

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

INGENIERÍA QUÍMICA
INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL

TEMA:

**“DETERMINACIÓN DE PROCESOS ÓPTIMOS PARA EL SECADO E
IMPREGNACIÓN DE AISLAMIENTO SÓLIDO EN ACEITES AISLANTES”**

LUGAR DE REALIZACIÓN:

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELÉCTRICAS

ASESOR INTERNO:

ING. JORGE CIRO JIMÉNEZ OCAÑA

ASESOR EXTERNO:

ING. ARA LI GUZMÁN LÓPEZ

PRESENTA:

FLOR ITZEL JABADILLA TINOCO

No.DE CONTROL:

12270096

CUERNAVACA, MORELOS.

JULIO 2016

Oficina matriz: Reforma 113, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México. Tel: +52 (777) 362 3811 y 362 3800.
Correo electrónico: difusion@iie.org.mx





Dedicatoria

Dedico este logro académico a mi familia por haberme forjado con reglas y con algunas libertades, motivándome constantemente para alcanzar mis anhelos.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por ser mi guía y darme la oportunidad de cumplir este logro académico.

A mis padres (Martha y Artemio) por su apoyo y ayuda incondicional.

A mi hermana (Citlaly) por su compañía y colaboración en todos estos años.

A mi asesor (Ing. Jorge Ciro) por su apoyo constante, sus consejos, su paciencia y su amistad desde los primeros semestres de la carrera profesional.

A mi asesora (Ing. Arali Guzmán) que durante la realización de este proyecto me ha guiado en este complicado proceso y gran parte del desarrollo de este trabajo se lo debo a usted.

A los ingenieros de la academia de Ingeniería química del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez que me brindaron de su conocimiento.

A mis compañeros y amigos que he compartido grandes momentos.

¡Muchas Gracias!

ÍNDICE

Índice de tablas	6
Índice de figuras	7
Introducción	9
Justificación	10
Objetivo.....	11
Capítulo 1. Generalidades	12
1.1 Aspectos generales de la empresa	13
1.1.1 Ubicación de la empresa	13
1.1.2 Misión.....	13
1.1.3 Visión	13
1.1.4 Política	13
1.1.5 Objetivos	14
1.1.6 Valores institucionales	14
1.1.7 Estructura organizacional.....	16
1.1.8 Organigrama Institucional.....	16
1.2 Descripción del área de trabajo	18
1.3 Descripción del problema a resolver.....	18
1.4 Alcances y limitaciones	19
Capítulo 2. Fundamento teórico	20
2.1 Estudio del transformador eléctrico	21
2.1.1 Definición del transformador	21
2.1.2 Funcionamiento del transformador	21
2.1.3 Tipos de transformadores	21
2.1.4 Componentes del transformador.....	22
2.1.5 Sistema aislante del transformador eléctrico	23
2.1.6 Factores que afectan al aislamiento del transformador eléctrico	24
2.2 Aislamiento líquido del transformador eléctrico	25
2.2.1 Generalidades	25
2.2.2 Funciones del aceite aislante en transformadores	25
2.2.3 Clasificación y características de los aceites aislantes	25

2.3 Aislamiento sólido	42
2.3.1 Estructura de la celulosa	42
2.3.2 Características del papel como material aislante	43
2.3.3 Características del <i>pressboard</i> como material aislante	44
2.3.4 Fabricación del <i>transformerboard</i>	44
2.4 Preparación de materiales aislantes (secado e impregnación de aceite)	46
2.4.1 Requisitos para el aceite del transformador	46
2.4.2 Requisitos de los materiales aislantes sólidos (Papel y <i>transformerboard</i>)	46
2.4.3 Fundamentos teóricos de secado	48
2.4.4 Impregnación de <i>Transformerboard</i>	48
Capítulo 3. Procedimiento y descripción de las actividades	53
3.1 Materiales y equipos	54
3.2 Procedimiento experimental	55
3.2.1 Secado de aislamiento sólido	55
3.2.2 Impregnación del aceite aislante	57
3.5 Diagrama de proceso	61
Capítulo 4. Resultados	64
4.1 Secado del aislamiento sólido	65
4.2 Impregnación del aceite aislante	66
4.2.1 Aceite Mineral	66
4.2.2 Aceite MIDEL 7131	67
4.2.3 Aceite VG-100	67
4.2.4 Comparación de impregnación de diferentes fluidos	68
Conclusiones	73
Recomendaciones	73
Referencias Bibliográficas	74
Anexo 1 Lista de usuarios de Transformador de potencia mediana y grande	76
Retrollenado & Nuevas instalaciones [26]	76
Anexo 2. Hoja de cálculo (punto de rocío a presión de vapor)	83
Anexo 3. Gráfico de conversión de punto de rocío a presión de vapor	84
Anexo 4. Gráfico de equilibrio de humedad	85

Índice de tablas

Tabla 1.Composición general de los hidrocarburos	27
Tabla 2.Propiedades fisicoquímicas del aceite mineral.....	27
Tabla 3.Propiedades físicas del MIDEL 7131	29
Tabla 4.Propiedades químicas del MIDEL 7131	29
Tabla 5.Propiedades dieléctricas del MIDEL 7131.....	30
Tabla 6.Puntos de inflamación y de incendio - IEC 61039 clase K3	31
Tabla 7.Propiedades físicas del aceite vegetal [20]	33
Tabla 8.Propiedades fisicoquímicas y eléctricas de un éster natural	35
Tabla 9.Características del VG-100 [24].....	38
Tabla 10.Comparación de la biodegradación de diferentes fluidos aislantes ...	39
Tabla 11.Comparación de puntos de inflamación e ignición de diferentes fluidos aislantes	40
Tabla 12.Comparación de saturación de humedad de diferentes fluidos aislantes	40
Tabla 13.Comparación de sulfato de celulosa de diversas materias primas	43
Tabla 14.Materiales y equipos para el secado e impregnación.....	54
Tabla 15.Tabla de procedimiento experimental	62
Tabla 16.Tiempo de impregnación del aceite mineral.....	66
Tabla 17.Tiempo de impregnación del MIDEL 7131	67
Tabla 18.Tiempo de impregnación del VG-100	67

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del Instituto de Investigaciones Eléctricas en Cuernavaca, Morelos.....	13
Figura 2. Organigrama del Instituto de Investigaciones Eléctricas	17
Figura 3. Croquis del área de trabajo	18
Figura 4. Esquema básico de funcionamiento de un transformador	21
Figura 5. Transformador tipo columna (a) y tipo acorazado (b).....	22
Figura 6. Partes del transformador PROLEC	23
Figura 7. Hidrocarburos parafínicos.....	26
Figura 8. Hidrocarburos nafténicos.....	26
Figura 9. Hidrocarburos aromáticos.....	26
Figura 10. Estructura molecular del MIDEL 7131	28
Figura 11. Biodegradación MIDEL 7131	31
Figura 12. Tensión de ruptura frente a contenido de humedad a 20°C	32
Figura 13. Estructura de un éster natural (aceite vegetal) triglicérido	33
Figura 14. Comparación de biodegradación acuática aeróbica [21]	36
Figura 15. Comparación de tensión de ruptura en función de la humedad	39
Figura 16. Comparación de la biodegradación de diferentes fluidos aislantes..	40
Figura 17. Comparación de saturación de diferentes fluidos aislantes	41
Figura 18. Fórmula química de la celulosa	42
Figura 19. Diagrama de la producción de transformerboard precomprimido ...	45
Figura 20. Tensión de aguante al impulso del papel.....	47
Figura 21. Influencia de la humedad del papel en el tiempo de envejecimiento de papel.....	47
Figura 22. Tensiones de ruptura de pressboard impregnados de aceite.....	49
Figura 23. Impregnación de TRANSFORMERBOARD precomprimido	50
Figura 24. Prueba de secado de laminado Transformerboard precomprimido ..	51
Figura 25. Impregnación a) 20°C b) 90°C	52
Figura 26. Segmentos de Pressboard T4 y H1V2 de 5 x 5 cm	55
Figura 27. Distribución del pressboard.....	55
Figura 28. Autoclave para el secado de pressboard.....	56
Figura 29. Datos de los parámetros del Sensor Vailsala después de las 18 horas estabilización.....	56
Figura 30. Balanza analítica para la medición de masas de pressboard y papel Manning.....	57
Figura 31. Humectador del aceite aislante	58
Figura 32. Horno de secado para el calentamiento de aceite.....	58
Figura 33. Muestras de aceite aislante a) MIDEL 7131 b) Mineral y c) VG-100... 	60
Figura 34. Secado del aislamiento sólido (pressboard).....	65
Figura 35. Tiempo de impregnación del papel Manning (2 g) con diferentes fluidos aislantes	69



Figura 36. Tiempo de impregnación del papel Manning (10 g) con diferentes fluidos aislantes	69
Figura 37. Tiempo de impregnación del Pressboard (H1 V2 3.2 mm) con diferentes fluidos aislantes	70
Figura 38. Tiempo de impregnación del pressboard (H1 V2 0.8 mm) con diferentes fluidos aislantes	70
Figura 39. Tiempo de impregnación del pressboard (T4 3.2 mm) con diferentes fluidos aislantes	71
Figura 40. Tiempo de impregnación del papel Manning (2 g) con diferentes fluidos aislantes	71
Figura 41. Impregnación del papel Manning (10 g) con diferentes fluidos dieléctricos	72

Introducción

Los transformadores de potencia juegan un papel muy importante para la humanidad ya que son las máquinas eléctricas encargadas de regular las diferencias de potencial y las diferencias de corrientes que existen en las diferentes Líneas de Transmisión.

El proceso de fabricación de los transformadores se compone de varias fases tales como el diseño, el montaje, el secado, impregnación y pruebas en fábrica. Antes de las pruebas eléctricas, todo el aislamiento sólido del transformador necesita estar 100% impregnado con el aceite dieléctrico para evitar la presencia de descargas parciales o un decremento en la tensión al impulso.

Por más de 100 años se ha utilizado aceite mineral como fluido aislante en transformadores de potencia, sin embargo, las nuevas regulaciones ambientales y la crisis petrolera han llevado al desarrollo de nuevos fluidos biodegradables. Estos fluidos, de origen vegetal y sintético tienen propiedades dieléctricas y fisicoquímicas diferentes a las del aceite mineral, lo que representa retos tanto para el fabricante, que tiene que modificar sus diseños y tiempos de impregnación, como para el usuario, que tiene que aplicar técnicas de diagnóstico diferentes en función del fluido a evaluar.

En este documento en primer lugar se describirá el transformador eléctrico así como su principio de funcionamiento y las principales características de sus elementos constructivos. En apartados posteriores se analizará con profundidad todos los aspectos relacionados con el secado e impregnación del aislamiento sólido en aceites aislantes. Para esto se realiza una recopilación bibliográfica sobre tres tipos de aceites aislantes dieléctricos (mineral, vegetal y sintético) que por sus propiedades fisicoquímicas tienen diferentes tiempos de impregnación.

La comparación de los procesos de impregnación de estos aceites aislantes se describe en el capítulo 4 de este reporte. La evaluación de los tiempos de impregnación de cada fluido se llevó a cabo con materiales de celulosa como son *pressboard* (de diferentes espesores) y papel Manning. Los resultados obtenidos servirán como base para determinar las condiciones de impregnación óptimas para cada fluido bajo estudio.



Justificación

El uso del aceite mineral en transformadores de potencia como aislante dieléctrico implica un riesgo grande al medio ambiente ya que contiene compuestos altamente peligrosos por lo que lo hacen poco biodegradable. Este es un tema que ha comenzado a preocupar al sector eléctrico dada la cantidad de transformadores con este tipo de aceite que se encuentran en uso.

Es por ello que se están buscando nuevas alternativas de aceites que sean amigables al medio ambiente y a su vez que tengan propiedades dieléctricas similares a las del aceite mineral. Por lo que se pretende demostrar que la aplicación de aceites sintéticos y vegetales son convenientes para el entorno ambiental, de tal manera que los procesos de manufactura del aceite mineral se empleen para estos nuevos aceites involucrando el tiempo, la metodología y ciertos requerimientos para lograr el proceso.

El procedimiento experimental de este proyecto consiste en el secado e impregnación de dos materiales celulósicos en aceite mineral, vegetal y sintético, con la finalidad de conocer el tiempo de impregnación del aceite en función de la temperatura.



Objetivo

Determinar las condiciones de temperatura, presión y tiempo de secado e impregnación de aislamiento sólido en función del tipo de aceite aislante.



Capítulo 1. Generalidades

1.1 Aspectos generales de la empresa

En esta sección del reporte se definen las características principales del Instituto de Investigaciones Eléctricas

1.1.1 Ubicación de la empresa

Instituto de investigaciones eléctricas, México.

Oficina matriz: Reforma 113, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México.

Teléfonos: +52 (777) 362 3811 y 362 3800.

Correo electrónico: difusion@iie.org.mx.

RFC: IIE-751125-JEA

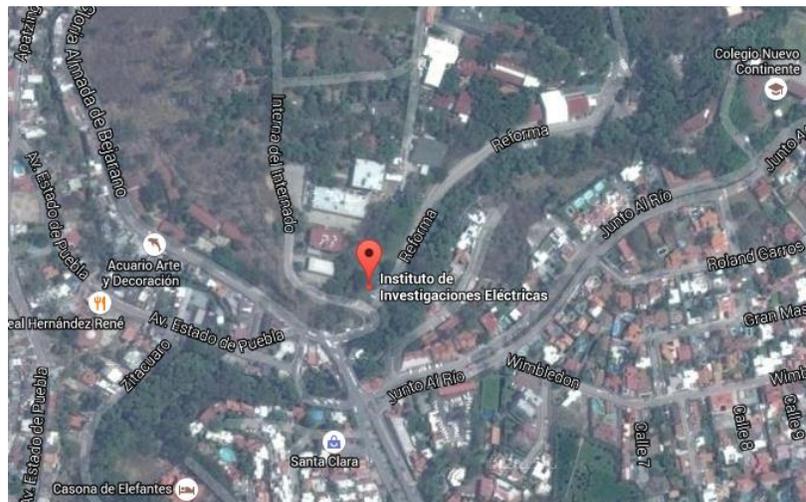


Figura 1. Ubicación del Instituto de Investigaciones Eléctricas en Cuernavaca, Morelos.

1.1.2 Misión

Impulsar el desarrollo sustentable de la industria energética mediante la innovación.

1.1.3 Visión

Se le acreditan aportaciones únicas a la competitividad de la industria por la formación de ecosistemas de innovación y creación de valor (gobierno, industria y academia) que propician e impulsan la sustentabilidad de la industria energética.

1.1.4 Política

Es compromiso del Instituto de Investigaciones Eléctricas satisfacer las necesidades de sus clientes y superar sus expectativas mediante la innovación, la eficacia y la mejora continua de sus procesos, dentro del marco normativo, legal y regulatorio

aplicable en materia de gestión de la calidad, desarrollo sustentable, igualdad laboral, gestión del medio ambiente, seguridad y salud en el trabajo.

1.1.5 Objetivos

Según nuestro decreto de creación, y su modificación, tenemos los siguientes objetivos:

- Realizar y promover la investigación científica, el desarrollo experimental y la investigación tecnológica, con la finalidad de resolver los problemas científicos y tecnológicos relacionados con el mejoramiento de la industria eléctrica.
- Contribuir a la difusión e implantación, dentro de la industria eléctrica, de aquellas tecnologías que mejor se adapten al desarrollo económico del país.
- Mantener relaciones efectivas con instituciones similares de otros países y con institutos académicos y de investigación tecnológica en el país.
- Impartir cursos de especialización y actualización de conocimientos en ciencia, tecnología y administración industrial en el área de la industria eléctrica.
- Brindar asesoría a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), a la industria de manufacturas eléctricas y a las compañías de ingeniería y de servicios de consultoría relacionadas con la industria eléctrica.
- Proponer a la Secretaría de Energía (SENER) y a la CFE, programas de investigación aplicada y tecnológica, y los correspondientes planes de operación, inversión y financiamiento a corto, mediano y largo plazo.
- Patentar y licenciar las tecnologías desarrolladas y los resultados de la investigación que obtengamos y que resulten procedentes.
- Realizar actos conexos con los anteriores y los demás que se fijen en nuestro estatuto.

1.1.6 Valores institucionales

- Honestidad

Respetar la propiedad y los bienes bajo su resguardo o de las demás personas, ya sean cuestiones materiales o intelectuales, para contribuir a mantener un clima de confianza en el ambiente laboral.

- Constancia

Es la virtud con la cual conquistamos las metas que nos proponemos, venciendo las dificultades y obstáculos que se nos presentan, sin desanimarnos, ya que es

fundamental para lograr con éxito los proyectos que desarrollamos y alcanzar los objetivos que guían el rumbo de la institución.

- Actitud de servicio

Es la disposición que mostramos ante las demás personas, para facilitar o atender de buena manera lo que nos solicitan. Las personas con buena actitud de servicio tratan con cordialidad y esmero a sus clientes, y con compañerismo a las y los integrantes de los equipos de trabajo en donde participan. Se esfuerzan por hacer las cosas sencillas y eliminar los obstáculos; son optimistas y empáticos con las demás personas; cuidan su salud; proyectan una imagen profesional en su actuar y en los productos de sus acciones, y no discriminan a nadie, todo esto contribuye a favorecer el trabajo en equipo y el logro de resultados.

- Responsabilidad social

Debemos conducirnos éticamente y responder a los impactos reales y potenciales en la sociedad, derivados de las decisiones y actividades del Instituto de Investigaciones Eléctricas, de esta manera contribuimos a comprender las expectativas de la sociedad y de nuestro entorno ambiental, con el objetivo de contribuir al desarrollo sustentable del país en un marco de legalidad en diversos temas: ambiente, salud, familia, educación, comunidad laboral y sociedad en general.

- Tolerancia y respeto

Debemos generar empatía con las demás personas, tratándolas como queremos que ellas nos traten, independientemente de su jerarquía en la organización, su nacionalidad, origen racial, sexo, género, edad, discapacidad, condición social o económica, condiciones de salud, religión, opiniones, preferencia u orientación sexual, estado civil o cualquier otra característica o condición análoga, para facilitar la colaboración y el trabajo en equipo que contribuya al logro de resultados en un ambiente de armonía.

- Igualdad, no discriminación y equidad de género

La igualdad y la no discriminación son principios básicos de las normas internacionales de derechos humanos.

Debemos conducirnos con un trato igualitario sin distinción de raza, sexo, clase social u otra circunstancia plausible de diferencia, ya que todos tenemos derecho a la igualdad de trato ante la ley y a ser protegido contra la discriminación por diversos motivos, entre ellos la orientación sexual y la identidad de género. Discriminar significa seleccionar excluyendo, esto es, dar un trato de inferioridad a personas o a grupos a causa de su origen étnico o nacional, religión, edad, género, opiniones, preferencias políticas y sexuales, condiciones de salud, discapacidades, estado civil u otra causa.



- Código de Conducta

Sintetiza el comportamiento de nuestra comunidad y establece las normas concretas de actuación y de convivencia enfocadas a generar un ambiente de armonía para la consecución de metas, logros, la satisfacción de nuestros clientes, la responsabilidad social y el compromiso con la sustentabilidad energética.

1.1.7 Estructura organizacional

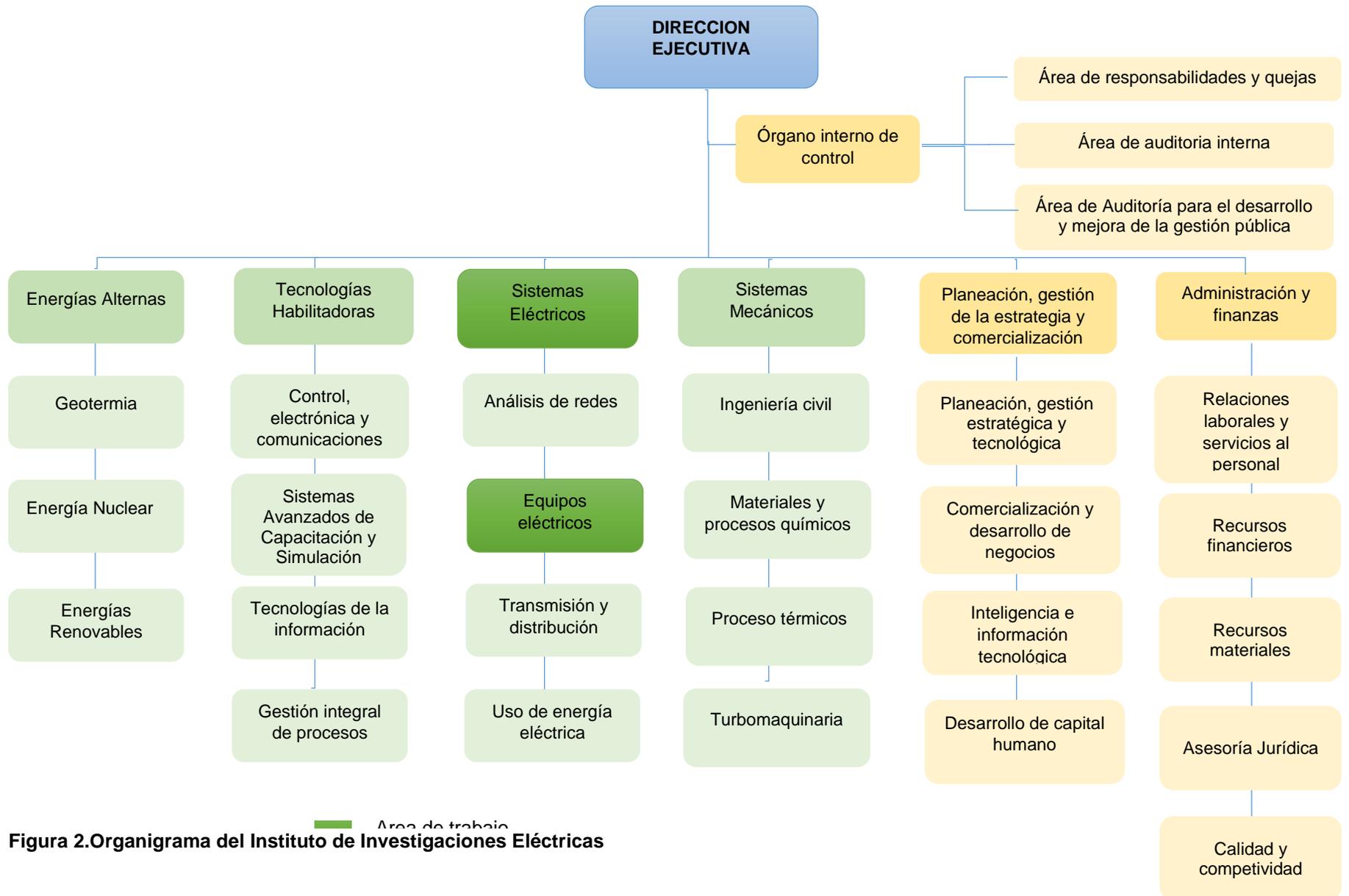
La estructura organizacional del Instituto de Investigaciones Eléctricas, con la cual asegura el cumplimiento y desempeño de las funciones para la consecución de metas y objetivos, busca fortalecer los frentes tecnológicos institucionales a través de los cuales se transfiere los procesos, equipos y sistemas que sus usuarios demandan.

Se ha consolidado como una de las principales instituciones de investigación y desarrollo tecnológico de México y de América Latina, sustentado al principal pilar: la capacidad tecnológica de nuestro recurso humano, contando con grupos especializados interdisciplinarios.

La plantilla está integrada por 559 investigadores, de los cuales 180 pertenecen a Tecnologías Habilitadoras (TH), 78 a Energías Alternas (EA), 119 a Sistemas Eléctricos (SE), 98 a Sistemas Mecánicos (SM), 54 a Planeación, Gestión de la Estrategia y Comercialización (PGEC), 24 a Administración y Finanzas, 2 a la Dirección Ejecutiva y 5 al Órgano Interno de Control.

1.1.8 Organigrama Institucional

El organigrama de la Institución se presenta en la Figura 2.



1.2 Descripción del área de trabajo

- **Nombre del departamento:**

Gerencia de equipos eléctricos

- **Croquis del área de trabajo:**

Las pruebas de impregnación de aislamientos sólidos en aceites aislantes se realizaron en el edificio 34. El secado de materiales sólidos se realizó en el edificio 25, laboratorio donde se encuentra el autoclave para el secado de celulosa.



Figura 3. Croquis del área de trabajo

1.3 Descripción del problema a resolver

El aceite mineral utilizado como fluido aislante en transformadores de potencia es un derivado del petróleo con una capacidad de contaminación muy elevada (1 L de aceite mineral puede contaminar 1, 000,000 L de agua [1]). Esta es una de las razones por las cuales se han desarrollado nuevos fluidos biodegradables para su aplicación en transformadores de potencia.

Los fluidos más estudiados para su aplicación en equipo eléctrico de potencia son los ésteres de tipo natural o sintético. Estos fluidos al tener una estructura molecular distinta a la del aceite mineral, tienen también propiedades físicas y químicas diferentes.

Uno de los procesos más importantes en la fabricación de transformadores es el secado e impregnación del aislamiento sólido, ya que de esto depende el que el equipo pase las pruebas eléctricas de fábrica al que es sometido antes de enviarse al usuario



final. Algo que se ha observado empíricamente es que los tiempos de impregnación con ésteres son más largos que con aceite mineral, debido a la viscosidad de los fluidos. El presente trabajo busca encontrar las condiciones óptimas para la impregnación de aislamiento sólido con ésteres naturales y sintéticos.

Una contribución adicional de este proyecto es determinar las condiciones de temperatura y presión para el secado de aislamiento sólido en el laboratorio de equipos eléctricos del IIE.

1.4 Alcances y limitaciones

El alcance del proyecto es por un lado determinar el tiempo de impregnación de diferentes clases de aislamiento sólido en 3 tipos de fluidos dieléctricos. Con dicha información se determinarán los tiempos y temperaturas óptimas para lograr la impregnación completa del aislamiento de un transformador de potencia con cada tipo de aceite.

El presente proyecto se limita al estudio de tres tipos de aceite: mineral, vegetal y sintético. Así como 5 tipos de aislamiento sólido papel Manning (2 y 5 gramos) y Pressboards (H1V2 0.8 mm, H1 V2 3.2 mm y T4 3.2 mm)



Capítulo 2. Fundamento teórico

2.1 Estudio del transformador eléctrico

2.1.1 Definición del transformador

Se denomina transformador a un dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia.

Los transformadores son dispositivos basados en el fenómeno de la inducción electromagnética y están constituidos, en su forma más simple, por dos bobinas devanadas sobre un núcleo cerrado, fabricado bien sea de hierro dulce o de láminas apiladas de acero eléctrico, aleación apropiada para optimizar el flujo magnético [2].

2.1.2 Funcionamiento del transformador

Los transformadores se basan en la inducción electromagnética ya que al aplicar una fuerza electromotriz en el devanado primario, es decir una tensión, se origina un flujo magnético en el núcleo de hierro. Este flujo viajará desde el devanado primario hasta el secundario y con su movimiento originará una fuerza electromotriz en el devanado secundario.

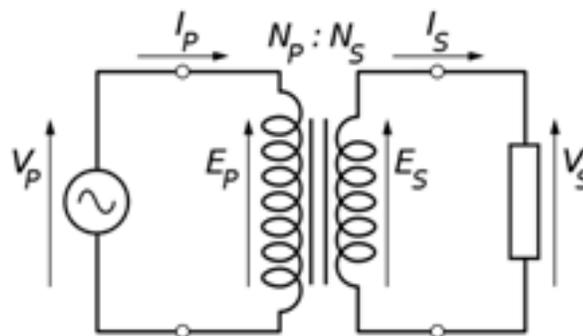


Figura 4. Esquema básico de funcionamiento de un transformador

Según la Ley de Lenz, se requiere que la corriente sea alterna para que se produzca esta variación de flujo.

2.1.3 Tipos de transformadores

Los transformadores de potencia se construyen de dos maneras: un tipo de transformadores consta de una pieza de acero rectangular, laminada, con los devanados enrollados sobre dos de los lados del rectángulo. Esta clase de construcción se conoce como transformador tipo columna.

El otro consta de un núcleo laminado de tres columnas, cuyas bobinadas están enrolladas en la columna central. Esta clase de construcción se conoce como transformador tipo acorazado.

En la figura 5 se muestran estos tipos de transformadores. En todos los casos, el núcleo se construye con delgadas láminas aisladas eléctricamente unas de otras para minimizar las corrientes circulantes [3].

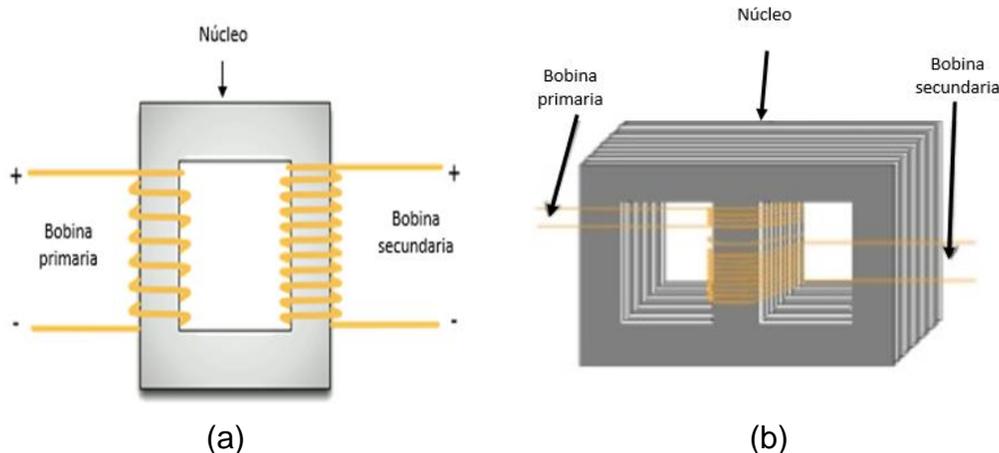


Figura 5. Transformador tipo columna (a) y tipo acorazado (b)

2.1.4 Componentes del transformador

Los transformadores están compuestos de diferentes elementos. Los componentes básicos son:

Núcleo: El núcleo de los transformadores está compuesto por las columnas, que es la parte donde se montan los devanados, y el yugo que es la parte donde se realiza la unión entre las columnas.

Devanados: El devanado es una solera de cobre enrollada a través del núcleo en uno de sus extremos y recubiertos con aislamiento sólido (papel). La relación de vueltas de la solera de cobre entre el primario y el secundario indica la relación de transformación [4].

Boquillas terminales: Son unos bornes que se encuentran en la parte exterior del transformador que sirven para alimentar al mismo, para así poder realizar la alimentación del circuito interno, y en la parte inferior se encuentran las boquillas de salida las cuales sirven para obtener el voltaje ya transformado [5].

Tanque: Es la carcasa del transformador donde se alojan todos los componentes del mismo. Los tanques son fabricados de acero laminado en frío de primera calidad y con espesores adecuados para evitar cualquier tipo de deformación o fisuras, las costuras de soldadura son verificadas presurizando el tanque y con un detector ultrasónico se descartan probables filtraciones.

Materiales aislantes: En el transformador eléctrico se utiliza cartón prensado de origen celulósico que proporciona el aislamiento entre los devanados y el núcleo. Estos

aislamientos son resistentes a la exposición directa al líquido aislante del transformador sin que se alteren sus propiedades ni contaminen a éste. Con el propósito de tener la máxima efectividad de los aislamientos y curar la resina contenida en el papel de las bobinas, los ensambles núcleo-bobinas se introducen en hornos modulares que operan con un ciclo de temperatura cuidadosamente controlada, logrando así, ofrecer una alta resistencia a los esfuerzos mecánicos producidos por una falla de corto circuito.

Fluido aislante. El interior del Transformador se encuentra inmerso en un fluido aislante, el cual cumple la función de dar la rigidez dieléctrica, aislar y de refrigerar el transformador [6].

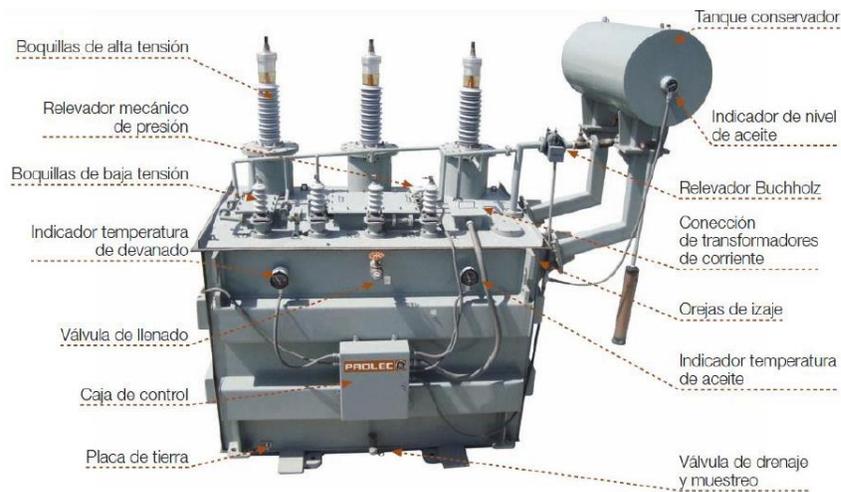


Figura 6. Partes del transformador PROLEC

2.1.5 Sistema aislante del transformador eléctrico

Los aislamientos en un transformador son necesarios para mantener una separación adecuada entre dos puntos de diferente potencial, dentro del circuito eléctrico del propio transformador. El aislamiento consta de dos partes principales: el aislamiento líquido y el aislamiento sólido.

- **Aislamiento líquido:** El aceite líquido más utilizado en los transformadores es el aceite mineral el cual tiene propiedades, mecánicas y eléctricas que lo hacen un buen fluido aislante. Para eliminar los efectos secundarios de los hidrocarburos, los ésteres naturales y sintéticos se desarrollaron para ser utilizados en transformadores de potencia como medio aislante.
- **Aislamiento sólido:** Los aislantes sólidos más utilizados son el papel Kraft y el papel Manning para envolver los conductores de los bobinados, así como también el cartón prensado (*Pressboard*) que dan forma a estructuras de aislamiento rígidas. Tanto el papel como el *Pressboard* suelen tener como

materia prima a la celulosa, que procede de la pulpa de madera, así como también se utilizan bloques aislantes de madera de alta calidad.

La vida de estos materiales aislantes es afectada por la humedad, contaminación química, efecto corona, esfuerzos anormales de voltaje y esfuerzos mecánicos.

2.1.6 Factores que afectan al aislamiento del transformador eléctrico

Existen cuatro factores que afectan al sistema aislante de un transformador: la humedad, el oxígeno, la temperatura y la contaminación externa.

La humedad en los aislamientos sólidos y líquidos, disminuye la fuerza de rigidez dieléctrica, acelera la descomposición de celulosa y provoca la emisión de burbujas a altas temperaturas. Por lo tanto, la concentración de humedad es de gran importancia para un servicio seguro y una larga vida útil de los transformadores de potencia [7]. La humedad puede presentarse en el interior del transformador de las siguientes maneras:

- De forma disuelta
- En forma de una emulsión agua/aceite
- En estado libre en el fondo del tanque

El oxígeno es otro de los potenciales enemigos del aislamiento de un transformador, ya que reacciona con el aceite para formar ácidos orgánicos, agua y lodo. El oxígeno proviene de la atmósfera o es liberado por la celulosa como resultado de la temperatura de operación del mismo. Además no es posible eliminar todo el oxígeno existente en un transformador inclusive si el llenado del mismo se realizara en vacío.

Se sabe que el 90% del deterioro de la celulosa es de origen térmico. La degradación térmica del aislamiento es función del tiempo, de la temperatura y de la humedad en el aislamiento. Las elevadas temperaturas causan un envejecimiento acelerado de la celulosa empleada, reduciendo su rigidez mecánica y eléctrica. Lo anterior provoca la de-polimerización o destrucción del papel. Otros efectos debidos a las elevadas temperaturas son la generación de agua, materiales ácidos y gases (CO_2 , CO).

Los contaminantes externos pueden presentarse en forma de “partículas”, provenientes del proceso de manufactura del transformador y que no han sido propiamente eliminados en el proceso de llenado del transformador con aceite. Partículas diminutas pueden desprenderse de la celulosa cuando el transformador esta en servicio [8].

2.2 Aislamiento líquido del transformador eléctrico

2.2.1 Generalidades

El aceite aislante o aceite dieléctrico de transformador, es un aceite que se utiliza en equipos eléctricos y que exhibe propiedades dieléctricas características y esenciales para oponerse al paso de la corriente eléctrica.

Las características dieléctricas y térmicas del aceite mineral aislante sumado a su costo razonable, son las principales razones para utilizarlo como medio aislante. Además, en combinación con la celulosa, sus propiedades mejoran, de ahí que sea muy utilizado en transformadores.

2.2.2 Funciones del aceite aislante en transformadores

El aceite aislante en un transformador tiene las siguientes funciones:

- a) Actúa como aislante eléctrico de y entre las partes energizadas.
- b) Actúa como refrigerante, transfiriendo el calor generado en los devanados al medio circundante.
- c) Protege los aislamientos sólidos contra la humedad y el aire [9].

2.2.3 Clasificación y características de los aceites aislantes

Los aceites aislantes se clasifican en tres categorías: inorgánicos, sintéticos y vegetales. Dentro de los inorgánicos, son los aceites minerales los que se usan con más frecuencia para equipos eléctricos de potencia. Además de estos, existen en el mercado una gran variedad de aislantes líquidos sintéticos como MIDEL 7131 y de origen vegetal como el FR3 y el VG-100 que poseen buenas características dieléctricas y térmicas.

2.2.3.1 Aceite aislante inorgánico

2.2.3.1.1 Aceite mineral

El aceite mineral es el principal líquido aislante utilizado en transformadores por sus características dieléctricas y mecánicas. Una función de este líquido aislante es que sirve como un recubrimiento protector a las superficies de metal dentro del transformador.

Este recubrimiento protege contra las reacciones químicas, tal como la oxidación, que puede influenciar la integridad de las conexiones, favorecer la formación de óxido y contribuye a la consecuente contaminación del sistema [10].

Un aceite es considerado nafténico, aromático o parafínico si su contenido en las muestras supera del uno al otro. La clase y la proporción determinan la naturaleza química de los aceites.

Hidrocarburos parafínicos: Son hidrocarburos saturados de cadena abierta lineal o ramificada. En su composición predominan los hidrocarburos parafínicos de fórmula general C_nH_{2n+2} .

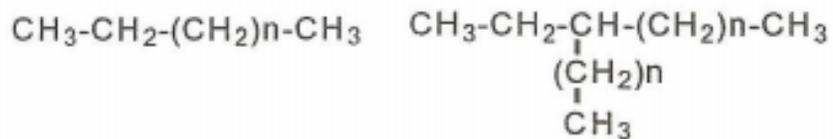


Figura 7. Hidrocarburos parafínicos

Hidrocarburos nafténicos: Son hidrocarburos saturados de cadena cerrada que contienen de uno a seis anillos, los cuales pueden tener una o más cadenas laterales lineales o ramificadas de fórmula general C_nH_{2n} .

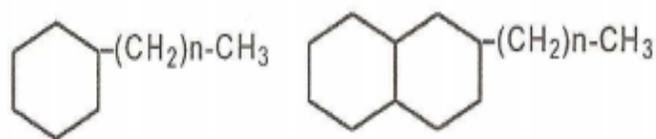


Figura 8. Hidrocarburos nafténicos

Hidrocarburos aromáticos: Son hidrocarburos que contienen uno o más anillos aromáticos, los cuales pueden presentar cadenas laterales. Estos hidrocarburos contienen una elevada proporción de hidrocarburos aromáticos de fórmula general C_nH_{2n-x} .

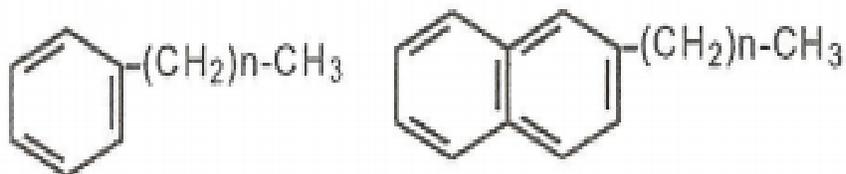


Figura 9. Hidrocarburos aromáticos

Los aceites minerales aislantes deben presentar características físicas, químicas y eléctricas adecuadas que le permitan desarrollar satisfactoriamente sus funciones, para lo cual debe ser analizado en servicio con una frecuencia determinada.

Propiedades fisicoquímicas

El rendimiento y la calidad de los aceites lubricantes viene determinada por el tipo de petróleo, su origen y su calidad. En la tabla 1 se muestra los hidrocarburos que componen la mayor parte de los aceites, compuestos principalmente de carbono e hidrogeno y en menor medida de un compuesto de azufre, nitrógeno y oxígeno y otros metales [11].

Tabla 1. Composición general de los hidrocarburos

Elemento	Porcentaje
Carbono	84-87
Hidrogeno	11-14
Azufre	0-2
Nitrógeno	0.2
Oxígeno y metales	Trazas

En la tabla 2 se indican las propiedades fisicoquímicas de un aceite mineral. Además de dichas propiedades, los aceites minerales que son expuestos al aire poseen diversas distinciones de oxidación variando con cada tipo de aceite, aditivos y materiales en conjunto.

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del aceite mineral

Propiedades del líquido	Aceite mineral		
	Transformador	Cable y condensador	Cable homogéneo
Peso específico	0.88	0.885	0.93
Viscosidad, Saybolt seg. a 37.8 °C	57-59	0.100	100
Punto de inflamación, °C	135	165	235
Punto de combustión espontánea, °C	148	185	280
Punto de fluidez, °C	-45	-45	-5
Calor específico	0.425	0.412	
Coefficiente de dilatación	0.00070		0.00075
Conductividad térmica, cal/(cm)(s)(°C)	0.039		
Resistencia dieléctrica, kV	30		
Permitividad a 25 °C	2.2		
Resistividad, Ω-cm x10 ¹²	1-10	50-100	1-10

Propiedades dieléctricas

La permitividad de los aceites minerales aislantes es pequeña, puesto que son esencialmente no polares y contienen tan solo pocas moléculas que poseen momentos eléctricos dipolares. Una permitividad típica de aceite de transformador a 60 hertz es de 2.19 a 25 °C, disminuyendo casi linealmente hasta 2.11 a 100 °C.

A temperaturas bajas y frecuencias elevadas los valores de la permitividad son del orden de 2.85 en aceites que presentan un nivel relativamente elevado de constituyentes polares.

Los niveles de conductividad en aceites minerales oscilan entre $10^{-15} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ para aceites nuevos puros y para los aceites usados contaminados $10^{-12} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ [12].

2.2.3.2 Aceite aislante sintético

Últimamente se han empleado fluidos sintéticos que han sido formulados para proporcionar una alternativa en la sustitución del aceite mineral, como es el caso de aceite sintético MIDEL 7131 que lleva dando servicio con éxito en el mercado para una serie de aplicaciones en sistemas eléctricos.

2.2.3.2.1 MIDEL 7131

MIDEL 7131 es un tipo de éster sintético fabricado por M&I Materiales in Manchester, Reino unido. Es derivado de pentaeritritol, con cuatro cadenas de ácidos grasos como se muestra en la figura 10. MIDEL 7131 es altamente biodegradable debido a los componentes de éster en la estructura molecular [13].

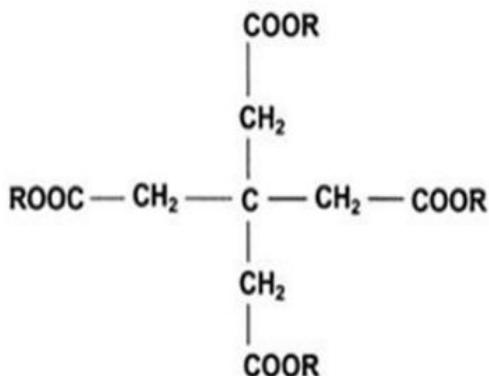


Figura 10. Estructura molecular del MIDEL 7131

Este aceite sintético ofrece rendimiento a alta temperatura, mayor protección contra el fuego y medioambiental y superior tolerancia a la humedad [14].

Los estudios han demostrado su estabilidad a largo plazo, incluso a temperaturas elevadas. Durante muchos años, se ha utilizado exitosamente en todo el mundo en

sistemas de transformadores de respiración y sellados a tensiones de 169 kV y menores.

Propiedades físicas

En la tabla 3 se muestran las propiedades físicas del aceite MIDEL 7131 según IEC 61099.

Tabla 3. Propiedades físicas del MIDEL 7131

Propiedades	Unidad	Método de prueba	MIDEL 7131
Color	HU	ISO 2211	125
Apariencia		IEC 61099 7.1.2	Claro, libre de materia en suspensión y los sedimentos
Densidad a 20 °C	Kg/dm ³	ISO 3675	0.97
Viscosidad Cinemática a 40°C	mm ² /s	ISO 3104	28
Viscosidad Cinemática a -20°C	mm ² /s		1400
Punto de inflamación	°C	ISO 2719	260
Punto de incendio	°C	ISO 2592	316
Punto de congelación	°C	ISO 3016	-60
Cristalización		IEC 61099 (2010) Anexo A	Ningún cristal

Propiedades Químicas

En la tabla 4 se especifican las propiedades químicas más importantes del aceite sintético MIDEL nuevo.

Tabla 4. Propiedades químicas del MIDEL 7131

Propiedades	Unidades	Método de prueba	MIDEL 7131
Contenido de agua	mg/kg	IEC 60814	50
Valor de neutralización	Mg KOH/g	IEC 62021-2	<0.03
Estabilidad de oxidación - Contenido de Ácido Total - Contenido de Lodo Total	mg KOH/g % masa	IEC 61125	0.01 <0.01
Valor calorífico neto	MJ/kg	ASTM D 240-02	31.6

Propiedades dieléctricas

En la tabla 5 la tensión de ruptura del MIDEL 7131 se encuentra en exceso de 75 kV cuando los niveles de humedad son superiores a 600 ppm.

Tabla 5. Propiedades dieléctricas del MIDEL 7131

Propiedades	Unidades	Método de prueba	MIDEL 7131
Tensión de ruptura	kV	IEC 60156	>75
Factor de disipación dieléctrica Tan δ a 90°C y 50 Hz		IEC 60247	< 0.008
CC de resistividad a volumen a 90°C	Gohm-m	IEC 60247	>30

El aceite MIDEL 7131 cumple con las “Specifications for Unused Synthetic Organic Esters for Electrical Purposes” de la comisión Electrotécnica Internacional (IEC) 61099. Está clasificado como tipo T1, un éster pentaeritrito libre de halógeno [15].

Mayor protección ambiental

Se han realizado pruebas en las que se determinó que el aceite sintético MIDEL 7131 no es tóxico y es fácilmente biodegradable por lo que es una alternativa ecológica al aceite mineral y al líquido de silicona.

La biodegradación es un proceso por el cual se degradan sustancias orgánicas y se absorben por el medioambiente sin causar daño. La biodegradación de MIDEL 7131 ha sido evaluada por un laboratorio acreditado usando un método de prueba estándar desarrollado por la organización para la cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE).

En la figura 11 se observa el diagrama de la biodegradación de MIDEL 7131, donde el 3° día logró una degradación del 10% y 10 días más tarde estaba degradado un 71 %, pero en el día 28 MIDEL 7131 alcanzó una degradación del 89 %, lo que lo clasifica como fácilmente biodegradable de acuerdo a las categorías de la OCDE y completamente biodegradable según la IEC 61039 [16].

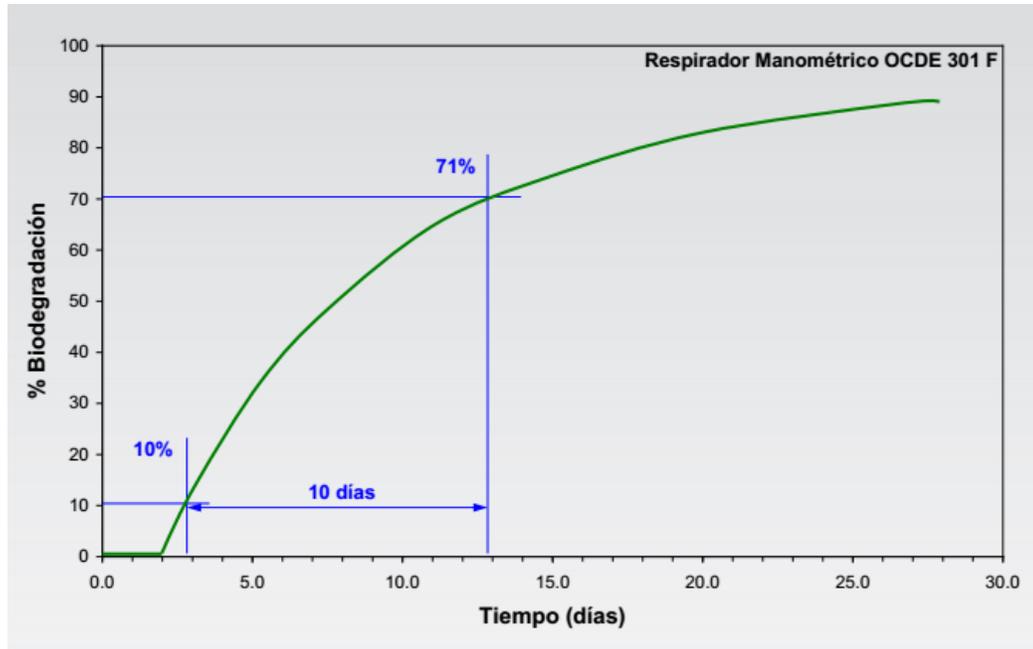


Figura 11. Biodegradación MIDL 7131

Mayor seguridad contra incendios

El fluido sintético MIDL 7131 tiene un punto de inflamación y de ignición altos. En la tabla 6 se compara el aceite MIDL 7131 con el aceite mineral en cuanto a los parámetros de punto de inflamación, ignición y valor calorífico neto.

Tabla 6. Puntos de inflamación y de incendio - IEC 61039 clase K3

Parámetro	Método	Requerido	MIDL 7131	Aceite mineral
Punto de inflamación	ISO 2719	min.250°C	260°C	150°C
Punto de ignición	ISO 2592	Min.300 °C	316°C	170 °C
Valor calorífico neto	ASTM D240-02	< 32	31.6 MJ/kg	46 MJ/kg

A diferencia del aceite mineral, MIDL 7131 es el fluido menos inflamable para fines dieléctricos. Los altos valores altos en punto de ignición y de combustión permiten el uso en transformadores dentro edificios y otras áreas críticas donde el aceite mineral no sería aceptable [17].

Tolerancia a la humedad

MIDL 7131 tiene una tolerancia muy alta de humedad, puede absorber cantidades mucho más altas de agua que el aceite mineral (ver Figura 12). MIDL 7131 puede atrapar más agua lo que puede atrasar el envejecimiento de la celulosa. En cambio el aceite mineral, existe el peligro que esta agua sea liberada como condensación.

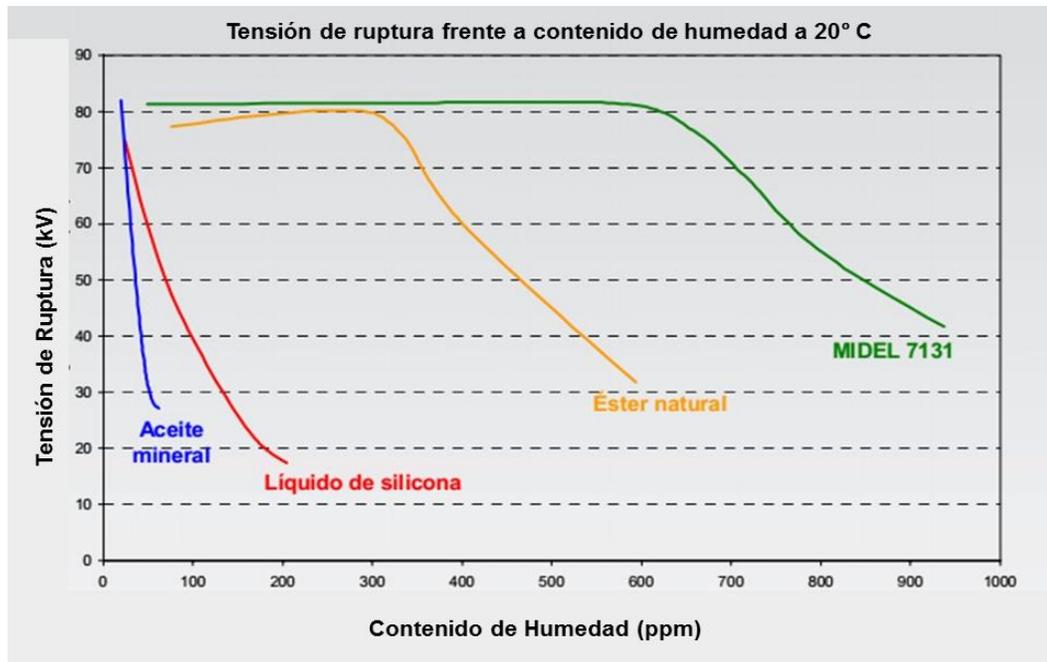


Figura 12. Tensión de ruptura frente a contenido de humedad a 20°C

La tolerancia a la humedad es importante en los transformadores, por lo siguiente:

- La humedad reduce la rigidez dieléctrica del fluido, incrementando el riesgo de falla en los equipos.
- Si un fluido es capaz de absorber un mayor contenido de humedad, el aislamiento sólido tendrá menor humedad, lo que redundará en una reducción de la tasa de envejecimiento del sistema aislante.
- Según la norma IEC 60076-14 la temperatura de generación de burbujas está directamente relacionada con el contenido de humedad en la celulosa. Si el fluido absorbe más humedad, el aislamiento sólido estará más seco, lo que incrementará el margen de seguridad durante sobrecargas.
- Si la capacidad de absorción del fluido es baja es posible que con los cambios de temperatura del transformador provocados por la carga de operación, se genere agua libre al interior del equipo. Lo anterior provocará fallas eléctricas en el transformador [18].

2.2.3.3 Aceite aislante vegetal

Los fluidos de éster natural, derivados de aceite de semillas aplicados en transformadores alcanzan un balance entre propiedades dieléctricas adecuadas y propiedades ambientales no encontradas en otros fluidos. Los esteres basados en semillas, incluidas las grasas líquidas y aceites se derivan del glicerol y se conocen como triglicéridos. Los segmentos ácidos grasos son formados de cadenas directas que tienen un número par de átomos de carbono. En la Figura 13 se muestra la estructura de un triglicérido, donde los (R, R', R''), son radicales que consisten en la cadena de C8-C22.

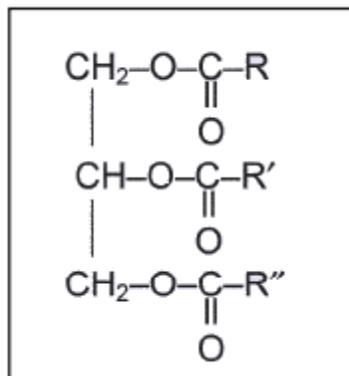


Figura 13. Estructura de un éster natural (aceite vegetal) triglicérido

Los fluidos de este tipo deben de cumplir con ciertas pruebas antes de ser recibidos y utilizados. El aceite vegetal tiene alta capacidad de absorber agua mucho más que el aceite mineral aumentando la capacidad de extraer el agua del papel aislante, lo que permite evitar la degradación del papel aislante [19].

Propiedades físicas

En la tabla 7 se muestran las propiedades físicas de un aceite vegetal.

Tabla 7. Propiedades físicas del aceite vegetal [20]

Propiedad		Valores	
Color		Amarillo, verde	
Apariencia		Clara y limpia	
Viscosidad	mm ² /s (cSt)	40 °C	33
		100 °C	7.9
Punto de fluidez	°C	-21	
Punto de combustión	°C	357	
Punto de inflamación	°C	328	
Densidad relativa		0.92	
Conductividad térmica	W/m K (25 °C)	-3.3	

2.2.3.3 Tipos de aceite aislante vegetal

Se ha mencionado en temas anteriores que durante años los transformadores han empleado primordialmente como elemento aislante y refrigerante a los aceites derivados del petróleo. Actualmente los aceites naturales se han considerado alternativas del aceite mineral debido a sus ventajas en cuanto a seguridad y principalmente al medio ambiente.

En este apartado se mencionan dos tipos de aceite aislante dieléctrico, el fluido FR3 (de mayor disponibilidad en el mercado), y el al aceite VG-100 (en proceso de introducción al mercado). Ambos fluidos son derivados de la semilla de soya.

Los fluidos vegetales están recomendados para aplicación en transformadores de interiores, sumergibles y en zonas densamente pobladas.

También son una excelente opción para instalaciones a la intemperie, en redes o en bóvedas subterráneas donde es necesario un margen adicional de seguridad contra explosión e incendio. También son preferibles cuando se necesita una protección contra impacto ambiental adverso en comparación con otros fluidos dieléctricos como el aceite de transformador convencional.

2.2.3.3.1 Aceite Vegetal FR3

El fluido FR3 es un refrigerante dieléctrico resistente al fuego, basado en éster natural. No contiene petróleo, halógenos, silicones por lo que se degrada rápido en suelo y en ambientes acuáticos.

El aceite FR3 es compatible con materiales de aislamientos, con componentes estándar de los transformadores y con equipos y procedimientos de procesamiento de aceites. [21].

Propiedades fisicoquímicas y eléctricas

En la tabla 8 se muestran las propiedades de un éster natural típico [22].

Tabla 8. Propiedades fisicoquímicas y eléctricas de un éster natural

Ensayo		Método	Ester natural ASTM D6871
rigidez dieléctrica [kV]		D877	≥30
	gap 1 mm	D1816	≥20
	gap 2mm		≥35
Factor de disipación [%]		D924	
	25°C		≤ 0.20
	100 °C		≤ 4.0
viscosidad cinemática [mm ² /s]		D445	
	40 °C		≤ 50
	100 °C		≤ 15
contenido de humedad [mg/kg]		D1533	≤ 200
Punto de fluidez [°C]		D97	≤ -10
Índice de neutralización [mg KOH/g]		D974	≤ 0.06
Tendencia de gasificación [µl/min]		D2300	≤ 0
Tensión interfacial [mN/m]		D971	-
Punto de inflamación [°C]		D92	≥ 275
Punto de combustión [°C]		D92	≥ 300

Seguridad contra incendio

El fluido FR3 tiene un punto de inflamación de 330°C y un punto de ignición de 360°C.

Medio ambiente y salud

En la Figura 14 se presenta la tasa de biodegradación del fluido FR3.

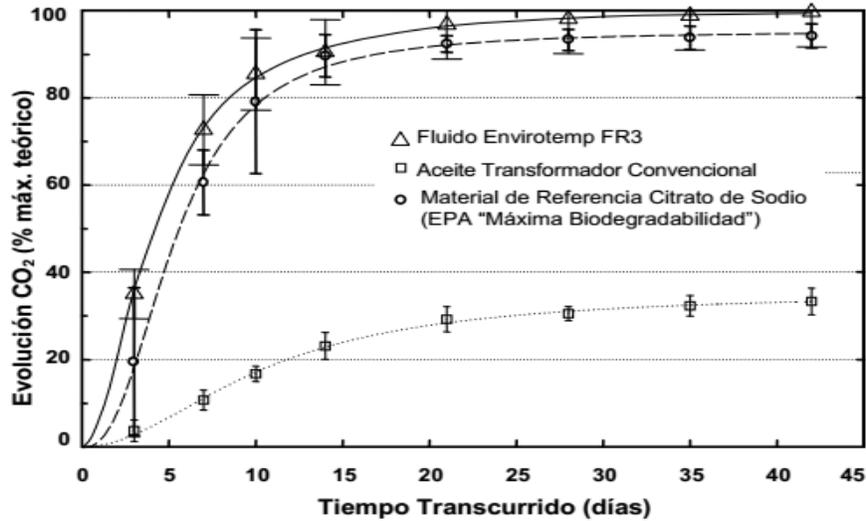


Figura 14. Comparación de biodegradación acuática aeróbica [21]

Aplicaciones

En el anexo 1 se muestra la lista de usuarios de fluido FR3 en transformadores de baja y alta tensión tanto en equipos rellenos como nuevos. Se observa que el fluido FR3 ha sido usado y comprobado a nivel internacional en transformadores de potencia de 13.8 hasta 242 kV. Lo que se engloba un total de 91 equipos nuevos, 58 rellenos y 4 reconstruidos [23].

Rellenado de transformadores con aceite convencional.

El fluido FR3 es muy adecuado como fluido de sustitución para mejorar el margen de seguridad de los transformadores llenos con líquido, tanto en los aspectos ambientales como de protección contra incendio. Es totalmente mezclable con el aceite de transformador convencional, hidrocarburos de alto peso molecular.

Diferentemente del relleno con otros fluidos resistentes al fuego, el residual de aceite que permanece en el transformador no ira a reducir típicamente el punto de combustión debajo del mínimo de 300°C.

Otras ventajas del relleno con fluido FR3 incluyen alta rigidez dieléctrica, constante dieléctrica muy próxima a la de papel Kraft aislante, excelente lubricidad, compatibilidad con los materiales y un coeficiente de expansión similar al aceite de transformador convencional. El fluido también actúa como agente secante para el aislamiento del transformador que se humedeció con el envejecimiento, esta propiedad ayuda a prolongar la vida útil del sistema de aislamiento del transformador [21].

Compatibilidad con materiales y equipos

La compatibilidad de los esteres naturales con cada uno de los elementos que conforman el transformador es un aspecto que debe estar claro. El deterioro de las partes a causa de la interacción entre materiales no debe ser permitido para garantizar la vida útil de diseño.

Estudios muestran que el aceite vegetal puede retener considerablemente más agua que el aceite mineral. Esta propiedad mejora las características de envejecimiento del papel al mantenerlo más seco. El resultado final es una capacidad térmica del aislamiento papel-aceite más alta, lo que en principio puede permitir operaciones del transformador por encima de sus valores de placa sin afectar su vida útil.

2.2.3.3.1 Fluido VG-100

VG-100 es un aceite dieléctrico constituido de esteres naturales provenientes de semillas comestibles perfeccionado para su aplicación en equipos eléctricos. Fue desarrollado por Prolec GE en 2009 como una alternativa ambientalmente amigable, ya que su composición es 100% natural, libre de aditivos o cualquier compuesto derivado del petróleo.

El aceite VG-100 cumple con los requerimientos y estándares, tanto nacionales como internacionales, para su aplicación en transformadores eléctricos.

Características del aceite VG-100

VG-100 cumple satisfactoriamente con los requerimientos establecidos por las especificaciones internacionales para aceites vegetales.

En la tabla 9 muestra los valores típicos de las propiedades del aceite vegetal.

Tabla 9. Características del VG-100 [24].

Propiedades	Estándar	Valor típico
Rigidez dieléctrica (kV)	ASTM D1816	>60
Factor de potencia (%)	ASTM D924	0.08
Densidad	ASTM D129	0.916
Viscosidad (cSt)		
0 °C		178
40 °C	ASTM D445	31
100 °C		6
Color	ASTM D1500	L0.5
Punto de inflamación (°C)	ASTM D92	330
Punto de combustión (°C)	ASTM D92	352
Punto de fluidez (°C)	ASTM D97	-12 a -15
Biodegradabilidad	OECD 301F	Rápidamente biodegradable (100%)
Toxicidad	OECD 203	Mortalidad cero

- Resistencia a la flama
 - Alto punto de inflamabilidad (>300 °C)
 - Certificaciones de seguridad FM Y UL
 - Auto-extinguible
 - Reducción de riesgos de incendio
 - Menor costo de protección contra incendio

- Protección al medio ambiente
 - Aceite dieléctrico 100% natural
 - Rápida y completamente biodegradable
 - No contamina el agua
 - No tóxico
 - Reducción de riesgos ambientales

- Desempeño
 - Compatibilidad con los materiales del transformador
 - Libre de azufre corrosivo y compuestos BPC
 - Mayor capacidad de sobre-carga en el equipo
 - Solución para re-llenado de unidades
 - Incrementa la vida útil de aislamiento
 - Mayor capacidad de retención de humedad en el aceite

2.2.3.3 Comparación de fluidos aislantes

Tensión de ruptura

La figura 15 muestra la tensión de ruptura a la temperatura de 20°C del MIDEL 7131, aceite mineral y el éster natural con niveles de humedad en aumento. MIDEL 7131 mantiene una tensión de ruptura alta >75 kV cuando los niveles de humedad son superiores a 600 ppm.

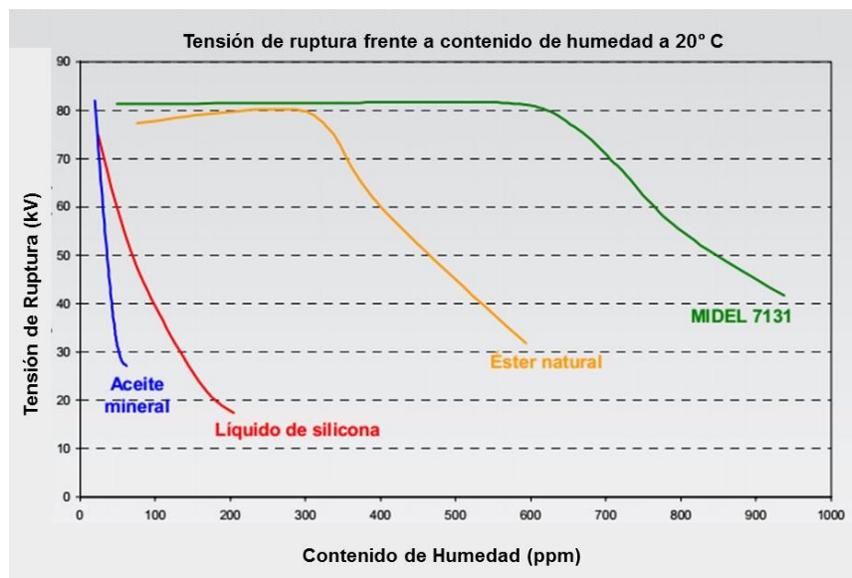


Figura 15. Comparación de tensión de ruptura en función de la humedad

Biodegradación

La tabla 10 y la figura 16 muestra la biodegradabilidad de los diferentes fluidos aislantes en una prueba de 28 días.

Tabla 10. Comparación de la biodegradación de diferentes fluidos aislantes

Fluido aislantes	Biodegradabilidad a los 28 días
Aceite mineral	<10%
Éster natural	95%
Éster sintético	89%

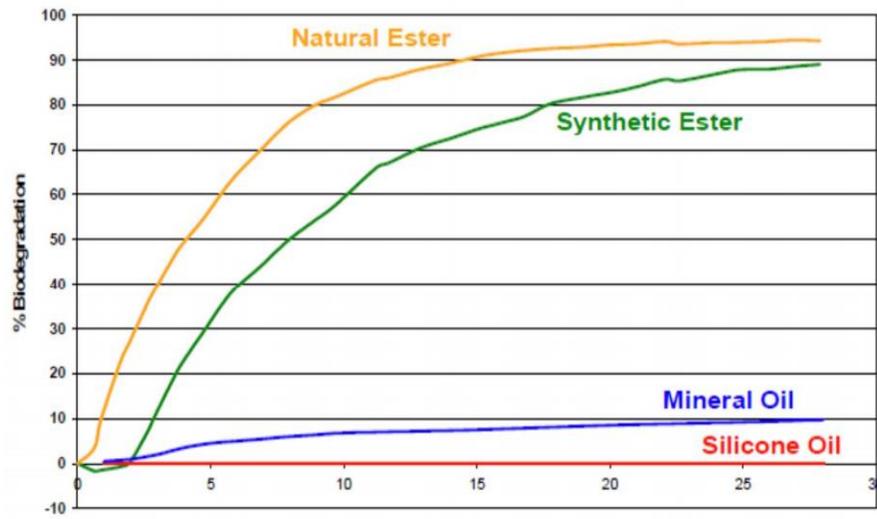


Figura 16. Comparación de la biodegradación de diferentes fluidos aislantes

Punto de inflamación e ignición

En la tabla 11 se comparan los puntos de ignición y combustión, los valores del el éster natural son mayores que los otros fluidos lo que representa una ventaja en caso de tener un riesgo de incendio.

Tabla 11. Comparación de puntos de inflamación e ignición de diferentes fluidos aislantes

Fluido aislante	Punto de inflamación °C	Punto de Incendio °C	Clase
Aceite mineral	160-170°C	170-180°C	O
Éster natural	>300	>350	K2
Éster sintético	>250	>300	K3

Saturación de humedad

En la tabla 12 y en la figura 17 Los esteres tienen valores más altos de saturación en todas las temperaturas que el aceite mineral

En condiciones normales, la saturación de agua del estere natural es de 5 a 8 veces la de aceite mineral ya que tienen una mayor afinidad por el agua.

Tabla 12. Comparación de saturación de humedad de diferentes fluidos aislantes

Fluido aislante	Saturación de agua aproximadamente a 23°C (ppm)
Aceite mineral	55
Éster natural	1100
Éster sintético	2600

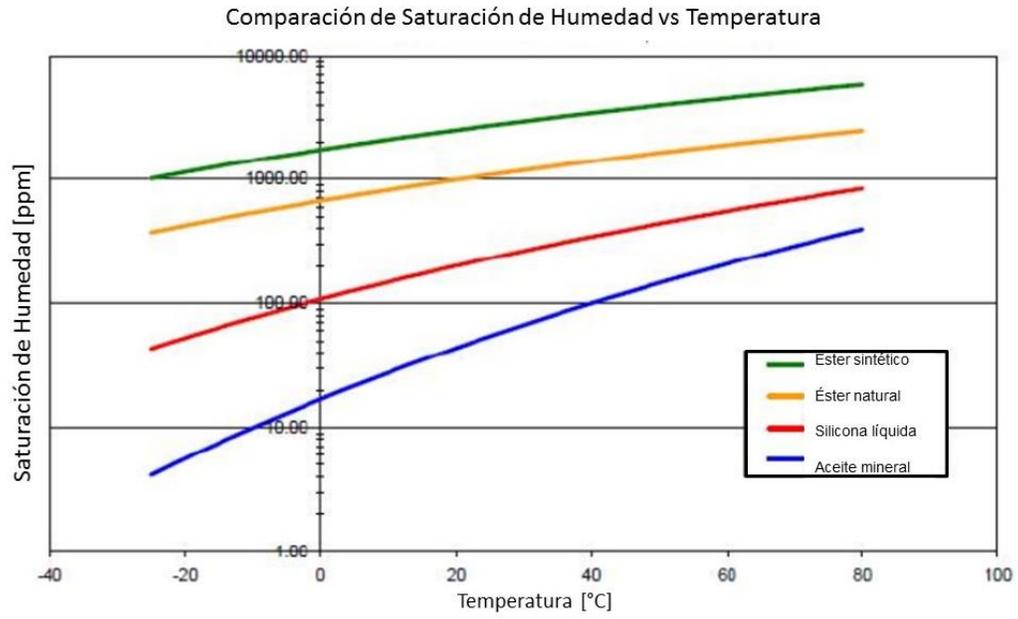


Figura 17. Comparación de saturación de diferentes fluidos aislantes

2.3 Aislamiento sólido

El aislamiento sólido de los transformadores de potencia está constituido por papel y cartón prensado, cada uno de ellos tiene características particulares con base en su manufactura. Debido a su función es considerada la parte más importante del sistema aislante hasta el grado de decir que la vida del papel es la vida del transformador.

El aislamiento sólido del transformador cumple las funciones de aislar las partes metálicas con tensión, dividir los espacios de aceite en volúmenes más pequeños para soportar mayores gradientes de campo y soportar mecánicamente los conductores y devanados con el resto de la estructura [25].

2.3.1 Estructura de la celulosa

En la figura 18 se muestra la composición química de la celulosa de algunos tipos de madera. El alfa celulosa requerida para la fabricación del papel es la cadena de carbohidratos de alto polímero que consiste en unidades de glucosa con un nivel de polimerización aproximadamente 2000.

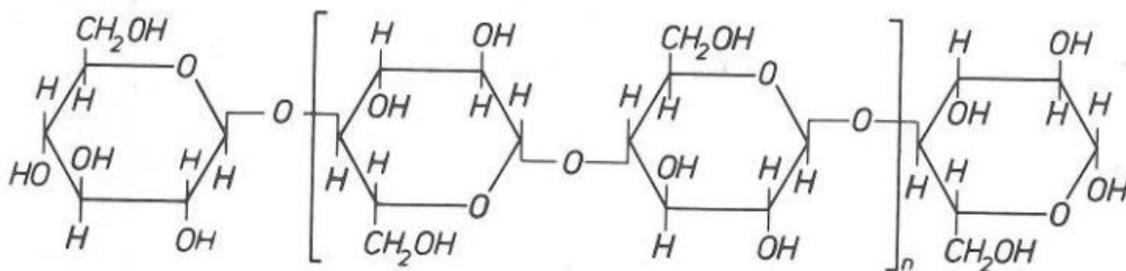


Figura 18. Fórmula química de la celulosa

La hemicelulosa son los segundos componentes principales de materias primas vegetales que son carbohidratos con un nivel de polimerización de menos de 200. En una cantidad limitada facilitan el proceso de enlace de hidrogeno importante para la resistencia mecánica que se reduce si su cantidad es superior al 10 %.

Además del 40-60% de fibras de celulosa, la madera todavía contiene otras sustancias. La lignina que proporciona una sustancia de unión de fibra rígida, esta y otras impurezas debe ser separada y se lavan por medio de diferentes procesos químicos. Sin embargo, todos estos procesos deben llevarse a cabo de tal manera que no sea atacada la celulosa, y de esta forma se aplica al tratamiento a las fibras de celulosa del papel y *transformerboard* (*papel de mayor espesor*). En la tabla 13 se muestran las propiedades más importantes de los tres tipos de celulosa de madera blanda [26].

Tabla 13. Comparación de sulfato de celulosa de diversas materias primas

	Pino	álamo	paja
Longitud de fibra en mm	2.5	1.3	1.3
La lignina en %	1.0	1.0	1.0
Hemicelulosa en %	5-6	20	23-25
Ceniza en %	0.5	1.0	2-3
Tiempo de refinación en mín.	20-100	20-60	20-10
Grado de refinación in SR	15-50	23-50	60-50
Longitud de ruptura	10,000	9,000	8,000-7,000
alargamiento en%	3-4	3.5-4	4-4
fuerza de ruptura en kp/cm ²	3-7	3.5-5	5-4
Resistencia plegable	5,000	3,000	2,000-1,000
Resistencia mecánica en p	110	90	50-70

2.3.2 Características del papel como material aislante

El papel es el aislamiento sólido que se utiliza en transformadores de potencia. Está formado por fibras de celulosa extraída de compuestos, tales como las fibras de algodón, la madera, etc. Sin embargo, la celulosa no se encuentra en estado puro en la naturaleza. La fibra de algodón es la fuente natural de la celulosa más pura que existe ya que contiene un 95% de esta y 5% de otras sustancias.

Durante el proceso de fabricación del papel, la madera es tratada químicamente para reducir el contenido de la lignina y pentosas en los papeles para aislamiento eléctrico.

El papel aislante usado en los transformadores de potencia debe cumplir con lo siguiente:

- Espesor entre 30 y 120 μm y una densidad aproximada entre 0.7 y 0.8 g/cm^3 [11].
- Rigidez dieléctrica (50 a 60 Hz), entre 10 y 150 kV/cm en condiciones secas y cuando es aplicado dentro de capas delgadas [10].
- Resistencia mecánica de 6 a 8 kN .
- La permitividad del papel seco varía de 1.5 a 3.5 y su factor de disipación ($\tan\delta$) varía entre 0.003 y 0.004.
- La resistividad del papel seco varía entre 10^{15} y $10^{17} \Omega\text{cm}$.

El papel tiene que estar protegido del contacto directo con la humedad para mantener sus propiedades dieléctricas, debido a la alta afinidad del papel al agua. Las propiedades del papel se deterioran bajo los efectos del calentamiento, agua y oxígeno. El envejecimiento del papel principalmente causa un deterioro de las propiedades mecánicas y reducción de la rigidez dieléctrica. Así mismo en el

transformador existen áreas, las cuales soportan altas tensiones eléctricas y mecánicas. Estas tensiones mecánicas pueden no ser soportadas por el papel aislante y por esta razón, para determinadas condiciones se usa el *pressboard* prensado.

2.3.3 Características del *pressboard* como material aislante

El *pressboard* es el material más importante del aislamiento celulósico ya que los anillos aislantes están fabricados con este material.

El proceso de producción de *pressboard* se realiza comprimiendo varias capas finas de papel en un medio húmedo, sin utilizar ningún tipo de material de unión. Dependiendo del espesor de la capa de *pressboard* se mejora la calidad final de dicho material, la calidad depende de lo fino que sea cada capa.

Dependiendo de la tecnología de producción se distinguen esencialmente dos tipos de *pressboard*:

Pressboard calandrado: Obtenido por prensado, posteriormente secado sin presión y, finalmente, enrollado bajo unas condiciones de presión elevadas. La densidad del producto final es de 1.15 a 1.3 kg/dm³.

Pressboard precomprimido: El proceso consiste en deshidratar el material, solidificarlo y secarlo. Su densidad es cercana a 1.25 kg/dm³.

Las propiedades eléctricas del *pressboard* impregnado en aceite son muy buenas: la rigidez dieléctrica a una presión de 2.7×10^{-2} mbar es de 200 a 250 kV/cm. La permitividad es de 4.4 a 4.5. El factor de pérdidas dieléctricas es de 40×10^{-4} a 130°C [11].

Las propiedades mecánicas del *pressboard* son excelentes. La tensión mecánica de un cartón precomprimido de una densidad de 1.25 kg/dm³, se encuentra en el intervalo de 95 a 125 N/mm² y su elongación es de 2.3 a 4.6% [10].

2.3.4 Fabricación del *transformerboard*

En la figura 19 se muestra el proceso de fabricación del *transformerboard*, al principio el proceso es idéntica a la fabricación del papel. Las hojas puras y vírgenes de sulfato de celulosa almacenadas en balas de 200 kg se suministran a las fábricas por barco y ferrocarril. La celulosa se dispersa en el agua en un pulper de capacidad de 20 m³ y se almacena temporalmente. Las fibras individuales son trituradas a fin de exponer una superficie adicional. La fuerza del papel y del *transformerboard* se determina principalmente por las fuerzas de unión entre las fibras. Estas fuerzas de enlace son influenciadas principalmente por el tipo y grado de refinación.

Las fibras separadas de esta manera se mezclan con agua y la mezcla se somete de nuevo a una limpieza intensiva. En esta operación, las fibras de celulosa de sulfatos

puros que no cumplan con los estándares de alta calidad se extraen, ya que pueden entrelazarse y formar pequeños nudos en lugar de flotar en el agua en forma de fibras individuales.

La mezcla de celulosa agua se dirige a una amplia pantalla, cilíndrica giratoria, mientras que el agua fluye a través de la pantalla cilíndrica, las fibras de celulosa se filtran la superficie de la pantalla y forman una capa de papel. Una capa de fieltro se elimina de la banda de papel, en este caso tres pantallas y se transmiten tres capas de papel para formar el rollo. El rollo consta de 35 capas de aproximadamente de 30 μm de espesor de *transformerboard* [26].

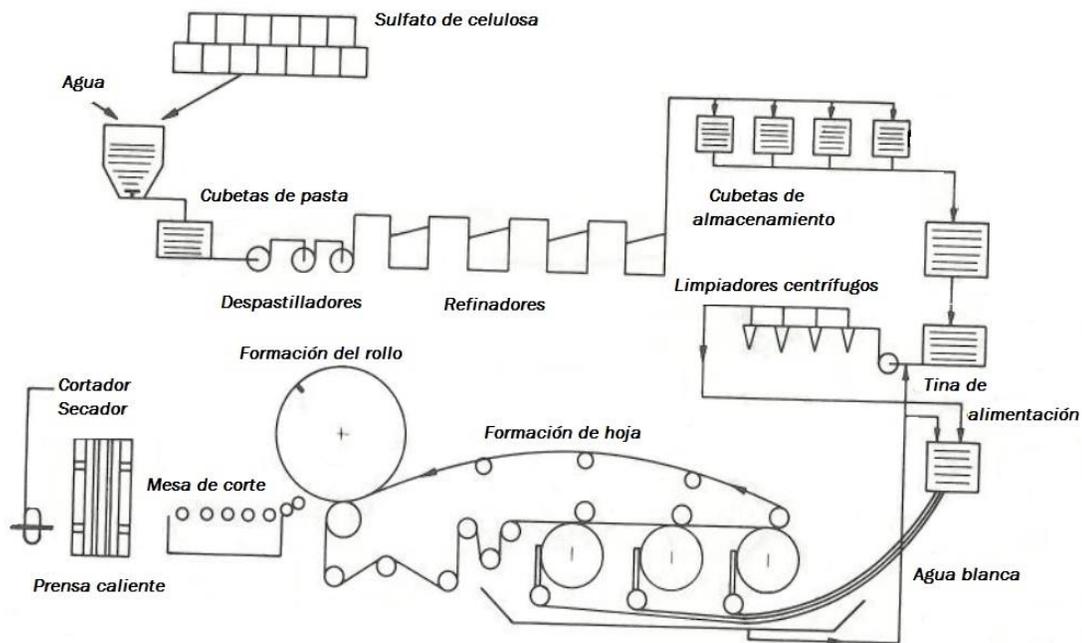


Figura 19. Diagrama de la producción de transformerboard precomprimido

2.3.4.1 La tecnología de fabricación

Todos los pressboards de 0,3 - 8,0 mm de espesor están fabricados en un tipo de proceso de cilindro por lotes. Esto implica laminado húmedo de muchas capas delgadas sin un pegamento para formar el grosor requerido. Esto se hace en la máquina de fabricación de tablero continuo de enrollado de la capa de papel sobre el rodillo.

2.4 Preparación de materiales aislantes (secado e impregnación de aceite)

2.4.1 Requisitos para el aceite del transformador

Un aceite aislante debe exhibir las siguientes características principales como una alta rigidez dieléctrica que es esencialmente determinado por el contenido de agua y la presencia de tejido fibroso similar a las impurezas. Sin embargo, el aceite debe ser principalmente resistente a descargas parciales. Esto implica que el aceite no se descompone, liberando gas, bajo la influencia de las descargas eléctricas.

Además, un aceite de calidad debe exhibir las características de enfriamiento que incluyen baja viscosidad, una temperatura de solidificación tan baja como sea posible, y sin tendencia a formar lodos durante la operación.

2.4.2 Requisitos de los materiales aislantes sólidos (Papel y *transformerboard*)

El secado y la impregnación del papel o *transformerboard* son de gran importancia y las principales razones son las siguientes:

- 1.- La reducción de la resistencia eléctrica cuando el contenido de humedad es demasiado alto.
2. Envejecimiento acelerado en presencia de humedad.
- 3.- Tensión de ruptura debido a una alteración del equilibrio de humedad
- 4.-Baja tensión de inicio de descarga parcial y mayor intensidad de descarga parcial en presencia de humedad.

En la figura 20 se muestra como la tensión de aguante al impulso en el papel depende del contenido de humedad. La disminución de la resistencia eléctrica es evidente tan pronto como el contenido de humedad del papel es sustancialmente mayor que el 0.1%.

La presencia de humedad también influye en el envejecimiento del papel o *transformerboard*. Los análisis han demostrado que en un papel con un 1 % de contenido de humedad, el envejecimiento es 10 veces más rápido que con el 0.1% (ver Figura 21).

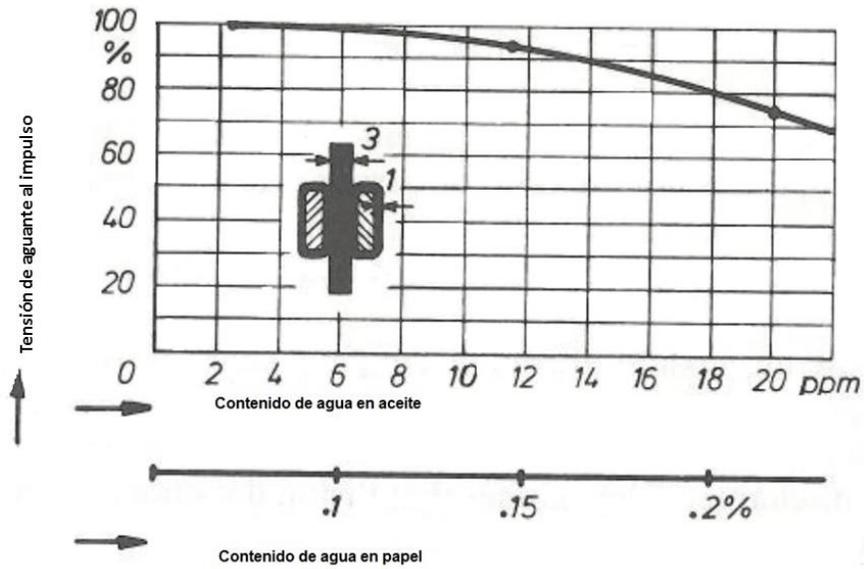


Figura 20. Tensión de aguante al impulso del papel

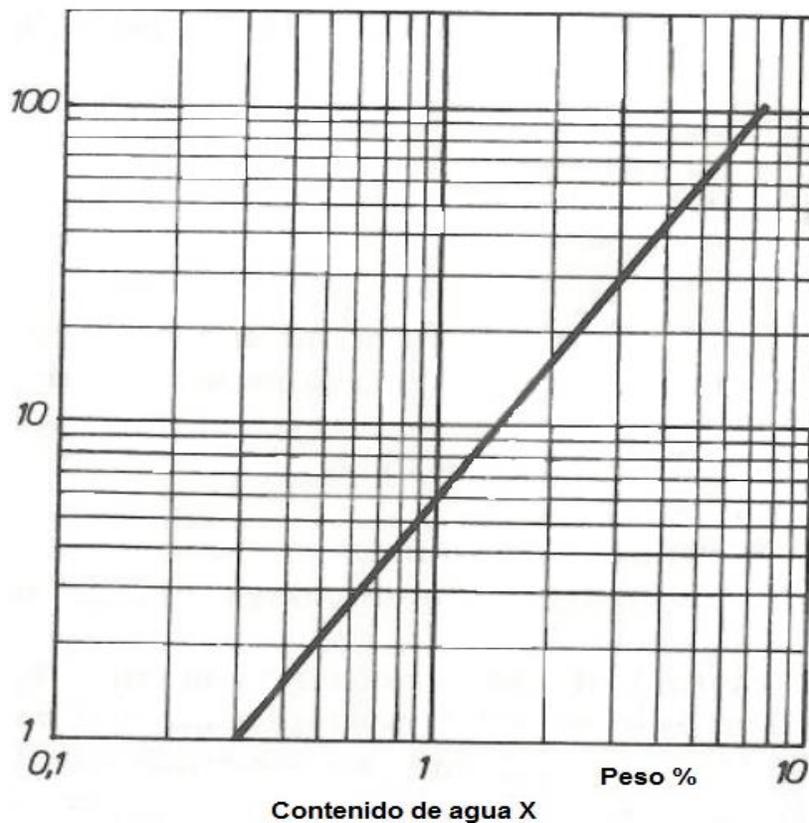


Figura 21. Influencia de la humedad del papel en el tiempo de envejecimiento de papel

2.4.3 Fundamentos teóricos de secado

Un papel húmedo se seca en tres etapas, en la primera etapa el secado se realiza una capa a la vez hacia el interior del papel ya que el proceso no es totalmente claro debido a la composición no homogénea y a las propiedades higroscópicas. En la segunda etapa la velocidad de secado se reduce, el vapor generado debe escaparse por el estrecho de los poros de las capas de papel adyacentes ya secos, la trayectoria de difusión se convierte en más tiempo con menor contenido de humedad. En la tercera etapa, la velocidad de secado disminuye rápidamente a temperatura constante. Durante el proceso, la humedad debe ser transformada primero de líquido a vapor, es posible acelerar este proceso mediante la reducción de la presión.

Para vencer la resistencia de flujo debe existir una diferencia de presión entre el punto de evaporación y la superficie del papel. El secado no se produce en la dirección de la superficie si no en dirección de la capa, para determinar el grado de secado se utiliza diversas mediciones indirectas como pérdida de ángulo, la constante dieléctrica o la resistencia del aislamiento.

El tiempo de secado para un bloque de 100 x 100 mm fueron 120 horas a una temperatura de secado de 90°C y una presión de vacío de aproximadamente 0.1 Torr. El tiempo se reduce a 50 y a 25 horas cuando se aumenta la temperatura a 120°C y a 135°C respectivamente. Una temperatura de secado superior a 120-125°C, el material está sujeto a fuertes presiones térmicas que puede agrietarse y también perjudica a la resistencia mecánica debido a esto deben ser evitadas las altas temperaturas.

2.4.4 Impregnación de *Transformerboard*

La impregnación es un proceso en el que se utiliza el aceite para llenar los poros existentes en el papel. Para un material celulósico, la impregnación de aceite puede suceder en las cavidades entre las fibras o en los huecos de la propia fibra. Por ejemplo, cuando un material celulósico se impregna con agua, las fibras se expanden y el volumen aumenta.

El proceso de impregnación se rige por dos mecanismos:

1.- La acción capilar, el aceite puede fluir en los espacios estrechos dentro de cartón prensado sin la ayuda de cualquier fuerza externa, como la gravedad. Este mecanismo es solo una consecuencia de las fuerzas intermoleculares entre líquido y las superficies sólidas.

2.-La fuerza aplicada por el aceite en la pared de las muestras, como las fuerzas o presiones gravitacionales del aceite en las paredes del cartón prensado.

Los factores que influyen en la entrada del aceite en material a base de celulosa se pueden clasificar en dos grupos:

1. Factores relacionados con el material celulósico: El factor más importante que influye en la penetración de aceite es la estructura capilar, la geometría de los capilares y su accesibilidad. Estos son diferentes en madera laminada, papel, cartón prensado y transformerboard laminado. Las dimensiones de las piezas del material influyen en la entrada de aceite. Además, en ciertos tipos de aislamiento sólido (como TIV y TX) se utiliza pegamento entre las capas de papel y por lo tanto el flujo de aceite ocurre en una dirección paralela a las capas.
2. Factores relacionados con el aceite de impregnación: La característica más importante que afectan a la ascensión capilar y el caudal en materiales celulósicos son la viscosidad del aceite la tensión superficial y la solubilidad del aire.

El proceso de impregnación debe llevarse a cabo con una adecuada presión de vacío [27]. En la figura 22 se muestra que los valores de ruptura del *transformerboard* entre electrodos están influenciadas por la calidad del vacío durante la impregnación.

Es evidente que la formación de burbujas de gas debe ser evitado en vista de la posibilidad de descargas parciales. Por esta razón, se recomienda un vacío de menos de 1 torr durante el proceso de impregnación.

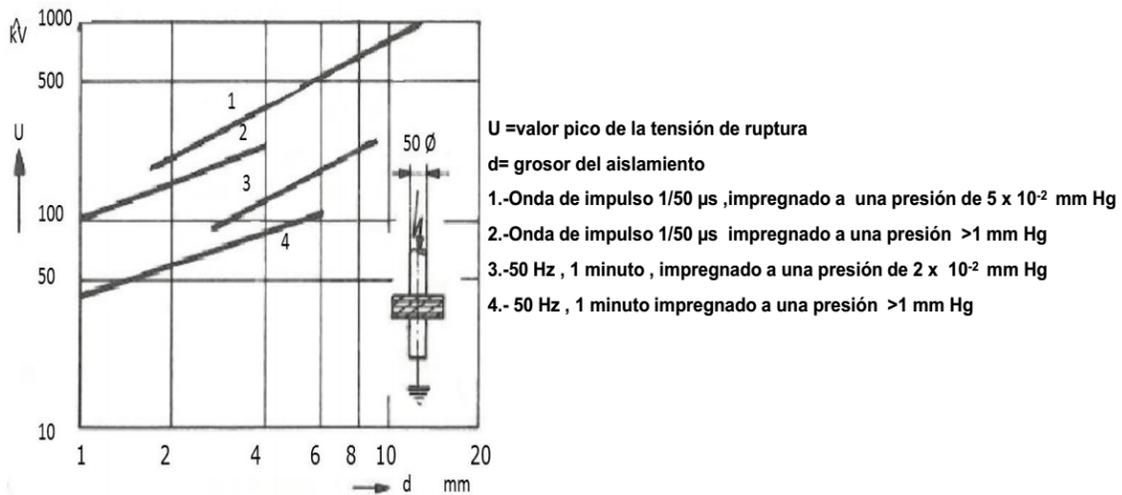


Figura 22. Tensiones de ruptura de *pressboard* impregnados de aceite

Algunas dificultades pueden ocurrir durante la impregnación de grandes bloques de soporte o transformerboard precomprimido, se puede observar en la figura 23 la velocidad de la penetración del aceite en transformerboard precomprimido. De manera similar a la operación de secado, el material adherente impregnado de aceite es paralelo a la laminación, de este modo es posible obtener una impregnación completa para *transformerboard* precomprimido pero se requiere un periodo de tiempo largo.

Por ejemplo, 380 horas son requeridas para la impregnación del anillo de fijación de 200 mm de ancho a la temperatura del ambiente. Este periodo puede reducirse mediante el calentamiento del aceite, a una temperatura 90°C de aceite, el periodo de impregnación para el mismo anillo de sujeción es sólo una décima parte de la duración requerida para la impregnación a 20 °C.

La posibilidad de reducir el período de impregnación debe ser observada cuando hay relativamente poco tiempo disponible entre la impregnación y la prueba de alta tensión. En tales casos, la medición de descarga parcial resulta sustancialmente mejor después de la operación de calentamiento que antes. También, la provisión de agujeros de secado e impregnación en grandes soportes ha demostrado ser beneficioso.

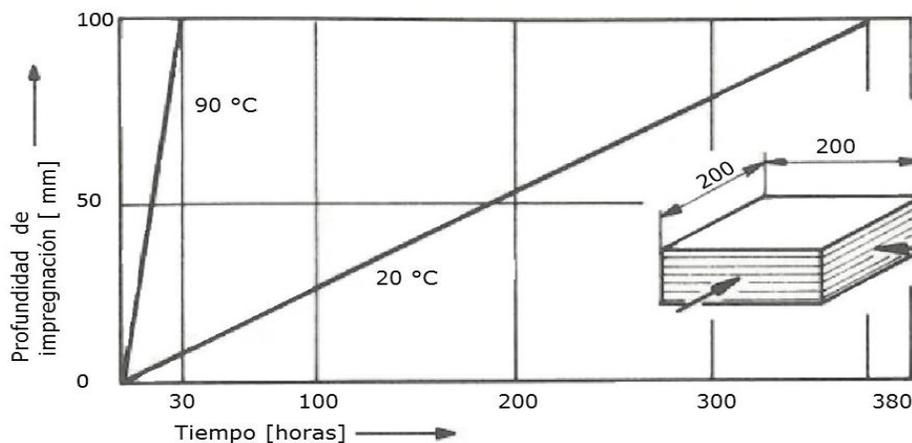


Figura 23. Impregnación de TRANSFORMERBOARD precomprimido

Las características de secado e impregnación de transformerboard se examinaron en las muestras de placas de 200 x 200 x 15 mm con un orificio central de secado y dos superficies laterales selladas. Las muestras fueron sometidas a tratamiento primero en la circulación de aire a 100 °C durante 24 horas y luego bajo vacío durante 14 días a 120 °C, las muestras fueron sumergidos con a) aceite de 90 °C y b) el aceite frío a temperatura ambiente. El vacío fue removido inmediatamente después.

El gráfico de la figura 24 muestra el proceso de secado de las muestras y la figura 25 muestra el curso de impregnación a 20°C y 90°C. La impregnación a la temperatura de 90°C se completó después de 23 horas y después de 10 días a 20°C [26].

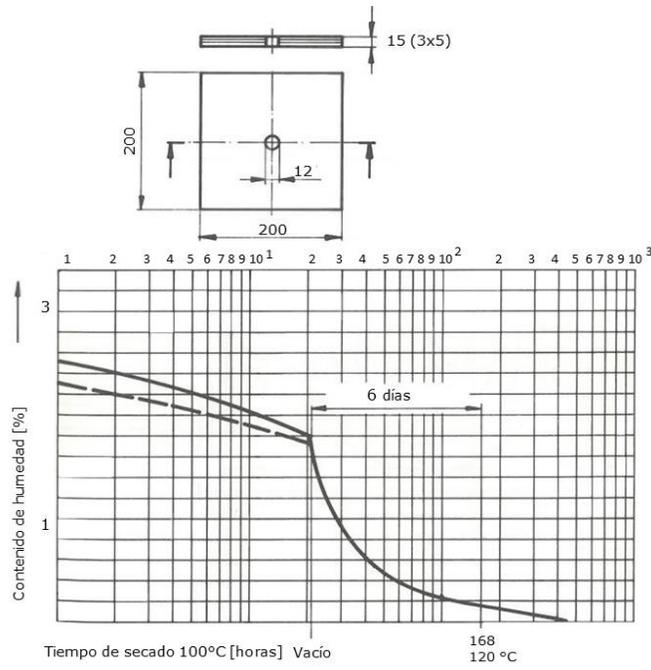
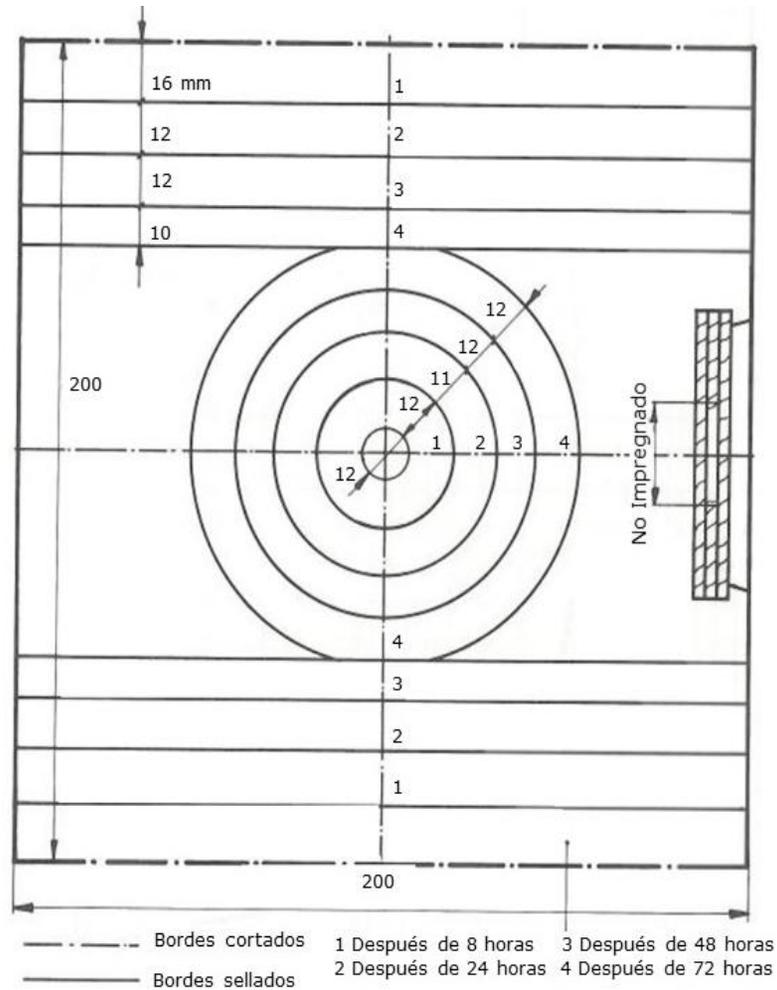
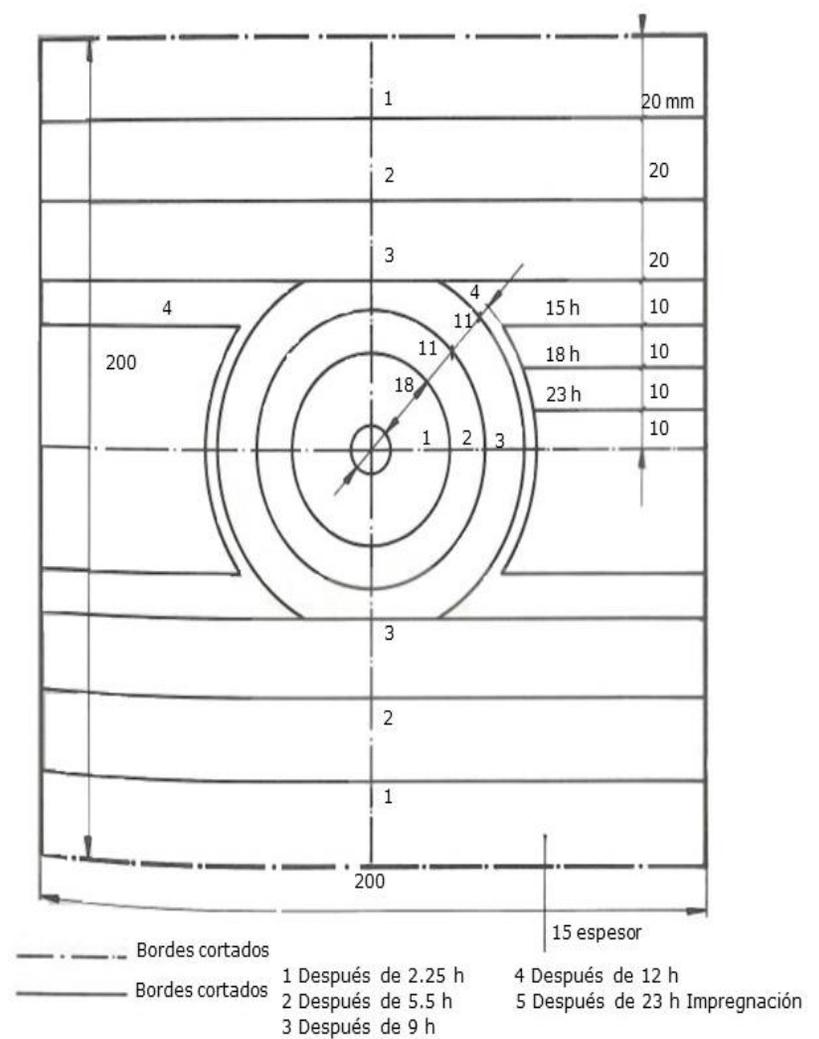


Figura 24. Prueba de secado de laminado Transformerboard precomprimido



(a)



(b)

Figura 25. Impregnación a) 20°C b) 90°C



Capítulo 3. Procedimiento y descripción de las actividades

3.1 Materiales y equipos

Los materiales utilizados en los procesos de secado e impregnación de aislamientos solidos se presentan en la tabla 14.

Tabla 14. Materiales y equipos para el secado e impregnación

Materiales	Equipos	Reactivos
Pressboard 5 x 5 cm (T4 con espesor de 3.4 mm y H1V2 de espesor 3.4 y 0.8 mm) Papel Manning 10 frascos cerrados con boca ancha de aproximadamente 430 ml. Segmentos de teflón de aproximadamente 1.5 cm con un espesor de 0.5 cm Guantes de nitrilo Tijeras Cúter Regla graduada 1 escobillón de cerda Paño de microfibra 1 pipeta graduada de 10 ml Termómetro de 100 ° c 2 vidrios de reloj 1 vaso precipitado de 100 ml 1 pinzas de crisol 1 probeta de 50 ml 1 Piseta	Balanza analítica Horno de secado Autoclave	Hexano Aceites aislantes : <ul style="list-style-type: none"> • MIDEL 7131 • Mineral • VG-100 Nitrógeno seco

3.2 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental de este proyecto se divide en dos partes:

- Determinar contenido de humedad del pressboard a evaluar
- Impregnación del aceite dieléctrico en pressboard y papel manning.

3.2.1 Secado de aislamiento sólido

Para este proceso es determinar el contenido de humedad del pressboard, las hojas de pressboard T4 y H1V2 se cortaron en segmentos de 5 x 5 cm (ver figura 26).



Figura 26. Segmentos de Pressboard T4 y H1V2 de 5 x 5 cm

Los segmentos de *pressboard* se acomodaron en la cuba del autoclave (ver figura 27) de manera que la transferencia de calor fuera uniformemente en todas las placas.



Figura 27. Distribución del *pressboard*

El *pressboard* se sometió a un proceso de secado rápido en el autoclave (ver figura 28) a una temperatura de 100 ° C aproximadamente durante 3 horas con la finalidad de determinar el contenido de agua en el aislamiento sólido.



Figura 28. Autoclave para el secado de pressboard

El secado se monitoreaba mediante un sensor (Marca Vaisala) el cual arroja tres parámetros: temperatura de rocío (Td °C), temperatura ambiente (°C) y la humedad relativa (% RH). Transcurrido el tiempo necesario se procedió a romper vacío con nitrógeno seco y se dejó estabilizar el sistema durante aproximadamente 18 horas.



Figura 29. Datos de los parámetros del Sensor Vaisala después de las 18 horas de estabilización

Con el valor de temperatura de punto de rocío se determinó la presión de vapor (Pv) del sistema, la cual fue de $P_v=29,463.9517$. La gráfica de conversión de punto de rocío se muestra en el anexo 3 de este reporte. Con el valor de la Presión de vapor y la temperatura del sistema registrada en el sensor Vaisala, se procede a determinar el contenido de humedad en el papel (WCP). En el Anexo 4 de este reporte se presenta la gráfica que se utilizó para determinar el WCP.

3.2.2 Impregnación del aceite aislante

En el procedimiento de impregnación fue el mismo para los tres tipos de aceites bajo estudio (mineral, vegetal y sintético). Inicialmente se pesa en la balanza analítica el *pressboard* o el papel Manning a utilizar, en el caso del papel se requiere una masa de 2 y 10 gramos (ver figura 30). El papel Manning viene en presentación de tiras de 1.5 cm de ancho, por lo que para tener un área uniforme, el papel se enrolló a una longitud de 5 cm.



Figura 30. Balanza analítica para la medición de masas de *pressboard* y papel Manning

En un frasco de vidrio limpio y seco se colocaron 150 ml aproximadamente de aceite seco proveniente del humectador (ver figura 31). Se añadieron dos segmentos de teflón que se utilizaron para evitar que el aislamiento sólido tocara el fondo del recipiente. El recipiente se colocó dentro del horno de secado (ver figura 32) a la temperatura de trabajo para homogenizar la temperatura del aceite durante 12 horas. Las temperaturas de impregnación del aislamiento sólido con los diferentes fluidos aislantes fueron 25, 40, 60, 80 y 100 °C.



Figura 31. Humectador del aceite aislante



Figura 32. Horno de secado para el calentamiento de aceite

Después de las 12 horas de estabilización del fluido, se procedió a sumergir el aislamiento sólido en el frasco con aceite, cuidando que el material quedara apoyado sobre el teflón. El momento en el que se introducía el aislamiento sólido al aceite se consideró como el tiempo cero o de inicio. **Nota:** El frasco debe estar dentro del horno a la temperatura de trabajo hasta que se termine el proceso de impregnación.



(a)



(b)

Figura 33. Acomodamiento del material sólido en el aceite a) papel Manning b) *Pressboard*

La masa del aislamiento sólido se determinaba antes de impregnación y cada hora una vez que se sumergía el aislamiento en el aceite. Para medir la masa del aislamiento impregnado se dejaba escurrir el exceso de aceite del papel Manning o pressboard como se muestra en la figura 34, tomando la muestra con la pinza de crisol. El proceso de impregnación concluía cuando la masa del material sólido se mantenía constante durante al menos 5 horas.



(a)



(b)



(c)

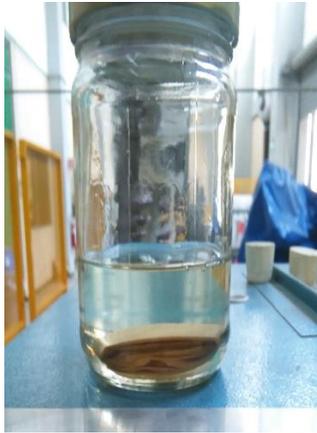


(d)

Figura 34. Escurrimento y pesado del *pressboard* y papel Manning

Con los datos de la experimentación se procedió a realizar las gráficas del % impregnación del aceite vs tiempo aplicando la siguiente fórmula

$$\% \text{ impregnación del aceite aislante} = \frac{[\text{masa del material sólido (g)}] [100]}{[\text{masa del material sólido completamente impregnado (g)}]}$$



(a)



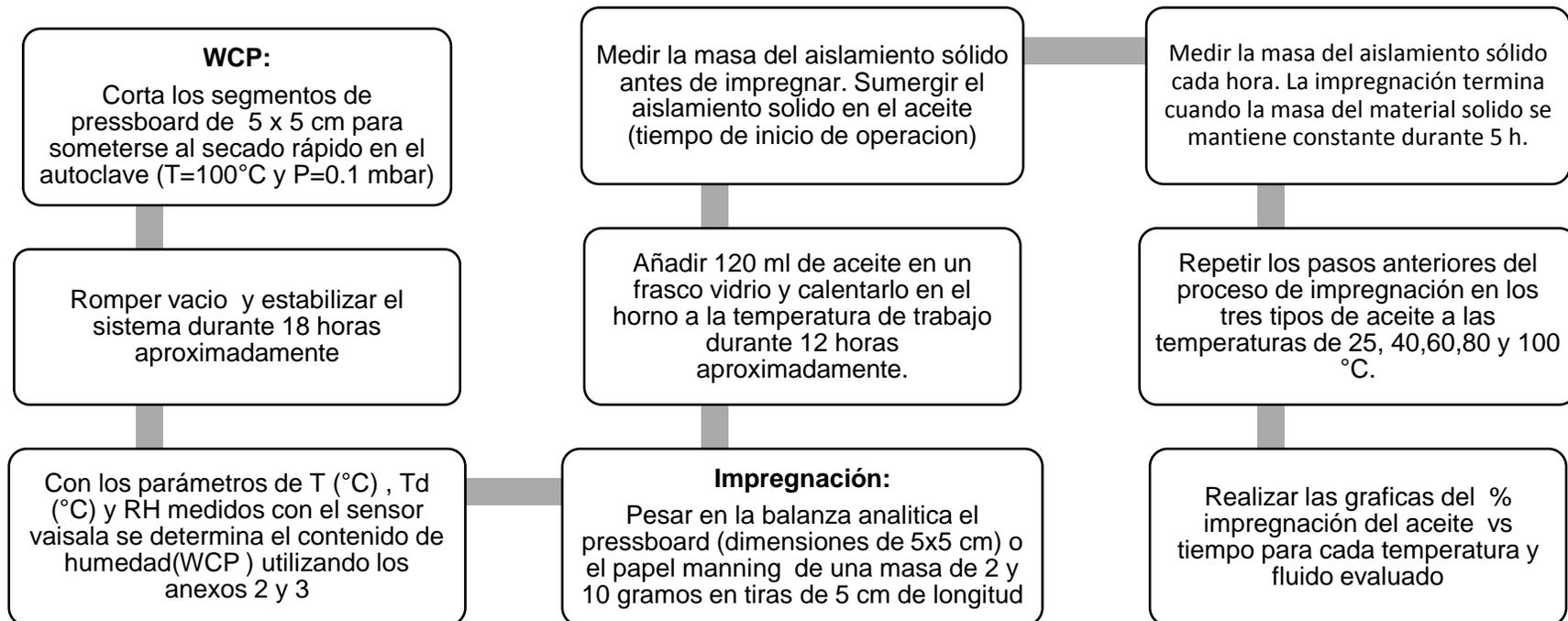
(b)



©

Figura 33. Muestras de aceite aislante a) MIDEL 7131 b) Mineral y c) VG-100

3.5 Diagrama de proceso



3.5 Tabla de procedimiento experimental

Tabla 15. Tabla de procedimiento experimental

Material aislante solido	Temperatura	Aceite aislante dieléctrico		
		Aceite mineral	Aceite sintético	Aceite vegetal
		Tiempo de impregnación al 100 % [h]	Tiempo de impregnación al 100 % [h]	Tiempo de impregnación al 100 % [h]
Pressboard T4 3.2 mm 	25	X	X	
	40	X	X	
	60	X	X	
	80	X	X	
	100	X	X	
Pressboard H1V2 3.2 mm 	25	X	X	
	40	X	X	
	60	X	X	
	80	X	X	
	100	X	X	
Pressboard H1V2 0.8 mm	25	X	X	
	40	X	X	
	60	X	X	

INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL



	80		X	X	
	100				
Papel Manning 2 gramos 	25		X	X	X
	40		X	X	X
	60		X	X	X
	80		X	X	X
	100		X	X	X
				X	X
Papel Manning 10 gramos 	25		X	X	X
	40		X	X	X
	60		X	X	X
	80		X	X	X
	100		X	X	X
Total de Experimentos			25	25	10



Capítulo 4.Resultados

4.1 Secado del aislamiento sólido

En la preparación de materiales para el proceso de secado, se determinó la cantidad de humedad (WCP) a la cual se encontraba el aislamiento sólido. Los segmentos de *pressboard* se sometieron al proceso de secado en el autoclave a una temperatura de 100 ° C y una presión de vacío de 0.01 mbar durante 3 horas. Se procedió a romper vacío con Nitrógeno seco para la estabilización de 18 horas. El nivel de secado se monitoreó mediante un sensor marca Vaisala que arroja tres parámetros: Temperatura de rocío (Td), Temperatura ambiente (T) y Humedad relativa (RH).

La figura 34 muestra el historial de datos del periodo de secado desde su programación de inicio hasta su estabilización, lo cual se obtiene un total de monitoreo de aproximadamente 21 horas.

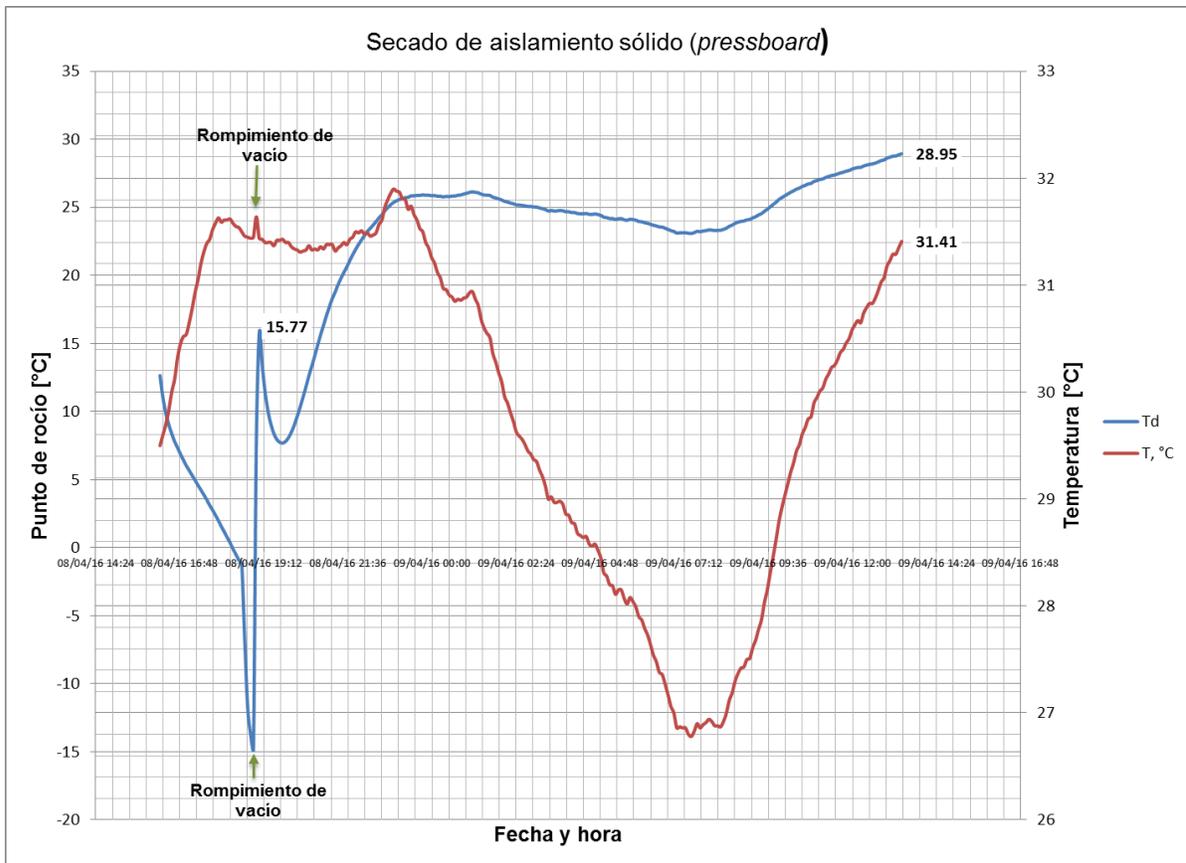


Figura 34. Secado del aislamiento sólido (*pressboard*)

Los valores registrados en el sensor Vaisala después de la estabilización fueron: $T_d=28.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $T=31.41\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estos valores mencionados son utilizados para determinar el contenido humedad del papel, el valor de la $T_d=28.85^{\circ}\text{C}$ excede los rangos para utilizar la gráfica del anexo 3, por lo que conlleva a utilizar una hoja de cálculo (anexo 2) para convertir el valor de la temperatura de Rocío a Presión de vapor (P_v) y se tiene un valor de $P_v= 29463.9517$. Finalmente se utiliza el anexo 4 estimando que el contenido de humedad *pressboard* es mayor que el 3%.

4.2 Impregnación del aceite aislante

La impregnación se llevó a cabo con los aceites MIDEL 7131 (sintético), Nynas Nytro 11 GBX (mineral) y VG-100 (vegetal). En esta sección se presentan los resultados de dichas pruebas a las diferentes temperaturas.

4.2.1 Aceite Mineral

A continuación se muestran los resultados de las pruebas que se realizaron con el aceite mineral. Las temperaturas a las cuales se llevó a cabo la impregnación fueron 25,40, 60, 80 y 100 °C. Los aislamientos sólidos evaluados fueron:

- *Pressboard* T4 de 3.2 mm de espesor
- H1 V2 de 3.2 mm de espesor
- H1V2 de 0.8 mm de espesor
- Papel Manning con masas de 2 y 10 gramos

En la tabla 16 se presentan los resultados de la impregnación de los 5 aislamientos sólidos evaluados con aceite mineral a 5 diferentes temperaturas. La tabla presenta el tiempo en el que se alcanzó el 100% de impregnación de los aislamientos. La viscosidad es dependiente de la temperatura es por eso que se observa que a mayor temperatura, el aceite viaja a mayor velocidad a través de los poros del material celulósico.

Tabla 16. Tiempo de impregnación del aceite mineral

Temperatura	Papel Manning 2 g	Papel Manning 10 g	<i>Pressboard</i> H1V2 0.8 mm	<i>Pressboard</i> H1V2 3.2 mm	<i>Pressboard</i> T4 3.2 mm
25	11	12	11	13	14
40	8	9	8	12	13
60	6	7	5	7	9
80	4	5	2	3	5
100	1.5	2	0.5	1.5	2.5

4.2.2 Aceite MIDEL 7131

A continuación se muestran los resultados de las pruebas que se realizaron con el aceite MIDEL 7131. Las temperaturas a las cuales se llevó a cabo la impregnación fueron 25,40,60,80 y 100°C. Los aislamientos sólidos evaluados fueron:

- *Pressboard* T4 de 3.2 mm de espesor
- H1 V2 de 3.2 mm de espesor
- H1V2 de 0.8 mm de espesor
- Papel Manning con masas de 2 y 10 gramos

La tabla 17 se presenta los resultados de la impregnación de los 5 aislamientos sólidos evaluados con el aceite MIDEL 7131 a 5 diferentes temperaturas.

Tabla 17. Tiempo de impregnación del MIDEL 7131

Temperatura [°C]	Papel Manning 2 g [h]	Papel Manning 10 g	Pressboard H1V2 0.8 mm	Pressboard H1V2 3.2 mm	Pressboard T4 3.2 mm
25	16	17	14	13	17
40	14	16	12	12	14
60	12	14	9	10	12
80	9	9	8	7	9
100	3	5	3	4	5

4.2.3 Aceite VG-100

A continuación se muestran los resultados de las pruebas que se realizaron con el aceite VG-100 (vegetal). Las temperaturas a las cuales se llevó a cabo la impregnación fueron 25,40,60,80 y 100°C. Los aislamientos sólidos evaluados fueron:

- Papel Manning con masas de 2 y 10 gramos

La tabla 18 se presenta los resultados de la impregnación de los 2 aislamientos sólidos evaluados con el aceite VG-100 a 5 diferentes temperaturas.

Tabla 18. Tiempo de impregnación del VG-100

Temperatura [°C]	Papel Manning 2 g [h]	Papel Manning 10 g
25	17	18
40	16	16
60	14	15
80	11	11
100	6	7

4.2.4 Comparación de impregnación de diferentes fluidos

En las figuras siguientes se comparan los resultados de las pruebas de impregnación de cada aislamiento sólido. Se observa que los fluidos aislantes no se comportan de la misma forma empleando la misma temperatura de trabajo.

Las figuras 35 y 36, muestran el tiempo de impregnación del papel Manning (2 y 10 g) con los fluidos aislantes (mineral, vegetal y sintético) realizados a cinco temperaturas (25,40,60,80 y 100°C) .

Las figuras 37,38 y 39 muestran el tiempo de impregnación de los pressboards (H1V2 3.2 mm ,H1V2 0.8 mm y T4 3.4 mm) con dos fluidos aislantes (mineral y sintético) realizados a cinco temperaturas (25,40,60,80 y 100°C) .

La figura 40 indica que la impregnación del aceite mineral a 25°C en el papel Manning (2 g) se requiere un tiempo de 11 horas para completar el 100% de impregnación. Por otro lado, el éster sintético y vegetal deben encontrarse a una temperatura de 60 y 80 °C respectivamente para alcanzar aproximadamente los mismos tiempos de impregnación del aceite mineral.

La figura 41 indica que la impregnación del aceite mineral a 25°C en el papel Manning (10 g) se requiere un tiempo de 12 horas para completar el 100% de impregnación. Por otro lado, el éster sintético debe encontrarse a una temperatura de 60°C y el éster vegetal a 80 °C para alcanzar los mismos tiempos de impregnación del aceite mineral.

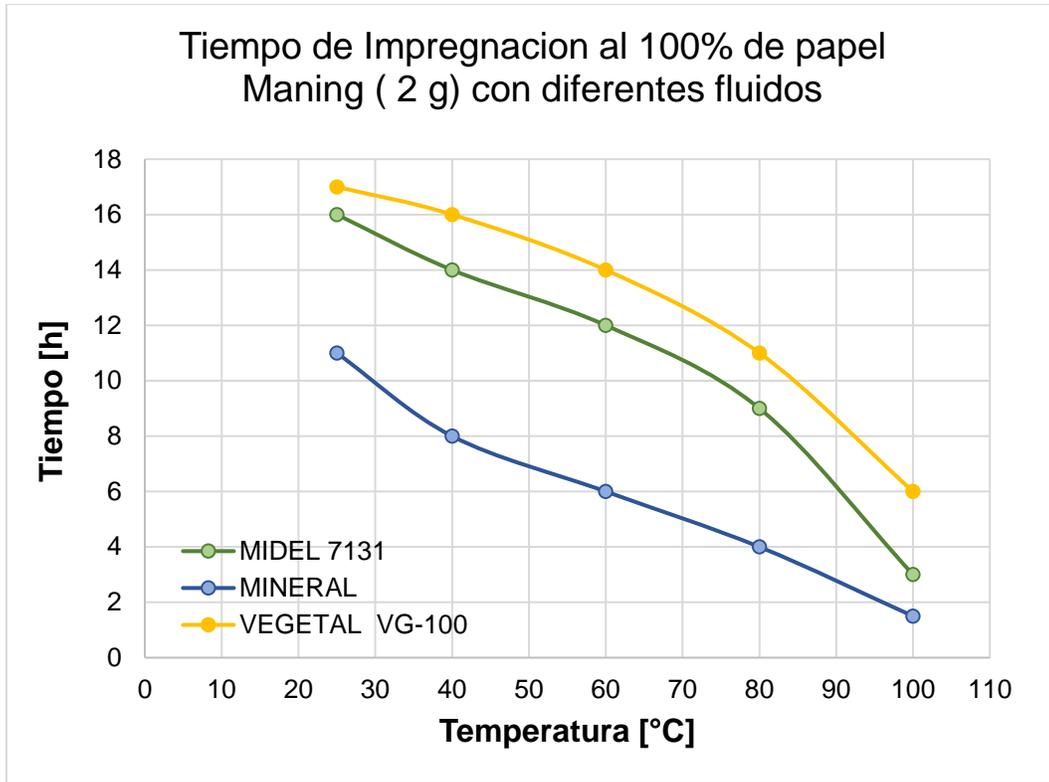


Figura 35. Tiempo de impregnación del papel Manning (2 g) con diferentes fluidos aislantes

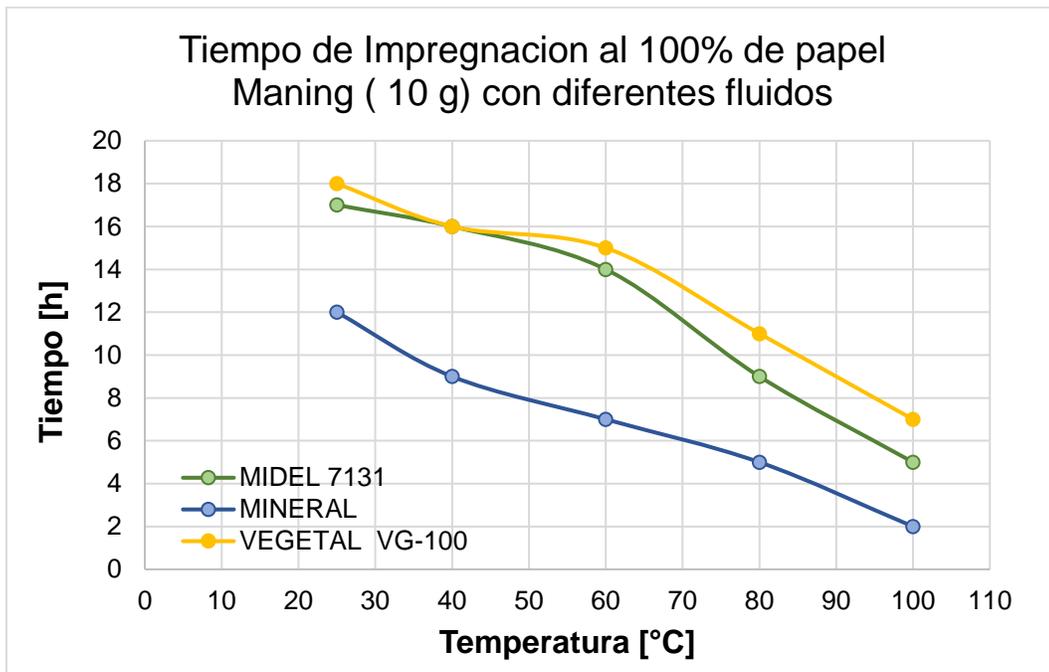


Figura 36. Tiempo de impregnación del papel Manning (10 g) con diferentes fluidos aislantes

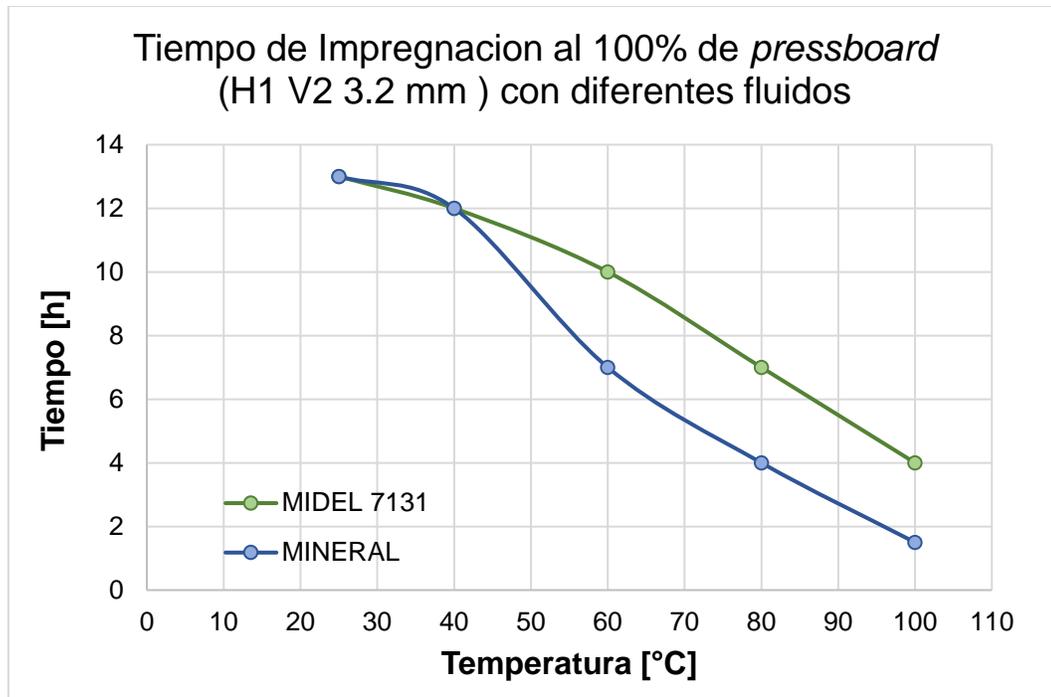


Figura 37. Tiempo de impregnación del Pressboard (H1 V2 3.2 mm) con diferentes fluidos aislantes

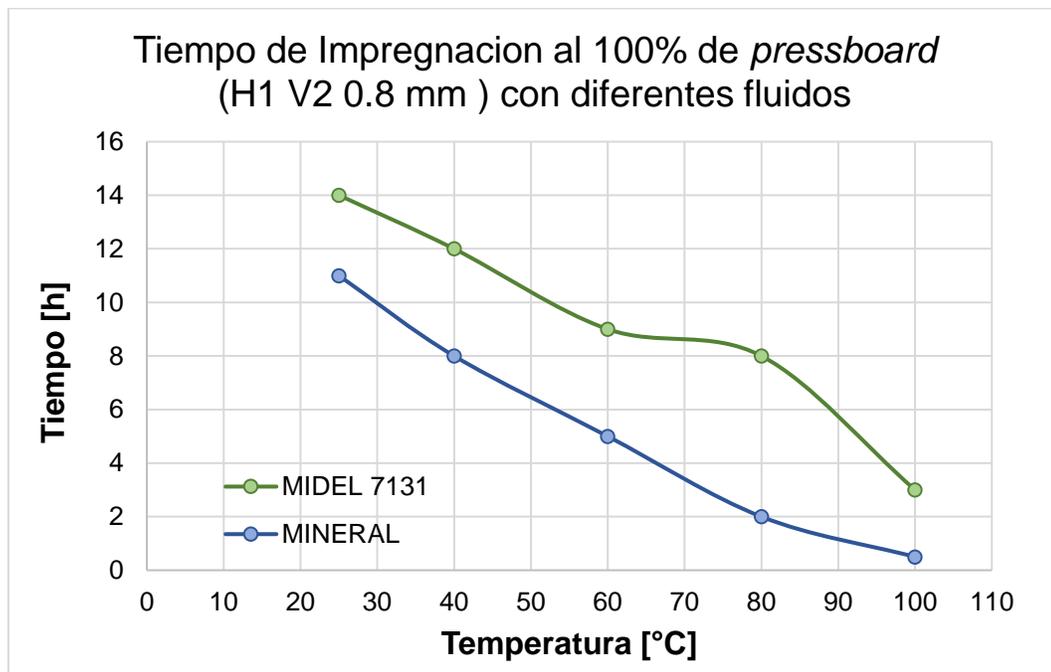


Figura 38. Tiempo de impregnación del pressboard (H1 V2 0.8 mm) con diferentes fluidos aislantes

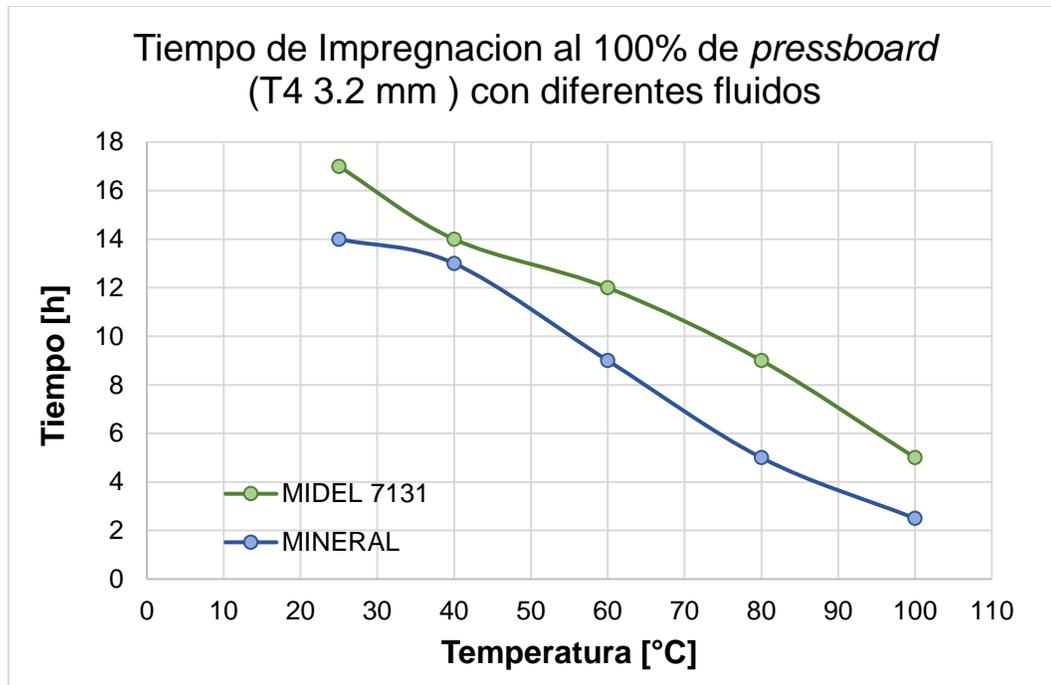


Figura 39. Tiempo de impregnación del *pressboard* (T4 3.2 mm) con diferentes fluidos aislantes

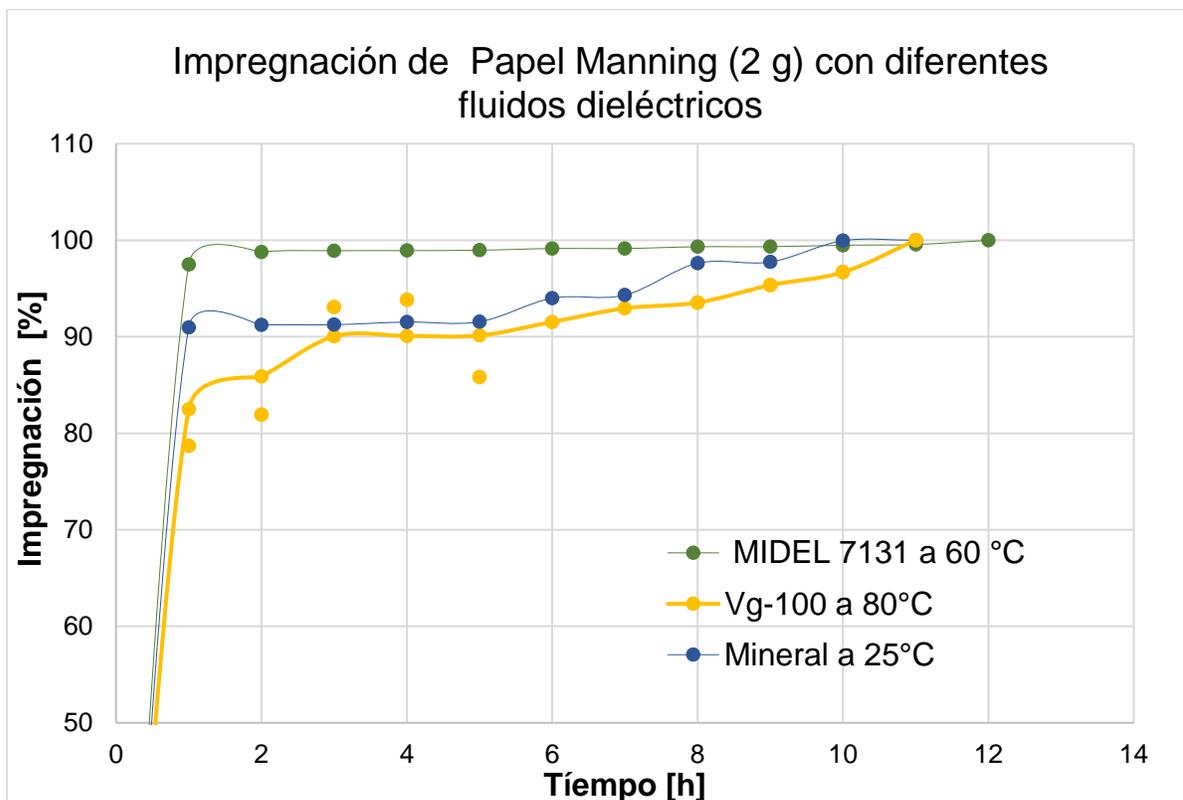


Figura 40. Tiempo de impregnación del papel Manning (2 g) con diferentes fluidos aislantes

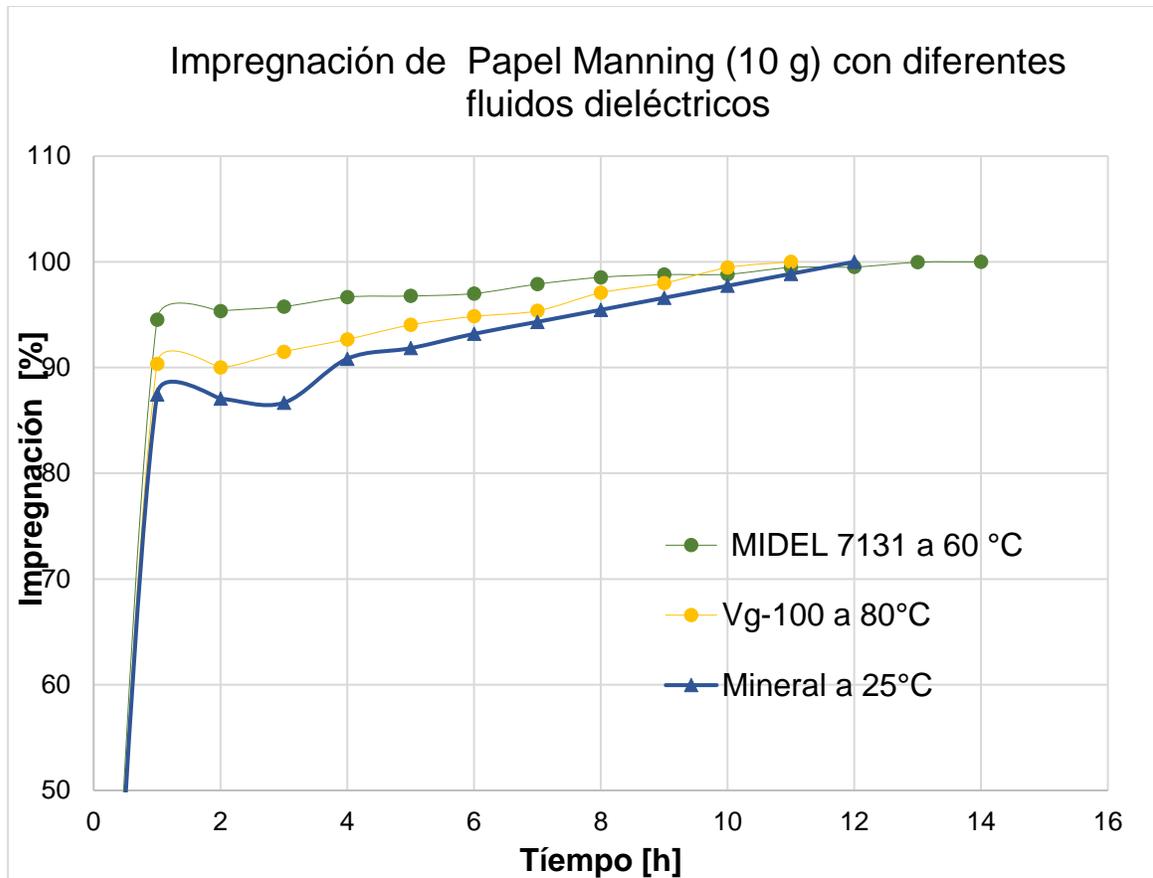


Figura 41. Impregnación del papel Manning (10 g) con diferentes fluidos dieléctricos

Conclusiones

En este proyecto se evaluó la impregnación de tres fluidos aislantes (mineral, sintético y vegetal) en materiales de celulosa (Papel Manning y *pressboard* de diferentes espesores) lo cual se realizó a diferentes temperaturas (25, 40, 60,80 y 100°C).

El tiempo del proceso de impregnación no es el mismo para cada material celulósico debido a las diferencias de viscosidad y densidad de los fluidos aislantes. Los fluidos evaluados no se comportan de igual forma a la misma temperatura de trabajo, ya que la temperatura es un factor importante que influye en la viscosidad del aceite dieléctrico, es decir, a temperatura ambiente la impregnación en el papel es lento y se requiere mucho más tiempo para completar el 100% de impregnación a comparación de trabajar con una temperatura más alta donde la viscosidad es baja y por ende el tiempo de impregnación es menor.

Para alcanzar el tiempo de impregnación del aceite mineral en el papel a temperatura ambiente, los ésteres deben encontrarse a una temperatura más alta para alcanzar el mismo tiempo del mineral, debido a que la viscosidad de los ésteres son más altas que el mineral.

Por último, la cantidad de masa del papel Manning y el espesor del *pressboard* influyen en el tiempo de impregnación, es decir, la impregnación es más lenta a mayor cantidad de masa y mayor espesor .

Recomendaciones

- Utilizar segmentos de *pressboard* de diferentes dimensiones debido que en el procedimiento de impregnación solo se trabajó con *pressboard* de 5 x 5 cm.
- Se recomienda realizar pruebas de impregnación en el *pressboard* con un menor contenido de humedad del 3%, para comparar los resultados de un aislamiento sólido con diferencias de humedad.

Referencias Bibliográficas

- [1] NYNAS. (2015). Manual de aceites de transformador. Solna: NYNAS
- [2] Generadores y transformadores de energía. (4 de Abril de 2016). Obtenido de: <https://descubriendolaingenieriaelectromecanica.wikispaces.com>
- [3] Chapman, S. J. (2012). Máquinas eléctricas. México, D.F: The McGraw-Hill.
- [4] Endesa Educa. (5 de abril de 2016). Obtenido de: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursosinteractivos/conceptosbasicos/funcionamiento-de-los-transformadores
- [5] Instituto Tecnológico de la Costa Grande. (5 de Abril de 2016). Obtenido de <https://transformadores.wikispaces.com>
- [6] Endesa Educa. (5 de Abril de 2016). Obtenido de http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursosinteractivos/conceptosbasicos/funcionamiento-de-los-transformadores
- [7] Koch, M., Krüger, M., & Tenbohlen, S. (2009). Comparing Various Moisture Determination Methods for Power Transformers. Paris: CIGRE.
- [8] TY ASA. (7 de Abril de 2016). Transformadores y abastecimientos eléctricos. Obtenido de http://www.dirind.com/die/monografia.php?cla_id=60.
- [9] Corrales León, J. C. (1999). Pruebas para la instalación, puesta en servicio, operación y mantenimiento de transformadores de potencia (Tesis previa a la obtención del título de ingeniería en sistemas eléctricos de potencia. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Quito.
- [10] Hernández Santiago, Á. R. (2015). Diseño del sistema de aislamiento interno de un transformador reductor de servicios propios auxiliares que operara a una tensión de 69 /127 V a una capacidad de 50 kVA. (Tesis de licenciatura).Instituto Politécnico Nacional. Distrito Federal.
- [11] Reis Tenajas, P. (2009). Análisis del envejecimiento del aceite de un transformador mediante espectroscopia dieléctrica medida en baja frecuencia (Tesis de Licenciatura).Universidad Carlos III de Madrid .Escuela Politécnica Superior.Depto de Ingeniería eléctrica. Madrid
- [12] Donald G., F., H.Wayne, B., & Jhon M., C. (1981). Manual práctico de electricidad para ingenieros. Barcelona: Editorial Reverté.
- [13] Wang, X. (2011). Partial discharge behaviours and breakdown.Thesis of Engineering and Physical Sciences.University of Manchester. Mánchester.

- [14] M&I Materials . (2 de Mayo de 2016). MIDEL. Obtenido de <http://www.midel.com/es/productsmidel/midel-7131>
- [15] M&I Materials. (2014). Visión general del fluido aislante dieléctrico. MIDEL, 2.
- [16] M&I Materials. (2013). Mayor protección ambiental. MIDEL 7131, 2.
- [17] M&I Materials . (2014). Mayor seguridad contra incendios. MIDEL 7131, 2.
- [18] M&I Materials. (2010). Tolerancia a la humedad. MIDEL 7131, 2.
- [19] Hernández González, L. E. (2010). Análisis técnico-económico de la utilización de fluidos con alto punto de inflamabilidad en transformadores de distribución, considerando su aplicación con transformadores con aceite mineral común por medio de su sustitución. (Tesis de Licenciatura). Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- [20] Fernando Navas, D., Cadavid Ramírez, H., & Echeverry Ibarra, D. F. (2012). Aplicación del aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores eléctricos. Revistas científicas Javeriana, 201-223.
- [21] Cooper Power Systems. (2005). Aceite dieléctrico vegetal FR3 para transformadores y subestaciones. Cooper Power Systems, 1-8.
- [22] Cargill Industrial Specialties. (2007). Fluido Envirotemp™ FR3™. Cargill.
- [23] Cooper Power Systems. (2009). Medium and Large Power Transformer Users List. COOPER POWER.
- [24] PROLEC. (2009). VG-100 Primer líquido dieléctrico biodegradable. PROLEC GE, 4-7.
- [25] Martínez Amaya, W. S., Ramírez Sorto, L. M., & Soto Hernández, P. A. (2014). Evaluación térmica en transformadores de potencia, cargabilidad y efectos en la vida del sistema de aislamiento (Tesis de Licenciatura). Universidad de El Salvador. Facultad de Ingeniería y arquitectura. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ciudad Universitaria
- [26] Moser, H. (1979). Transformerboard. Rapperswil: Graphics DOK MAN.
- [27] Irahauten, N. (2015). Optimization of the Impregnation Process of Cellulose Materials in High Voltage Power Transformers(Thesis for the degree of M.Sc of Electrical Engineering). Technical University of Delft. Netherlands.



Anexo 1 Lista de usuarios de Transformador de potencia mediana y grande Retrolenado & Nuevas instalaciones [26]

Cooper Power Systems

Qty	Base MVA	HV (kV)	LV (kV)	End User	Manufacturer	Type	Cooling Class	Notes
1	22.14 MVAR	242	242	Electro Norte Brazil	Areva Brazil	3 Ph Reactor	KNAN	Built December 2006 Energized October 2008
1	212	230	18	Platte River Power Authority Ft. Collins, CO	Waukesha Electric Systems	GSU	KNAN/KNAF/KNAF	Built and commissioned 2008
2	100	230	115	Platte River Power Authority Ft. Collins, CO	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Built and commissioned 2008
2	100	230	115	Platte River Power Authority Ft. Collins, CO	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Built and commissioned April 2007
1	50	230	34.5	State University of New York - Buffalo	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN	Built and Commissioned June 2008
4	8	230	12.47	Missoula Electric Coop Ovando, MT	GE	1 Ph Transmission	KNAN/KNAF/KFAF	Retrofilled Mar. 2005, commissioned Dec. 2005 Orig. commissioned 1980
1	200	161	19	Alliant Energy, Burlington, IA	Moloney	GSU	KNAF	Retrofilled March 2004 Orig. commissioned 1966
2	115	161	13.8	Century Aluminum	Siemens	Substation	KFAF	Rebuilt and commissioned 2008
1	25	161	12.47	Premcor Refinery Memphis, TN	GE	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Retrofilled July 2005 Orig. commissioned 1980
2	25	161	12.47	Valero Refinery Memphis, TN	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN/KNAF/KFAF	Built & commissioned Feb 2006

INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL



Qty	Base MVA	HV (kV)	LV (kV)	End User	Manufacturer	Type	Cooling Class	Notes
1	25	161	12.47	Valero Refinery Memphis, TN	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN/KNAF/KFAF	Built & commissioned April 2006
1	40	145	15	Waukesha Electric Systems	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN/KNAN	Built and commissioned August 2008
1	11.04 MVAR	145	145	Electro Norte Brazil	Trafo Brazil	3 PH Reactor	KNAN	Built July 2006 Energized March 2008
2	40	138	13.8	Electro Norte Brazil	Trafo Brazil	Substation	KNAN/KNAF	Built June 2007 Energized August 2008
1	20	145	11.95	Ampla Brazil	Trafo Brazil	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Rebuilt April 2007. Energized July 2007
1	20	138	13.8	Electro Norte Brazil	Trafo Brazil	Substation	KNAN/KNAF	Built November 2006
1	12.5	138	13.8	Electro Norte Brazil	Trafo Brazil	Substation	KNAN/KNAF	Built July 2006 Energized March 2008
2	64	138	12	Alliant Energy Beloit, WI	GE	GSU	KNAN/KNAF	Retrofilled Dec. 2006 Orig. commissioned 1955
1	36	138	13.8	Tropicana Beverages Bradenton, FL	Westinghouse	GSU	KNAN/KNAF/KNAF	Retrofilled Aug 2005 Orig. commissioned 1990
2	30	138	24	Celesc Brazil	Trafo Brazil	Mobile Substation	KNAN	Built October 2006
1	24	138	24 x 69	ATC DePere, WI	Westinghouse	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Retrofilled June 2004 Orig. commissioned 1965
2	26	138	12	ATI Titanium	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Built and commissioned April 2008
1	20	138	69	Electro Norte Brazil	WEG	Autotransformer	KNAN/KNAF	Built November 2006.
1	12	138	12.47	United REMC Roanoke, IN	Waukesha Electric Systems	Dist	KNAN/KNAF/KNAF	Built, commissioned & Retrofilled Dec. 2005
2	25	134	13.2	Wood County EC Quitman, TX	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN/KNAF	Built & commissioned Feb 2007
1	90	132	33	EDF Energy Networks	Areva	Substation	KNAN	Energized November 2008
2	50	132	11	Energy Australia	Wilson	Substation	KNAN	Built and commissioned in 2008
1	120	115	17.5	Alliant Energy Cedar Rapids, IA	North American	GSU	KNAN/KNAF/KNAF	Retrofilled May 2004 Orig. commissioned 1994

INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL



Qty	Base MVA	HV (kV)	LV (kV)	End User	Manufacturer	Type	Cooling Class	Notes
2	60	115	15	USBR - Nimbus Gen. Station, Folsom, CA	Delta Star	GSU	KNAN/KNAF/KNAF	Built 2007 and commissioned 2008
1	55	115	13.2	Alliant Energy Cedar Rapids, IA	Allis Chalmers	GSU	KNAN/KNAF/KNAF	Retrofilled April 2006, Orig. commissioned 1955
1	45	115	12.47	PG&E, San Francisco, CA	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Built and commissioned 2008
1	30	115	6.9	Phelps Dodge Miami, AZ	GE	Substation	KNAN/KNAF	Rebuild June 2004 by Siemens-USA With LTC
2	27	115	13.2	City of Manassas Manassas, VA	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN, KNAF, KNAF	Built & commissioned June 2007
2	25	115	12.47	Lower Valley Energy Afton, WY	Kuhlman	Substation	KNAN/KNAF	Retrofilled June 2007 Orig commissioned 1982
1	22	115	34.5	Maquoketa	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Retrofill Sept. 2007. Built 1990's
2	20	115	12.5	Platte River Power Authority Ft. Collins, CO	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN/KNAN	Built and commissioned August 2008
2	12	115	5	Lectrics	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN/KNAN	Built September 2008
1	15	115	12.47	Lane Electric Coop Eugene, OR	N/A	Substation	KNAN	Retrofilled Aug 2007
2	15	115	12.47	City of Opalika Alabama	Kuhlman	Substation	KNAN/KNAF	Built Oct 2004
2	12	115	12.47	Lower Valley Energy Afton, WY	GE	Substation	KNAN/KNAF	Retrofilled June 2006 Orig. commissioned 1976
1	22.4	110	13.2	Entergy	Westinghouse	Substation	KNAN	Retrofilled Oct 2007
1	40	110	32	EnBW - Stuttgart	Siemens Dresden	Substation	KNAN	Built April 2008
1	8 MVAR	72.5	72.5	Electro Norte Brazil	Trafo Brazil	Grounding Transformer	KNAN	Built August 2006. Energized April 2007
1	36	70.6	12.5	Opti-Solar	Delta Star	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Built in 2008, commissioned 2009
1	66	69	13.8	US Steel	Kuhlman	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Built and commissioned in 2009
2	26.6	69	13.8	Electro Norte Brazil	Trafo Brazil	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Built November 2006 Energized January 2009

INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL



Qty	Base MVA	HV (kV)	LV (kV)	End User	Manufacturer	Type	Cooling Class	Notes
1	26.6	69	13.8	Electro Norte Brazil	Trafo Brazil	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Built November 2006
1	20	69	13.8	Electro Norte Brazil	Trafo Brazil	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Built 2007
1	26.6	69	13.8	Electro Norte Brazil	Trafo Brazil	Substation	KNAN/KNAF	Built November 2007
1	12.5	69	13.8	Electro Norte Brazil	Trafo Brazil	Substation	KNAN/KNAF	Built July 2006 Energized August 2008
1	66	69	13.8	US Steel	Kuhlman	GSU	KNAN/KNAF/KNAF	Built and Commissioned 2009
1	50	69	12.47	Alliant Energy Dubuque, IA	Westinghouse	GSU	KNAF	Retrofilled October 2001 Orig. commissioned 1957 With LTC
1	50	69	13.8	Braskem Brazil	Siemens Brazil	Substation	KNAN	Energized February 2006
1	40	69	8.32	Easton Utilities Easton, MD	Westinghouse	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Retrofill October 2007. Built 1991.
2	30	69	13.8	Archer Daniels Midland Clinton, IA	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Built May 2006 & December 2006
2	30	69	13.8	Archer Daniels Midland Clinton, IA	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Built October 2008
1	28	69	8.32	Easton Utilities Easton, MD	Delta Star	Substation	KNAN/KNAF/KNAF	Retrofilled Oct. 2007. Built 1972
1	28	69	25	Easton Utilities Easton, MD	Delta Star	Dist	KNAN/KNAF	Retrofilled March 2007. Orig commissioned 1990
7	20	69	4.16	Archer Daniels Midland, Cedar Rapids, IA	Pennsylvania Transformer	Substation	KNAN/KNAF	Built and commissioned 2008
2	20	69	13.2	Maui Electric Maalaea, HI	Waukesha Electric Systems	GSU	KNAN/KNAF/KFAF	Built and commissioned March 2006
1	20	69	13.2	Maui Electric Maalaea, HI	ABB	GSU	KNAN/KNAF/ KFAF	Retrofilled October 2003 Orig. commissioned 1990
2	18	69	20	So. California Edison California	Kuhlman	Substation	KNAN/KNAF/ KFAF	Built October 2003 & March 2004
1	15	69	12.47	Waverly	Westinghouse	Substation	KNAN/KNAF/ KFAF	PCB Retrofill September 2007

INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL



Qty	Base MVA	HV (kV)	LV (kV)	End User	Manufacturer	Type	Cooling Class	Notes
2	14	69	4	Maui Electric Maalea, HI	GE	GSU	KNAN/KNAF/ KNAF	Retrofilled Oct. 2003 & May 2004 Orig. commissioned 1973
1	12	69	4.16	American Electric Power Roanoke, VA	Virginia Transf.	GSU	KNAN/KNAF/ KNAF	Built & commissioned August 2005
1	10	69	4.16	People's Coop Rochester, MN	Uptegraff	Substation	KNAN/KNAF	Built March 2004
2	10	69	12	Dept. of Water & Power Los Angeles, CA	Delta Star	Mobile	KNAN/KNAF/ KNAF	Built & commissioned 2005
2	7.58	69	12.47	Lower Valley Energy Afton, WY	GE	Substation	KNAN/KNAF	Retrofilled June 2005 Orig. commissioned 1965
2	7.5	69	12.47	Lower Valley Energy Afton, WY	GE	Substation	KNAN/KNAF	Retrofilled August 2005 Orig. commissioned 1965
1	37.5	67	12.47	Reedy Creek Energy Lake Buena Vista, FL	Waukesha Electric Systems	Substation	KNAN/KNAF	Retrofilled Dec. 2005 Orig. commissioned 1988
2	20	67	11	Country Energy Australia	Wilson	Substation	KNAF	Built and Commissioned 2003
1	16.8	67	12.47	Waverly L&P Waverly, IA	Delta Star	Substation	KNAN/KNAF/ KFAF	Retrofilled Oct. 2006 Orig. commissioned 1999
2	10	67	11	ETSA Utilities	Wilson	Skid mounted Mobile		Built and commissioned in October 2008
1	10	60	25	Kinross Gold	Virginia Transf.	Substation	KNAN/ KNAF/KNAF	Built and commissioned in 2009
2	20	46	13.8	Phelps Dodge Morenci, AZ	Ferranti-Packard	Substation	KNAN/ KNAF/ KNAF	Retrofilled Sept. 2004 Orig. commissioned 1981
1	20	46	13.8	Phelps-Dodge Miami, AZ	Ferranti-Packard	Substation	KNAN, KNAF/ KFAF	Retrofilled May 2005 Orig. commissioned 1995
2	10	46	13.8	Symantec	Virginia Transf.	Substation	KNAN/ KNAF/KNAF	Built and commissioned in 2008
2	15	44	13.8	Kennecott Copper Salt Lake City, UT	Kuhlman	Substation	KNAN/KNAF	Retrofilled Aug. 2005 Orig. commissioned 1989
2	7.5	44	4.16	Kennecott Copper Salt Lake City, UT	Westinghouse	Substation	KNAN/KNAF	Retrofilled Aug. 2005 Orig. commissioned 1989
2	7.5	43.8	4.16	Kennecott Copper Salt Lake City, UT	Westinghouse	Substation	KNAN/KNAF	Retrofilled Sept. 2006, Orig. commissioned 1986

INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL



Qty	Base MVA	HV (kV)	LV (kV)	End User	Manufacturer	Type	Cooling Class	Notes
1	3.75	43.8	4.16	Kennecott Copper Salt Lake City, UT	US Transf.	Substation	KNAN/KNAF	Retrofilled Sept. 2006 Orig. commissioned 1993
1	3.75	43.8	4.16	Kennecott Copper Salt Lake City, UT	Wagner	Substation	KNAN/KNAF	Retrofilled Sept. 2006 Orig. commissioned 1993
1	27	37	0.654	Noranda Aluminum New Madrid, MO	Toshiba	Rectif.	KNAN/KNAF	Retrofilled May 2004
2	27	37	0.6	Noranda Aluminum New Madrid, MO	Toshiba	Rectif	KNAN/KNAF	Retrofilled April 2005
1	26	37	0.6	Noranda Aluminum New Madrid, MO	Fuji	Rectif	KNAN/KNAF	Retrofilled April 2005
1	9.375	34.5	13.8	Electro Norte Brazil	Trafo Brazil	GSU	KNAN/KNAF	Built July 2006
1	6.25	34.5	13.8	Electro Norte Brazil	Trafo Brazil	GSU	KNAN/KNAF	Built Jul, 2006
1	18	35	4.16	GE Energy	Virginia Transf.	Substation	KNAN/KNAF/ KNAF	Commissioned 2008
2	36	34.5	13.8	Thyssen Krupp Mt. Vernon, AL	WEG	Substation	KNAN/KNAF/ KNAF	Built and commissioned 2009
2	30	34.5	0.6	Noranda Aluminum New Madrid, MO	Fuji	Rectif	KNAN/KNAF	Retrofilled April 2005
1	30	34.5	0.562	Noranda Aluminum New Madrid, MO	Fuji	Rectif.	KNAN/KNAF	Retrofilled May 2004
9	18	34.5	13.8	Thyssen Krupp Mt. Vernon, AL	WEG	Substation	KNAN/KNAF/ KNAF	Built and commissioned in 2009
1	10	34.5	4.16	Forest Oil Alaska	Cooper	Substation	KNAN/KNAF	Built November 2002
1	22	34	12	Maquoketa, IA	Kuhlman	Substation	KNAN/KNAF	Built and commissioned September 2007
1	10	33	11	Top Energy New Zealand	LEECC (China)	Mobile	KNAN/KNAF	Built November 2002
2	24	27.6	600	Ford Windsor, Canada	GE	Substation	KNAN/KNAF/ KNAF	Retrofilled June 2007, Orig. commissioned 1970 Rewound 1995
1	37.5	24	13.8	PCS Phosphates	Delta Star	GSU	KNAN/KNAF/ KNAF	Built and commissioned 2009
1	39	24	5	Alliant Ottumwa, IA	GE	Aux Transformer	KNAN/KNAF	Retrofilled June 2007

INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL



Qty	Base MVA	HV (kV)	LV (kV)	End User	Manufacturer	Type	Cooling Class	Notes
2	20	23	13.8	Northrop Grumman Newport News, VA	Delta Star	Substation	KNAN/KNAF	Built Feb 2006, commissioned April 2007
2	11	20	4.4	Alliant Energy Burlington, IA	Allis Chalmers	Aux. Power	KNAN/KNAF	Retrofilled March & May 2004 Orig. commissioned 1966
1	25	19	13.2	Keyspan Energy Queens, NY	Delta Star	Aux. Power	KNAF	Retrofill April 2004, Orig. commissioned 2000
4	15	19	4.36	Georgia Power/Ctrs for Disease Control Atlanta, GA	Waukesha Electric Systems	GSU	KNAN/KNAF	Built and commissioned August 2007
1	10	18	2.4	Alliant Energy Cedar Rapids, IA	GE	Aux. Power	KNAF	Retrofill May 2004, Orig. commissioned 1965
1	11.5	13.8	4.16	Tropicana Beverages Bradenton, FL	Ward	Substation	KNAN/KNAF	Retrofilled Aug 2005 Orig. commissioned 1990
1		13.8		Alliant Energy, Cedar Rapids, IA	Waukesha Electric Systems	Grounding Transformer	KNAN	Commissioned August 2006
2	110	13.8	14	Century Aluminum	Siemens	Voltage Reg	KNAN	Rebuilt and commissioned 2008



Anexo 2. Hoja de cálculo (punto de rocío a presión de vapor)

Td a Pv_Regresion - Excel

ARCHIVO INICIO INSERTAR DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA FOXIT PDF FOXIT READER PDF Iniciar se

Calibri 11 Fuente Alineación Número Estilos Celdas Modificar

D	P		Rocío	Presión
-70	2	2.5488	28.95	29463.9517
-64	5	5.6957		
-59	10	10.8745		
-53	20	22.9759		
-48	40	41.8648		
-44	60	66.6305		
-40	100	104.6154		
-36	200	162.0382		
-27	400	412.6589		
-23	600	611.5547		
-17.88	1000	991.9850		
-10	2000	1999.5196		
11	10000	10008.3640		

a 30°C de tempe Presión

1%	-27	412
2%	-16.7	1101
3%	-5	3035
4%	1.35	5002

Valor 1 Valor 2

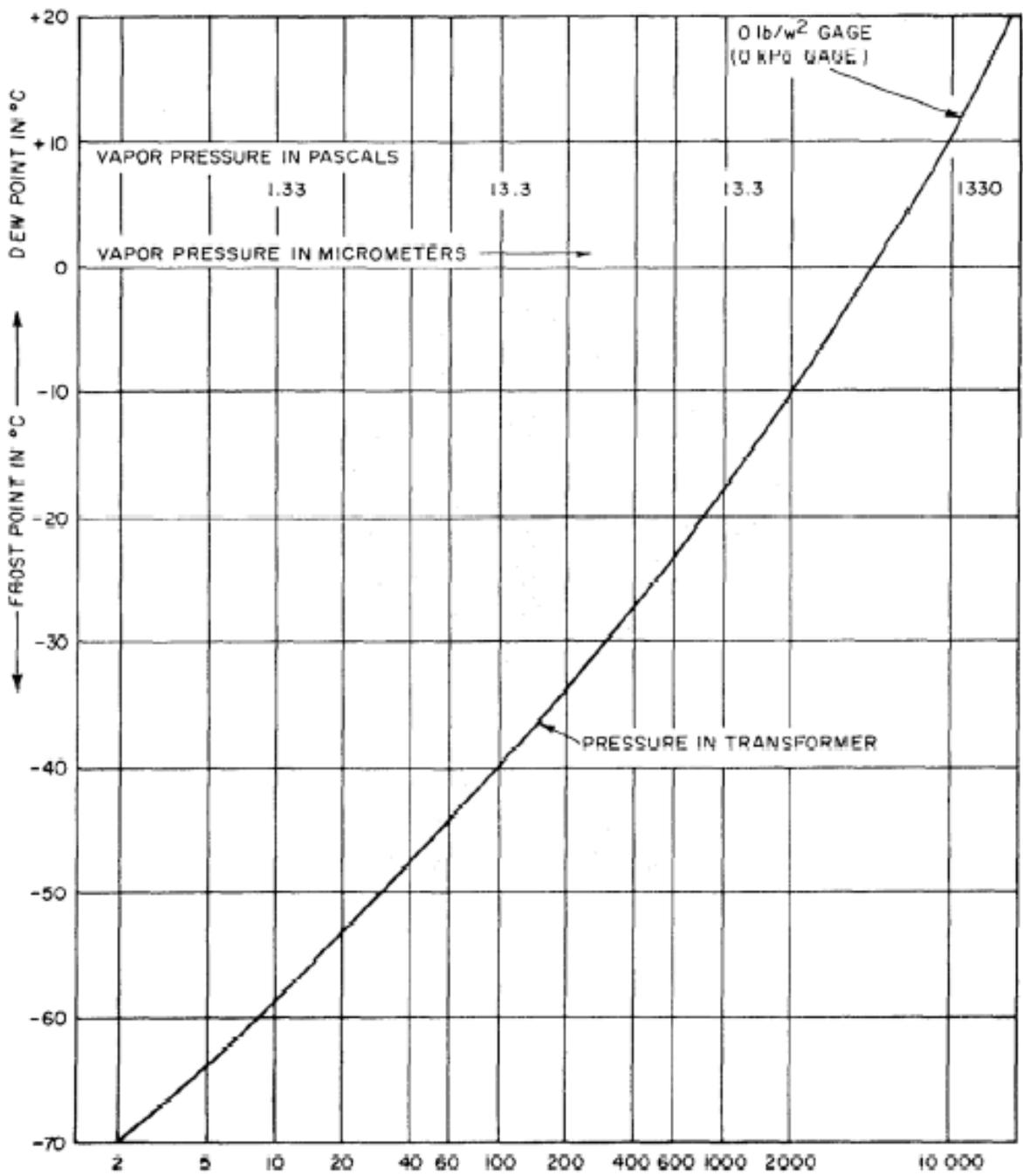
$$H_1 = \sqrt{0.011T - 0.1623 \log(VP) + 0.6688 + 0.9048}$$

Valor 1 Valor 2

$$H_1 = 0.4029 \sqrt{0.0678T - \log\left(\frac{VP}{61.57}\right) + 0.9048}$$

T	32
VP	29463.9517

Anexo 3. Gráfico de conversión de punto de rocío a presión de vapor



Anexo 4. Gráfico de equilibrio de humedad

