumenta la rigidez dieléctrica del sistema de aislamiento. (Ruano Rivera, 2020).

#### **2.2.2.1.2 Aceite como medio de transferencia de calor**

El aceite actúa como medio de enfriamiento. La composición del aceite determina sus propiedades físicas (viscosidad, calor específico, densidad relativa, coeficiente de expansión del aceite). Tales propiedades determinan cuan bien el aceite transporta el exceso de calor desde la parte activa del transformador, núcleo y arrollamientos, hacia el exterior. Estas características de transferencia de calor van reduciéndose poco a poco, a medida que el aceite envejece en servicio. (Ruano Rivera, 2020).

#### **2.2.2.1.3 Aceite como protector del papel**

El aceite salvaguarda el aislamiento sólido (papel); actúa como una barrera protectora entre el papel con los efectos dañinos como el oxígeno, calor, humedad, etc. El aceite extrae el calor del papel en el núcleo y la bobina a medida que este se origina. En términos generales, el aceite ofrece rigidez mecánica al aislamiento sólido. (Ruano Rivera, 2020).

#### **2.2.2.1.4 El aceite como herramienta de diagnóstico**

(Ruano Rivera, 2020) El aceite tiene que analizarse para conocer las condiciones internas del transformador; actúa como una herramienta de diagnóstico para la evaluación, monitoreo del aislamiento sólido y las condiciones del equipo.

### **2.2.2.2 Tipos de aceites dieléctricos**

El aceite mineral se clasifica de Tipo I y Tipo II. El aceite Tipo I se utiliza en equipos que no requieren mucha resistencia a la oxidación, mientras que los del Tipo II ofrecen una mayor protección respecto a la oxidación. Existen otros tipos de líquidos dieléctricos que son o podrían ser utilizados como líquido aislante en un transformador de potencia, de los cuales se logran mencionar los siguientes: (Ruano Rivera, 2020).

- a) Hidrocarburos de alto peso molecular (HMWH)
- b) Siliconas
- c) Fluido a base de éster
- d) Fluidos dieléctricos basados en aceites vegetales

### **2.2.2.3 Mecanismos de degeneración del aceite dieléctrico**

Un origen del envejecimiento del aceite es la oxidación; el aceite envejece porque se oxida. Este líquido al hacer contacto con el oxígeno, los hidrocarburos en el aceite reaccionan con el oxígeno disuelto en este para formar derivados de la oxidación en el aceite. A estos derivados se les conoce como productos de la oxidación, productos de la descomposición, compuestos de la oxidación o derivados del envejecimiento en el aceite. Cuando el aceite envejece rápidamente, significa que requiere mantenimiento más frecuente y que, además, habrá mayor daño en el aislamiento sólido si se retrasa el mantenimiento. Varias condiciones en un transformador propician que el aceite reaccione más aceleradamente en presencia del oxígeno. A continuación, se verán varios agentes y catalizadores que acompañan al aceite dentro del transformador, que afectan la velocidad a la cual se desarrollan productos de la oxidación o acidez altamente contaminantes. (Ruano Rivera, 2020)

#### **2.2.2.3.1 Oxígeno**

El oxígeno está presente en el aceite del transformador en operación dado que es imposible remover todo el O<sub>2</sub>, al menos queda un 0,25 %, lo necesario para contribuir a la oxidación del aceite

aislante; es uno de los gases con mayor solubilidad en el aceite, por ende, el de mayor afinidad con el mismo. La degradación del papel también suministra O<sub>2</sub>, y por último los naturales inhibidores de O<sub>2</sub> gradualmente se acaban con el tiempo. La mayor parte del aire presente en el aceite del transformador es de origen atmosférico. El aire contiene aproximadamente 20 % de oxígeno y se disuelve en el aceite expuesto al aire. Cuando se introduce el aceite dentro del transformador, se elimina el oxígeno mediante el proceso de desgasificación al vacío. (Ruano Rivera, 2020).

#### **2.2.2.4 Calor**

A temperaturas más altas, numerosas reacciones químicas se desarrollan más rápidamente, entre ellas, la oxidación del aceite; esto acelera el envejecimiento, reduciendo la fuerza mecánica-dieléctrica del aislamiento sólido. Los efectos secundarios son la producción de agua, materiales ácidos y gases. (Ruano Rivera, 2020).

#### **2.2.2.5 Catalizadores**

Los principales catalizadores presentes en el aceite que inducen la reacción de la oxidación son el cobre y hierro. Estos dos metales, en presencia de agua, constituyen un cultivo mortal en el proceso de oxidación del aceite aislante. Por lo general, los otros metales que se encuentran en los transformadores también actúan como catalizadores en la oxidación del aceite. (Ruano Rivera, 2020).

#### **2.2.2.6 Formación de lodos en el aceite**

Las reacciones químicas forman productos de oxidación crecientemente contaminantes. Estos, a su vez, se activan aglomerándose para formar complejos moleculares de alto peso en forma de lodos que se sitúan en las bobinas, núcleo, radiadores, principalmente en las capas internas de los devanados y, por lo tanto, en los espacios pequeños de las fibras de la celulosa, afectando la vida útil del papel, reduciendo sus propiedades mecánicas-dieléctricas. El lodo es la fase terminal del proceso de oxidación del aceite. Tiene la

particularidad de ser una sustancia resinosa, parcialmente conductora, moderadamente soluble en el aceite (a temperatura de punto de anilina), en el transformador causa la disminución del aislamiento, pérdida de capacidad de sobrecarga del transformador, aumento en su temperatura de operación. Los lodos se precipitan primero en las partes frías, luego en las partes calientes del transformador y su formación es periódica o continua. (Ruano Rivera, 2020).

#### **2.2.2.7 Métodos de conservación del aceite dieléctrico**

Lo expuesto sucede en el interior de un transformador en servicio y lo convierte en un complejo reactor químico que propicia el envejecimiento del aceite y que necesite mantenimiento. El mantenimiento permite el control de condiciones que aceleran el envejecimiento del aceite. Para ello, se recomienda lo siguiente: (Ruano Rivera, 2020)

- a) Es indispensable monitorear y controlar el contenido humedad en el aceite, adicionalmente permite estimar la humedad presente en el aislamiento de papel.
- b) Se controla la temperatura de operación del transformador, esto se logra evitando las sobrecargas del transformador y que su sistema de enfriamiento funcione adecuadamente.
- c) De existir productos de la oxidación, estos se logran conservar para evitar que se acumulen en el sistema papel-aceite.
- d) Se considera prolongar la vida del aceite mediante el uso de un inhibidor de oxidación.

En la norma ASTM D-117 se establecen 55 métodos de prueba. Sin embargo, en práctica según consenso internacional interesan solo 6 de estas pruebas para medir la degradación-contaminación de los aceites y dos opcionales que se utilizan en casos especiales, los cuales se relacionan en la siguiente tabla 1.

**Tabla 1:**  
*Pruebas ASTM para aceites aislantes en operación.*

<b>Pruebas ASTM más importantes para aceites aislantes en operación</b>				
<b>Método de Prueba ASTM</b>	<b>Criterios para evaluar la condición del aceite en operación</b>			<b>Indicaciones</b>
	<b>AC</b>	<b>CU</b>	<b>IN</b>	
1. Rigidez dieléctrica D-877 (kV)	≥30	<30 ≥25	<25	Contaminantes, conductores, impurezas, agua.
2. Acidez o número de Neutralización D-974 (mg KOH/G)	≤0,05	>0,05 ≤0,10	>0,10	Ácidos presentes, lodos
3. Tensión Interfacial D-971 (dinas/cm)	≥32	<32 ≥28	<28	Compuestos hidrofílicos o contaminantes polares ácidos
4. Color D-10500 <sup>a</sup>	≤3,5	- - - -	>3,5	Un marcado cambio en un año indica anomalía
5. Contenido de agua D-1533 (ppm)	<30	≥30 <35	≥35	Indica contenido total de agua en el aceite
6. Gravedad específica D-1278	0,84 a 0,91	<0,84	>0,91	Se requiere para ajustar el valor leído de Tensión Interfacial. Indicativo del indicio de presencia de PCB's
<b>PRUEBAS OPCIONALES</b>				
1. Contenido de Inhibidor de oxidación DBP o DBPC ASTM D-4768	<b>AC</b> ≥0,2 %	<b>CU</b> ≥0,1 % <0,2 %	<b>IN</b> <0,1 %	Nivel de defensas contra productos de la oxidación
2. Factor de Potencia ASTM D-924	a 25 °C <0,1 %	≥0,1 % ≤0,3 %	>0,3 %	Indica agua, contaminantes extraños y ácidos
	a 100 °C <3,0 %	≥3,0 % ≤4,0 %	>4,0 %	

Fuente: Elaboración propia.

#### **2.2.2.8 Mantenimiento al aceite dieléctrico**

El mantenimiento preventivo al aceite de los transformadores de potencia se orienta hacia el logro de los siguientes objetivos: conservar la operación eficiente de la máquina por el mayor tiempo posible, sin interrupciones imprevistas, prevenir las fallas del equipo y conservar las inversiones económicas representadas por el transformador. De acuerdo con la naturaleza de la deficiencia que se quiera corregir para cada caso en particular, el tratamiento del aceite consiste en uno o varios de los siguientes procedimientos de mantenimiento preventivo de los cuales no se entrará en detalle: (Ruano Rivera, 2020).

- a) Cambio de aceite.
- b) Secado del aceite.
- c) Proceso de vacío.
- d) Recirculación del aceite.
- e) Regeneración del aceite.

#### **2.2.3 Aislamiento Sólido**

El material primordial utilizado para el aislamiento sólido en transformadores llenos de líquido ha sido, hasta ahora, material a base de celulosa. Las razones importantes de esto son su disponibilidad, costo relativamente bajo y desempeño mecánico y dieléctrico. Los primeros materiales utilizados en los transformadores fueron telas a base de algodón. Estos fueron rápidamente sustituidos por papeles celulósicos y cartones prensados. Rápidamente se comprendió que la pureza del aislamiento por razones dieléctricas y la resistencia del aislamiento por razones mecánicas eran primordiales en el rendimiento del sistema de aislamiento. Desde principios del siglo XX, el papel de celulosa y el cartón prensado hechos de pulpa cruda obtenida por el proceso kraft (sulfato) han sido el material de elección en los transformadores llenos de líquido. (Chavarrea Camargo, 2020).

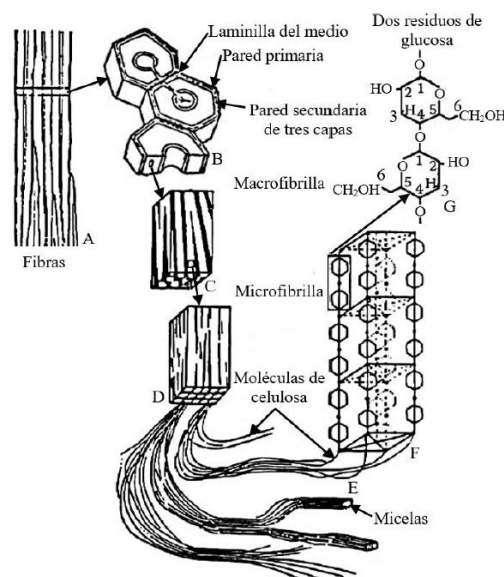
##### **2.2.3.1 Papel y cartón prensado de pulpa de madera**

El papel y cartón prensado de calidad eléctrica se fabrican principalmente a partir de pulpa de madera procesada mediante el



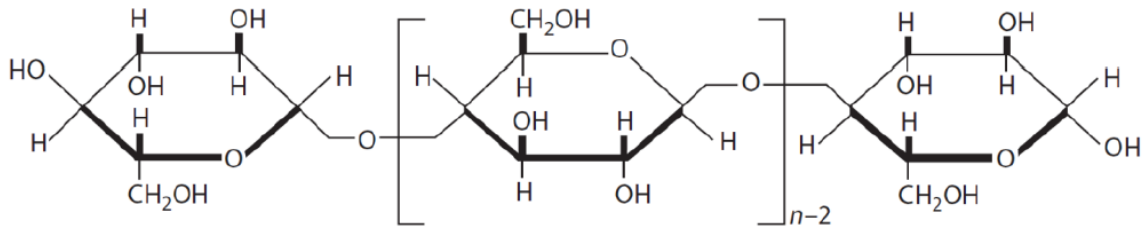
proceso químico kraft, por lo que se conocen como papel kraft y cartón kraft (kraft en alemán significa fuerte). El material de partida es madera, tanto madera blanda como madera dura. La madera es un material compuesto natural que se compone de tubos flexibles de celulosa unidos por lignina, un polímero aromático pardusco que se elimina principalmente durante el proceso de pulpa. En la Figura 13 se muestra una representación esquemática de la estructura fina de la pulpa de madera. (Chavarrea Camargo, 2020)

La celulosa, el componente esencial del papel y el cartón prensado, es un polímero de unidades de glucosa unidas entre sí de una manera especial, como se muestra en la Figura 14. Consigue representarse simplemente como  $[C_5H_{10}O_5]_n$  ignorando los átomos adicionales en los grupos terminales, donde n es el grado de polimerización (GP). Sin embargo, la unidad que se repite es la celobiosa que consta de dos unidades de glucosa. (Chavarrea Camargo, 2020).



**Figura 13:** Estructura de madera.

Fuente: (Chavarrea, 2020).



**Figura 14:** Estructura Química de la Celulosa.

Fuente: <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/education/resources/highschool/chemmatters/spanishtranslations/cm-april2019-celebrate-paper-spanish.pdf> Consulta: 22/09/2021

Actualmente se fabrican dos tipos de cartones prensados. Estos se basan en el proceso de secado de las hojas de cartón prensado. En un proceso, las hojas de cartón prensado húmedas se secan en un horno. Luego, la hoja seca se calandra para lograr el espesor y la densidad deseados. Este proceso produce una hoja de cartón prensado con una densidad en el rango de 0,95 a 1,05 g/cm<sup>3</sup>. (Chavarrea Camargo, 2020).

En el proceso alternativo, las hojas de cartón prensado húmedo se secan a presión en una prensa calentada. Este proceso, conocido como proceso precomprimido, produce una hoja de cartón prensado con una densidad en el rango de 1,10 a 1,25 g/cm<sup>3</sup>. Las hojas de cartón prensado calandrado se utilizan como barreras y para componentes que requieren conformación en formas como el aislamiento de los extremos de los devanados. El cartón precomprimido se utiliza para enrollar espaciadores, enrollar cilindros y aislar los extremos. Varias toneladas de cartón prensado y papel aislante se utilizan en transformadores de potencia grandes y medianos. (Chavarrea Camargo, 2020).

### **2.2.3.2 Aislamiento de papel**

El aislamiento de papel se utiliza para aislar los conductores dentro de cada devanado y los cables. Las características importantes del aislamiento de papel son la rigidez dieléctrica, la resistencia mecánica y el rendimiento térmico. La rigidez dieléctrica del papel determinará cuánto papel se requiere para soportar el diferencial de potencial entre vueltas y que sea lo suficiente para soportar la tensión pico de funcionamiento normal a baja frecuencia (50 o 60 Hz), así como las tensiones más altas durante los impulsos o las sobretensiones de conmutación. Para optimizar la rigidez dieléctrica del aislamiento de papel, se prefiere construir el aislamiento en capas utilizando papel fino (normalmente en el rango de 0,003" –0,005" (0,075–0,125 mm). (Chavarrea Camargo, 2020).

La resistencia mecánica del conductor de papel se controla durante el proceso de fabricación del papel. El tipo de pulpa, el desarrollo de la fibra y la velocidad de la máquina son tres de los parámetros críticos para un papel resistente. La resistencia del papel se mide por la resistencia a la tracción, el alargamiento por tracción, la resistencia al estallido y la resistencia al desgarro. La resistencia al desgarro es típicamente el factor limitante para el fabricante del transformador cuando envuelve el conductor de cobre. (Chavarrea Camargo, 2020).

### **2.2.3.3 Papel crepé**

Se logró una mejora significativa en el aislamiento de los conductores con el desarrollo del aislamiento de vuelta de papel crepé. El papel crepé para aislamiento de vueltas se introdujo en la década de 1970. Los fabricantes de transformadores de la época estaban interesados en un papel sin rasgaduras para encintar. El resistente papel cáñamo-kraft utilizado para encintar en ese momento se estiraba muy poco y se rasgaba con frecuencia al aplicarse. El papel crepé tiene hasta un 20% de estiramiento (alargamiento). El crepado se realiza en la hoja de papel normal. El papel pasa por un baño acuoso que contiene un compuesto de crepado y se aplica a un tambor giratorio y

luego se recoge en otro tambor que gira a una velocidad más lenta. Este proceso produce continuos pliegues en el papel que aumentan su alargamiento o estiramiento. A continuación, el papel se calandra con el grosor deseado. El papel crepé descrito es diferente al aislamiento crepé sin calandrar con valores de estiramiento que oscilan entre el 50% y el 200%. Estos papeles crepé se utilizan normalmente para aislar cables. Los altos valores de elongación permiten que el aislamiento permanezca envuelto firmemente en los cables mientras los cables se doblan en su lugar. (Chavarrea Camargo, 2020).

El rendimiento térmico del aislamiento del conductor es un parámetro crítico en la vida útil del sistema de aislamiento del transformador. El aislamiento transfiere el calor generado por las pérdidas en el conductor al fluido del transformador. El aislamiento del conductor más denso y grueso inhibe esta transferencia de calor, lo que conduce a un compromiso entre el diseño dieléctrico y el diseño térmico. (Chavarrea Camargo, 2020).

#### 2.2.3.4 Papel mejorado térmicamente

El límite térmico de devanados del transformador es el aislamiento del conductor en el punto caliente del devanado. La elevación media del devanado se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2:**  
*Temperatura y Aumentos de Temperatura para Aislamientos de 55°C y 65°C.*

	55 °C	65 °C
	Subida	Subida
Ambiente	30 °C	30 °C
Subida media del bobinado	55 °C	65 °C
Diferencial de puntos calientes	10 °C	15 °C
Temperatura del punto caliente	95 °C	110 °C

\*Solo alcanzable con aislamiento mejorado térmicamente

Fuente: Elaboración propia

A finales de la década de 1950, varios fabricantes de transformadores introdujeron el aislamiento de celulosa mejorado térmicamente. En 1962, la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA) reconoció oficialmente el aislamiento mejorado en la norma TR-1-1962 al establecer otro límite de aumento de temperatura de 65 °C para transformadores sumergidos en aceite que utilizan papel tratado. Antes de eso, la norma era un transformador de elevación de bobinado promedio de 55 °C. Estos 10°C adicionales permitieron al fabricante aumentar la carga en un 12% o, a la inversa, enviar un transformador más pequeño para la misma potencia nominal. El uso de aislamiento mejorado térmicamente se convirtió en la norma en los transformadores a mediados de la década de 1960, con la mayoría de las unidades clasificadas a 65 °C de aumento. (Chavarrea Camargo, 2020).

Diferentes investigadores probaron varios agentes de mejora; las fórmulas más exitosas utilizaron compuestos de amina, particularmente dicianidamida ("dicy"). Los investigadores de Westinghouse Electric introdujeron "Insuldur" en 1958, y lo mejoraron aún más en 1960.<sup>3</sup> El componente principal de esto es dicy (más del 60%); los otros son melamina (más del 30%) y poliacrilamida. El contenido de Insuldur tiene que estar comprendido entre el 2,75% y el 4,0% en peso, lo que corresponde a un contenido de nitrógeno del 1,74% al 2,54% en el papel. Se ha descubierto que la combinación de los productos químicos es más eficaz que solo los peligrosos. Sin embargo, algunos papeles para transformadores se fabrican solo con una actualización rápida. (Chavarrea Camargo, 2020).

### **2.2.3.5 Aislamiento de cartón prensado**

En los transformadores de potencia llenos de líquido, el aislamiento tiene que proporcionar tres funciones principales: dieléctrico, mecánico y térmico.

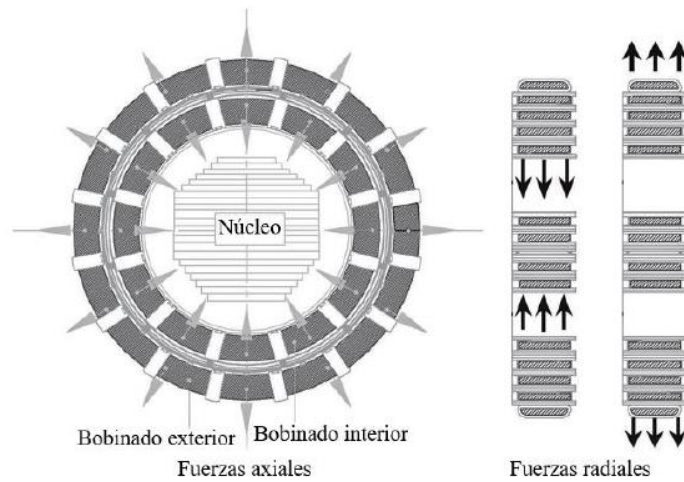
Si bien el aislamiento de papel se utiliza para aislar los conductores y conductores de bobinado, no proporciona ningún soporte mecánico. El cartón prensado, un material aislante a base de celulosa que se logra fabricar en espesores de 1 a 8 mm (0,040" –0,320"), es ideal para este propósito. Basado en el proceso de fabricación, el cartón prensado está disponible en dos rangos de densidad. El cartón prensado de baja densidad se utiliza en aplicaciones en las que el aislamiento se utiliza como barrera y la resistencia no es un factor. El cartón prensado de alta densidad se utiliza cuando el aislamiento está bajo compresión, como dentro del devanado o cuando se requiere una alta resistencia, como una forma de bobinado cilíndrico. Para mayor resistencia, también está disponible un material de cartón prensado laminado. Las láminas de hasta 150 mm (6 ") se fabrican laminando láminas de cartón prensado con adhesivo a base de poliéster. Este material se utiliza para bloques de soporte, vigas y placas de sujeción. (Chavarrea Camargo, 2020).

#### **2.2.3.6 Papel mecánico del aislamiento**

Un papel principal del aislamiento de cartón prensado en transformadores de potencia es soportar los devanados durante cortocircuitos. Las fuerzas de cortocircuito tienen dos componentes: radial y axial.

Las fuerzas axiales son tales que el devanado interior intenta comprimirse, generando fuerzas de pandeo, mientras que el devanado exterior intenta expandirse, generando fuerzas de aro. Hoy en día, muchos diseños son autoportantes y utilizan la resistencia mecánica del propio conductor para resistir las fuerzas radiales de cortocircuito. En algunos casos, el diseñador depende de la resistencia mecánica del cilindro de bobinado para soportar estas fuerzas. Las fuerzas axiales que actúan sobre un devanado en cortocircuito son de naturaleza compresiva. El espaciador de bobinado tiene que poder resistir esta fuerza de compresión sin una deformación permanente significativa.

Idealmente, la altura del devanado volverá a su dimensión original después de un cortocircuito. (Chavarrea Camargo, 2020).



**Figura 15:** *Fuerzas de Corto Circuito del Transformador.*

Fuente: (Chavarrea Camargo, 2020)

Las fuerzas axiales son tales que el devanado interior intenta comprimirse, generando fuerzas de pandeo, mientras que el devanado exterior intenta expandirse, generando fuerzas de aro. Hoy en día, muchos diseños son autoportantes y utilizan la resistencia mecánica del propio conductor para resistir las fuerzas radiales de cortocircuito. En algunos casos, el diseñador depende de la resistencia mecánica del cilindro de bobinado para soportar estas fuerzas. Las fuerzas axiales que actúan sobre un devanado en cortocircuito son de naturaleza compresiva. El espaciador de bobinado tiene que poder resistir esta fuerza de compresión sin una deformación permanente significativa. Idealmente, la altura del devanado volverá a su dimensión original después de un cortocircuito. (Chavarrea Camargo, 2020).

El aislamiento de cartón prensado tiene que tener suficiente resistencia mecánica para soportar los devanados durante los cortocircuitos. Fue con este propósito que se desarrolló el cartón precomprimido. Al comprimir y secar simultáneamente la hoja de cartón prensado húmedo, se obtiene una densidad de 1,2 g/cm<sup>3</sup>. (Para fines comparativos, la madera de arce tiene una densidad de 0,6 g/cm<sup>3</sup>.) La

densidad aumenta aún más fresando las superficies superior e inferior del cartón prensado para eliminar el patrón de pantalla resultante del proceso de secado de la hoja. (Chavarrea Camargo, 2020).

#### **2.2.3.7 Papel dieléctrico del aislamiento**

El aislamiento de celulosa tiene excelentes propiedades dieléctricas cuando se seca adecuadamente y se impregna completamente con un fluido dieléctrico de alta calidad. Existe una discusión significativa sobre cuál tiene que ser el nivel adecuado de secado para el aislamiento de celulosa. Para transformadores de potencia media de hasta 345 kV, muchos consideran aceptable un nivel de humedad del 0,5%. Para transformadores EHV superiores a 345 kV, a menudo se requiere un nivel de humedad del 0,3%. El alto contenido de humedad tiene otros efectos en el sistema de aislamiento, como el envejecimiento acelerado y la formación de burbujas. (Chavarrea Camargo, 2020).

El aislamiento de celulosa se utiliza para aislar directamente componentes como conductores y cables o para establecer y mantener espacios eléctricos utilizando material espaciador y material de barrera. La rigidez dieléctrica de un sistema de aislamiento mejora si se logra dividir en áreas más pequeñas. Las barreras de cartón prensado de baja densidad que consiguen formarse en su lugar se utilizan típicamente para este propósito. Para cualquier diseño de aislamiento específico, existen en el transformador las siguientes áreas críticas: aislamiento sólido, aislamiento líquido e Interfaz entre sólido y fluido. (Chavarrea Camargo, 2020).

La caída de voltaje en cada material es una función del ancho ( $d$ ) y la permitividad ( $\epsilon$ ) del material aislante. La tensión se distribuye inversamente proporcional a la permitividad del material:



$$Z = \left(\frac{d_1}{\epsilon_1}\right) + \left(\frac{d_2}{\epsilon_2}\right)$$

$$E_1 = \frac{V}{(\epsilon_1 \cdot z)}$$

$$E_2 = \frac{V}{(\epsilon_2 \cdot z)}$$

Dónde:

$\epsilon_1$  es la permitividad en el material 1

$\epsilon_2$  es la permitividad en el material 2

V es el voltaje aplicado

E1 es la tensión en el material 1

E2 es la tensión en el material 2

La rigidez dieléctrica del aislamiento sólido (aislamiento kraft impregnado con aceite dieléctrico) está cerca de un orden de magnitud mayor que el propio fluido. Por tanto, el material débil en la estructura de aislamiento es el fluido. Al acercar las permitividades del aislamiento líquido y sólido, se distribuirá más tensión dieléctrica en el material sólido. Esto reducirá la tensión en el fluido, que normalmente establece la holgura de diseño. Las permitividades de aceite mineral y cartón prensado se dan en la Tabla 3. (Chavarrea Camargo, 2020).

**Tabla 3:**

*Permitividad del cartón prensado impregnado con aceite mineral.*

Material	Temperatura		
	25 °C	90 °C	130 °C
Aceite mineral	2,4	2,3	2,2
Cartón prensado de baja densidad	3,9	3,9	4,1
Cartón prensado de alta densidad	4,5	4,7	4,9

Fuente: Elaboración propia

## **2.2.4 Humedad en el aislamiento del transformador**

Es importante definir el concepto de humedad relativa para poder tratar la humedad en el aislamiento del transformador. La humedad relativa del aire es el contenido de vapor de agua del aire con relación a su contenido en la saturación. La humedad relativa del aceite es el contenido en agua disuelto en el aceite con respecto a la cantidad máxima de humedad que el aceite consigue soportar ya que el cociente del término correspondiente a la saturación es una función de la presión, y especialmente de la temperatura, la humedad relativa es un indicativo del ambiente y refleja más que el contenido en agua. (Viscaíno Moreno, 2009).

La humedad que se consigue en el aislamiento del transformador es uno de los factores dominantes que determina la condición del aislamiento. La humedad relativa se define como el cociente de la humedad de mezcla  $r$  entre la humedad de mezcla de saturación  $r_s$ , el R.H.  $\% = 100 r/r_s$ , la humedad relativa se suele expresar en términos porcentuales, el R.H% es un número adimensional. La humedad ingresa en los transformadores desde la atmósfera (pérdida de estanqueidad) y durante la instalación y reparación. Asimismo, el envejecimiento del aislamiento del papel con aceite aumenta el nivel de humedad. Por lo tanto, incluso en el caso de un transformador no permeable, el nivel de humedad logra llegar a un nivel peligroso. (Viscaíno Moreno, 2009)

El agua en el papel se encuentra en cuatro estados: como agua adsorbida por las superficies, como vapor, como agua libre en tubos capilares, y como agua libre embebida. En general, la parte sólida de las estructuras de aislamiento, como por ejemplo el cartón prensado, el papel y la madera, contiene la mayor parte del agua, en una concentración que logra ser unas 200 veces superior a la del aceite. Por lo tanto, la concentración de humedad en el aislamiento sólido es mucho más importante que en el aceite. (Viscaíno Moreno, 2009).

### **2.2.4.1 Importancia de la humedad en el aislamiento del transformador**

La presencia de humedad en el aislamiento del transformador es un factor que altera el funcionamiento del mismo, acelerando el

proceso de envejecimiento del aislamiento sólido y provoca la aparición de burbujas en el aceite.

Tanto el papel como el aceite absorben humedad, y su rigidez dieléctrica se deteriora a medida que se aumenta el contenido en humedad disminuyendo la tensión eléctrica y mecánica que soporta. En el aislamiento del transformador logran aparecer descargas parciales a una tensión más baja, que a la tensión que aparecerían sin la presencia de humedad. La presencia de una cantidad excesiva de agua en el aceite provoca una disminución de la tensión de ruptura dieléctrica y de la resistividad, así como un aumento del factor de pérdidas dieléctricas. La migración de una cantidad pequeña de humedad se ha asociado a la electrificación del flujo en los interfaces de papel/aceite y se presume que es debido a la acumulación de la carga en las zonas secas del aislamiento. El agua en el aceite mineral de transformadores también conlleva el riesgo de que se formen burbujas, cuando la absorción de agua por parte de la celulosa hace que aumente la concentración local de gases en el aceite. (Viscaíno Moreno, 2009).

La presencia de humedad en el aislamiento supone además una doble desventaja, ya que el agua acelera en envejecimiento y éste produce a su vez más agua.

#### **2.2.4.2 Origen de la humedad en el aislamiento del transformador**

Una de las fuentes de humedad en el aceite del transformador es el medio ambiente. La humedad logra introducirse en el transformador como resultado de la libre respiración con la atmósfera, que contiene vapor de agua. Cuando el aceite del transformador mantiene contacto con la humedad del aire, una parte de esta humedad logra pasar del aire y condensarse en la superficie del aceite. La acumulación de humedad provoca el deterioro de las propiedades del aceite. Como se ha mencionado, la humedad logra entrar en el aceite del transformador

durante su vida como resultado de la libre respiración del transformador con la atmósfera en condiciones de humedad. Aunque la afinidad del aceite con la humedad es baja, el que se introduzca humedad de esta forma es malo para el aislamiento. Por otro lado, el papel tiene una gran afinidad con el agua, lo que hace que se puedan encontrar altas concentraciones de humedad en el papel. (Viscaíno Moreno, 2009)

Cuando un transformador nuevo está en proceso de construcción en fábrica, al papel aislante se le aplica un extenso proceso de secado y vacío, para posteriormente ser impregnado. El aceite también se trata con vacío para eliminar cualquier rastro de humedad. En un transformador nuevo el contenido en humedad tiene que ser menor del 5% (porcentaje en peso de papel) en el papel y menos de 5ppm (partes por millón) en el aceite. A medida que el transformador se envejece la humedad se incrementará en el aislamiento. La humedad contenida en el papel logra crecer más de un 4% en un aislamiento seriamente deteriorado. Este incremento en la humedad es causado por el envejecimiento del papel, el agua es el producto de una reacción química que se produce en el papel. (Viscaíno Moreno, 2009)

El envejecimiento se ve incrementado por la rotura térmica de las cadenas de hidrocarburos en el papel, reduciendo así la longitud de las cadenas moleculares. Se produce de esta forma la liberación de átomos de hidrógeno y oxígeno provenientes del agua. El proceso de envejecimiento se acelera si se incrementa la temperatura durante la sobrecarga. El movimiento de la humedad es producido por las variaciones en la temperatura, causando un intercambio constante de humedad entre el aislamiento sólido y líquido. La temperatura de un transformador aumenta cuando está en carga, en esta situación una parte de la humedad contenida en el papel migrará al aceite. La solubilidad del agua en transformadores usado logra verse incrementada alrededor de un 800% para temperaturas entre 20°C y 80°C. Este porcentaje de saturación del aceite sigue siendo bajo y la

tensión de ruptura del sistema de aislamiento sigue siendo alta. (Viscaíno Moreno, 2009)

Cuando el transformador se enfría de nuevo, la humedad en el aceite migrará hacia el papel mucho más despacio que cuando lo hace del papel al aceite lo que lleva a que un porcentaje de humedad permanezca en el aceite. Esto logra llevar a la saturación del aceite y a la libre formación de agua en el transformador. Los cambios transitorios de carga, especialmente en el arranque del transformador, provocan cambios rápidos en la temperatura del aislamiento. La temperatura afecta al equilibrio en la solubilidad de la humedad entre el aislamiento sólido y el líquido y también tiene una influencia directa en la conductividad del aislamiento. Durante los transitorios térmicos, logran ocurrir complejos procesos dinámicos que desarrollen gradientes de temperatura. Los transitorios de temperatura perturban el equilibrio de la humedad en sistemas de aislamiento, causando el inicio del proceso de transferencia de humedad. El proceso de transferencia de masa de agua es el resultado del desequilibrio de humedad entre el papel y el aceite. A altas temperaturas, la humedad abandona el papel y migra hacia el aceite. Inicialmente el aceite establece la humedad de equilibrio en una zona intermedia en la superficie del papel. (Viscaíno Moreno, 2009).

La humedad de equilibrio entre el aceite y el papel determina la dirección del proceso de transferencia de masa de agua en el sistema papel-aceite. Este equilibrio es extremadamente sensible a la temperatura, ya que un transitorio de temperatura hace que el sistema se salga del equilibrio de humedad y se inicie el proceso de transferencia de masa. El estado de equilibrio se establece cuando la humedad en el interior del papel se difunde desde el interior hasta la superficie, creando una distribución uniforme de la humedad. (Viscaíno Moreno, 2009).

#### **2.2.4.3 Evaluación de la humedad en el aislamiento del transformador**

El método tradicional para evaluar el contenido de humedad en el aislamiento de un transformador consiste en obtener muestras de aceite en intervalos regulares. Estas muestras son luego procesadas por el método de filtración de Karl Fischer que determina el contenido total de agua. La mayor parte del agua se encuentra disuelta y logra migrar del aceite al aislamiento sólido o del aislamiento sólido al aceite del transformador hasta alcanzar un equilibrio. (Viscaíno Moreno, 2009).

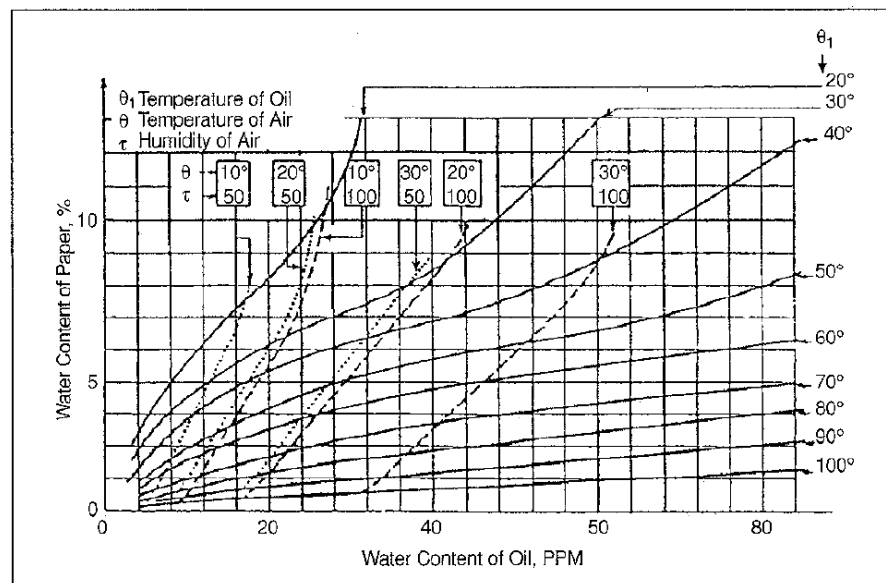
Sin embargo parte del agua se encuentra en el límite químico de formación de agentes, como por ejemplo productos de oxidación. Con el envejecimiento del aceite, la cantidad de agentes químicos debidos a la oxidación también aumenta y estos agentes provocan lugares adicionales que consiguen ser ocupados por el agua. A pesar de estos inconvenientes, este método resulta el más utilizado para determinar el contenido de humedad del aislamiento sólido. En condiciones de equilibrio, la saturación relativa del aceite es la misma que la saturación relativa del papel en contacto con el aceite. Para el análisis del contenido de humedad en el aislamiento sólido del transformador existen dos clases de técnicas o métodos, los métodos directos y los indirectos. (Viscaíno Moreno, 2009).

El método directo se basa en tomar muestras de papel del transformador y medir su contenido de humedad. Es imposible medir la humedad del aislamiento sólido sin que el transformador este fuera de servicio. Solo se realiza esta técnica es transformadores que se están reparando o en construcción. Los métodos indirectos se basan en obtener datos del aislamiento del transformador midiendo sus propiedades y a través de estas extrapolar su contenido de humedad. El método indirecto para medir este contenido de humedad es fácil de realizar, usando curvas de equilibrio, para conocer el contenido de humedad del papel. (Viscaíno Moreno, 2009).

### 2.2.4.3.1 Curvas de equilibrio de humedad papel-aceite

Existen diferentes curvas que relacionan el contenido de humedad en el papel con el contenido de humedad en el aceite, además de relacionar la humedad relativa con el contenido de humedad en el papel. Esto es así debido a las diferentes investigaciones llevadas a cabo para conocer el contenido en agua del papel aislante. (Viscaíno Moreno, 2009)

La curva de humedad-equilibrio para el sistema del aceite-papel fue divulgada en primer lugar por Fabre y Pichon en 1960 y se muestra en la siguiente figura.



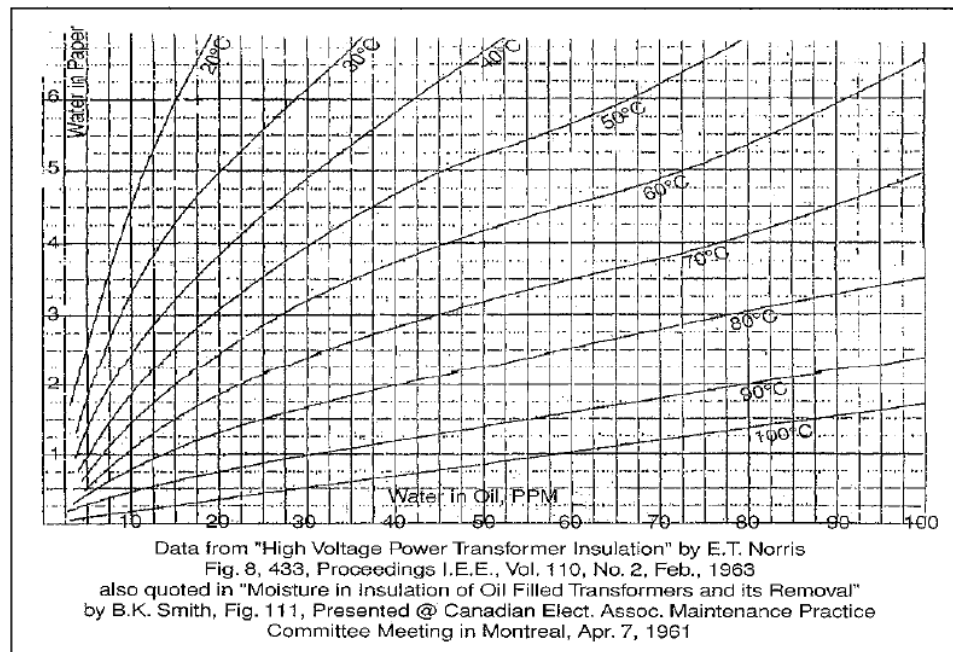
**Figura 16:** Fabre-Pichon del PPM curva para el equilibrio de la humedad del complejo del aire-aceite-papel en función del aire y del aceite que rodean el papel.

Fuente: (Viscaíno Moreno, 2009)

Este es el sistema más citado de curvas. El papel usado fue papel Kraft y se estudió un sistema de aire-papel-aceite. Fallou realizó un resumen posterior del trabajo realizado, en el que indica que el contenido de humedad en el aceite y papel impregnado en aceite, alcanza ser medido

directamente por el método de Kart Fischer. (Viscaíno Moreno, 2009).

El artículo corroboró la ley del equilibrio, que es similar al principio que luego Oommen utilizó indirectamente para obtener las curvas del equilibrio de la humedad para los sistemas del aceite-papel: "la humedad relativa (es decir, valor referido de la saturación) es igual en el aceite y en el aire en contacto el uno con el otro a la misma temperatura." Se demostró que esto era cierto dentro de los límites de los procedimientos experimentales hechos por General Electric en 1960. (Viscaíno Moreno, 2009).



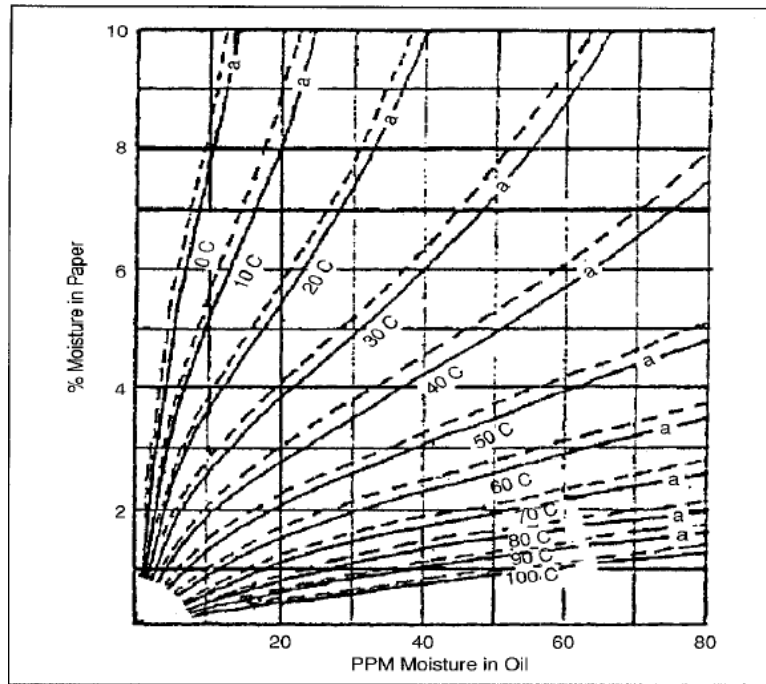
**Figura 17:** Redrawn de las curvas de EHV-Weidmann-Weidmann para el equilibrio de la humedad del sistema del aceite – papel.

Fuente: (Viscaíno Moreno, 2009)

#### a) Curvas Oommen:

En 1983 Oommen desarrolló un sistema de curvas del equilibrio de la humedad.





**Figura 18:** Curva de Oomen. Humedad en el papel frente a humedad en el aceite para sistemas de aislamiento papel/aceite en equilibrio.

Fuente: (Viscaíno Moreno, 2009)

El método de Oommen se basaba en el principio de que las curvas de equilibrio representan que la humedad relativa de saturación para el aceite y para el papel a la misma temperatura, es la misma. Él combinó las curvas de humedad en el aceite en función de humedad relativa en aire con las curvas de humedad en el papel en función de la humedad relativa en aire a la misma temperatura, para construir las curvas de equilibrio de la humedad en el papel en función de la humedad en el aceite. Las curvas de humedad en aceite en función de la humedad relativa son líneas rectas con la siguiente relación de las curvas de la humedad en el aceite: (Viscaíno Moreno, 2009).

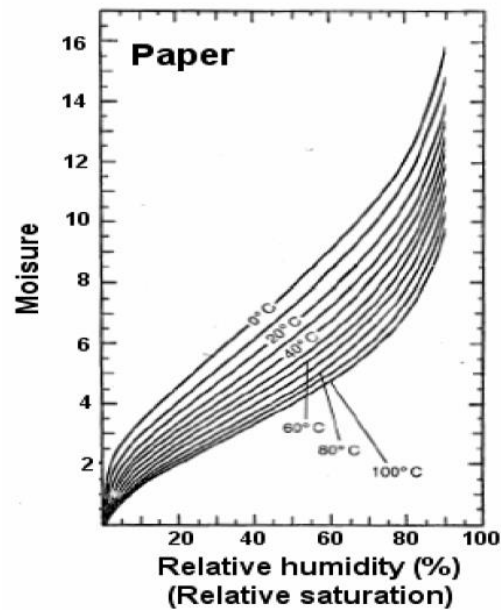
$$x_w = x_w^s \cdot R \cdot H$$

Donde:

$x_w$  es la humedad en el aceite en PPM.

Xws es la solubilidad del agua en el aceite en PPM.  
H.R. es la humedad relativa del aceite.

Oommen usó las curvas de equilibrio del aceite junto con las curvas de humedad en la pulpa de madera en función de la humedad relativa hechas a partir de los datos de Jeffries; sus resultados se muestran en la siguiente figura.

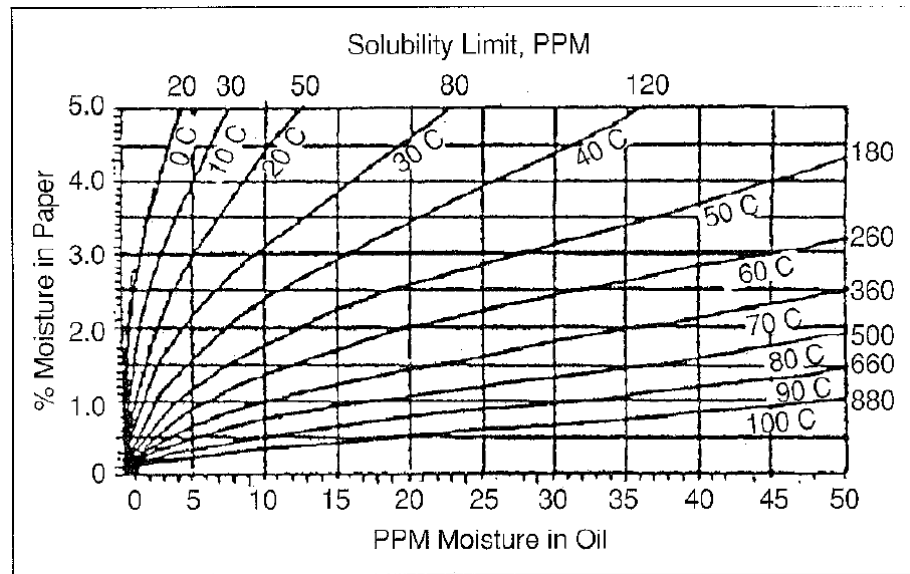


**Figura 19:** % HR en el papel en función del % de la HR del ambiente.

Fuente: (Viscaíno Moreno, 2009)

Y generó las curvas de equilibrio de humedad para el sistema papel-aceite mostrado anteriormente. Las líneas discontinuas indican las curvas de la desorción (difusión de la humedad fuera de la celulosa), mientras que las líneas llenas indican las curvas de la adsorción (difusión de la humedad en la celulosa). Para la misma humedad relativa, el contenido de agua de las curvas de la desorción es

levemente más alto que el de las curvas de la adsorción. (Viscaíno Moreno, 2009).



**Figura 20:** Humedad en el papel en % en función de la humedad en el aceite en PPM.

Fuente: (Viscaíno Moreno, 2009)

Según lo precisado por Reason, si la humedad relativa del aceite es medida por los sensores comercialmente disponibles, los datos de Jeffries se alcanzan utilizar directamente para estimar la concentración de la humedad en el cartón prensado. Las curvas de Oommen no son muy fiables para un rango de humedad bajo. Por lo tanto, Oommen utilizó los datos de la presión del vapor del agua en el espacio de gas sobre la muestra, en un sistema sellado, divulgado por Beer en 1966 y convertido a la humedad relativa por la siguiente relación de la humedad relativa: (Viscaíno Moreno, 2009).

$$\%R. H. = \left( \frac{p}{p_0} \right) \cdot 100$$

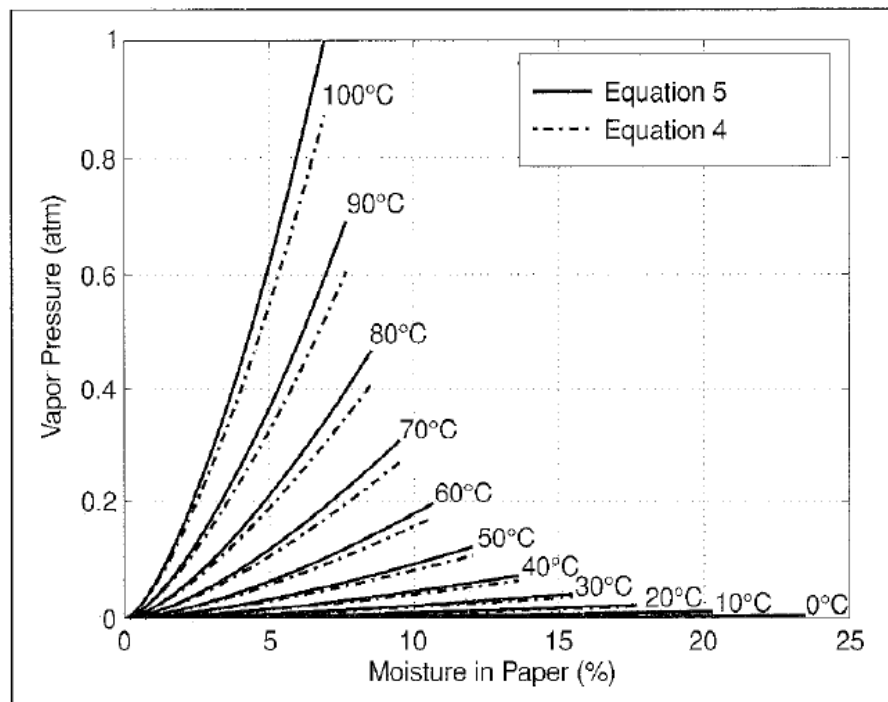
Donde:

$P_0$  es la presión saturada del vapor de agua.

RH es la humedad relativa.

p es la presión de vapor de agua.

Combinando las curvas de la absorción para el papel y el aceite otra vez, Oommen construyó las curvas de la absorción para la región de la humedad baja según lo demostrado en la siguiente figura:



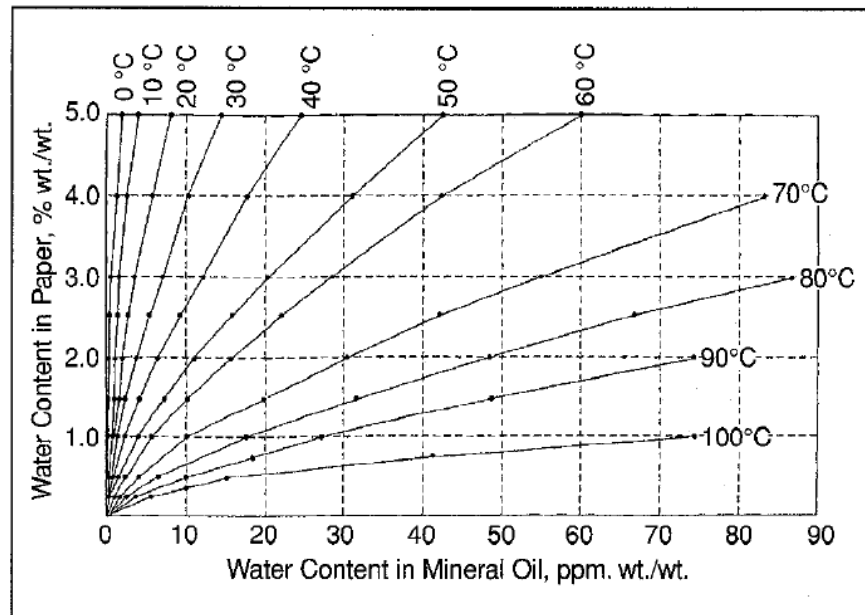
**Figura 21:** Presión de vapor en función de la humedad en el papel en % por Oommen.

Fuente: (Viscaíno Moreno, 2009)

### b) Curvas de Griffin

Griffin, en 1988 construyó curvas similares para el aceite mineral y el papel usando el método de Oommen. Cuando hace referencia a aceite mineral, se refiere a un típico aceite mineral utilizado como aislante eléctrico. Griffin utilizó la primera fórmula de Fessler, para la presión de vapor: (Viscaíno Moreno, 2009).

$$P_v = 5.8869 \times 10^9 x C^{1.4495} x e^{(-6996.7/T)}$$



**Figura 22:** *Curvas de Griffin. Curvas para el contenido de agua en sistemas papel/aceite mineral en equilibrio.*

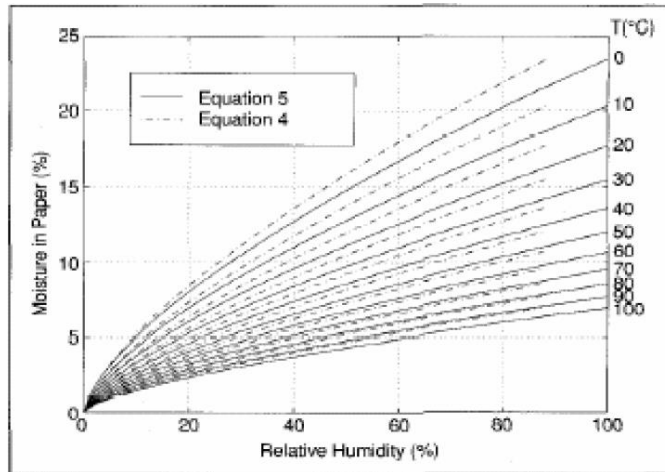
Fuente: (Viscaíno Moreno, 2009)

### c) Curvas Fessler

Fessler en 1987 necesitó una fórmula para construir un modelo para la formación de la burbuja en transformadores. Notando las diferencias en la literatura, midió directamente la humedad en papel y la presión del vapor de la humedad e hizo una comparación con los informes existentes. Sus resultados demostraron que la base de datos de Piper tiende a ser más altos que cualquiera de los otros datos de las otras bases de datos en los que estaban de acuerdo con los resultados. Fessler combinó los datos de Houtz, de Ewart, de Oommen y los datos de sus propios experimentos y determinó la fórmula anteriormente mencionada del equilibrio del agua-papel. (Viscaíno Moreno, 2009).

$$P_v = 9.2683 \times 10^9 x C^{1.4959} x e^{(-7069.7/T)}$$

Esta ecuación se diferencia perceptiblemente de la ecuación anterior debido a la existencia de un error algebraico. La diferencia entre los dos tipos de curvas se demuestra en la figura 23.



**Figura 23:** *Humedad en el papel (%) frente a humedad relativa (%) de Fessler.*

Fuente: (Viscaíno Moreno, 2009)

### 2.3 Definición de términos básicos

- **Aislamiento.-** Son materiales donde los electrones no logran circular libremente, como por ejemplo la cerámica, el vidrio, plásticos en general, el papel, la madera, etc. Estos materiales no conducen la corriente eléctrica.
- **En línea.-** Término utilizado que refiere que el circuito eléctrico esta con carga eléctrica, o sistema eléctrico que está en constante funcionamiento, también es utilizado como el término "en caliente".
- **Grado de polimerización.-** La prueba de grado de polimerización se realiza para medir con precisión la degradación del papel aislante utilizado en el transformador. La celulosa, que se utiliza como aislamiento de transformadores sólidos, es una molécula de polímero lineal que consta de cientos de unidades de glucosa. GP es el número promedio de moléculas de glucosa que forman cadenas de celulosa. El valor de GP disminuye en el tiempo proporcional a la molécula de celulosa rota. La tasa de deterioro depende en gran medida de la temperatura. Según el estándar IEEE C57

140, los valores de GP varían desde aproximadamente 1200 para papel nuevo hasta al menos 100 para papel envejecido. A 200 de GP, el papel ha perdido aproximadamente el 50% de la resistencia a la tracción inicial. En este punto, el papel se vuelve quebradizo y se considera el final de su vida del transformador porque ha perdido su resistencia mecánica.

- **Humedad.-** Cantidad de agua, vapor de agua o cualquier otro líquido que está presente en los transformadores de potencia.
- **MVA.-** Es la abreviatura de megavoltiamperio, una unidad de potencia aparente utilizada con frecuencia en grandes instalaciones de generación de energía eléctrica, como centrales hidroeléctricas y otras. Equivale a la potencia aparente de 1 voltio x 1 amperio x 10<sup>6</sup>.
- **PPM.-** Proporción de la concentración de una sustancia con respecto a la concentración de otra, como una unidad de soluto disuelta en un millón de unidades de disolvente.
- **SET.-** Término que abrevia una subestación eléctrica, subestación transformadora o subestación eléctrica transformadora (abreviadamente ST o SET) es una instalación destinada a establecer los niveles de tensión adecuados para la transmisión y distribución de la energía eléctrica. Su equipo principal es el transformador.
- **Vida útil remanente (VUR).-** Es el período de tiempo durante el cual es probable que una máquina funcione antes de que requiera reparación o reemplazo. Al tomar en consideración a VUR, los ingenieros logran programar el mantenimiento, optimizar la eficiencia operativa y evitar el tiempo de inactividad no planificado. Por esta razón, la estimación de VUR es una prioridad máxima en los programas de mantenimiento predictivo.
- **Tamiz.-** Un tamiz es una rejilla que permite el paso de partículas de un tamaño menor al de los agujeros que posee. Se utiliza para separar mezclas de dos sólidos cuyas partículas son de diferente tamaño: unas más grandes que los agujeros del tamiz y otras más pequeñas.

## **CAPÍTULO III**

### **DESARROLLO DEL TRABAJO PROFESIONAL**

#### **3.1 Determinación y análisis del problema**

El transformador de potencia de la subestación Puquio del distrito de Puquio, provincia de Lucanas, departamento de Ayacucho es indispensable para unir sistemas de electrificación en el sur del mencionado departamento, así mismo energiza al distrito de Puquio y a más de diez localidades con grandes extensiones territoriales, por tal motivo los mantenimientos al transformador de potencia son de gran importancia para su adecuado funcionamiento.

Ante esto se puso en marcha diferentes mantenimientos preventivos aplicando diferentes metodologías como el análisis de muestreo de aceite y gases en el transformador de potencia encontrándose húmedo.

La realidad problemática se centra en reducir la humedad sobre todo en el papel aislante por degradación de la celulosa por los años de operación y también en el aceite para brindar seguridad ante un corto circuito por la disminución de la tensión de ruptura en el transformador o que aumente el riesgo de que la operación continua sea eficiente.

De esta manera, el presente trabajo tiene el propósito de utilizar un sistema de secado continuo en línea para reducir la humedad en el sistema de aislamiento sólido como también en el aceite para mejorar el funcionamiento y alargar la vida útil del transformador de potencia.

Para lo cual, se plantea los problemas para su solución de la reducción de la humedad del transformador de potencia de la subestación puquio – Ayacucho:



### **3.1.1 Problema General**

¿De qué manera el sistema de secado en línea TRANSEC, incrementará el tiempo de vida útil y reducirá la humedad del transformador de potencia de 7MVA de la SET Puquio-Ayacucho?

### **3.1.2 Problemas Específicos**

¿De qué manera se logra verificar si la utilización del sistema de secado TRANSEC en línea, realiza un secado continuo que disminuirá el porcentaje de humedad en el papel aislante del transformador de potencia de 7MVA de la SET Puquio-Ayacucho?

¿Por qué es necesario determinar si la utilización del sistema de secado TRANSEC en línea, realiza un control de la humedad que mejorará el rendimiento del transformador de potencia de 7MVA de la SET Puquio-Ayacucho?

## **3.2 Modelo de solución propuesto**

La solución propuesta para el mantenimiento del transformador de potencia de la empresa Electrodunas es utilizar el sistema de secado con el equipo TRANSEC en línea ya que contiene un tamiz de filtración continua para eliminar la humedad en el aceite y principalmente en el papel aislante, como también tiene un monitoreo digital de control de humedad y temperatura en todo el proceso de filtrado y así verificar si es viable el sistema para alargar la vida útil del transformador de potencia.

### **3.2.1 Toma de muestra de aceite**

El primer paso importante para realizar un análisis de humedad se tomó una muestra representativa para el análisis. El técnico responsable en transformadores se demoró en extraer la muestra un tiempo de 15 minutos. Se consideró una especial atención en utilizar un procedimiento seguro para extraer la muestra.

Se tomó importancia y precaución en la toma de muestra del transformador energizado. El equipos y herramientas utilizado fue una jeringa de vidrio hermética graduada, 50 ml, con válvula auto sellante de 3 vías.

Se verificó antes de realizar cualquier maniobra que la atmósfera interior se encuentre vacío o en baja presión, en el caso de que la atmósfera es aire (respiración libre) o de gas inerte (nitrógeno).

De acuerdo a la verificación donde se observó que tenía una presión de 4 Psi se procedió a seleccionar el punto más seguro, accesible y alejado de la parte viva del transformador en la parte superior de éste, verificando que el aceite se encuentre a nivel normal para proceder a relevar la presión abriendo lentamente el venteo.

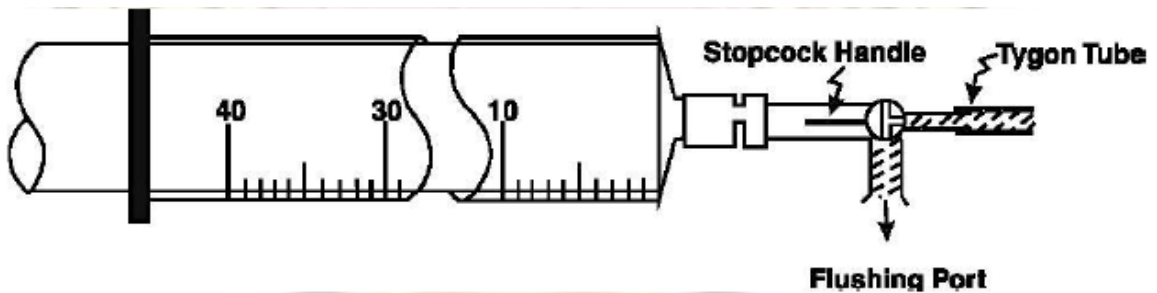
Se localizó la válvula para muestreo en la parte más baja del tanque del transformador seleccionando los accesorios requeridos como es el árbol de reducciones bushing, para la descarga de la muestra. Se verificó que la válvula esté completamente cerrada antes de remover el tapón de descarga, la remoción del tapón se realizó con mucho cuidado utilizando la charola para evitar un posible derrame de aceite sobre el piso.

Una vez removido el tapón se inspeccionó el estado de la válvula y se procedió a limpiarla perfectamente de suciedad que pudiera tener, se colocó los accesorios que se requieran sobre la válvula para realizar la descarga asegurándose que queden perfectamente acoplados para evitar cualquier posibilidad de fuga, finalmente se colocó la conexión de espiga con el tramo de manguera necesario para la realización de la toma de muestra.

Se abrió la válvula de descarga con extremo cuidado asegurándose evitar la formación y entrada de aire (burbuja) al interior del transformador, observando detalladamente la descarga sí existe agua libre u otro tipo de partículas sólidas, dejar que fluyan aproximadamente 300 ml de aceite dentro del recipiente colector con el fin de purgar la válvula y para proceder a la toma de la muestra.

### 3.2.1.1 Toma de muestra para determinar la humedad

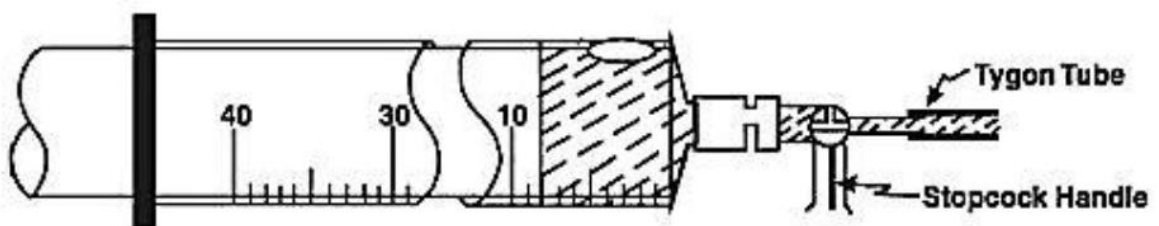
Se utilizó una jeringa de vidrio de 50 ml, se inspeccionó la correcta operación de la válvula de tres vías. Se conectó y ajustó la manguera de drenado de drenado.



**Figura 24:** *Drenado de aceite.*

Fuente: (Pongo Porras, 1990)

Se abrió cuidadosamente la válvula principal de descarga del transformador y la de admisión a la jeringa permitiendo el libre desplazamiento del embolo ejercido por la altura del líquido en el transformador y la presión atmosférica, permitir que la jeringa se llene hasta los 50 ml e inmediatamente se cerró la válvula de admisión y la principal del transformador.

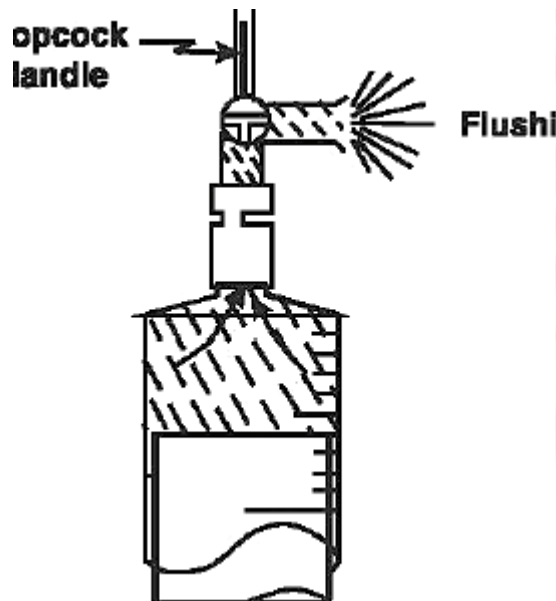


**Figura 25:** *Llenado de jeringa.*

Fuente: (Pongo Porras, 1990)

Se colocó verticalmente la jeringa y abrió la válvula en la posesión de descarga para purgar el contenido de aire que pudiera tener ésta (asegurándose que el contenido esté completo libre de burbujas dejando un volumen mínimo de 40 ml en la jeringa). La jeringa no

presentó ninguna falla por hermeticidad, finalmente se colocó y resguardó la jeringa dentro de su empaque de cartón.



**Figura 26:** Liberación de burbujas.

Fuente: (Pongo Porras, 1990)

Se desechó los excedentes de aceite captados durante el muestreo a un recipiente o contenedor que el cliente lo destinó para evitar escurrimientos, la muestra se envió al laboratorio SDMyers determinando una cantidad de humedad de 30 ppm y 460DP como también partículas en suspensión, esto quiere decir que los aislantes sólido y líquido se han estado degradando y oxidando reduciendo de esta manera la tensión de ruptura.

### 3.2.2 Cuantificación de la humedad

La humedad del transformador de potencia fue cuantificada por peso seco a partir de la muestra extraída del aceite y analizada en un laboratorio físico químico conjuntamente con los datos del transformador de la subestación puquio de 7MVA 60/22.9/10KV que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 4:**

*Datos del Transformador de la subestación Puquio.*

---

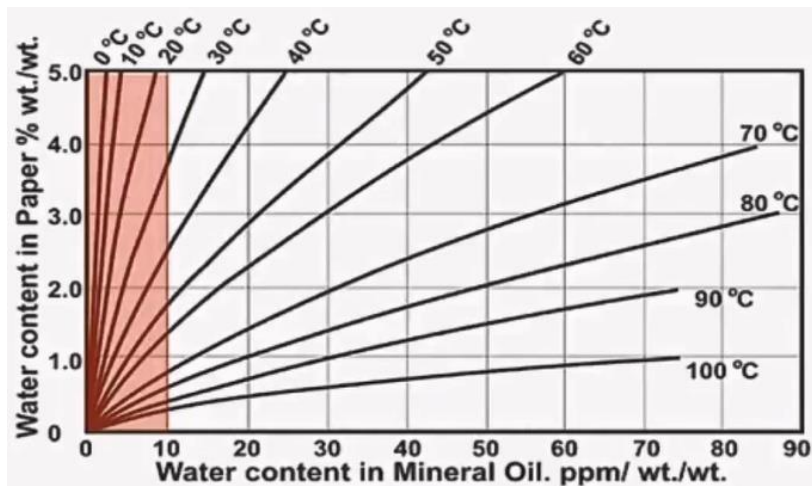
TRANSFORMADOR DE POTENCIA	
MR(MASCHINENFABRIK	
REINHAUSEN GMBH)	
N°:142317	
<hr/>	
Potencia aparente	7MVA
Aceite aislante	8.02 toneladas = 8020 kg
Papel aislante	0.8 toneladas
PPM de agua en aceite	30ppm
Temperatura promedio del aceite	60°C
Humedad en celulosa	3 %
Año de Fabricación	1990

---

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2.1 Humedad en el papel aislante

La humedad en la celulosa (papel aislante) se determinó a partir de las curvas de correlación de Oomen de la figura 27, dando un estimado del 3.1% de humedad en el papel aislante.

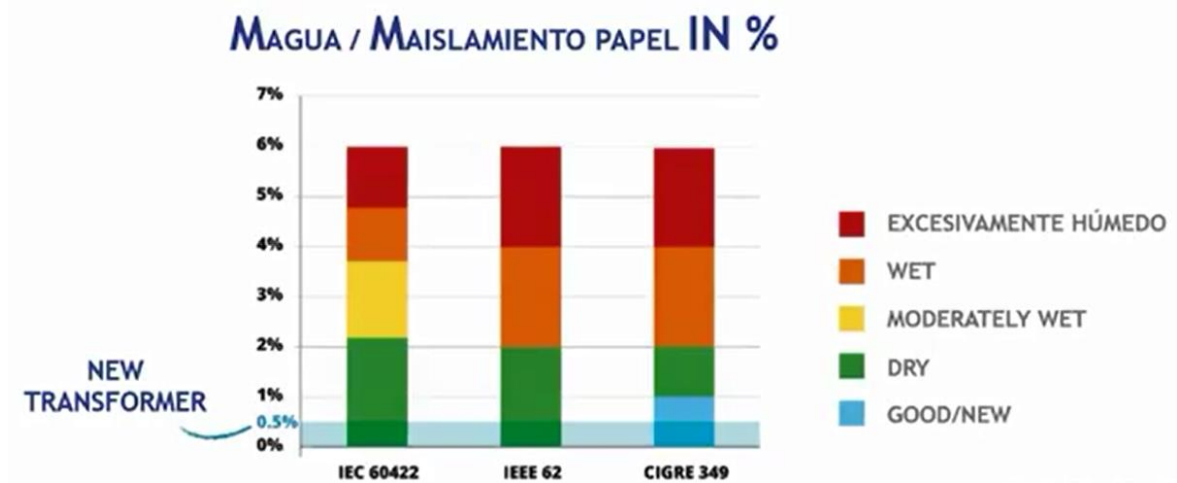


**Figura 27:** Curvas de Oomen.

Fuente: (Stream Electric AG, 2019)

Se empleó la curva de equilibrio de Oommen por su precisión y reconocimiento. En la actualidad estas curvas se han perfeccionado y calibrado después de múltiples experimentos, por lo tanto

correlacionan es con precisión, con lo estimado de 3% de humedad en el papel se determinó que el papel aislante contiene humedad ya que sobrepasó el 2% considerado por la normativa europea IEC 60422 como se muestra en la figura 28.



**Figura 28:** Estimación de la humedad según el porcentaje de agua en el papel aislante.

Fuente: (Stream Electric AG, 2019)

Como se muestra en la figura anterior se consideró que el transformador de potencia de la subestación Puquio se encuentra moderadamente húmedo respecto al aislamiento sólido.

Se aplicó el desarrollo matemático para poder cuantificar la humedad en la celulosa a partir del dato obtenido de 3% y la capacidad del papel aislante:

$$3\% \times 800\text{kg} = 24\text{ kg} = 24\text{ lt}$$

### 3.2.2.2 Humedad en el aceite

La cantidad de agua encontrada en el aceite disuelta o en suspensión es un parámetro de humedad absoluta que describe la relación de volumen o masa entre el agua y aceite, estando unida por el hidrógeno a las moléculas de hidrocarburos del aceite. Un ppm de agua se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Por volumen: } 1\text{ppm} = 1\text{ml de agua} / 1\text{ m}^3$$

Por masa:  $1 \text{ ppm} = 1 \text{ g de agua} / 1000 \text{ kg de aceite}$

Se aplicó el desarrollo matemático para poder cuantificar la humedad por masa en el aceite a partir del dato obtenido de 30 PPM y la capacidad del aceite aislante:

$$30 \text{ PPM} \sim 0.00003 \text{ kg} \times 8020 \text{ kg} = 0.24 \text{ kg} = 0.24 \text{ lt}$$

Por consecuencia se procedió a la instalación del sistema de secado TRANSEC modelo CL3 para su reducción de la humedad y mantenimiento continuo del transformador de potencia antes que la degradación de la celulosa siga avanzando y ocasione riesgos o fallas al intercambiar humedad del papel al aceite generando una disminución del voltaje de ruptura (VDR) que alcanza a producir un cortocircuito en el transformador.

### **3.2.3 Prueba de rigidez dieléctrica del aceite**

Se realizó esta prueba para detectar contaminantes tales como agua, partículas en suspensión o partículas conductoras, nos da el grado de pureza del aceite, es decir nos indica hasta qué punto su aislamiento se halla afectado.

La característica dieléctrica del aceite se ve afectado por la presencia de la humedad y el contenido de impurezas. El deterioro o envejecimiento del aceite depende del tipo de impurezas, siendo las más influyentes las burbujas de aire con contenido de humedad provenientes por el intercambio de humedad del papel aislante al aceite.

El aceite tiene que cambiarse o regenerarse si se detecta:

- Baja rigidez dieléctrica.
- Elevada acidez.
- Alto contenido de lodo.
- Elevado contenido de agua.

Para la realización de la prueba se usó un instrumento cuyos componentes fundamentales son:

- a) Un transformador elevador.
- b) Un dispositivo que permita variar el voltaje de entrada al transformador manual o automáticamente.
- c) Equipo de protección e interrupción.
- d) Instrumentos para detectar el voltaje al que produce la ruptura del dieléctrico.
- e) Copa de prueba para contener el aceite aislante y en la cual están los electrodos de la forma y separación indicadas en las normas que se apliquen como se muestra en la siguiente tabla 5.

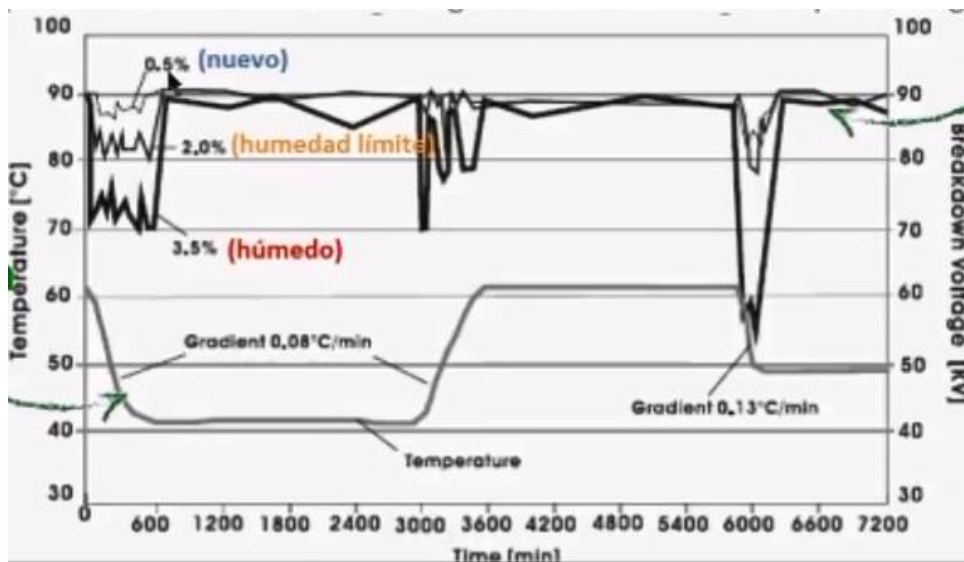
**Tabla 5:**  
*Resumen de Normas para pruebas de aceites dieléctricos.*

NORMA	IEC	ASTM
Electrodo	Esferas $\Phi$ 12.5 a 13.0 mm Casquetes Esféricos $\Phi=25\text{mm}$	Discos $\Phi$ 1° + ensayo y o VDE 0
Separación	2.5 mm	0.1"
N° de muestra	1	1
N° de pruebas para muestras	6	5
Incremento de voltaje	2 KV/s hasta perforación	3 KV/s hasta perforación
Duración	.....	.....
Transformador	20 mA en cortocircuito en cortocircuito a 15 Kv	>2KVA
Voltaje de ruptura	Promedio de las 6 descargas	Promedio de las 5 descargas
Criterio de bondad del aceite	Aceite no tratado min.30 Kv Tratado, min 50 Kv	Min. 30 Kv

Fuente: Elaboración propia.



Se realizó la prueba de rigidez dieléctrica al transformador de potencia obteniendo una Tensión de ruptura de 50 Kv, aunque el límite de mínimo recomendado es >33kv en alerta y 28Kv en alarma, según la norma IECC C57.106, se considera igualmente una baja tensión de ruptura por la cantidad de humedad que tiene el transformador ya que al cambio de temperatura que experimenta el transformador de potencia más se produce la humedad en el mismo, por lo cual se considera en riesgo de que ocurra un corto circuito si el cambio de temperatura es más rápido y así el gradiente de la tensión de ruptura pueda bajar rápidamente como se muestra en la siguiente figura 29 y producir fallos en el transformador de potencia.



**Figura 29:** *Gradientes Temperatura-Tensión de ruptura-Tiempo según el porcentaje de humedad en el papel.*

Fuente: (Stream Electric AG, 2019)

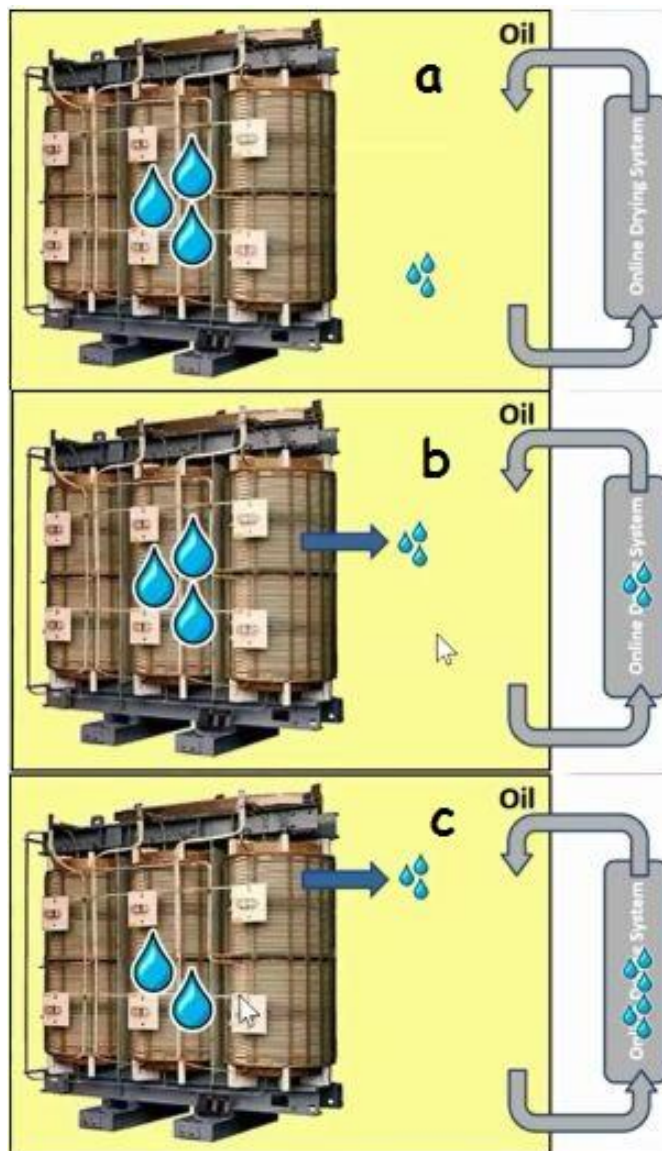
### 3.2.4 Principio operacional del equipo TRANSEC

TRANSEC es un tamiz de secado en línea. La unidad consta de una bomba eléctrica, cilindros especiales de absorción de agua y sensores de medición que controlará la cantidad de agua eliminada. El sistema fue instalado junto al transformador de potencia. Dos tubos están conectados a la parte superior e inferior del cuerpo del transformador. El sistema toma la muestra del aceite del transformador a través de los cilindros en un ciclo continuo. Dentro de los cilindros, el material absorbente elimina la humedad del aceite. Después de este proceso, el aceite pasa a través de un filtro de

partículas para garantizar su limpieza antes de que regrese al transformador. Un desaireador incorporado asegura que no ingresará aire al tanque. Cada unidad de TRANSEC incluye muestras y puntos de medición en la entrada y la salida (para verificar el contenido de humedad en el aceite).

En resumen el principio de funcionamiento consta de tres partes:

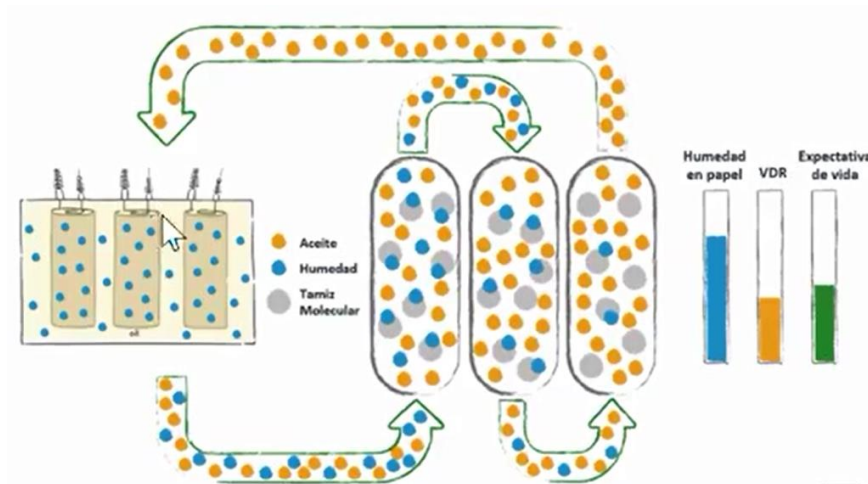
- a.-La humedad se extrae constantemente del aceite
- b.-El aceite seco recibe la humedad del papel.
- c.-El papel se está secando continuamente.



**Figura 30:** Principio de Funcionamiento del equipo TRANSEC.

Fuente: (Stream Electric AG, 2019)

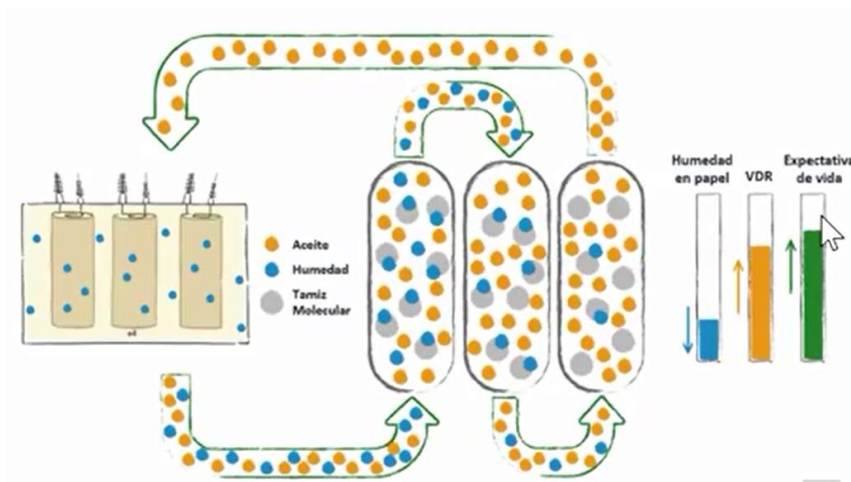
Por lo tanto el transformador de potencia de la subestación Puquio con moderado nivel de humedad en el papel y aceite, también con bajo nivel de voltaje de ruptura (VDR) y baja expectativa de vida como se representa en la siguiente figura 31.



**Figura 31:** Condiciones iniciales del transformador de potencia sin utilizar el equipo.

Fuente: (Stream Electric AG, 2019)

Gracias al sistema de funcionamiento del sistema de secado TRANSEC reducirá el nivel de la humedad en el papel y aceite, aumentará el voltaje de ruptura y aumentará la expectativa de vida como se representa en la siguiente figura 32.



**Figura 32:** Condiciones finales del transformador de potencia utilizando el equipo.

Fuente: (Stream Electric AG, 2019)

### 3.2.5 Estructura del equipo TRANSEC

El sistema de secado en línea TRANSEC emplea tamices moleculares con el fin de extraer la humedad del aceite. Estos gránulos (no químicos) contienen muchos poros de 3 angstrom de diámetro que es el tamaño exacto para atrapar las moléculas de agua. De esa manera otros componentes tales como gases y moléculas con mayor o menor diámetro no son filtrados por estos tamices.

En la figura 33 se muestra todos los componentes del equipo TRANSEC CL3 que fueron instalados en la subestación Puquío:



**Figura 33:** Componentes del equipo TRANSEC CL3.

Fuente: (Stream Electric AG, 2019)

### 3.2.6 Datos técnicos del equipo TRANSEC

En la siguiente tabla se muestra los datos técnicos considerados del equipo TRANSEC modelo CL3 para la instalación en el transformador de potencia de la subestación Puquío:

**Tabla 6:**  
*Datos técnicos del equipo TRANSEC.*

Datos técnicos	TRANSEC CL3
Capacidad de extracción de agua antes de cambiar el cilindro	10 a 12 litros
Flujo de agua	60 a 90 litros por hora
Filtro de partículas	10 micras
Material	Acero inoxidable de grado 304
Rango de temperatura del aceite	0°C a 105°C
Condiciones ambientales aceptables	-10°C a 80°C
Clase de protección	IP55
Suministro eléctrico	240 V 50 Hz o 110V 60 Hz
Bomba	Bomba de circulación para motor encapsulado. Corriente máxima de 0.8A@240V y 1.5A@110V
Tamaño	Empaquetaduras de nitrilo BA70 1950x705x320
Peso	170kg
Tiempo de instalación	5 a 6h con 2 personas
Prueba del tipo de fabricación	3 bares de presión a 110°C durante 1 hora
Prueba de rutina de fabricación	2 bares de presión a 60° a 60°C durante 30 min

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.2.7 Instalación del equipo TRANSEC

El equipo se instaló con una estructura como soporte como se muestra en la figura 34 empezando con la instalación a las 09:00 am finalizando a las



16:00 pm a cargo de 2 operarios cumpliendo con las 5 reglas de oro para todo mantenimiento eléctrico:

- Desconexión, corte visible o efectivo.
- Enclavamiento, bloqueo y señalización.
- Comprobación de ausencia de tensión.
- Puesta a tierra y cortocircuito.
- Señalización de la zona de trabajo.



**Figura 34:** *Equipo TRANSEC instalado en el transformador de potencia.*

Fuente: propia.

### **3.2.7.1 Equipos y herramientas a utilizar**

a) Herramientas:

- Llaves Stillson #s 12-18, llaves pericas Nos. 8 y 12.
- Juego desarmadores de cruz y plano.

- Pinzas de presión con cadena.
- b) Accesorios:
- Reducciones Bushing de:  $\frac{1}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{4}$ ", 1",  $1\frac{1}{4}$ ",  $1\frac{1}{2}$ ",  $1\frac{3}{4}$ ", 2".
  - Conexión espiga de bronce para manguera de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro.
  - Charola de plástico y/o aluminio de 30x20 cm.
  - Lámpara sorda.
- c) Materiales:
- Manguera de plástico transparente de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro.
  - Trapo de algodón 100%.
  - Absorbente.
  - Maleta y /o Cajas de cartón (dimensiones según se requiera).
  - Bola de hilo de henequén, plástico, y/o algodón.
  - Bolsas de plástico.
  - Envase para excedentes capacidad 3-5 L
  - Embudo.
  - Cinta de teflón de  $\frac{1}{2}$ ".
- d) Instrumentos de medición:
- Termómetro de mercurio o bimetálico
  - Hidrómetro.
- e) Equipo personal de seguridad:
- Casco de protección dieléctrico.
  - Botas de seguridad dieléctrica.
  - Lentes de seguridad.
  - Guantes de neopreno-caucho.
  - Guantes de carnaza.
  - Tapones auditivos cuando se tomen muestras en áreas con nivel de ruido alto.

El equipo fue instalado y conectado con tuberías rígidas de acero inoxidable a las válvulas superiores e inferiores del transformador de potencia de la subestación Puquio inspeccionando:

- a) Primeramente que las válvulas estén correctamente cerradas.
- b) Así mismo su estado de las válvulas.

- c) Se limpia perfectamente de suciedad que pudiera tener colocando los accesorios de acople para la unión al equipo TRANSEC.
- d) Se asegura que las válvulas no tengan fuga y verificar que estén perfectamente acoplados
- d) Finalmente se verificó las siguientes consideraciones de la operación que se encuentra trabajando el transformador de potencia:
  - Temperatura del aceite indicada en el termómetro del tanque principal.
  - Temperatura del devanado.
  - Lectura del mano-vacómetro.
  - Estado operativo del sistema de gas inerte.
  - Nivel actual de aceite.
  - Existencia de fugas de aceite su localización y posible causa.

### 3.2.8 Monitoreo de la humedad

La unidad de monitoreo del sistema TRANSEC se realiza mediante un gabinete de control como se muestra en la figura 35.



**Figura 35:** Unidad de monitoreo.

Fuente: Propia.



Contiene:

- Un display LCD que mide temperatura y ppm del aceite a la entrada y salida del sistema.
- Protección de sobrecarga para la bomba.
- Alarmas para la bomba.
- Salida análoga para SCADA.
- Gabinete de acero inoxidable con protección IP65.

### **3.2.8.1 Sensores de humedad y temperatura en el aceite**

Se instaló en el sistema de secado TRANSEC el sensor VAISALA MMT162, uno de los mejores sensores certificados de humedad en la actualidad en la entrada y salida del sistema a fin de monitorear las PPM y la temperatura del aceite que fluye a través del equipo TRANSEC, estos datos se transfieren a la caja de monitoreo para que se realice el análisis.

Como los sensores son sumergidos en aceite no hay riesgo de contaminación externa y como los sensores no están cambiando, la repetibilidad está garantizada.

El equipo está basado en un microprocesador que mide la humedad presente en el aceite, con respecto a la actividad hídrica o saturación relativa (%RS) y temperatura (°C). La concentración de agua en ppm se calcula a partir de los dos parámetros anteriores cuando se conoce la característica de solubilidad en agua del aceite.

El sensor es muy selectivo para mostrar la cantidad de agua, brinda una máxima resistencia a los agentes contaminantes, como el polvo, partículas, suciedad, así como otras moléculas de aceite que interfieran en la medición. La absorción de humedad es proporcional a la actividad hídrica del fluido. Las ventajas de utilizar este tipo de sensor son la capacidad de instalación en línea directa con el aceite, un tiempo de

respuesta muy rápido y una buena durabilidad química adecuada para un amplio rango de fluidos.



**Figura 36:** Sensor VAISALA MMT162.

Fuente: (Stream Electric AG, 2019)

### 3.2.9 Cambio de Cilindros de extracción

La saturación del cilindro se determinará bien sea mediante los sistemas de monitoreo de TRANSEC o comparando las PPM de agua en 2 muestras de aceite en la entrada y salida, como también considerando la humedad calculada en el papel que fue de 3.1% por lo tanto es determinado por el fabricante como se muestra en la tabla 7 que se va a sustituir a los 24 meses de iniciado la filtración, los cilindros instalados en el transformador de potencia de la subestación Puquio cuando estén saturados se reemplazarán por cilindros nuevos mientras el transformador está en operación en línea en un lapso de 30 minutos.

**Tabla 7:**  
*Tiempo para reemplazar los cilindros saturados.*

Característica	Tiempo típico para la extracción de 10 litros de agua
Contenido de agua de un transformador nuevo	5 años
Transformador moderadamente húmedo de 2%	2 años
Transformador antiguo/ humedad contenido de agua >3%	12 meses

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.10 Determinación de la vida útil del transformador de potencia

La vida útil de los transformadores se basa en la vida útil de su sistema de aislamiento, la combinación de celulosa y aceite. La vida útil de un sistema de aislamiento de un transformador es la vida útil del papel utilizado porque el aceite se puede limpiar o incluso reemplazar durante la vida útil del transformador, pero el papel se fija desde el principio y no se repara ni se reemplaza. Por lo tanto, el final de la vida útil del papel del transformador es el final de su vida útil. Sin embargo, cabe señalar que el estado de aceite de un transformador juega un papel importante en el proceso de envejecimiento de la celulosa.

Se consideró para determinar la expectativa de vida del transformador la medición del grado de polimerización (DP) en el papel que para valores debajo de 200 DP llega al final de la vida útil del mismo. Por lo tanto se llevó a laboratorio la muestra de aceite para poder determinar el grado de concentración de 2- furfural (FALppm) del transformador de potencia mediante el análisis de 2-furaldehído, la presencia de fenoles y cresoles en concentraciones superiores a 1ppm indica que el aislamiento sólido está involucrado en el sobrecalentamiento.

**Tabla 8:**  
*Relación del contenido de 2-Furaldehído y DP.*

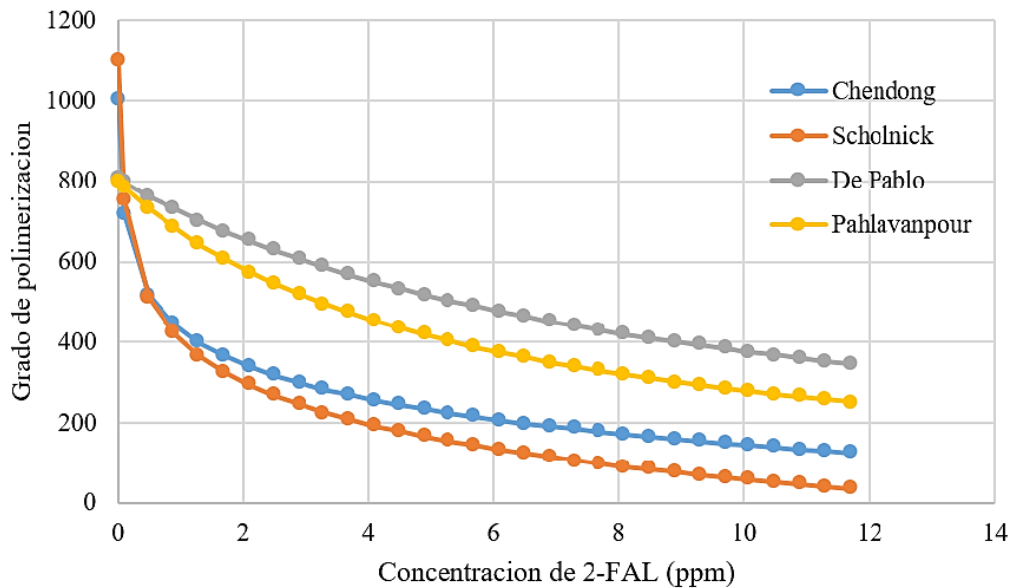
<b>Contenido de 2-Furaldehído (ppm)</b>	<b>Valor de DP</b>	<b>Significado</b>
0-0.1	1200 - 700	Transformador saludable
0.1 – 1.0	700 - 450	Deterioro moderado
1-10	450 - 250	Deterioro extenso
>10	<250	Fin de vida

**Fuente:** Elaboración propia

Se determinó también el grado de polimerización en forma manual a partir del resultado de la concentración de 2- furfural, se calculó mediante la fórmula de Pahlavanpour que es considerado un modelo completo a comparación de otras fórmulas para calcular el valor del DP:

$$GP = \frac{1200}{[0.186 + (2 - FAL \text{ ppm})] + 1}$$

La figura 37 muestra las correlaciones entre las concentraciones de 2-furfural y el grado de polimerización diferenciando entre las fórmulas más utilizadas para el cálculo del grado de polimerización.



**Figura 37:** Correlación de 2-FAL (ppm) y DP

Fuente: (Chavarrea Camargo, 2020)

El porcentaje de vida utilizada por el transformador se calculó con el valor del grado de polimerización mediante la siguiente ecuación:

$$\%vida\ utilizada = \frac{\log(DP) - 2.903}{-0.006021}$$

### 3.3 Resultados

Para la utilización del sistema de secado en línea TRANSEC para reducir la humedad del transformador de potencia de la subestación Puquio-Ayacucho se tienen los siguientes resultados:

### 3.3.1 Humedad en el transformador de potencia

Gracias a la toma de muestra del aceite aislante se determinó que el transformador de potencia tiene un contenido de agua de 30 ppm y un grado de polimerización de 500DP que indica presencia de humedad, siendo el límite recomendado <25 ppm encontrándose fuera de los límites máximos permisibles.

Se obtuvo el resultado de que el transformador de potencia MR (MASCHINENFABRIK REINHAUSEN GMBH) N°:142317 tiene humedad moderada ya que se calculó la cantidad de 0.24 litros en el aceite y 24 litros en el papel aislante por lo cual se empezó a utilizar el sistema de secado continuamente.

Una vez instalado el equipo TRANSEC se verificó los datos de monitoreo de entrada y salida dando los resultados como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 9:**

*Datos de monitoreo después de la instalación del equipo TRANSEC.*

	Entrada	Salida
Humedad en el aceite	30.2 ppm	1 ppm
Temperatura	62.3°C	61.5°C

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la tabla 8 una vez instalado la humedad en la salida del equipo TRANSEC siempre nos dará 1ppm que ingresará nuevamente al transformador de potencia, de esta manera se crea un ciclo de disminución de humedad constantemente.

Se observó semanalmente los datos obtenidos por el monitoreo durante 2 meses obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 10:***Datos semanales obtenidos después de la instalación del equipo TRANSEC.*

Fecha	Humedad en el aceite		Temperatura	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
06/03/2017	30.2	1 ppm	63.1	62.2
13/03/2017	30	1 ppm	62.5	61.3
20/03/2017	29.9	1 ppm	61.6	60.4
27/03/2017	29.7	1 ppm	64.7	63.2
03/04/2017	29.5	1 ppm	62.6	61.8
10/04/2017	29.4	1 ppm	63.5	62.5
17/04/2017	29.3	1ppm	60.3	60.3
24/04/2017	29.2	1 ppm	62.8	61.7

Fuente: Elaboración propia.

Según la norma IEC se tiene que reducir el contenido de humedad en el papel hasta llegar a la cantidad de 2% permitida, entonces se llegaría a extraer la siguiente cantidad de agua:

$$(24 \text{ litros}) - ((800 \text{ litros}) \times 2\%) = 8 \text{ litros de agua para extraer}$$

Considerando la capacidad de extracción del equipo TRANSEC según el fabricante de 10 litros en 12 meses y considerando la humedad de 3% en el papel, la estimación de tiempo de utilización del equipo para extraer 8 litros de agua para que el transformador esté dentro de la humedad permitida se calculó de la siguiente manera:

$$T = \frac{Cx12 \text{ meses}}{10 \text{ litros}}$$

T= tiempo de utilización (meses)

C= litros de agua para extraer

Considerando lo mencionado para extraer 8 litros se calculó:

$$T = \frac{8 \times 12}{10} = 9.6 \text{ meses} \approx 10 \text{ meses}$$

Se va a utilizar el equipo TRANSEC para reducir 1% y llegar a la humedad permitida en el papel el tiempo de 10 meses aproximadamente, sin embargo la utilización constante permitirá que la humedad siga disminuyendo.

Mantener un nivel bajo de humedad en el transformador proporcionó ventajas significativas en términos de operaciones y disminución de riesgo en la medida en que mantiene un alto nivel de aislamiento constante. Por lo tanto, es posible cargar el transformador a un nivel alto y hacer que esta carga varíe sin correr el riesgo de averiar el transformador.

### 3.3.2 Expectativa de la vida útil del transformador

El término "vida útil del transformador " tiene que ser entendido como la vida del aislamiento de un transformador, así el aislamiento de un transformador sufre deterioro debido a diversas causas donde la más significativa es la humedad.

El resultado de la concentración del furano 2FAL obtenida en el aceite del transformador fue de 0.814 ppm considerándose un importante deterioro del aislamiento sólido, a partir de este dato se determinó el grado de polimerización por la fórmula de Pahlavanpour, para luego hallar el porcentaje de vida utilizada (% VU) y el porcentaje vida útil remanente (%VUR) como se muestra en la tabla 11.

**Tabla 11:**

*Resultados obtenidos para la expectativa de vida útil del transformador.*

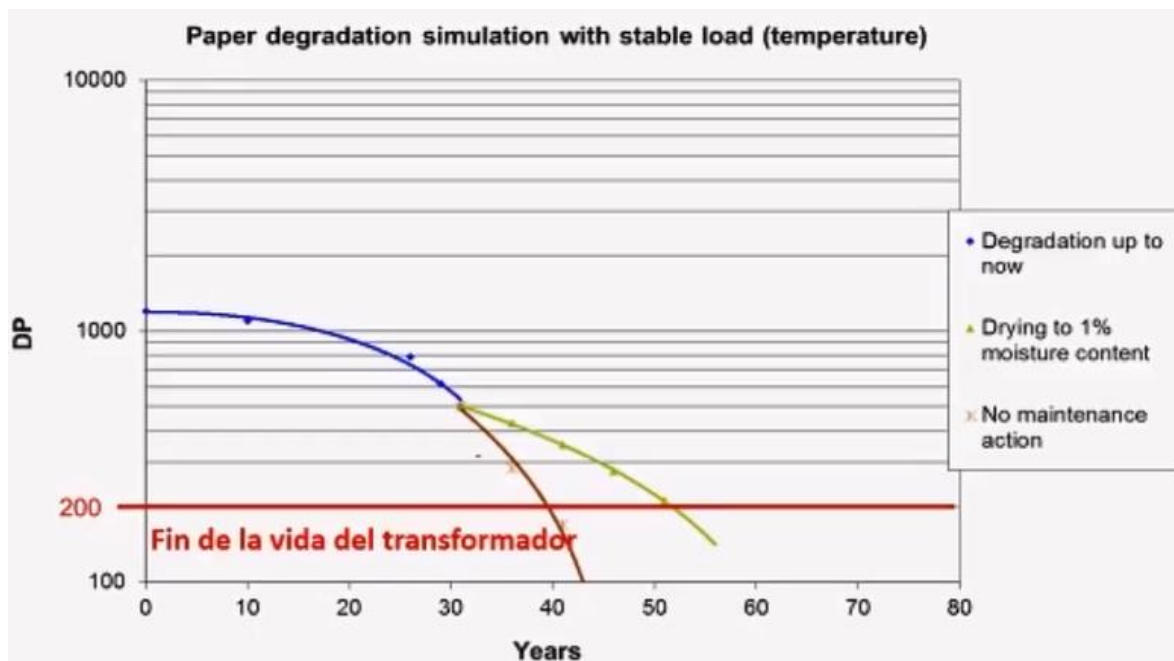
<b>Transformador</b>	<b>2FAL</b>	<b>DP</b>	<b>%VU</b>	<b>%VUR</b>
MR(MASCHINENFABRIK REINHAUSEN GMBH) N°:142317	0.814	450	70%	30%

Fuente: Elaboración propia.

Es importante señalar que más del 98% del agua en un transformador se encuentra en el papel mientras que una cantidad muy baja está disuelta en el aceite y que un aumento de humedad de 1% en el papel duplica la velocidad

de polimerización. El tiempo de difusión del agua desde el papel hacia el aceite es muy lento, por tal razón el resultado de la utilización del sistema de secado TRANSEC aumentará la vida residual útil ya que el transformador de potencia de la subestación Puquio fue fabricado en el año 1990 con una esperanza de vida de 40 años de funcionamiento hasta que llegue al grado de polimerización mínima de 200DP.

Por los datos obtenidos de la tabla 10 se espera una vida residual de 12 años, pero como se muestra en la siguiente figura 37, la prolongación que se estima utilizando el sistema de secado TRANSEC reduciendo la humedad constantemente a partir de la fecha instalada del equipo es el siguiente:



**Figura 38:** Estimación de la extensión de la vida residual del transformador.

Fuente: (Stream Electric AG, 2019)

- Línea azul: Degradación de polimerización del transformador nuevo.
- Línea roja: Degradación de la vida residual sin reducir la humedad.
- Línea verde: Degradación reduciendo a 1% de humedad en la celulosa.

Dando como resultado la proyección de una extensión de vida residual útil del transformador de potencia de la subestación puquio de 12 años a 25 años.



## CONCLUSIONES

- Luego de utilizar el sistema se logró prolongar el tiempo de vida útil con una estimación de 13 años de vida útil del transformador de potencia de 7MVA de la SET Puquio-Ayacucho por el sistema de secado en línea TRANSEC reduciendo la humedad en el aceite como también en el papel aislante.
- Se concluye de igual forma que se logró realizar un secado continuo que reducirá el porcentaje de humedad en el papel aislante estimando 10 meses de utilización una reducción de 3% a 2%.
- Se concluye por último que al utilizar el sistema de secado TRANSEC controló la humedad y temperatura obteniendo siempre 1 ppm a la salida del equipo en el transformador de potencia de la subestación puquio de manera continua gracias a su monitoreo digital mejorando el rendimiento del transformador.

## RECOMENDACIONES

- Si bien la utilización del equipo TRANSEC prolonga la vida residual útil del transformador se recomienda instalarlo antes de que tenga una humedad considerable, es más se puede utilizar en transformadores nuevos para una mayor esperanza de vida del mismo.
- Se debe tener en cuenta que el proceso de secado en línea es considerablemente lento para llegar al nivel de humedad al límite establecido, se recomienda seguir utilizando el sistema TRANSEC continuamente a pesar de llegar a la humedad correcta normada del transformador de potencia.
- El equipo de secado en línea TRANSEC cuenta con un sensor certificado de humedad y temperatura VAISALA MMT162 sin embargo tiene accesorios que pueden ser instalados como el prefiltro adicional para extraer lodos pesados del transformador como también un armario de protección especial que protege al equipo de ambientes muy corrosivos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cáceres Pizarro, J. (2017). Análisis Físicoquímico y Cromatógrafo en transformadores de potencia y de distribución en la planta de licuefacción de gas Melchorita-Perú. *Universidad Nacional del Altiplano*.
- Castrejón Chappa, S. G., & Ramirez Guerra, C. A. (2016). Gestión de activos y mantenimiento de Set's: Transformadores de potencia. *Universidad Nacional del Callao*.
- Chavarrea Camargo, R. R. (2020). Estimación de la vida útil remanente de los transformadores de potencia de la minera Carmen-Pasapalca en base a la degradación del aislamiento del papel. *Universidad Nacional del Centro del Perú*.
- Mazariegos Bámaca, M. A. (2019). Uso de técnica avanzadas no destructivas FDS/PDC para el diagnóstico del aislamiento de transformadores de potencia. *Universidad San Carlos de Guatemala*.
- Muñoz Pérez, A. D. (2018). Metodología del mantenimiento centrado de confiabilidad (RCM) aplicada a transformadores de potencia. *Universidad San Carlos de Guatemala*.
- Pongo Porras, S. F. (1990). Regeneración de aceite Dieléctrico del Transformador de potencia de 30MVA 138/10.7 kv de la subestación Trujillo sur en servicio. *Universidad Nacional de Ingeniería*.
- Ruano Rivera, B. A. (2020). Estimación de la humedad en el aislamiento del papel a través de la medición en el aceite en transformadores de potencia de ETCEE-INDE, mediante equipo de instrumentación transmisor de humedad y temperatura(VAISALA MMT330). *Universidad de San Carlos de Guatemala*.
- Stream Electric AG. (2019). Control de Humedad en Línea y soluciones de secado para Transformadores aislados en aceite. *TRANSEC*.
- Viscaíno Moreno, L. (2009). Influencia de la humedad y la temperatura en las características dieléctricas del papel Kraft. *Universidad Carlos III de Madrid*.

# ANEXOS

## ANEXO 1:

### Datos de la placa del transformador

En la siguiente figura se muestra los datos del transformador.



## ANEXO 2:

### Medición de la válvula inferior del Transformador

En la siguiente figura se muestra la medición de la válvula inferior para determinar si es necesario un acople para la instalación del equipo TRANSEC.

