

**VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN MODELO MULTIFÍSICO DE DIFUSIÓN
DE HUMEDAD – TEMPERATURA EN UN TRANSFORMADOR SUMERGIDO EN
ACEITE**

WILVER CORREA BRAVO

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2018**

**VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN MODELO MULTIFÍSICO DE DIFUSIÓN
DE HUMEDAD – TEMPERATURA EN UN TRANSFORMADOR SUMERGIDO EN
ACEITE**

WILVER CORREA BRAVO

**Trabajo de investigación como requisito parcial para optar por el título de
Magíster en Ingeniería**

Director
Profesor, DIEGO FERNANDO GARCÍA
Ingeniero Electricista, Ph.D

Director
ALEXANDER CÉSPEDES FERNÁNDEZ
Ingeniero Electricista, M.Sc

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2018

Nota de aceptación:

Director del Proyecto
Diego Fernando García
Profesor, Ingeniero Electricista, Ph.D

Director del Proyecto
Alexander Céspedes Fernández
Ingeniero Electricista, M.Sc

Santiago de Cali, __ de ____ de 2018.

AGRADECIMIENTOS

La ayuda que otros nos pueden dar nunca está de más, agradezco a los profesores Diego García y Alexander Céspedes, quienes, en calidad de directores del proyecto, aportaron con sus correcciones y comentarios.

A mis padres que siempre han sido incondicionales a lo largo de mi vida. A mis hermanos que poco ayudaron, pero al menos escuchaban.

A Vanessa, que ha sido la mayor bendición que he recibido, tu apoyo y comprensión han sido muy importantes, gracias a ti fue más fácil continuar.

A la Universidad del Valle y COLCIENCIAS que financiaron la ejecución del proyecto.

“El futuro mostrará los resultados y juzgará a cada uno de acuerdo con sus logros”
- Nikola Tesla.

CONTENIDO

pág.

RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
1 INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 AISLAMIENTO ELÉCTRICO EN TRANSFORMADORES INMERSOS EN ACEITE	9
1.2 EXPECTATIVA DE VIDA DEL TRANSFORMADOR	10
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	13
1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	14
2 DINÁMICA DE LA TEMPERATURA Y LA HUMEDAD EN UN TRANSFORMADOR.....	15
2.1 COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL TRANSFORMADOR.....	15
2.1.1 Generación del calor	15
2.1.2 Transferencia del calor.....	17
2.1.3 Distribución de la temperatura	19
2.2 HUMEDAD EN EL SISTEMA DE AISLAMIENTO PAPEL-ACEITE	20
2.2.1 Fuentes de humedad	20
2.2.2 Adsorción y desorción de humedad en la celulosa	22
2.2.3 Intercambio y equilibrio de la humedad.....	23
2.2.4 Distribución de la humedad.....	24
3 MODELO MULTIFÍSICO DE HUMEDAD Y TEMPERATURA EN EL TRANSFORMADOR.....	27
3.1 MODELO DE TEMPERATURA	27
3.2 MODELO DE DIFUSIÓN DE HUMEDAD	28
3.3 MODELO DE DIFUSIÓN DE HUMEDAD - TEMPERATURA.....	29
4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	33
4.1 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO Y EQUIPOS	33
4.1.1 Planta Experimental	35

4.1.2	Balanza de humedad	37
4.1.3	Horno de secado con vacío.....	38
4.1.4	Equipo de FDS	39
4.1.5	Equipo de Karl Fischer	40
4.2	PROCEDIMIENTO Y EJECUCIÓN	41
4.2.1	Caso de estudio	41
4.2.2	Preparación de las muestras.....	43
4.2.3	Preparación de la planta experimental	48
4.2.4	Ejecución de los ensayos.....	50
4.2.5	Caracterización dieléctrica del porta-muestras	51
4.2.6	Estimación de la concentración de humedad en la celulosa.	60
5	RESULTADOS Y VALIDACIÓN	62
5.1	CONCENTRACIÓN DE HUMEDAD OBTENIDA POR MEDICIONES.....	62
5.2	CONCENTRACIÓN DE HUMEDAD OBTENIDA POR EL MODELO MULTIFÍSICO.....	65
5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL MODELO	67
5.4	PROPUESTA DE MEJORA DEL MODELO MULTIFÍSICO	76
6	CONCLUSIONES	81
6.1	TRABAJOS FUTUROS.....	82
	BIBLIOGRAFÍA	83
	ANEXOS	87
	Anexo A.....	87
	Anexo B.....	90
	Anexo C	91
	Anexo D	92
	Anexo E.....	97
	Anexo F	104
	Anexo G	109

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Fuentes de humedad que intervienen en el experimento.	34
Tabla 2. Información básica del transformador.	41
Tabla 3. Cantidad de aceite ingresado a la planta.	44
Tabla 4. Material celulósico ingresado a la planta.	45
Tabla 5. Humedad previa del papel Kraft y el cartón.	46
Tabla 6. Masa de las muestras de papel Kraft ingresadas a la planta experimental.	46
Tabla 7. Masa de las muestras de cartón ingresadas a la planta experimental.	47
Tabla 8. Humedad inicial de las muestras de papel Kraft.	48
Tabla 9. Funciones para obtener la parte real de la permitividad $\epsilon_r'(m)$ y la parte imaginaria de la permitividad $\epsilon_r''(m)$ a una temperatura de 60°C.	52
Tabla 10. Parámetros de la función aproximada de $m(S_{(f)})$	56
Tabla 11. Humedad de las muestras usadas para validar la ecuación (15) estimada con las curvas de equilibrio.	57
Tabla 12. Humedad m de las muestras estimada con la ecuación (15).	58
Tabla 13. Calculo de la integral $S(f_{ref})$ para cada medición de FDS realizada en la planta.	63
Tabla 14. Concentración de humedad m de las muestras estimada con la ecuación (15) en % de la masa seca.	63
Tabla 15. Información de entrada al modelo multifísico de humedad - temperatura.	66
Tabla 16. Concentración de humedad de las muestras obtenida por medio del modelo multifísico.	66
Tabla 17. Error entre el valor de humedad en el papel obtenido por el modelo con referencia al valor medido por medio del FDS (ecuación (15)).	68
Tabla 18. Error entre el valor de humedad en el papel obtenido por el modelo modificado con referencia al valor medido.	71
Tabla 19. Error entre el valor de humedad en el papel obtenido por el modelo modificado (con los valores A y B de Oommen) y las mediciones con FDS.	73

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Componentes principales del aislamiento sólido del transformador.	10
Figura 2. Velocidad de reacción de los diferentes mecanismos de degradación de la celulosa en transformadores sumergidos en aceite en función de la temperatura.	11
Figura 3. Expectativa de vida del aislamiento sólido y su dependencia con la humedad y temperatura.	12
Figura 4. Generación de calor.....	16
Figura 5. Transferencia de calor.	19
Figura 6. Diagrama térmico de la distribución de la temperatura en el transformador.	20
Figura 7. Fuentes de contaminación de agua en el transformador.	22
Figura 8. Proceso de adsorción de las moléculas de agua.....	23
Figura 9. Esquema de la dinámica de humedad en el sistema papel-aceite.	24
Figura 10. Distribución del aislamiento sólido y su contenido de humedad.	25
Figura 11. Distribución de temperatura, humedad y grado de polimerización de un modelo de devanado.	26
Figura 12. Diagrama de bloques del modelo propuesto en el Anexo G de [12].	28
Figura 13. Esquema del MEF para el cálculo de la difusión de humedad en el aislamiento celulósico de papel Kraft.	30
Figura 14. Diagrama de flujo de un modelo multifísico de humedad – temperatura en el aislamiento celulósico del transformador.	32
Figura 15. Planta experimental utilizada.	36
Figura 16. Cuba y sus partes.	37
Figura 17. Instalación del sensor de humedad en la celulosa.	37
Figura 18. Balanza de humedad utilizada.	38
Figura 19. Horno con vacío utilizado.....	39
Figura 20. Medición de C y PF del aislamiento usando el método de FDS.	40
Figura 21. Perfil de carga del transformador.....	42
Figura 22. Temperatura ambiente.....	43
Figura 23. Ubicación de las muestras de cartón.....	45
Figura 24. Medición de humedad y temperatura en el aceite antes de la Cuba 5.	49
Figura 25. Humedad relativa calculada en cada una de las cubas.	50
Figura 26. Curvas de referencia para la permitividad real ϵ_r'	53
Figura 27. Curvas de referencia para la permitividad imaginaria ϵ_r''	53
Figura 28. Logaritmo natural de $\tan(\delta)$ vs logaritmo natural de f desplazada.	55

Figura 29. Concentración de humedad m vs $S_{(f)m}$	56
Figura 30. Curvas de $\tan(\delta)$ de las muestras usadas para validar la ecuación (15).	57
Figura 31. Curva de $\tan(\delta)$ de una muestra antes de iniciar la operación de la planta experimental, temperatura 26 °C.	58
Figura 32. Diagrama de flujo del procedimiento de caracterización del sensor.	60
Figura 33. Diagrama de flujo para la estimación de la concentración de humedad en la celulosa.	61
Figura 34. Distribución de la humedad con la altura obtenida en la planta para cada medición.	64
Figura 35. Distribución de la humedad y temperatura en la altura del devanado obtenida en la planta experimental en la primera medición de FDS.	65
Figura 36. Concentración de humedad en la celulosa y temperatura del devanado de la Cuba 1.....	67
Figura 37. Mediciones de FDS en la Cuba 1 corregidas por temperatura.	69
Figura 38. Comportamiento de la temperatura entre el devanado-papel-aceite. ...	70
Figura 39. Concentración de humedad en la celulosa obtenida con el modelo sin modificar (%C) y modificado (%C mod.) en la Cuba 1.....	72
Figura 40. Límite de saturación de agua en el aceite mineral.....	74
Figura 41. Coeficiente de difusión de la humedad en el cartón y el papel.	75
Figura 42. Propuesta de mejora para el modelo multifísico de humedad-temperatura.....	77
Figura 43. Direcciones de la difusión de humedad en los materiales celulósicos..	79
Figura 44. MEF para estimar la humedad en el cartón.	79

RESUMEN

El aumento continuo de la demanda conlleva condiciones más exigentes para el transformador durante su funcionamiento, volviendo más importante garantizar entornos adecuados para la operación del transformador, con el fin de reducir el número de fallas y de las intervenciones y duración del mantenimiento. Esto implica un monitoreo continuo de su condición, en el caso de los transformadores sumergidos en aceite, es de gran importancia mantener el conocimiento de la cantidad de humedad que posee el aislamiento (aceite y papel), ya que ésta degrada las propiedades del mismo.

Con el objetivo de monitorear de forma continua el comportamiento de la humedad en la celulosa, se ha desarrollado un modelo multifísico de humedad-temperatura que permite conocer estos dos parámetros sin involucrar mediciones o procedimientos que requieran la desconexión del equipo, sin embargo, este modelo no ha sido validado experimentalmente.

En el presente trabajo se desarrolló un experimento para poder validar dicho modelo, donde se emula el comportamiento térmico del transformador en condiciones controladas que faciliten la medición de la humedad contenida en muestras de papel Kraft. Como resultado se encontraron algunos errores entre el modelo y el experimento debido algunas simplificaciones realizadas en la definición del mismo que pueden ser corregidas, para esto se proponen algunas mejoras que requieren estudios futuros.

Palabras clave: aceite mineral, celulosa, comportamiento térmico, emulación, experimento, humedad, planta experimental, transformador.

ABSTRACT

The continuous rise of the demand creates much more challenging conditions for the transformer during its operation, making it much more relevant to guarantee an adequate environment for the transformer to work properly and for malfunctions, intervention and maintenance to be minimal. This implies continuous monitoring. In the case of oil transformers, it is very important to know the quantity of humidity of the insulation (paper and oil), because it deteriorates its properties.

With the objective of monitoring continuously the behavior of the humidity in the cellulose, a temperature-humidity multi-physic model has been developed which allows us to know these parameters without involving measurements or procedures that might require disconnecting the equipment, nonetheless, this model has not been validated experimentally.

As this document shows, an experiment was developed to assess the model, where the thermic behavior of the transformer is emulated in controlled conditions that make it easier to take the measurements of the humidity contained in the Krafft paper samples. As a result, some errors were found between the model of the author and the data obtained in the experiment. For this reason, some improvements are proposed which will require future studies.

Key words: *mineral oil, cellulose, thermal behavior, emulation, experiment, humidity, experimental plant, transformer.*

1 INTRODUCCIÓN

El transformador de potencia es uno de los activos más costosos que se utiliza en el proceso de transmisión de la energía eléctrica, adicionalmente la falla en su operación puede generar consecuencias graves como el remplazo del equipo dependiendo de su estado final, incluyendo la interrupción del suministro eléctrico, lo que conlleva multas para el operador del servicio y pérdidas por falta de producción en los usuarios industriales o alteraciones en otros servicios (suministro de agua, comunicaciones, etc.).

Por lo anterior, es de gran interés conocer la condición de la operación del transformador, que está ligada al estado del aislamiento, a lo largo de su vida de servicio, para hacer una mejor gestión de este activo.

En el presente capítulo se procede a describir las generalidades relacionadas con el aislamiento del transformador y su importancia en la vida útil del mismo. También se presentan los objetivos del proyecto y la estructura del documento.

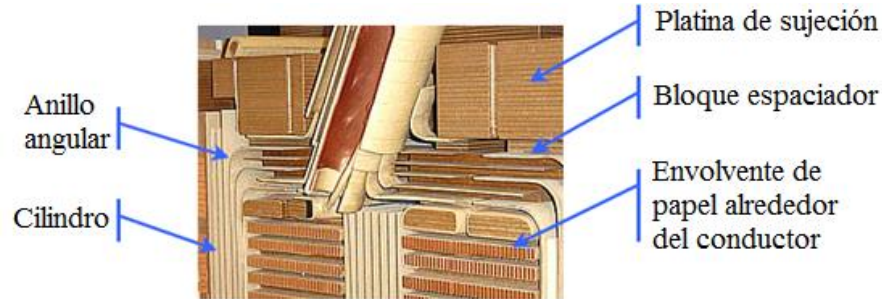
1.1 AISLAMIENTO ELÉCTRICO EN TRANSFORMADORES INMERSOS EN ACEITE

El aislamiento en los transformadores tiene como objetivo principal aislar eléctricamente las partes conductoras que están a diferente potencial, además deben facilitar la transferencia del calor desde las partes activas hacia el exterior. Una función adicional es servir de soporte mecánico a los conductores, evitando que se muevan por la acción de diversas fuerzas electromagnéticas que surgen al interior del transformador durante su operación normal o en condiciones de falla.

En el caso de los transformadores sumergidos en aceite, el aislamiento lo realiza el denominado sistema papel-aceite, el cual está conformado por una parte sólida (papel y cartón prensado de diferentes espesores) que soporta los esfuerzos mecánicos y una fracción de los esfuerzos eléctricos, y que además sirven como ducto para dirigir la circulación del aceite; y otra parte que está formada por el aceite dieléctrico (que puede ser de origen mineral, vegetal o sintético) que complementa al papel para mantener una elevada rigidez dieléctrica y además transportar el calor desde el interior del transformador hacia el exterior.

Un ejemplo de este sistema se puede observar en la Figura 1, donde se presentan las partes del aislamiento sólido y los conductores, los espacios vacíos estarían llenos de aceite cuando el devanado sea sumergido.

Figura 1. Componentes principales del aislamiento sólido del transformador.



Fuente: V. Sokolov et al., CIGRE 349 Moisture Equilibrium And Moisture Migration within Transformer Insulation Systems, no. June. CIGRE, 2008. p 23. Traducido del inglés al español.

1.2 EXPECTATIVA DE VIDA DEL TRANSFORMADOR

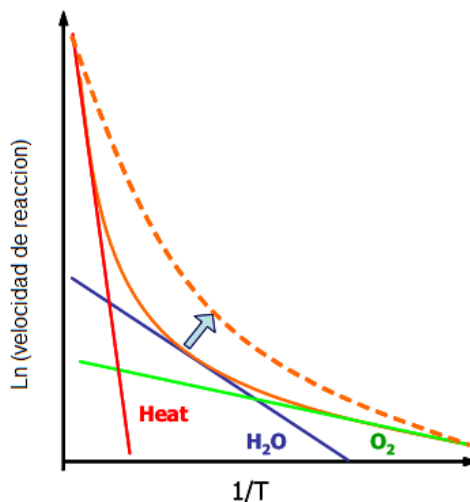
La expectativa de vida de un transformador de potencia está limitada por la integridad de su sistema de aislamiento eléctrico, en especial por su aislamiento celulósico [1], dado que las principales causas de falla en estos equipos están relacionadas con la degradación natural de este material; dicho deterioro reduce su capacidad para resistir los esfuerzos electro-mecánicos durante su operación [2].

Por otra parte, están los fluidos dieléctricos del transformador, cuya principal ventaja es su auto-regeneración cuando se extingue una descarga entre partes con diferente potencial. En este caso el material que fue alterado por la descarga es remplazado por el fluido circundante. Los fluidos además son de fácil extracción cuando comienza a perder sus propiedades dieléctricas por condiciones operativas excesivas (como sobrecargas de larga duración), por contaminación o culminación de su vida útil.

Por el contrario, el aislamiento celulósico no se regenera cuando se presenta una falla en él y para extraerlo es necesario el desarme del transformador y su reconstrucción. Por esta singularidad, se asocia la vida útil del transformador con la vida útil del aislamiento celulósico. Adicionalmente según [3], el aislamiento de los devanados incide en el 28% de las fallas que ocurren en un transformador. Todo lo anterior determina la importancia del monitoreo del estado (degradación) del aislamiento celulósico [4].

Los aislamientos celulósicos se degradan por diversos agentes como son; la temperatura (pirolisis), la humedad (hidrólisis) y la oxidación, cada uno lo afecta con una velocidad de reacción diferente en función de la temperatura [5], tal y como se presenta en la Figura 2, donde se observa un mayor efecto producido por el calentamiento “Heat” y el agua “H₂O”, que por el oxígeno “O₂”.

Figura 2. Velocidad de reacción de los diferentes mecanismos de degradación de la celulosa en transformadores sumergidos en aceite en función de la temperatura.

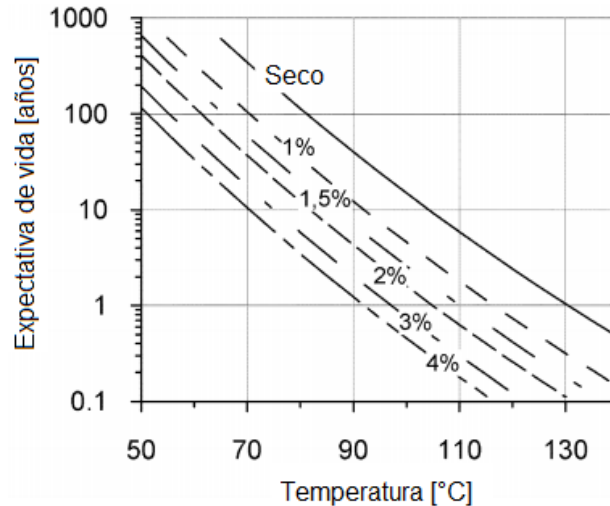


Fuente: Lars E. Lundgaard, et al, Cigre 323, Ageing of Cellulose in Mineral-Oil Insulated Transformers, no. October. 2007. pg 32. Traducido del inglés al español.

La temperatura, como se observa en la gráfica anterior, afecta la velocidad de los distintos procesos de degradación, es una condición inherente a la operación del transformador, que puede ser controlada manteniendo en buenas condiciones el sistema de refrigeración del transformador y evitando periodos prolongados de sobrecarga, como también de las condiciones medio ambientales que pueden ser mitigadas. Por otra parte, el contenido de agua del aislamiento puede ser controlado por medio de procesos de secado, que pueden ser en línea o con el transformador des-energizado [6]. También se toma precaución en el contenido de humedad del aislamiento desde el proceso de producción con un secado de la parte activa antes de ser impregnada con aceite [7]. El efecto del agua en el aislamiento es muy significativo porque acelera su envejecimiento, inclusive a temperaturas de operación bajas, además reduce su capacidad dieléctrica y disminuye la tensión de iniciación de las descargas parciales [8]. Adicionalmente el agua reacciona con las cadenas de celulosa y a elevadas temperaturas rompe estas uniones generando más agua, lo que aumenta el contenido de humedad al interior del transformador y acelera más el proceso de degradación [5] [9].

Según [10], una humedad del 4% puede acortar la vida útil operativa de un transformador en un factor de 40 (es decir, en un 97,5%) respecto al aislamiento considerado como seco, tal y como se observa en la Figura 3, mientras que el oxígeno solo la reduce a la mitad.

Figura 3. Expectativa de vida del aislamiento sólido y su dependencia con la humedad y temperatura.



Fuente: L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, and T. J. Painter, "Aging of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 1, pp. 230–239, 2004. pg 237. Traducido del inglés al español.

El deterioro de los aislamientos celulósicos en el transformador, puede determinarse por medio del grado de polimerización (DP), que a su vez se puede estimar por medio de modelos matemáticos que calculan su valor teniendo en cuenta la temperatura y la humedad a la cual están expuestos durante un determinado lapso de tiempo [10]. En algunos de estos modelos también se considera el efecto de la oxidación [11], aunque la incidencia del oxígeno en la degradación del papel es menor en comparación con la provocada por el efecto de la humedad y la temperatura. Teniendo esto en consideración, se podría estimar el envejecimiento del aislamiento celulósico conociendo al menos la temperatura y la humedad a la que están expuestos durante la operación del transformador, ya que son estos los agentes que inciden en mayor medida en su degradación.

La temperatura interna de trabajo del transformador puede determinarse por medición o por medio de diferentes modelos que se encuentran en la literatura y en normas internacionales como la IEEE C57.91 – 2011 [12], que han sido validados demostrando resultados satisfactorios.

Por otra parte, los métodos actuales para la medición del contenido de humedad en los aislamientos sólidos del transformador, implican la desconexión del transformador, que además de representar grandes costos económicos asociados al descargo de este activo del sistema de potencia, no permiten el monitoreo continuo en línea del transformador. Además, estos métodos son poco precisos pues no consideran las condiciones de no equilibrio termodinámico que se presentan durante la operación del transformador o implica asumir valores de algunos parámetros, lo que también torna imprecisa la estimación de la humedad.

R. Villarroel en su tesis de doctorado [13], propuso un modelo para estimar la dinámica de la humedad-temperatura aplicable a transformadores inmersos en aceite, tanto mineral como vegetal, que permite estimar con mayor precisión el comportamiento de la humedad en el aislamiento de los transformadores de potencia durante su operación, sin necesidad de intervenir el equipo. Sin embargo, dada la dificultad que implica la medición precisa de la humedad en el papel sin intervenir el transformador, dicho modelo no ha sido validado a través de mediciones experimentales.

Por lo anterior, se propuso por medio del presente proyecto de investigación, desarrollar una metodología experimental para evaluar el modelo propuesto por R. Villarroel para la estimación de la humedad en el papel del transformador inmerso en aceite bajo condiciones de operación.

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El objetivo de este trabajo de investigación es validar experimentalmente un modelo multifísico de difusión de la humedad y temperatura en el papel aislante para transformadores sumergidos en aceite mineral.

Los objetivos específicos son:

- Representar mediante una planta experimental el comportamiento térmico y de la humedad de un transformador.
- Elaborar y aplicar un método experimental que permita obtener mediciones del comportamiento de la humedad en el aislamiento del transformador para diferentes condiciones de operación con carga.

- Implementar el modelo multifísico de difusión de humedad - temperatura en un software de simulación multifísica.
- Comparar los resultados entregados por el modelo multifísico implementado con las mediciones obtenidas en los experimentos.
- Proponer en caso de que se requiera, un ajuste del modelo de acuerdo a las desviaciones encontradas entre la simulación y la planta experimental.

1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente documento está conformado por seis capítulos. El primer capítulo es introductorio y en él se describe brevemente la composición del aislamiento del transformador y su relación con la expectativa de vida del equipo, también se presentan los objetivos del proyecto y la organización del documento.

En el segundo capítulo se describe el comportamiento de la temperatura y la humedad en el transformador, junto con los modelos que los representan y que son la base del estudio subsiguiente.

El tercer capítulo presenta en detalle los modelos que son utilizados por R. Villarroel para desarrollar el modelo multifísico, objeto de evaluación en este proyecto.

La descripción del experimento y el procedimiento ejecutado se muestran en el cuarto capítulo, indicando los métodos usados y los equipos utilizados.

En el quinto capítulo se exponen los resultados obtenidos en los experimentos realizados y la validación del modelo descrito en el tercer capítulo.

El sexto capítulo contiene las conclusiones a las que se llegó durante el desarrollo del proyecto, también se proponen, a manera de recomendación, algunos trabajos futuros para continuar profundizando en esta línea de investigación.

2 DINÁMICA DE LA TEMPERATURA Y LA HUMEDAD EN UN TRANSFORMADOR

Al interior de un transformador ideal se presentarían solamente los fenómenos relacionados con campos eléctricos y magnéticos; sin embargo, en un transformador real ocurren otros fenómenos como consecuencia de corrientes que producen calor en el material por donde estas circulan, a su vez hay procesos termodinámicos (circulación de fluidos, cambios de presión, entre otros) que son consecuencia de las variaciones de temperatura originadas por estas fuentes de calor.

Como consecuencia de este proceso termodinámico, en ciertos materiales usados en la construcción del transformador se presentan interacciones químicas entre ellos, en este caso intercambios de humedad entre la celulosa y el aceite.

Ambos comportamientos, el térmico y la difusión de humedad, no son estáticos y responden a diferentes factores que son descritos a continuación.

2.1 COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL TRANSFORMADOR

2.1.1 Generación del calor

Durante el funcionamiento del transformador se produce calor al interior del mismo debido a las pérdidas de energía, como consecuencia de la circulación de corriente por los conductores, así como las corrientes inducidas por los flujos magnéticos en las partes metálicas (incluyendo los propios conductores de los devanados) durante el proceso de transformación.

El calor producido en los materiales conductores es consecuencia del choque de los electrones con las partículas fijas durante la circulación de corriente, como consecuencia estas partículas fijas ganan energía aumentando su vibración generando calor. Este fenómeno se conoce como efecto Joule. Las pérdidas por inducción de corrientes parásitas (corrientes de Foucault) es otra manifestación del efecto Joule.

Otro medio de generación de calor es producido por la reorientación de los dipolos magnéticos en los materiales ferromagnéticos, conocido como pérdidas por histéresis.

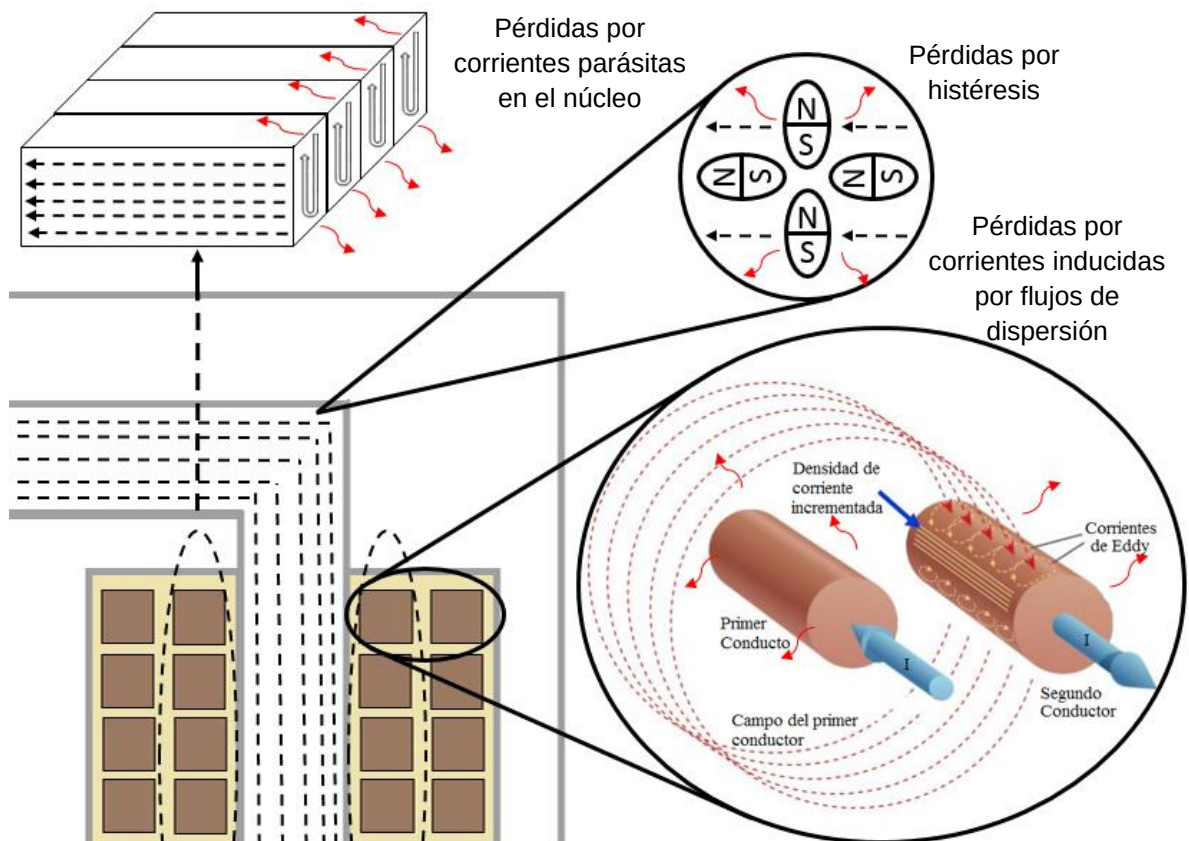
En los diversos elementos del transformador se pueden presentar uno o ambos medios de generación de calor descritos anteriormente.

En los conductores de los devanados se presentan pérdidas por efecto Joule debido a la corriente que circula a través del transformador, esta se puede calcular como I^2R ; donde I es la corriente que circula a través de los devanados y R su resistencia.

En el núcleo se presentan las pérdidas de histéresis y las pérdidas por corrientes parásitas inducidas en las láminas del núcleo del transformador por el flujo magnético principal.

Además de esto, se producen pérdidas en los devanados y otras partes conductoras debidas a las corrientes inducidas por los flujos de dispersión. En la Figura 4 se representan las diferentes formas de generación de calor.

Figura 4. Generación de calor.



2.1.2 Transferencia del calor

La transferencia de calor, es la tasa de flujo de la energía térmica de un cuerpo caliente a un cuerpo con menor temperatura. Siempre que exista una diferencia de temperatura en un medio o entre diferentes medios ocurrirá una transferencia de calor.

Dado que el calor se acumula e incrementa la temperatura del elemento donde se almacena, el calor generado en el interior del transformador debe ser disipado para evitar que llegue a una temperatura que provoque deterioro excesivo del aislamiento [14].

En el transformador la transferencia de calor ocurre de tres formas diferentes [15]:

2.1.2.1 *Conducción:*

Es un proceso de transferencia de calor a través de dos medios en contacto, ya sean sólidos, líquidos o gases. En un transformador este medio de transferencia en los devanados donde el calor fluye a través del aislamiento de papel que se mantiene en contacto directo con los conductores del devanado, además en diferentes puntos del devanado el calor tiene que fluir a través de muchas capas de conductores y material aislante antes de entrar en contacto con el medio refrigerante.

2.1.2.2 *Convección:*

Es un mecanismo de transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido (líquido o gas) adyacente que circula de una región a otra. La circulación puede ser natural, gracias al cambio de la densidad del fluido cuando aumenta la temperatura, o artificial (forzada) por medio de una fuerza externa que obliga al movimiento del fluido.

En los transformadores, el aceite en la medida en que gana calor asciende y lo transfiere al medio ambiente a través de las paredes del tanque y los radiadores. El aceite en ascenso es reemplazado con aceite más frío del fondo, generando una circulación continua de este dentro del tanque y los radiadores.

Este medio de transferencia de calor es modificado con los diferentes tipos de refrigeración [15] como son:

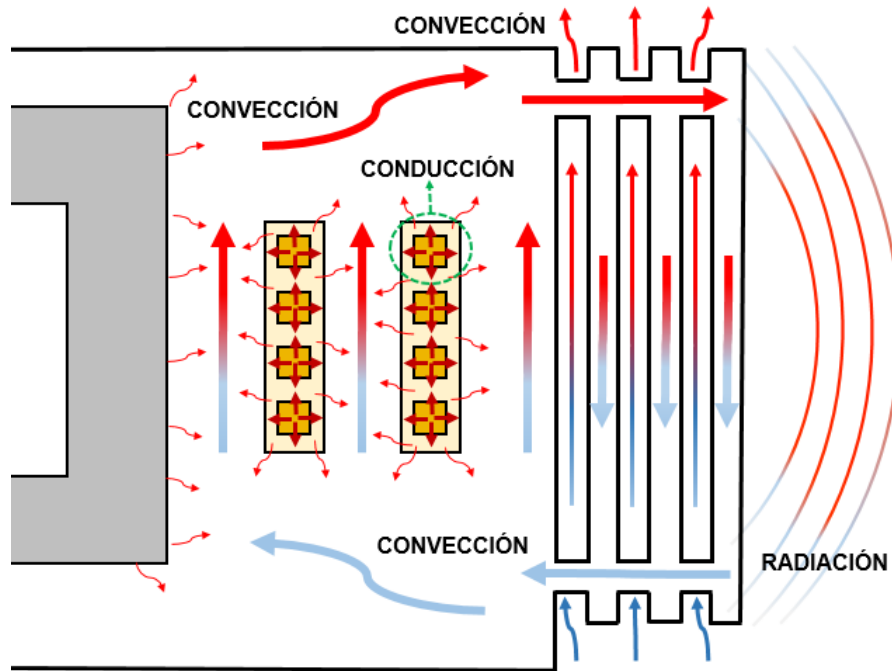
- **ONAN:** Este tipo de refrigeración se realiza por circulación natural del aceite (Oil Natural) y de aire (Air Natural).
- **ONAF:** Se usa una ráfaga de aire producida por ventiladores. Se envía el aire forzado (Air Forced) a través de los radiadores y los espacios huecos para extraer rápidamente el aire caliente causando un mejor intercambio de calor entre el aceite y el aire exterior. El aceite se mantiene en circulación natural (Oil Natural).
- **OFAF:** Se añaden bombas para realizar una circulación forzada del aceite (Oil Forced) y se mantiene la circulación forzada del aire (Air Forced) a lo largo de los radiadores para garantizar el intercambio del calor entre el aire y el aceite.
- **ODAF:** Se puede mejorar la refrigeración anterior añadiendo ductos para dirigir el aceite (Oil Directed) al núcleo y devanados. Se mantiene la ventilación forzada con aire (Air Forced).
- **OFWF/ODWF:** Se puede cambiar el aire por agua cuando se requiere un intercambio de calor más eficaz, en este caso el agua es forzada (Water Forced) y se mantiene el aceite con circulación forzada (Oil Forced) o con circulación dirigida (Oil Directed).

2.1.2.3 Radiación:

Es la transferencia del calor en forma de ondas electromagnéticas. En el transformador la disipación de calor desde el tanque se produce tanto por radiación como por convección natural. En los radiadores también se produce la disipación de calor por radiación, pero es muy poca comparada con la disipación por convección, debido a la cercanía entre las aletas del radiador. Por ello en los radiadores solo se toma como área efectiva de radiación a la superficie envolvente exterior.

En la siguiente Figura 5 se representan las diversas formas de transferencia de calor.

Figura 5. Transferencia de calor.

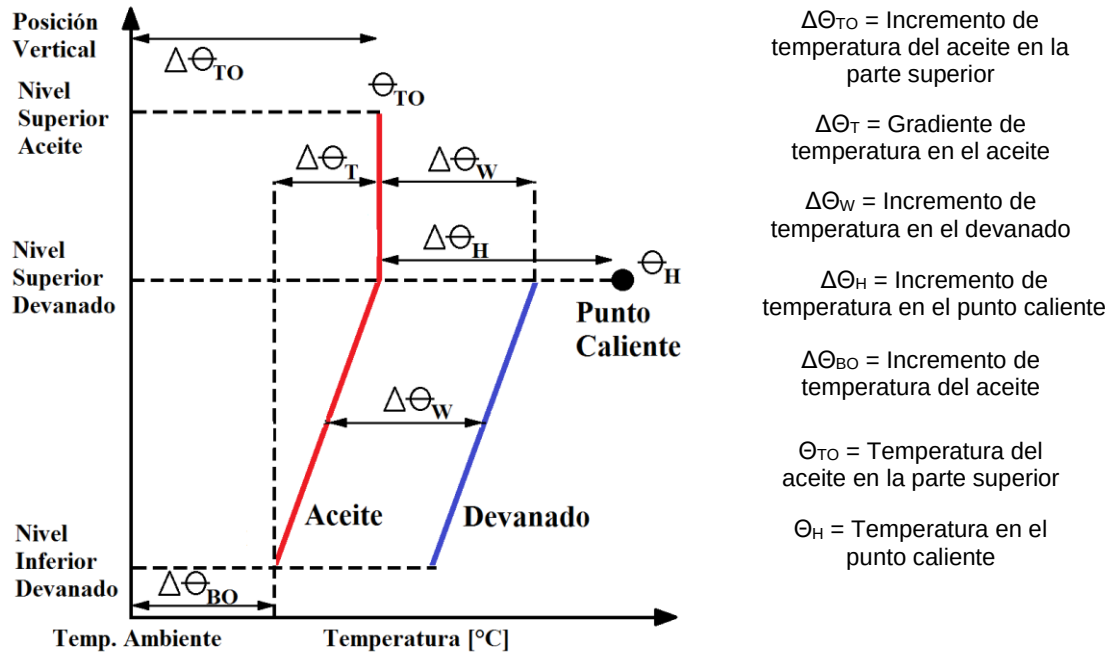


2.1.3 Distribución de la temperatura

Para determinar la distribución de la temperatura al interior de un transformador, se asume un diagrama térmico como el mostrado en la Figura 6 [16], este diagrama es la simplificación de una distribución más compleja. Las hipótesis realizadas en esta simplificación son las siguientes [17]:

- a) La temperatura del aceite dentro de la cuba aumenta linealmente desde la parte inferior a la superior, sin importar el modo de refrigeración.
- b) El calentamiento del conductor, a cualquier altura del arrollamiento, se supone que crece linealmente, paralelo al calentamiento del aceite, con una diferencia constante entre las dos líneas rectas.
- c) El calentamiento del punto más caliente es mayor que el calentamiento del conductor en la parte superior del arrollamiento, porque se ha de establecer una tolerancia por el aumento en pérdidas parásitas, por las diferencias en flujos de aceite locales y por un posible papel adicional en el conductor. Para tener en cuenta esta no-linealidad, la diferencia de temperatura entre el punto caliente y el aceite superior en la cuba se usa un factor llamado “factor de punto caliente”.

Figura 6. Diagrama térmico de la distribución de la temperatura en el transformador.



Fuente: M. E. Muñoz Leudo, "Metodología para determinar la carga en transformadores de distribución," Universidad del Valle, 2008. pg 22. Modificada.

2.2 HUMEDAD EN EL SISTEMA DE AISLAMIENTO PAPEL-ACEITE

2.2.1 Fuentes de humedad

El agua en el interior de un transformador puede aparecer como consecuencia de contaminación externa o como un subproducto de la propia degradación de los aislamientos. A continuación se describen las diversas fuentes de humedad que afectan al transformador [18]:

2.2.1.1 Humedad residual:

Corresponde a la humedad almacenada en los "componentes estructurales gruesos" (madera, cartones, entre otros) que no se elimina durante el secado en fábrica debido a las limitaciones de los procedimientos de secado o su duración. También puede deberse al humedecimiento de la superficie del aislamiento cuando se realiza el encube.

Durante el servicio del transformador, esta humedad residual es redistribuida espacialmente con la generación de calor, lo que implica su migración del aislamiento grueso al más delgado usando el aceite como medio de transferencia.

2.2.1.2 Ingreso de humedad:

Corresponde a la filtración de la humedad desde la atmosfera hacia el interior del transformador. Esto puede ocurrir de diversas maneras:

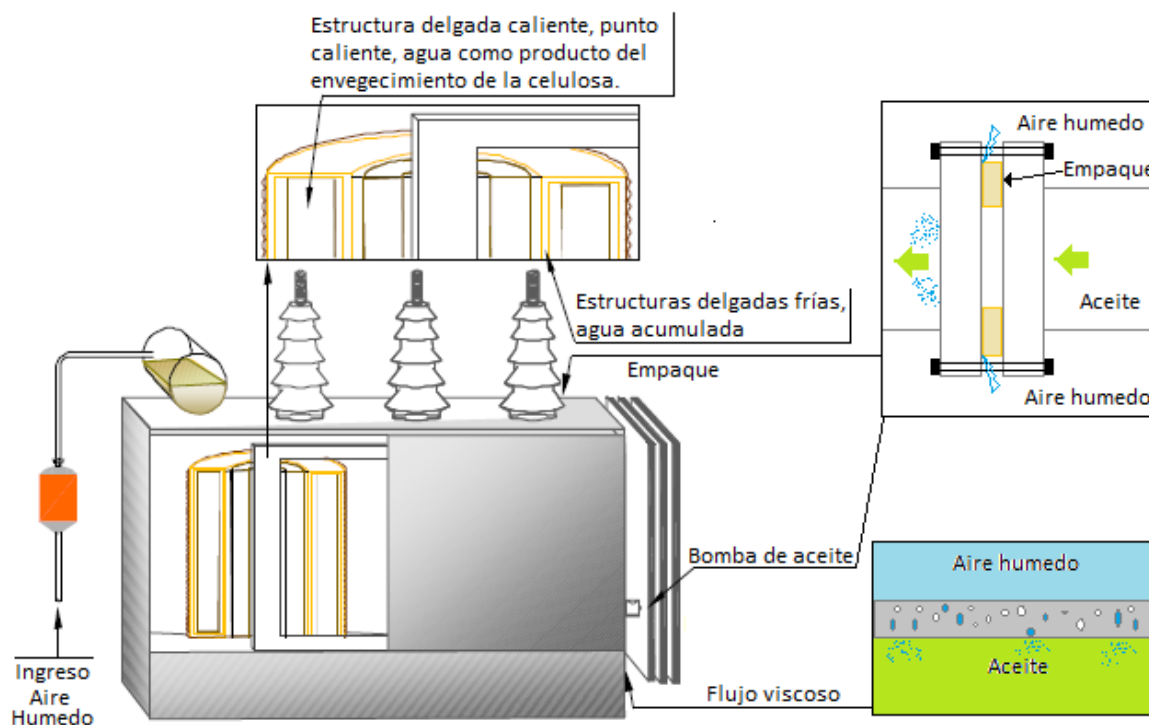
- Cuando la parte activa o el aceite se expone directamente al aire de la atmosfera, por ejemplo, durante la instalación o reparaciones internas.
- Por flujo molecular Knudsen, debido a la diferencia de presión de vapor de agua entre la atmosfera y el interior del transformador, en forma de difusión gaseosa a través de poros y capilares en la cuba.
- Por flujo de aire húmedo, cuando la presión atmosférica es mayor a la del interior del transformador. Este flujo se produce principalmente a través del sistema de respiración del conservador de aceite. También ocurre cuando el sello del tanque no es el adecuado o hay deterioro en el mismo en los diversos accesorios que tenga instalado el transformador (bujes, medidores, válvulas, etc.), incluso el sistema de bombeo de aceite crea una presión negativa propicia para el ingreso de la humedad.

2.2.1.3 Degradación de los materiales aislantes:

El envejecimiento de la celulosa consiste en la descomposición de la misma por la escisión de las cadenas moleculares y la consiguiente generación de subproductos como agua y compuestos furánicos. Otro mecanismo que aporta agua a los aislamientos, aunque en menor proporción que la descomposición de la celulosa, es la oxidación del aceite. La descomposición de estos materiales es debida a temperaturas elevadas, por lo tanto, se presenta con mayor facilidad en los puntos calientes.

En la Figura 7 se representan las diversas fuentes de humedad.

Figura 7. Fuentes de contaminación de agua en el transformador.



Fuente: V. Sokolov et al., CIGRE 349 Moisture Equilibrium And Moisture Migration within Transformer Insulation Systems, no. June. CIGRE, 2008. pg 13. Modificada y traducida del inglés al español.

Según [4], la humedad en los transformadores varía con su edad (unidades nuevas menos húmedas que las más viejas), su aplicación (en transformadores de distribución con baja carga, la humedad es menor que para grandes unidades) y su construcción (transformadores con respiración libre tienen mayor humedad en menor tiempo). En cada uno de estos casos se presenta una combinación en los aportes de cada una de las fuentes de humedad al total de humedad del transformador.

2.2.2 Adsorción y desorción de humedad en la celulosa

La adsorción de humedad en los aislamientos celulósicos se inicia en su superficie y en los microcapilares formados por las fibras de celulosa, a través de las estructuras polares o sitios activos. Cuando las moléculas de agua en forma de vapor se unen a estos sitios activos, mantienen un movimiento limitado gracias a la atracción electromagnética de estas porciones polares de la celulosa. Esto ocurre hasta que otras moléculas de agua ocupan todos los sitios activos disponibles en la

totalidad de la superficie expuesta, formando una capa de moléculas de agua, conocida como monocapa [18].

Si la concentración de moléculas de agua en la superficie supera el número de sitios activos, las moléculas sobrantes presionan a las de la capa superficial hacia el interior del aislamiento, forzándolas a ser adsorbidas por las moléculas de celulosa del interior y de nuevo se forma una capa en la superficie del aislamiento. A esta fase del proceso se le conoce como multicapa. Si hay suficiente cantidad de moléculas de agua disponibles, el proceso se repetirá hasta alcanzar el equilibrio [1]. La Figura 8 esquematiza el proceso de adsorción del agua por las estructuras polares de la celulosa.

Figura 8. Proceso de adsorción de las moléculas de agua.



Fuente: D. F. García Gómez, "Determinación de coeficientes de difusión de humedad en papeles aislantes de transformador," Carlos III de Madrid, 2012. pg 15.

Un proceso similar se presenta cuando se produce la desorción del agua desde el interior hacia el exterior del aislamiento, pero a diferencia de la adsorción, para que éste se inicie, se requiere una cierta energía de activación que por lo general es aportada por un incremento de la temperatura, el aumento de la temperatura acelera el movimiento y la desorción de la humedad [18]. Por esta razón, al aumentar la temperatura la cantidad de agua que puede admitir el papel se reduce.

2.2.3 Intercambio y equilibrio de la humedad

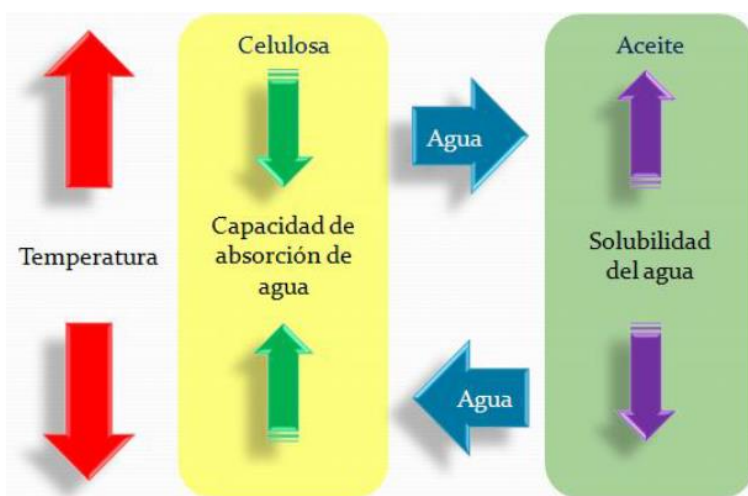
La distribución de la humedad entre el papel y el aceite no es estática, sino que depende de la temperatura alcanzada por los diferentes materiales [13].

La capacidad del aceite para aceptar agua depende del límite de saturación de agua, el cual establece el valor máximo de agua que se puede disolver antes de observarse en forma libre [18].

Cuando la temperatura aumenta, el límite de saturación de agua en el aceite se incrementa, permitiendo que pueda adsorber mayor cantidad de agua, por otra parte la capacidad de adsorción de agua de la celulosa se reduce, haciendo que esta libere parte de la humedad que posee [1]. El proceso contrario se presenta cuando la temperatura se reduce.

Como consecuencia, con los cambios de temperatura originados por la operación propia del transformador, existirá un continuo intercambio de humedad entre el papel y el aceite, siempre tratando de encontrar el equilibrio entre los dos medios; es decir, buscando que las saturaciones relativas sean iguales [19]. Este comportamiento se puede observar en la Figura 9, donde se transfiere humedad de la celulosa al aceite cuando la temperatura aumenta y del aceite a la celulosa cuando la temperatura disminuye.

Figura 9. Esquema de la dinámica de humedad en el sistema papel-aceite.



Fuente: D. F. García Gómez, "Determinación de coeficientes de difusión de humedad en papeles aislantes de transformador," Carlos III de Madrid, 2012. pg 24.

2.2.4 Distribución de la humedad

La celulosa y el aceite tienen un comportamiento muy diferente con respecto a la humedad; los materiales celulósicos son hidrófilos mientras que el aceite es altamente hidrófobo [20]. En consecuencia, la mayor parte de la humedad en un

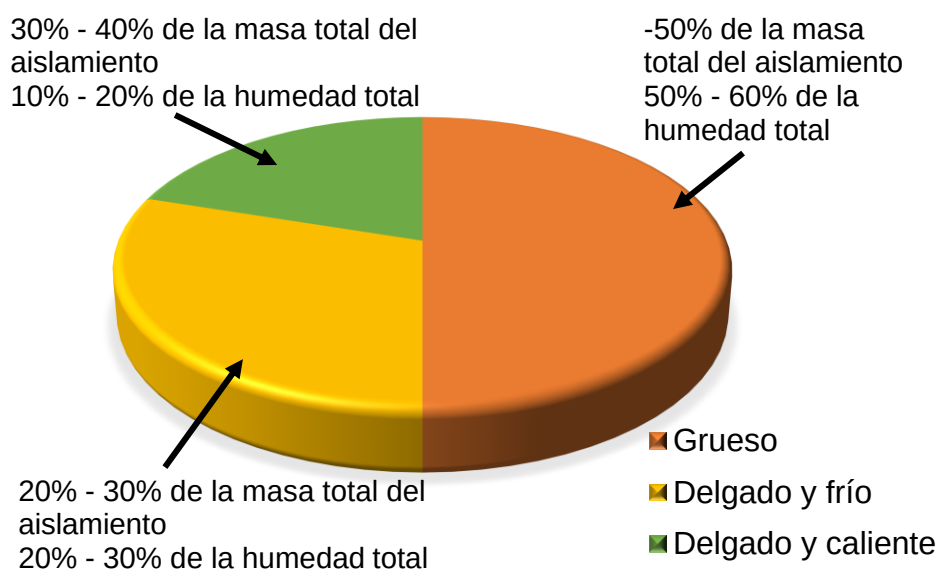
transformador está contenida en su aislamiento celulósico, este último puede ser clasificado en tres grupos [18]:

Aislamientos gruesos: son principalmente componentes de soporte. Contienen la mayor cantidad de humedad, en lo que refiere al aislamiento sólido, sin embargo, su aporte es reducido debido a la baja temperatura de trabajo y sus grandes constantes de tiempo (años). Este bajo aporte a la dinámica de humedad, es gracias a su gran grosor y baja superficie en contacto con aceite caliente.

Aislamientos delgados y fríos: son principalmente barreras, tapas entre otros. Tienen espesor menor a los anteriores y su temperatura de operación es similar a la del aceite, gracias a esto tiene mayor facilidad de interferir en el proceso de migración de humedad (liberar o recibir) en tiempos relativamente cortos (como los ciclos diarios de temperatura), debido a esto se constituyen como el principal almacén de agua para intercambio con el aceite.

Aislamientos delgados y calientes: corresponde al papel delgado que recubre a los conductores, debido a esto su temperatura de trabajo es mayor que los demás aislamientos, haciendo que la movilidad de humedad sea más rápida. Dado su bajo espesor y gran temperatura de trabajo, la cantidad de agua que almacenan es la menor de los tres grupos de aislamiento.

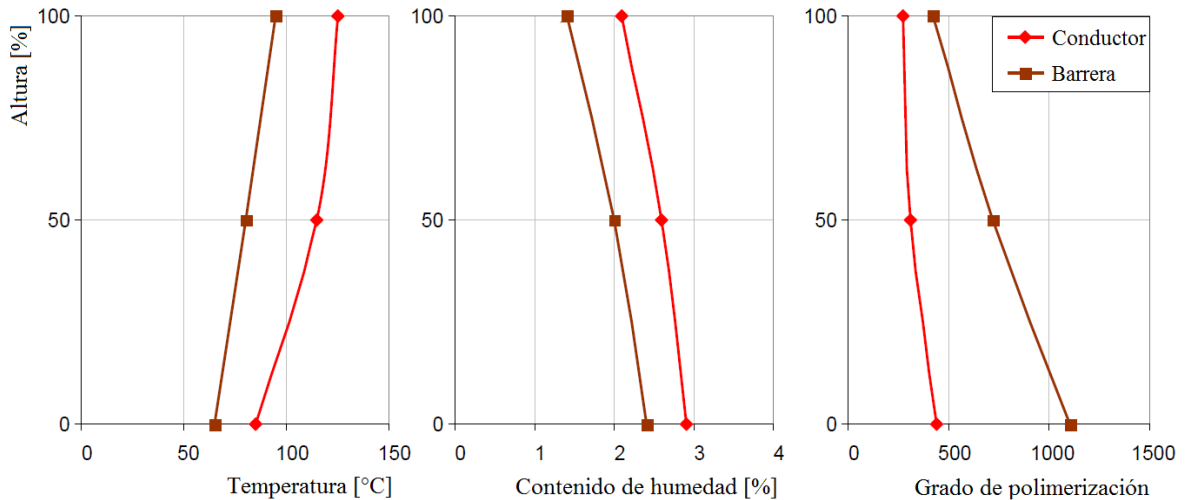
Figura 10. Distribución del aislamiento sólido y su contenido de humedad.



Fuente: D. F. García Gómez, "Determinación de coeficientes de difusión de humedad en papeles aislantes de transformador," Carlos III de Madrid, 2012. pg 25. Modificada.

Teniendo en cuenta que la temperatura a lo largo del devanado no es igual, así mismo la concentración de humedad varía con la altura de este, como se observa en la Figura 11, en la parte más caliente del devanado se espera que el contenido de humedad sea menor que en la zona con menos temperatura. También se observa que el grado de polimerización (con el cual se puede estimar el envejecimiento) no es igual en todo el devanado.

Figura 11. Distribución de temperatura, humedad y grado de polimerización de un modelo de devanado.



Fuente: V. Sokolov et al., CIGRE 349 Moisture Equilibrium And Moisture Migration within Transformer Insulation Systems, no. June. CIGRE, 2008. pg 26. Traducido del inglés al español.

Esto último demuestra la importancia de conocer como es la concentración de la humedad en diversas alturas del devanado, dado que el grado de polimerización es afectado por ella.

3 MODELO MULTIFÍSICO DE HUMEDAD Y TEMPERATURA EN EL TRANSFORMADOR

El comportamiento térmico del transformador ha sido ampliamente estudiado por la comunidad científica, como resultado de ello se han obtenido gran cantidad de modelos térmicos que han llegado a ser validados y normalizados, entre ellos está el modelo presentado en el Anexo G de la norma IEEE Std. C57.91 – 2011.

Por otra parte, la difusión de la humedad se modela basados en las leyes de Fick, lo que cambia es el cálculo del coeficiente de difusión y las condiciones de frontera, según el caso de estudio.

Ambos modelos fueron integrados por R. Villarroel [13] en un solo modelo multifísico, con el fin de conocer el comportamiento de la humedad y la temperatura al interior del transformador cuando este está en servicio sin requerir mediciones.

En este capítulo se describen brevemente los modelos de temperatura y humedad que sirvieron para el desarrollo de la propuesta de R. Villarroel, junto con una descripción más detallada de este último, indicando las ecuaciones utilizadas, la relación entre ellas y la construcción del mismo.

3.1 MODELO DE TEMPERATURA

R. Villarroel utiliza el modelo térmico descrito en el Anexo G de la norma IEEE Std. C57.91 – 2011, porque tiene una gran exactitud si se utilizan métodos precisos para determinar la carga, temperatura ambiente, posición de la derivación y el modo de enfriamiento durante el funcionamiento del transformador [13]. En este apartado solo se describen los aspectos más relevantes del modelo debido a su extensión, si se desea mayor detalle se puede consultar la norma [12].

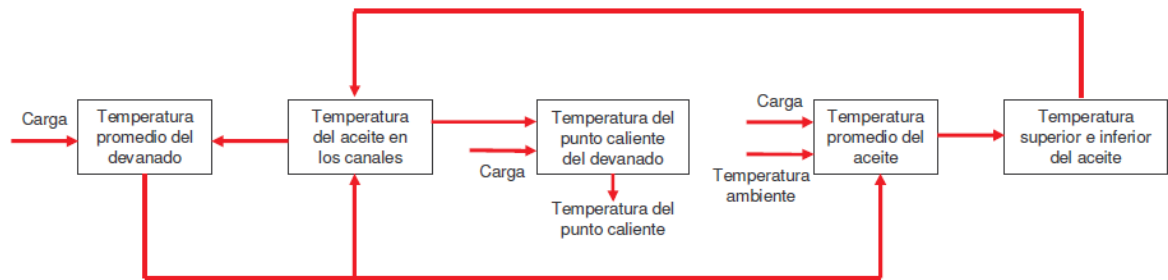
Las ecuaciones presentadas en este modelo constituyen un procedimiento de cálculo de diferencias finitas transitorias, que están formuladas de modo que las temperaturas obtenidas en el tiempo anterior t_1 , se usen para calcular las temperaturas en el siguiente instante de tiempo $t_1 + \Delta t$.

En cada paso de tiempo, se calculan las pérdidas según la cargabilidad, corrigiendo el cambio de la resistencia con la temperatura. Dentro del modelo también se considera el tipo de fluido aislante, el modo de enfriamiento, el aumento de la

temperatura del aceite del conducto de los bobinados, los cambios de viscosidad del fluido, la temperatura ambiente y los cambios de carga, incluyendo las variaciones causadas por el ajuste de las derivaciones y los periodos con sobretensión.

Con este enfoque, no se requiere iteración en cada paso de tiempo y la precisión requerida se consigue seleccionando un pequeño valor para el incremento de tiempo Δt . En la Figura 12 se presenta el diagrama de bloques del modelo propuestos en el Anexo G de la norma IEEE Std. C57.91 – 2011.

Figura 12. Diagrama de bloques del modelo propuesto en el Anexo G de [12].



Fuente: M. E. MUÑOZ LEUDO, "Metodología para determinar la carga en transformadores de distribución," Universidad del Valle, 2008. pg 12.

3.2 MODELO DE DIFUSIÓN DE HUMEDAD

La difusión de la humedad fue modelada por R. Villarroel con ayuda de la segunda ley de Fick que se describe con la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (1)$$

Donde D es el coeficiente de difusión de humedad efectivo (incluye difusión de humedad en forma de vapor y líquido) en el aislamiento sólido, c es la concentración de humedad total local, t es el tiempo y x es la distancia dentro del material en la dirección del movimiento de humedad. En este caso, se considera solamente la difusión en una dirección "x" perpendicular al conductor, ya que el devanado posee una gran longitud en la dirección "y" en comparación con la porción de los extremos donde se puede presentar difusión en la dirección "y", por otra parte, en la dirección "z" no se presenta difusión por la geometría cilíndrica del problema.

El parámetro principal para modelar la dinámica de la humedad en el interior del aislamiento de un transformador es el coeficiente de difusión D , cuyo cálculo debe ser lo suficientemente acertado para considerar todos los efectos que influyen en él como son el espesor del papel, la temperatura y la concentración de humedad [19] [21] [22] [23].

En [13], R. Villarroel propone tres ecuaciones que permiten calcular el coeficiente de difusión de humedad en cartones impregnados, una de ellas para aceites minerales y dos para aceites de origen vegetal de diferentes fabricantes. En este estudio, es de interés conocer la humedad en el papel impregnado en aceite mineral, por lo tanto, se usará en el modelo un coeficiente de difusión correspondiente a este material, como el desarrollado en [23] que se presenta en la ecuación (2).

$$D = 0,5 \cdot e^{\left(0,5 \cdot c - \frac{10057 - 133,7 \cdot l}{T}\right)} \quad (2)$$

Donde D es el coeficiente de difusión de la humedad efectivo (expresado en m^2/s), c es la concentración de humedad local del aislamiento (expresada en % del peso seco), T es la temperatura del aislamiento (expresada en K) y l el espesor del aislamiento celulósico (indicado en mm).

3.3 MODELO DE DIFUSIÓN DE HUMEDAD - TEMPERATURA

R. Villarroel propone la integración del modelo térmico del transformador presentado en el Anexo G de la norma IEEE C57-91 – 2011 [12] y los modelos de humedad estudiados en [21] y [22], para determinar la humedad alojada en la celulosa durante la operación de un transformador.

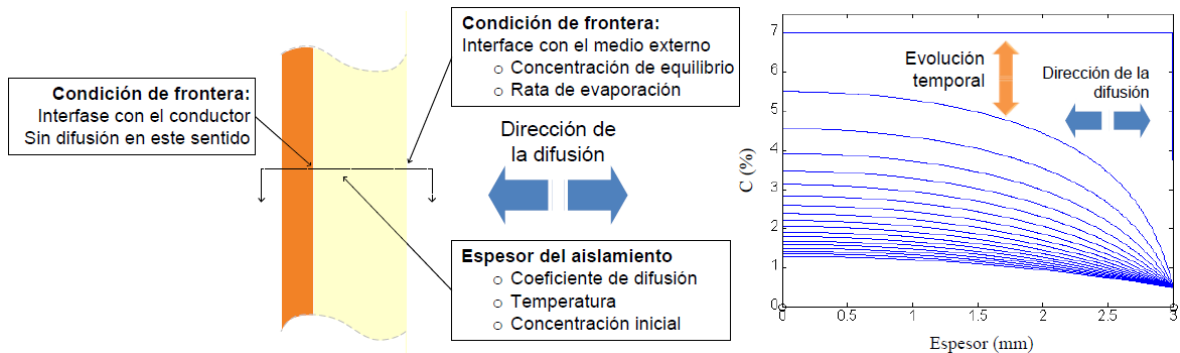
Para lograr esto, R. Villarroel establece un proceso de cálculo en cascada, donde primero se resuelve el modelo térmico para todo el perfil de carga designado, extrayendo las temperaturas de operación del devanado y del aceite en diferentes alturas.

Posteriormente, con las temperaturas de operación, se resuelve el modelo de difusión de humedad para cada periodo de tiempo. En esta etapa se calcula la concentración de equilibrio de humedad entre el papel y el aceite, teniendo como condición la conservación de la cantidad total de agua al interior del transformador.

Si bien el equilibrio de humedad no se alcanza durante la operación normal del transformador, resulta importante conocerlo para establecer las condiciones de frontera que permitan resolver el modelo en elementos finitos (MEF) de la difusión de humedad.

El MEF resuelve la segunda ley de Fick, ecuación (1), tal y como se describe en la Figura 13, con la condición de frontera mencionada anteriormente entre el papel y el aceite.

Figura 13. Esquema del MEF para el cálculo de la difusión de humedad en el aislamiento celulósico de papel Kraft.



Fuente: D. F. García Gómez, "Determinación de coeficientes de difusión de humedad en papeles aislantes de transformador," Carlos III de Madrid, 2012. pg 30.

En cada paso de tiempo se considera que la superficie del papel tiene un contenido de humedad igual a la obtenida en equilibrio para la temperatura de ese instante, es decir, el modelo supone que la superficie del papel alcanza el equilibrio de una manera instantánea [13].

La concentración de equilibrio se puede calcular resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones en cada paso de tiempo, considerando la temperatura calculada en el aceite en ese momento:

$$C_{equil} = 2,173 \cdot 10^{-5} \cdot p_v^{0,6685} \cdot e^{\frac{42725,6}{T}} \quad (3)$$

$$W_{total} = M_{celulosa} \cdot \frac{C_{equil}}{100} + M_{aceite} \cdot \frac{PPM_{aceite-equil}}{1000000} \quad (4)$$

Donde C_{equil} es la humedad de equilibrio en la celulosa, calculada usando la fórmula propuesta por Fessler [24] (expresada en % de la masa seca), T es la temperatura en la interfaz aceite-celulosa (expresada en K), p_v es la presión parcial del vapor de agua (expresada en atmósferas), W_{total} es el total de agua al interior del transformador (expresado en Kg), $M_{celulosa}$ es el peso de celulosa (expresado en Kg),

M_{aceite} es el peso de aceite (expresado en Kg) y $PPM_{aceite-equil}$ es el contenido de humedad en el aceite (expresado en partes por millón).

La presión parcial del vapor de agua, p_v , se puede calcular con ayuda de las siguientes ecuaciones:

$$p_v = RH \cdot p_{v-sat} = \frac{PPM}{PPM_{sat}} \cdot p_{v-sat} \quad (5)$$

$$PPM_{sat} = 10^{A - \frac{B}{T}} \quad (6)$$

Donde PPM es la concentración de humedad en el aceite (expresada en partes por millón), PPM_{sat} es la concentración de humedad en saturación (expresada en partes por millón), representada en la fórmula de Arrhenius con T siendo la temperatura en el aceite (expresada en K) y los parámetros $A = 7,44$ y $B = 1686$ calculados por R. Villarroel [13]. Por último, p_{v-sat} es la presión parcial en saturación (indicada en atmosferas), que se puede calcular con la siguiente ecuación tomada de [25]:

$$p_{v-sat} = \frac{p_c}{760} \cdot 10^{\left[\left(\frac{T_{ext} - T_c}{T_{ext}} \right) \cdot \left(\frac{a + b \cdot (T_c - T_{ext}) + c \cdot (T_c - T_{ext})^3}{1 + d \cdot (T_c - T_{ext})} \right) \right]} \quad (7)$$

Donde p_c es la presión crítica del agua ($1,65807 \cdot 10^5$ mmHg), T_c es la temperatura crítica del agua (647,26 K), T_{ext} es la temperatura en la interfaz papel-aceite (expresada en K), los parámetros a , b , c y d son constantes y tiene los siguientes valores $a=3,2437814$, $b=5,86826 \cdot 10^{-3}$, $c=1,1702379 \cdot 10^{-8}$, $d=2,1878462 \cdot 10^{-3}$.

Finalmente se calcula la humedad media en el papel usando la siguiente ecuación:

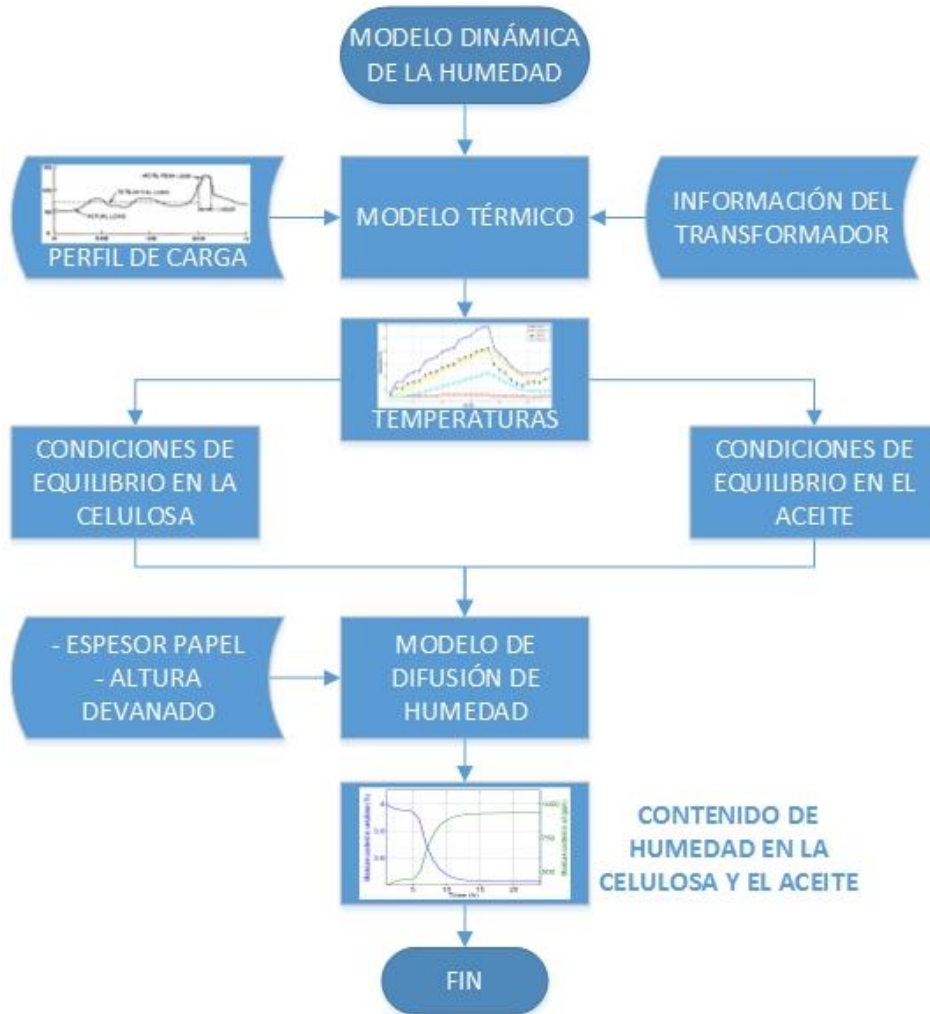
$$C_{m-(t_i)} = \frac{1}{l} \cdot \int_{x=0}^{x=1} C_{x-(t_i)} dx \quad (8)$$

Donde C_{m-ti} es la concentración de humedad media en el paso de tiempo t_i (indicado en segundos) y l es el espesor del aislamiento (expresado en mm). Una vez calculado C_{m-ti} , la humedad instantánea contenida en el aceite puede ser calculada usando la ecuación (4).

En el trabajo desarrollado por R. Villarroel, se considera la temperatura del papel igual a la temperatura del devanado, y la temperatura de la interfaz papel-aceite es tomada como la temperatura del aceite.

Este modelo multifísico de humedad y temperatura fue implementado con ayuda de las herramientas MATLAB® (modelo térmico) y COMSOL Multiphysics® (MEF - difusión de humedad) y se representa resumidamente en la Figura 14. En el Anexo A se presenta la implementación del MEF en COMSOL Multiphysics® y su interacción con MATLAB®.

Figura 14. Diagrama de flujo de un modelo multifísico de humedad – temperatura en el aislamiento celulósico del transformador.



Fuente: R. Villaroel, "Moisture Dynamics in Transformers Insulated with Natural Esters," Carlos III de Madrid, Mayo. 2015. pg 109. Traducido del inglés al español.

4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Teniendo en cuenta los recursos disponibles para la ejecución de ensayos y preparación de muestras, se diseñó un experimento que permitiera reproducir el comportamiento de la humedad y la temperatura de un transformador bajo una condición de operación dada, con el fin de validar el modelo propuesto por R. Villarroel. En este capítulo se detalla el experimento propuesto, indicando los equipos usados y el procedimiento seguido.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO Y EQUIPOS

El experimento se basa en la idea de reproducir la dinámica de la temperatura y la humedad bajo una condición de operación de un transformador con aislamiento papel – aceite, de tal manera que permita la medición de la humedad presente en el papel por medio de algún método no invasivo, para evitar la contaminación o truncar el proceso de carga del transformador. Para esto se utiliza una planta experimental que opera de forma autónoma que permita reproducir el comportamiento del transformador, facilitando la ejecución de las mediciones de humedad requeridas.

Dentro del experimento se deben considerar las fuentes de humedad que pueden intervenir en el corto plazo (< 1 año) durante la operación del transformador, ya que no se dispone del tiempo suficiente para considerar aquellas que son significativas solamente en grandes periodos de tiempo. En este caso el tiempo durante el cual se emuló el comportamiento del transformador fue de 52 días aproximadamente. En la Tabla 1 se presentan las fuentes de humedad descritas en la sección 2.2.1, allí también se seleccionan aquellas fuentes que podían intervenir en el corto plazo y se describe la forma en que se representan.

Al interior de la planta experimental se dispuso de las muestras de papel Kraft y el aceite dieléctrico mineral, que fueron sometidas al experimento, de estas dos es importante conocer las condiciones iniciales de humedad al momento de iniciar el experimento, ya que son valores de entrada indispensables para el modelo a validar.

Para conocer la humedad inicial del papel se aplica el método A de la norma ASTM D 1348 – 08 [26] usando una balanza de humedad. Esta humedad inicial es muy elevada debido a la exposición del papel Kraft al ambiente, por lo tanto, es reducida

por medio de un horno de secado con vacío a un valor al menos inferior al 9%. Para obtener la humedad inicial del aceite se usa un equipo de titulación coulométrica de Karl Fischer usando el método descrito en la norma ASTM D1533 – 12 [27].

Tabla 1. Fuentes de humedad que intervienen en el experimento.

Tipo	Fuente	Interviene en el corto plazo (< 1 año)*	Descripción
Humedad Residual	Humedad almacenada en las estructuras delgadas calientes	Si	Representada por papel Kraft bobinado en un cilindro que representa el devanado
	Humedad almacenada en las estructuras delgadas frías	Si	Libera humedad durante ciclos de carga diarios. Es representada por cartón de 2 mm de espesor como el utilizado en ductos
	Humedad almacenada en las estructuras gruesas	No	Constante de tiempo de algunos años
	Superficies húmedas	Si	Humedad que fácilmente es transferida al aceite. Se considera como la humedad alojada en la superficie de las cubas y tuberías cuando ingresa aire húmedo durante la introducción de aceite o de las muestras.
Ingreso de humedad	Exposición directa del aceite al aire de la atmosfera	Si	Ocurre cuando el aceite es ingresado a la planta experimental e interactúa con el aire contenido en la planta que no ha circulado por el deshumectador
	Flujo molecular Knudsen	No	Su aporte en corto tiempo es despreciable
	Flujo de aire húmedo	Si	Se presenta en el sistema de respiración del tanque principal, es controlado con un deshumectador de aire
Degradación de los materiales aislantes	Escisión de las cadenas moleculares de la celulosa y oxidación del aceite.	No	Su aporte en corto tiempo es despreciable

Nota:*La selección de cada una de las fuentes de humedad se hace con ayuda de la información presentada en el documento CIGRE 349 [18], donde se presenta una idea de los aportes de cada fuente.

Para medir la humedad durante el periodo de funcionamiento de la planta, se usó un equipo de espectroscopia en el dominio de la frecuencia (FDS por sus siglas en inglés) de referencia DIRANA, para obtener la respuesta dieléctrica de un portamuestra con papel Kraft.

Con base en esta respuesta dieléctrica se obtiene un valor de humedad en cada muestra, que fue comparado con el valor entregado por el modelo propuesto por R. Villarroel. Como este último es altamente dependiente de la temperatura, se tomarán las mediciones de temperatura de la planta experimental como uno de sus datos de entrada, asegurando de esta manera que el modelo contará con la misma información que lo encontrado en el experimento.

Los equipos nombrados anteriormente se describen a continuación de forma breve:

4.1.1 Planta Experimental

La planta experimental fue diseñada previamente a la presentación de la propuesta de este proyecto de maestría, con la intención de ser usada en los experimentos, sin embargo su construcción se realizó en las primeras etapas de este proyecto. Esto fue posible gracias a la financiación por parte de la Universidad del Valle (convocatoria interna 4-2015) y COLCIENCIAS (convocatoria externa 715-2015).

Esta planta se presenta en la Figura 15 y fue construida con el objetivo de [28]:

- Reproducir la dinámica de temperatura a diferentes alturas a lo largo del devanado y su variación por el cambio de carga en el transformador.
- Asegurar la estanqueidad para evitar el ingreso excesivo de humedad desde el exterior hacia el interior, lo que podría contaminar el proceso.
- Permitir la medición de la humedad por algún método no invasivo.
- Simplificar otros fenómenos físicos presentes en el transformador, para enfocar el estudio únicamente en las variables que influyen en la dinámica de la humedad (como la transferencia de calor y el transporte de masa).

El comportamiento térmico fue representado utilizando resistencias de calefacción que emulan el aporte de calor a los aislamientos del devanado y al aceite. El control y registro temperatura se realizó por medio de un PLC.

La planta está constituida por 5 cubas que representan 5 alturas diferentes en el devanado y por lo tanto tendrán una temperatura de operación diferente, tanto del

devanado como del aceite. Una de las cubas se presenta en la Figura 16 con cada una de sus partes. Las cubas se numeran de 1 a 5 de izquierda a derecha (Figura 15), siendo la 1 de mayor temperatura hasta la 5 de menor valor.

En las cubas, los devanados son representados por cilindros de aluminio donde fueron instaladas las muestras de papel sometidas al experimento, este instrumento se puede observar en la Figura 17. Este elemento además permite la aplicación de una señal de tensión a la muestra para obtener su respuesta dieléctrica que, entre otros factores, es dependiente de la concentración de humedad en la celulosa. Un elemento de este tipo fue desarrollado en [29] y demostró tener un fácil procedimiento para su caracterización usando la técnica de FDS [30].

Figura 15. Planta experimental utilizada.

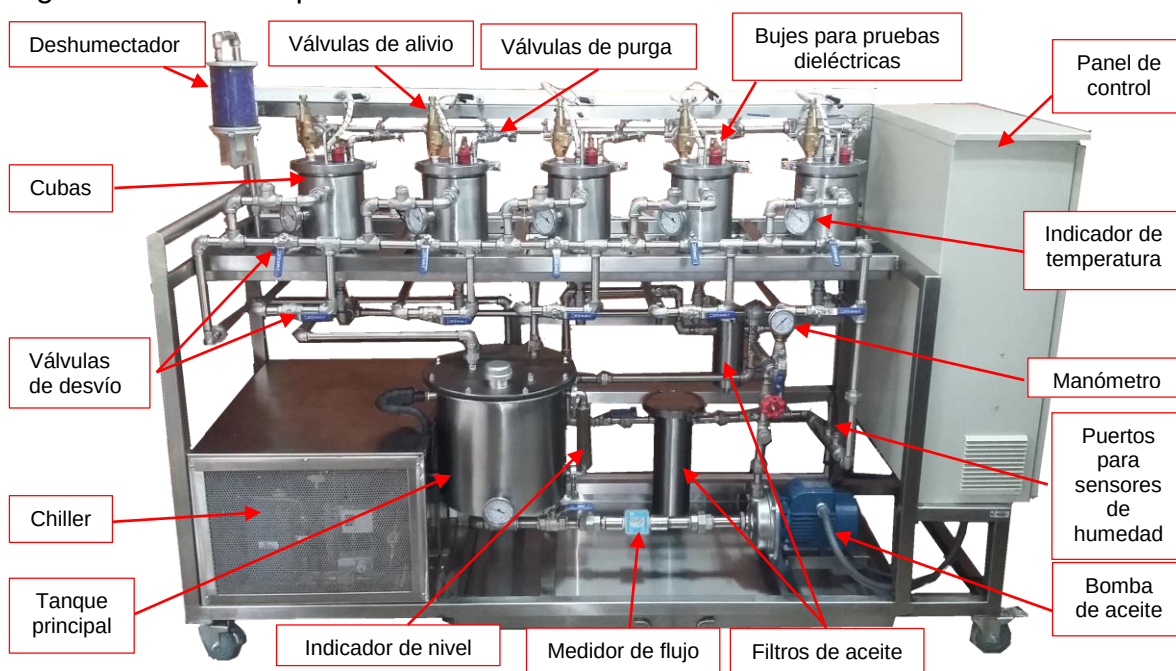
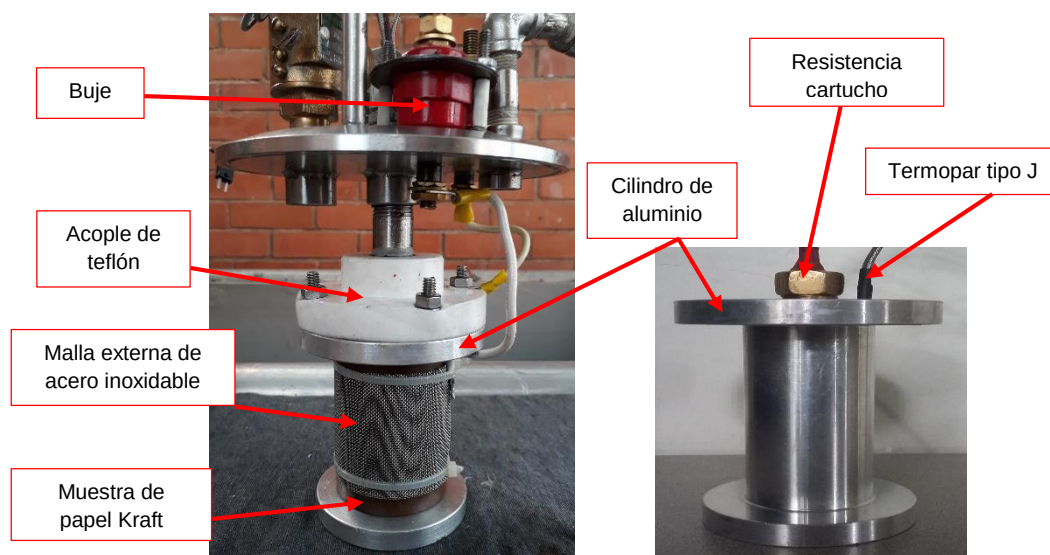


Figura 16. Cuba y sus partes.



Figura 17. Instalación del sensor de humedad en la celulosa.



La circulación del aceite se mantiene por medio de una bomba centrífuga, dirigiéndolo a todas las cubas, sucedidas una de la otra, hasta retornar al tanque principal, donde se reduce la temperatura final del aceite a un valor adecuado para iniciar nuevamente el ciclo de calentamiento en la cuba de menor temperatura.

Para garantizar la estanqueidad de las cubas, se utilizaron empaques de teflón para las tapas de las cubas y Viton para los bujes, que son materiales compatibles con el aceite mineral y permiten el sello sin deteriorarse con el tiempo.

4.1.2 Balanza de humedad

La referencia del equipo es MAC 50 de la marca RADWAG y corresponde a un horno de secado por infrarrojo que dispone de una balanza con una exactitud de

$\pm 0,001\text{mg}$, con resolución de la medición de temperatura de $\pm 1^\circ\text{C}$ y exactitud de la lectura de humedad de $0,001\%$. Permite visualizar la medición de temperatura, masa de la muestra, porcentaje de masa pérdida, porcentaje de masa residual seca y porcentaje de humedad en relación al peso seco. También permite ajustar el tiempo del ensayo a valor recomendado por la norma ASTM D 1348 – 08 [26], en este caso el tiempo debe ser de 4 horas por que no se usa un flujo de aire seco. Una balanza de este tipo se presenta en la Figura 18.

Figura 18. Balanza de humedad utilizada.



4.1.3 Horno de secado con vacío

La referencia del equipo es 1430D de la marca VWR y corresponde a un horno de resistencias que dispone de una cámara hermética, esta posee válvulas para extraer el aire al interior de la cámara y producir un ambiente de baja presión de hasta $24,5\text{ inHg}$ de vacío. El rango de operación de temperatura es desde 40°C hasta 260°C controlado por medio de un PID. La capacidad total de la cámara es de $1,7\text{ ft}^3$ ($481,4\text{ L}$). Este horno se presenta en la Figura 19.

Figura 19. Horno con vacío utilizado.



1 – Válvulas para extraer el aire

2 - Indicador análogo de presión en la cámara

3 – Controlador de temperatura con indicador

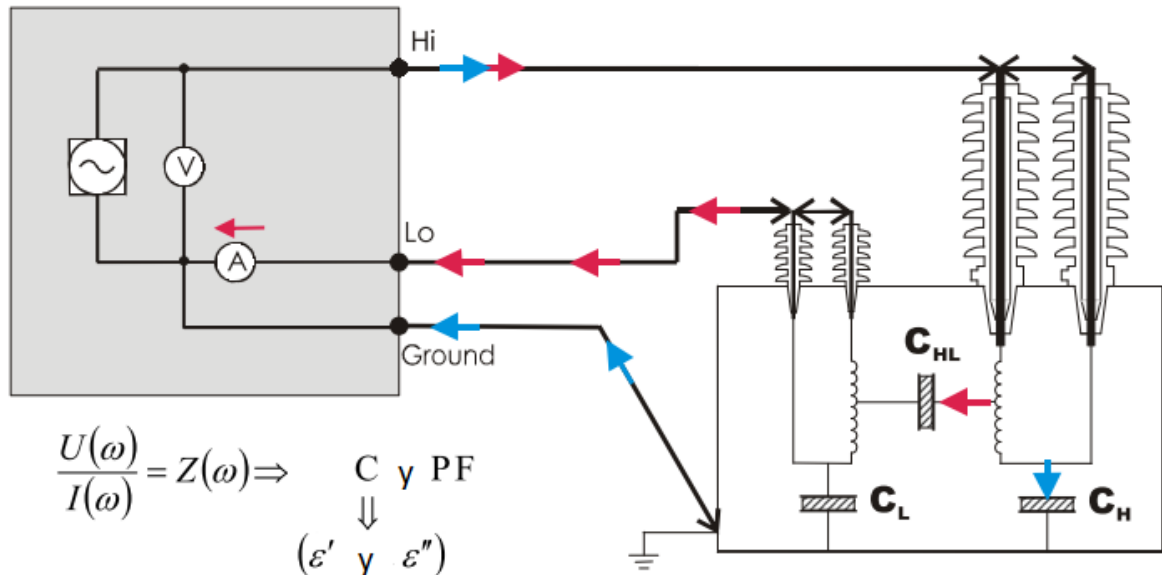
4 – Cámara interna del horno

4.1.4 Equipo de FDS

El FDS se refiere a la medición de las propiedades dieléctricas, expresada como la capacitancia (C), factor de potencia (PF) de un sistema de aislamiento en función de la frecuencia. Para un sistema de aislamiento de papel – aceite, los elementos implicados en este análisis incluyen la humedad en el material de celulosa, la conductividad del aceite y la presencia de contaminantes u otros materiales que afectan la capacitancia o las pérdidas dieléctricas del sistema [31].

El ensayo de FDS se realiza aplicando una señal de baja tensión de frecuencia variable al sistema de aislamiento bajo prueba, midiendo la tensión, la corriente y el ángulo de fase entre ellos para determinar C y PF en el intervalo de frecuencia de interés. Las conexiones para la prueba se puede observar en la Figura 20.

Figura 20. Medición de C y PF del aislamiento usando el método de FDS.



Fuente: IEEE Standards Association, "IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors," IEEE Std C57.152-2013. IEEE, pp. 1–121, 2013. pg 97.

El equipo DIRANA desarrollado por OMICRON utiliza el método de FDS combinado con el método de PDC [32], esto permite reducir a la mitad el tiempo del ensayo [33], aspecto que es importante teniendo en cuenta que la medición fue realizada con la planta en funcionamiento y se requería el menor tiempo posible.

Posteriormente se compara la respuesta dieléctrica con una base de datos de diferentes curvas para obtener el valor de humedad indirectamente. Este equipo se operó en todas las mediciones con un rango de frecuencias de 5 kHz – 800 μHz con tensiones de prueba de 100 Vpc-FDS y 200 Vpc PDC con una duración aproximada de 30 min.

4.1.5 Equipo de Karl Fischer

El método de Karl Fischer permite la determinación del contenido de humedad por medio de una valoración química en sólidos, líquidos y gases. En la valoración Karl Fischer coulométrica, la muestra se mezcla con una disolución base/alcohol de iones yoduro y dióxido de azufre. El yodo se genera electrolíticamente y reacciona con el agua de modo que la cantidad de yodo generada es proporcional a la cantidad de electricidad según la ley de Faraday. Basados en este principio, es posible determinar la cantidad de agua a partir de la cantidad de electricidad (número de culombios) requerida para efectuar la electrólisis [27].

El método de Karl Fischer tiene la ventaja de ser selectivo respecto a la cuantificación de humedad, ya que la reacción sólo se produce con el agua y no con otras sustancias. Se debe aclarar que la humedad medida de este modo, es la humedad promedio a lo largo del espesor del papel [1], que es la variable que se manejará en el estudio experimental.

4.2 PROCEDIMIENTO Y EJECUCIÓN

En esta sección se describen el paso a paso que se llevó a cabo durante la ejecución del experimento, cómo se adaptaron los parámetros del transformador empleado como base del caso de estudio, a la operación de la planta experimental, los ensayos realizados y los ajustes que se tuvieron que realizar.

4.2.1 Caso de estudio

El transformador que fue representado en el experimento corresponde al mismo utilizado como ejemplo en el modelo propuesto por R. Villarroel, los datos de este equipo se presentan en la Tabla 2.

El perfil de carga emulado, para representar la carga del transformador, se escogió de tal manera que permitiera periodos de temperatura elevada y otros de baja temperatura, con el fin de facilitar la migración de la humedad en ambos sentidos, este perfil de carga se presenta en la Figura 21. La temperatura ambiente, que es otra variable de entrada al modelo térmico, se asigna de tal manera que represente un incremento progresivo de la temperatura en las primeras horas, hasta alcanzar una temperatura máxima en las horas intermedias y luego se reduzca al finalizar el día, tal y como se muestra en la Figura 22. Estos perfiles se repiten cada día durante la duración del experimento.

Tabla 2. Información básica del transformador.

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia	52267	kVA
Refrigeración	ONAN/ONAF	-
Pérdidas sin carga	36986	W
Pérdidas con carga	72768	W
Pérdidas totales	109755	W

Peso de núcleo y devanados	75600	lb
Peso de tanques y radiadores	31400	lb
Material del conductor	Cobre	-
Masa de papel	3023	kg
Masa de aceite	94000	kg

La información adicional que requiere el modelo térmico, se presentan en el Anexo B. Los perfiles de temperatura obtenidos con el modelo térmico son presentados en el Anexo C, en estos solamente se muestran las primeas 72 horas, dado que no hay mayor diferencia en las horas siguientes después de la hora 24.

Figura 21. Perfil de carga del transformador.

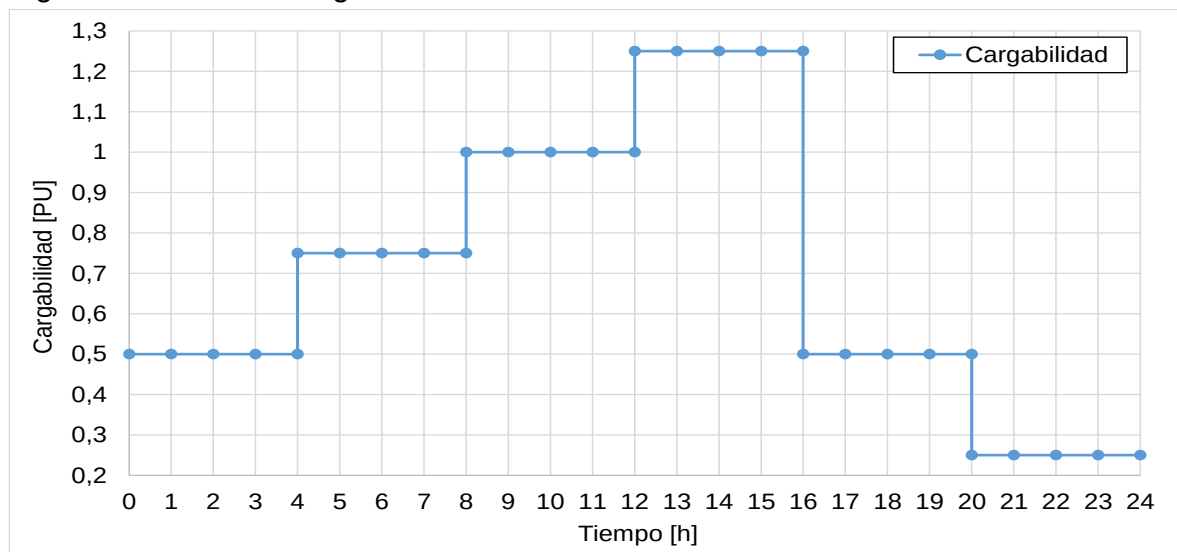
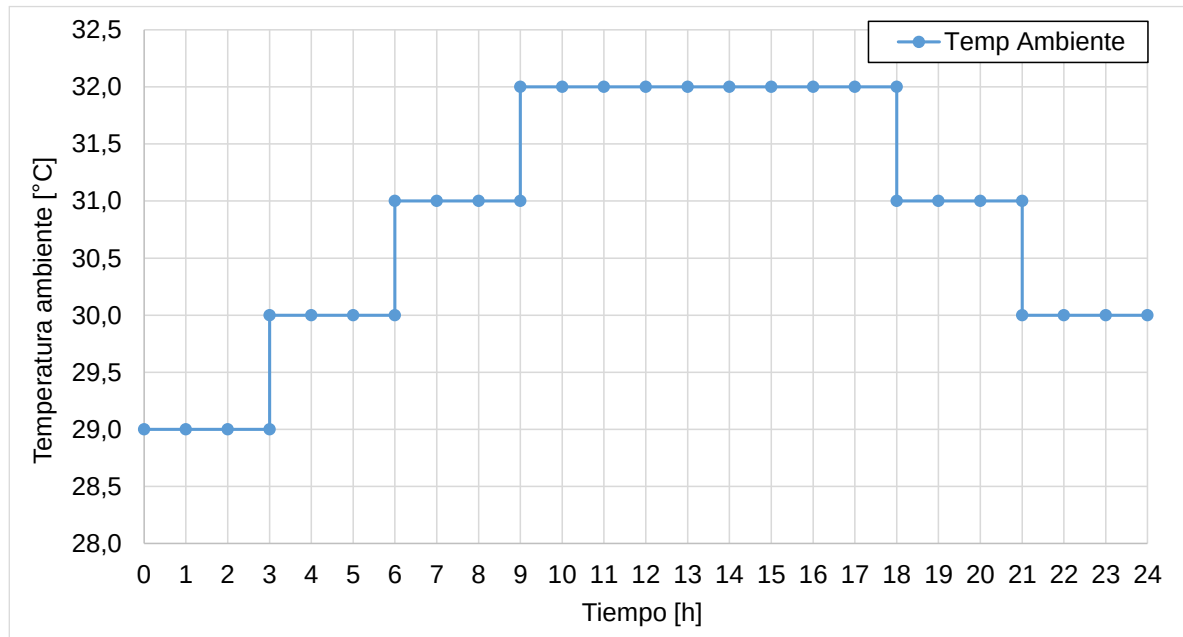


Figura 22. Temperatura ambiente.



4.2.2 Preparación de las muestras

Un punto de partida para estimar las cantidades a usar, de papel y aceite, es la relación Papel/Aceite del transformador del caso de estudio ($3023 \text{ kg}/94000 \text{ kg} = 0,032$), se desea mantener esta relación junto con las proporciones típicas de material celulósico al interior de un transformador como pueden ser aproximadamente 50% material grueso frío, entre el 30 y el 40% de material delgado frío y el restante es papel delgado caliente [18].

Primero se parte de la cantidad de aceite que se utilizará y por medio de la relación Papel/Aceite se obtiene la cantidad de papel deseado y posteriormente se manipulan los porcentajes de papel delgado caliente y delgado frío teniendo en cuenta las limitaciones de la planta experimental.

Para obtener un desempeño adecuado de la planta, esta debe tener un volumen total de aceite de al menos 50 L, tomando también la densidad del aceite podemos estimar la masa de aceite total que interviene en el experimento, esta información se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Cantidad de aceite ingresado a la planta.

Densidad	0,8742*	kg/dm ³
	874,2	kg/m ³
Volumen	50	L
	0,0500	m ³
Masa	43,71	kg

Nota: *Dato tomado del protocolo de pruebas entregado por el proveedor del aceite.

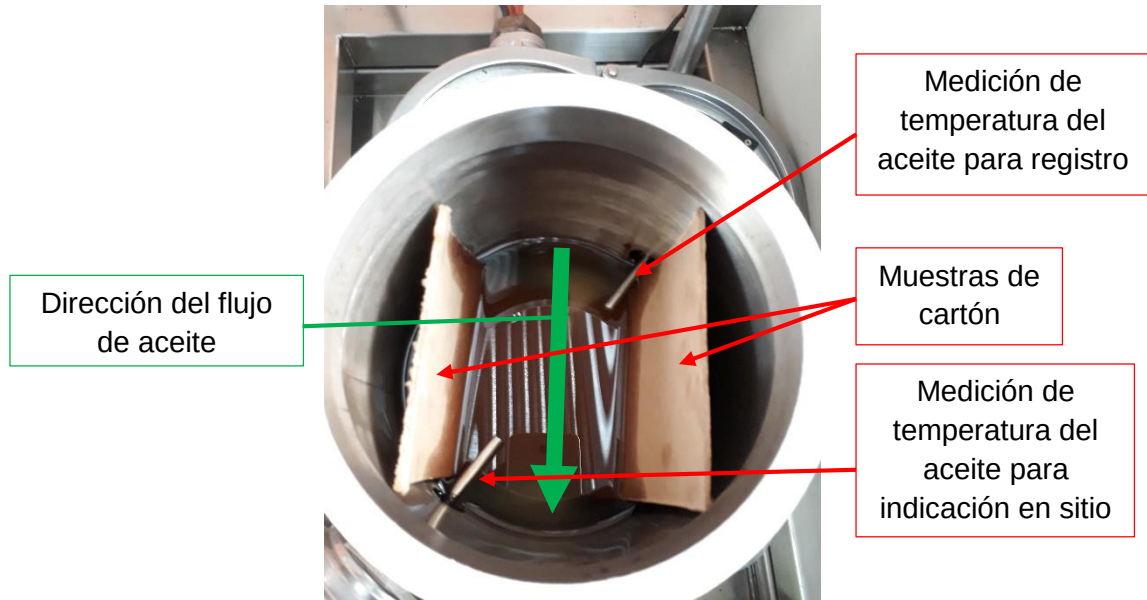
A la planta se ingresan 51 L, por que posteriormente se extrae una muestra de 1 L para determinar el contenido inicial de humedad en él, por lo tanto, este litro adicional no será tenido en cuenta para estimar el total de celulosa ingresado a la planta.

Ahora, multiplicando la cantidad de masa de aceite por la relación Papel/Aceite del transformador se obtiene la masa total de papel (celulosa en general) que se representaría en la planta, de esta cantidad se omite la correspondiente al aislamiento frio grueso, tal y como se indicó anteriormente en la sección 4.1, este no se considera dentro de las fuentes de humedad por ser su constante de tiempo del orden de años.

La cantidad de papel delgado caliente que se puede ingresar por cuba fue limitado a un espesor máximo de 5 mm, para evitar que sea muy grueso. El alto será de 8 cm con un diámetro interno de 48 mm, ambas medidas establecidas por el portamuestra de aluminio. Se bobinaron las muestras de papel sobre los portamuestras de tal manera que se mantuviera una compresión suficiente para reducir al mínimo los espacios de aire entre capas [1], y así mantener uniforme su superficie. Finalmente, el espesor del papel Kraft se mantuvo en 5 mm para todas las muestras.

El cartón delgado frio ingresado a la planta se limita de tal forma que no obstruya la circulación del aceite al interior de la cuba, ni alcance a estar en contacto con el cilindro de aluminio. Se dividen en dos muestras con las siguientes dimensiones; alto 18 cm, ancho de 11,4 cm y espesor 2 mm, ubicándose de forma paralela entre ellas y en el mismo sentido del flujo de aceite, tal y como se presenta en la Figura 23.

Figura 23. Ubicación de las muestras de cartón.



En la Tabla 4 se presentan los valores deseados de celulosa y los valores a los que se pudo llegar teniendo en cuenta las limitaciones de la planta, tratando de mantenerse en los rangos típicos de distribución de los materiales que conforman al aislamiento celulósico, también se indica la masa seca de celulosa que se explicará posteriormente como fue obtenida.

Tabla 4. Material celulósico ingresado a la planta.

Celulosa	Cantidades deseadas [kg]	Cantidades alcanzadas [kg]	Masa seca [kg]
Masa total de papel	1,4057 (100,0%)	1,4057 (100,0%)	1,4057 (100,0%)
Masa de papel delgado caliente (10-20%)	0,2811 (20,0%)	0,2709 (19,3%)	0,2472 (17,6%)
Masa de catón delgado frío (30-40%)	0,4217 (30,0%)	0,4300 (30,7%)	0,3889 (27,8%)

Para conocer la cantidad de papel y cartón seco ingresado a la planta, se tomaron muestras representativas de estos materiales para conocer la humedad inicial y posteriormente estimar la cantidad de masa seca con la ecuación (9).

$$Masa\ seca = Masa\ inicial * \left(1 - \frac{\%humedad\ inicial}{100}\right) \quad (9)$$

El porcentaje de humedad se obtuvo con ayuda de la balanza de humedad ajustada a una temperatura de 105°C por 4 horas según el método A de la norma ASTM D 1348 – 08 [26], estos resultados se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Humedad previa del papel Kraft y el cartón.

Material	Muestra	Peso Inicial [g]	Peso Final [g]	Diferencia [g] (agua)	Peso perdido [%]	Masa seca [%]	Humedad/ Masa seca [%]	Promedio [%]
Papel	M1	10,625	9,771	0,854	8,038	91,962	8,740	8,737
	M2	10,647	9,789	0,858	8,059	91,941	8,765	
	M3	10,602	9,753	0,849	8,008	91,992	8,705	
Cartón	M1	10,155	9,236	0,9190	9,050	90,950	9,950	9,577
	M2	11,314	10,363	0,951	8,406	91,594	9,177	
	M3	11,470	10,465	1,005	8,762	91,238	9,603	

Para conocer la masa total ingresada de papel se pesaron cada una de las muestras después de ser bobinadas y se restó el peso del cilindro de aluminio, estos valores se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Masa de las muestras de papel Kraft ingresadas a la planta experimental.

Ubicación en la planta	Peso del cilindro [g]*	Peso del Cilindro + Papel [g]*	Peso papel [g]
Cuba 5	658,45	716,66	58,21
Cuba 4	661,19	714,88	53,69
Cuba 3	648,61	695,29	46,68
Cuba 2	661,03	717,20	56,18
Cuba 1	659,59	715,73	56,14
Masa total [g]			270,9
Humedad inicial [%]			8,737
Masa total de papel seco [g]			247,2

Nota: *Corresponden a valores promedio de tres medidas consecutivas realizadas.

La masa total ingresada de cartón fue estimada usando la densidad del material y el volumen calculado a partir de sus dimensiones, estos valores se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Masa de las muestras de cartón ingresadas a la planta experimental.

Dimensiones [mm]		
Alto	Ancho	Espesor
180,0	114,0	2,0
Volumen [m ³]	Densidad [kg/m ³]	Masa [kg]
0,00004104	1048	0,043
Cantidad	10	(2 por cuba)
Masa total	0,4300	kg
Humedad inicial	9,577	%
Masa total seca	0,3889	kg

Dado que el papel Kraft que se va a utilizar estuvo expuesto al ambiente con una temperatura entre 20 y 26°C con una humedad relativa entre 60 y 80%, este tenía una humedad en su interior del 8,737% con referencia al peso seco, para garantizar una humedad igual en cada una de las muestras de papel Kraft se usó el horno de secado a una temperatura de 90°C con una presión de vacío de 24,5 inHg por un tiempo de 96 h (4 días).

Al momento de finalizar el secado, se introducen inmediatamente las muestras en recipientes herméticos con aceite para que se impregnen y posteriormente se pueda obtener la humedad en el papel con ayuda de las curvas de equilibrio entre la humedad del aceite y la contenida en el papel. Para garantizar el equilibrio se mantienen las muestras por al menos 30 días en un ambiente entre 24 °C y 26 °C.

Después de una semana de haber sumergido las muestras en aceite, se instalaron las mallas metálicas en cada una de las muestras, como estas ya se encontraban impregnadas de aceite, junto con una temperatura ambiente de 25°C y un tiempo de exposición reducido (<5min), se puede despreciar algún ingreso significativo de humedad a la muestra. Después de instaladas las mallas se ingresaron nuevamente las muestras al recipiente con aceite.

Para obtener la humedad en el papel impregnado se calcula la humedad relativa RH con el valor de humedad medido en el aceite en ppm usando la ecuación (10).

$$RH = \frac{PPM_{oil}}{PPM_{sat}} \quad (10)$$

Posteriormente se calcula el valor de saturación de humedad en el aceite a la misma temperatura que fue tomada la muestra con ayuda de la ecuación (6), usando como parámetros $A= 7,42$ y $B=1670$ obtenidos por Oommen [34], la presión parcial en saturación de vapor de agua con la ecuación (7), con esta presión y usando la ecuación (5) se calcula la presión parcial de vapor de agua que será ingresada a la ecuación (3) para obtener la concentración de humedad en la celulosa en condición de equilibrio. Como resultado se obtuvieron los valores presentados en la Tabla 8.

Tabla 8. Humedad inicial de las muestras de papel Kraft.

Temperatura		PPM _{oil} [ppm]	PPM _{sat} [ppm]	RH [%]	pv _{sat} [atm]	pv [atm]	C _{equil} [%]
[°C]	[K]						
26	299,15	24	68,79	34,9	0,0332	0,01157	7,99

4.2.3 Preparación de la planta experimental

Para preparar la planta, primero se limpiaron las cubas y los filtros de los residuos del proceso de fabricación o de las manipulaciones posteriores durante los ensayos de operación.

Se introdujo aceite a la planta, un total de 51 litros, donde se adiciona 1 litro más que posteriormente será extraído para determinar la condición inicial del aceite. Este aceite se hizo circular por todas las tuberías y se purgó el aire contenido en las cubas. Para esto se cierran las válvulas que permiten el retorno del aceite al tanque principal, de esta manera se presuriza el sistema hidráulico hasta un valor cercano a los 10 PSI sin encontrarse fugas y liberando el aire del interior de las cubas.

Sin embargo, después de este procedimiento, aún queda aire húmedo en el tanque principal, junto con la humedad alojada en la superficie interna de las tuberías y cubas. En este caso para incluir esta fuente de humedad dentro del balance inicial de humedad, se hace circular el aceite a una temperatura de 80°C durante 5 días, de tal modo que pueda adsorber la humedad al interior de la planta.

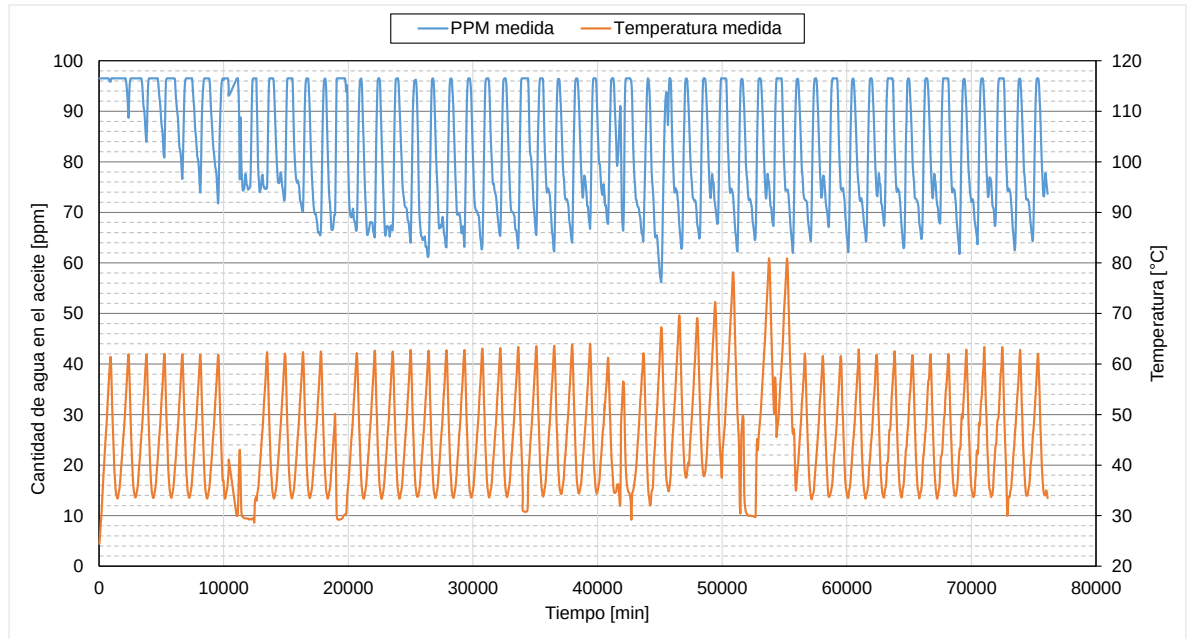
De la planta se extrae una muestra de 1 L para determinar la humedad inicial del aceite, obteniendo un valor de 110 ppm. La humedad contenida en el aceite es muy elevada, y puede llegar a existir agua libre en el aceite si en algún punto de la planta la temperatura se reduce lo suficiente para que el límite de saturación sea menor al valor inicial medido. Para verificar esto, se tomó la medición de agua en el aceite en ppm (que se presenta en la Figura 24), entregada por un sensor VAISALA instalado

en la planta antes de la Cuba 5, y se calculó la humedad relativa con la ecuación (10) en el punto de medición usando los parámetros A y B calculados por Oommen [35] y la temperatura medida en ese punto (Figura 24) para calcular el límite de saturación de agua en el aceite (ecuación (6)). Posterior a esto se calculó la humedad relativa en todas las cubas usando la ecuación (11) [36], tomando la temperatura del aceite en cada una, para evidenciar que en las cubas no se presentó agua libre. Como resultado se obtuvieron las curvas de humedad relativa de la Figura 25.

$$RH_i = RH_m \cdot 10^{B \cdot \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_m} \right)} \quad (11)$$

Donde RH_i es la humedad relativa (indicada en pu) en el punto i , RH_m es la humedad relativa en el punto de medición (indicada en pu), B es el coeficiente de solubilidad igual a 1670, T_i es la temperatura en el punto i y T_m es la temperatura en el punto de medición (ambas expresadas en K).

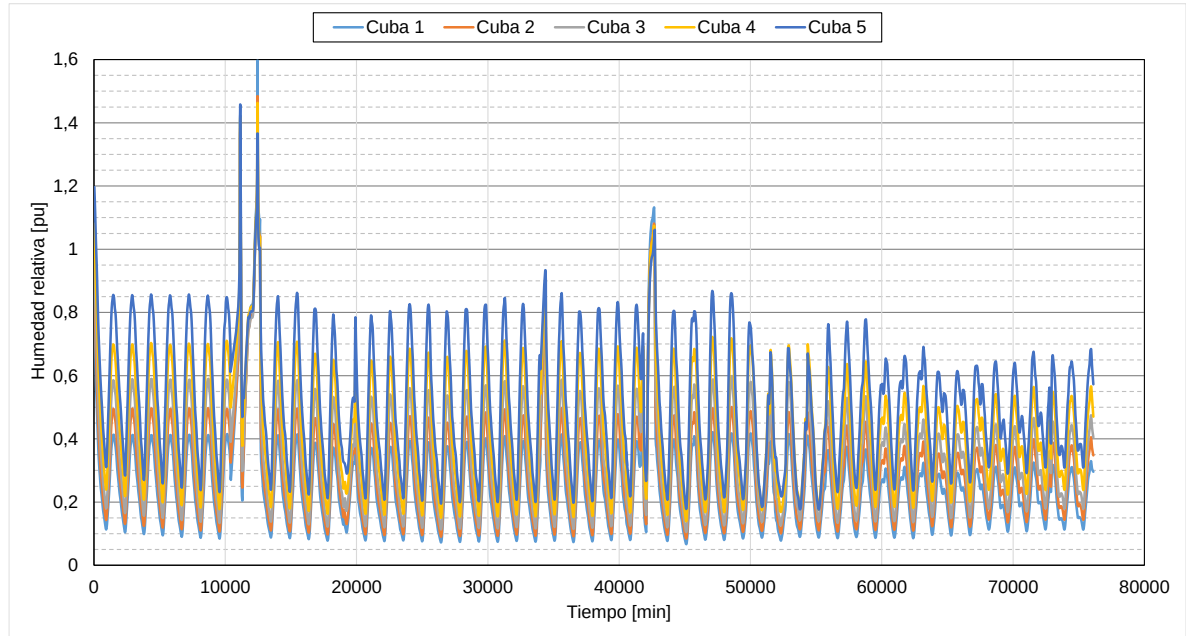
Figura 24. Medición de humedad y temperatura en el aceite antes de la Cuba 5.



En la Figura 25 se presentaron unos picos donde se sobrepasa el límite de 1 pu en la humedad relativa presente en el aceite, sin embargo esto se presenta en los periodos donde ocurrieron cortes del suministro de energía, lo que causa error en

la medición del sensor VAISALA, por lo tanto no se considera crítico el riesgo de presencia de agua libre en el aceite en las cubas.

Figura 25. Humedad relativa calculada en cada una de las cubas.



Se tomaron otras medidas preventivas para reducir las fuentes de incertidumbre en el experimento, entre ellas, se mantuvo el nivel de aceite en las cubas lo más alto posible para evitar el ingreso de aire húmedo del exterior en el momento de introducir las muestras de papel y cartón, procurando que el tiempo invertido en esta actividad fuera menor a 5 minutos, para evitar contaminación de las muestras y considerar despreciable el ingreso de humedad que haya ocurrido durante esta tarea.

Después de introducir las muestras y garantizar el sello de las tapas, se inicia la operación de la planta experimental.

4.2.4 Ejecución de los ensayos

La planta experimental estuvo funcionando por cerca de 52 días, donde cambiaron los valores de temperatura cada hora de acuerdo con el perfil de temperaturas establecido previamente. El registro de temperatura se realizó cada minuto de forma simultánea en todos los puntos de interés, estos datos se presenta en el Anexo D.

Durante la ejecución de los experimentos se realizaron mediciones periódicas de FDS en todas las muestras, estas se realizaron 8 veces, distribuidas 1 cada semana. La programación de estas mediciones se realizó de tal manera que se lograran hacer las mediciones de las 5 cubas en un periodo donde las variaciones de temperatura sean muy pequeñas para seleccionar correctamente la temperatura durante el ensayo, siendo esta el valor promedio de las mediciones minuto a minuto a la que estuvo expuesta la muestra de papel. Las mediciones de FDS se presentan en el Anexo E.

4.2.5 Caracterización dieléctrica del porta-muestras

Para realizar la caracterización dieléctrica del porta-muestras se recurre a la información disponible hasta el momento de las características de los materiales aislantes en otros trabajos realizados como en [37], de tal manera que se pueda construir una base de datos de la respuesta dieléctrica en la frecuencia, del papel impregnado de aceite mineral, con humedad y temperatura conocidas, que sirvan como referencia para comparar las curvas medidas durante la ejecución del experimento y poder estimar la concentración de humedad en el papel.

Hay que tener en cuenta que la respuesta en la frecuencia del dieléctrico se ve afectada por los siguientes parámetros [38] [39] [40]:

- Envejecimiento: en la medida en que se envejece la celulosa, la parte imaginaria de la permitividad compleja tiende a incrementarse.
- Humedad: Para un mismo valor de temperatura, cuando se incrementa la humedad así mismo se observa un incremento en la capacitancia compleja.
- Contenido de ácidos: La presencia de ácidos ligeros (hidrofílicos por envejecimiento de la celulosa, estos se almacenan en ella misma) incrementa los valores de permitividad compleja, bajo una misma condición de humedad.
- Temperatura: esto se debe al cambio de las propiedades dieléctricas del aislamiento con la temperatura. Las magnitudes de la capacitancia compleja en los rangos de baja frecuencia, aumentan con la temperatura. De manera similar, también la frecuencia de cruce entre C'' y C' aumenta con la temperatura.
- Geometría: el cambio en los porcentajes de composición del aislamiento entre barreras, espaciadores y aceite, conduce a diferentes valores de capacitancia cuando los demás parámetros se mantienen constantes.

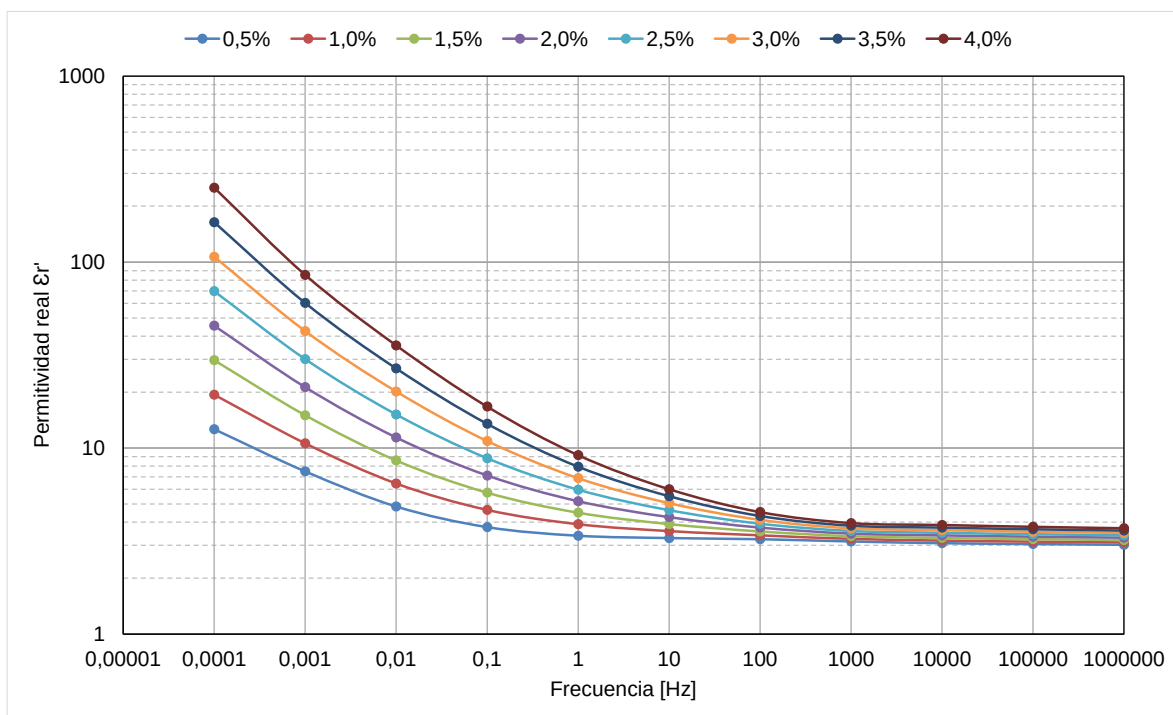
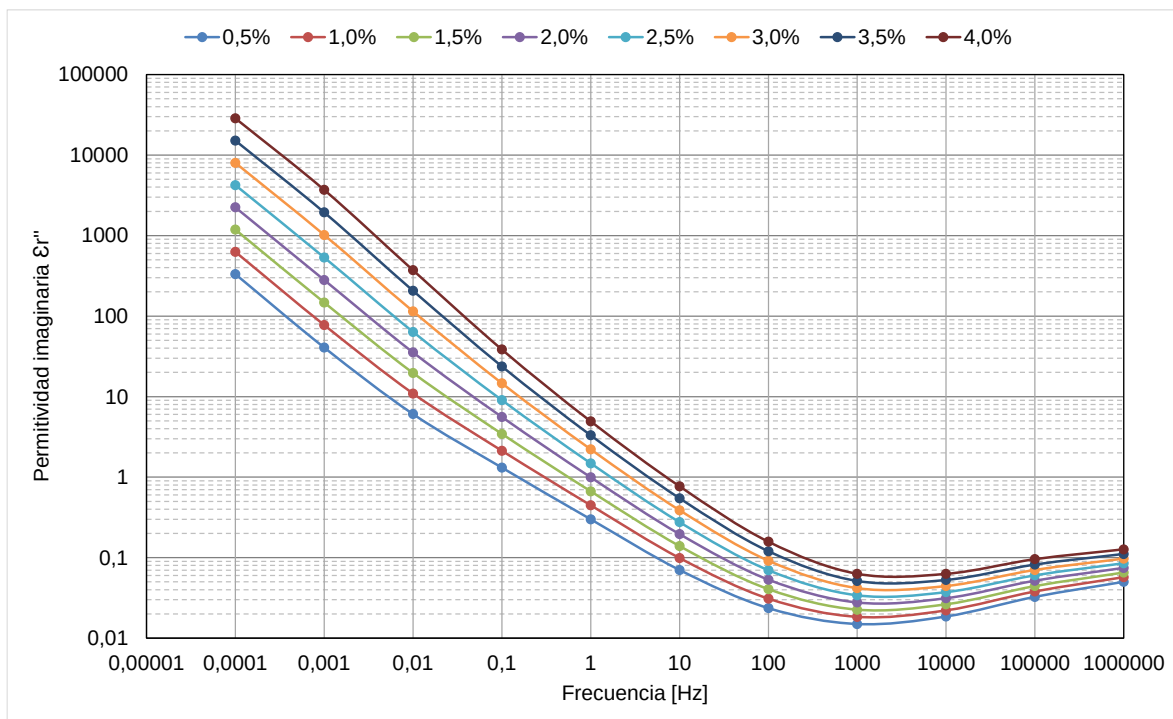
De los parámetros anteriores, en este proyecto solo se considerarán la humedad y la temperatura en la caracterización del sensor, ya que la geometría del objeto que será medido es conocida y no sufrirá cambios. Adicionalmente, el experimento no será demasiado prolongado o con temperaturas extremas que puedan conducir a un envejecimiento considerable o la generación de ácidos que puedan afectar la respuesta del dieléctrico.

Para construir la base de información se toman las formulas y datos presentados en [37], que permiten obtener la parte real e imaginaria de la permitividad compleja para diferentes frecuencias en función de la humedad m , estas se presentan en la Tabla 9 para una temperatura de 60°C. Estas fórmulas corresponden a la tendencia que describe mejor el comportamiento de los datos.

Con las funciones presentadas en la Tabla 9, se pueden obtener las permitividades real e imaginaria para un valor de humedad deseado a una temperatura de 60 °C, tal y como las curvas presentadas en las Figura 26 y Figura 27.

Tabla 9. Funciones para obtener la parte real de la permitividad $\epsilon_r'(m)$ y la parte imaginaria de la permitividad $\epsilon_r''(m)$ a una temperatura de 60°C.

Frecuencia [Hz]	Permitividad real $\epsilon_r'(m)$	Permitividad imaginaria $\epsilon_r''(m)$
10^{-4}	$\exp(2,10872 + 0,85439 * m)$	$\exp(5,17036 + 1,27305 * m)$
10^{-3}	$\exp(1,66636 + 0,69508 * m)$	$\exp(3,06324 + 1,28883 * m)$
10^{-2}	$\exp(1,29438 + 0,56975 * m)$	$\exp(1,21622 + 1,17555 * m)$
10^{-1}	$\exp(1,11086 + 0,42631 * m)$	$\exp(-0,20956 + 0,96506 * m)$
1	$\exp(1,07502 + 0,28489 * m)$	$\exp(-1,60495 + 0,80037 * m)$
10	$\exp(1,10224 + 0,17278 * m)$	$\exp(-2,99649 + 0,68355 * m)$
10^2	$\exp(1,12655 + 0,09585 * m)$	$\exp(-4,01716 + 0,54268 * m)$
10^3	$\exp(1,1138 + 0,06504 * m)$	$\exp(-4,40511 + 0,41030 * m)$
10^4	$\exp(1,09274 + 0,06439 * m)$	$\exp(-4,15872 + 0,34811 * m)$
10^5	$\exp(1,08348 + 0,06106 * m)$	$\exp(-3,57715 + 0,30779 * m)$
10^6	$\exp(1,07617 + 0,05846 * m)$	$\exp(-3,12554 + 0,26546 * m)$

Figura 26. Curvas de referencia para la permitividad real ϵ_r' .Figura 27. Curvas de referencia para la permitividad imaginaria ϵ_r'' .

Para estimar la concentración de humedad en el papel, basados en las anteriores curvas, se usará una metodología similar a la desarrollada en [41], donde se utilizó el área bajo la curva formada por $\varepsilon_r'(f)$ y $\varepsilon_r''(f)$ para cuantificar la humedad en la celulosa.

En este trabajo, en lugar de utilizar las permitividades se usará el $\tan(\delta)_{(f)}$, esto con el fin de evitar el cálculo de los parámetros $\varepsilon_r'(f)$ y $\varepsilon_r''(f)$ a partir de las mediciones de la capacitancia compleja, lo que requiere conocer la capacitancia geométrica del sistema, es decir cuando el dieléctrico corresponde al vacío. Se desea omitir este paso porque la capacitancia geométrica podría variar levemente entre un porta-muestra y otro, por algún defecto, por el uso de la malla metálica o por las mismas tolerancias de fabricación, lo que induciría un error más en las mediciones.

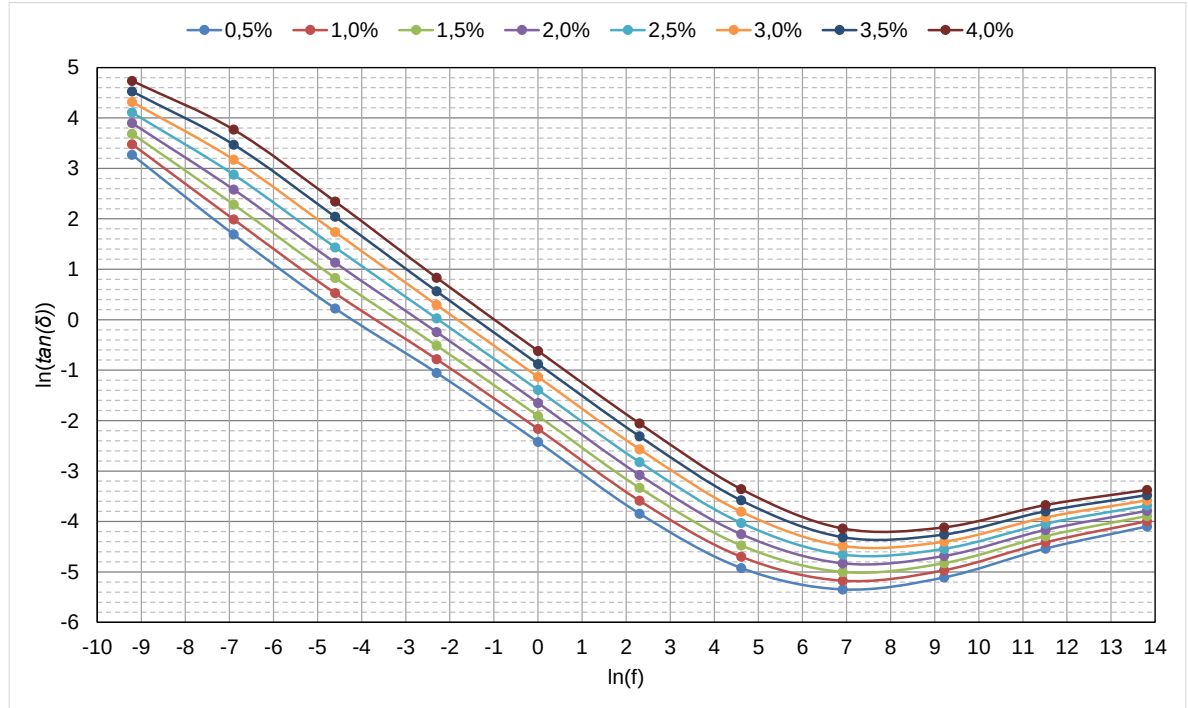
De esta manera, la integral objetivo para un valor de humedad m sería $S_{(f)m}$, representada por medio de la ecuación (12). El valor de $\tan(\delta)_{(f)m}$ de las funciones de la Tabla 9 se calcularía como se indica en la ecuación (13).

$$S_{(f)m} = \int_{10^{-3}}^{10^1} \tan(\delta)_{(f)m} df \quad (12)$$

$$\tan(\delta)_{(f)m} = \frac{\varepsilon_r''(f)_m}{\varepsilon_r'(f)_m} = \frac{C''(f)_m}{C'(f)_m} \quad (13)$$

Los rangos de frecuencia de integración son sugeridos por los autores de [41], ya que en este intervalo la permitividad compleja es extremadamente sensible al contenido de humedad. El rango de integración está determinado para una temperatura entre 30 y 50 °C, por lo tanto las curvas de referencia obtenidas con las formulas de la Tabla 9 se referencian a una de estas dos temperaturas, en este caso se selecciona el valor de 30°C. Este procedimiento denominado “curva maestra” se describe posteriormente.

Para calcular la integral de $\tan(\delta)_{(f)m}$, fue necesario encontrar la función que mejor describiera el comportamiento de los valores calculados de $\tan(\delta)_{(f)m}$ con la frecuencia desplazada a la temperatura de referencia, para cada valor de humedad m . Para esto es necesario representar en una gráfica el logaritmo natural de $\tan(\delta)_{(f)}$ versus el logaritmo natural de la frecuencia f desplazada, tal y como se muestra en la Figura 28.

Figura 28. Logaritmo natural de $\tan(\delta)$ vs logaritmo natural de f desplazada.

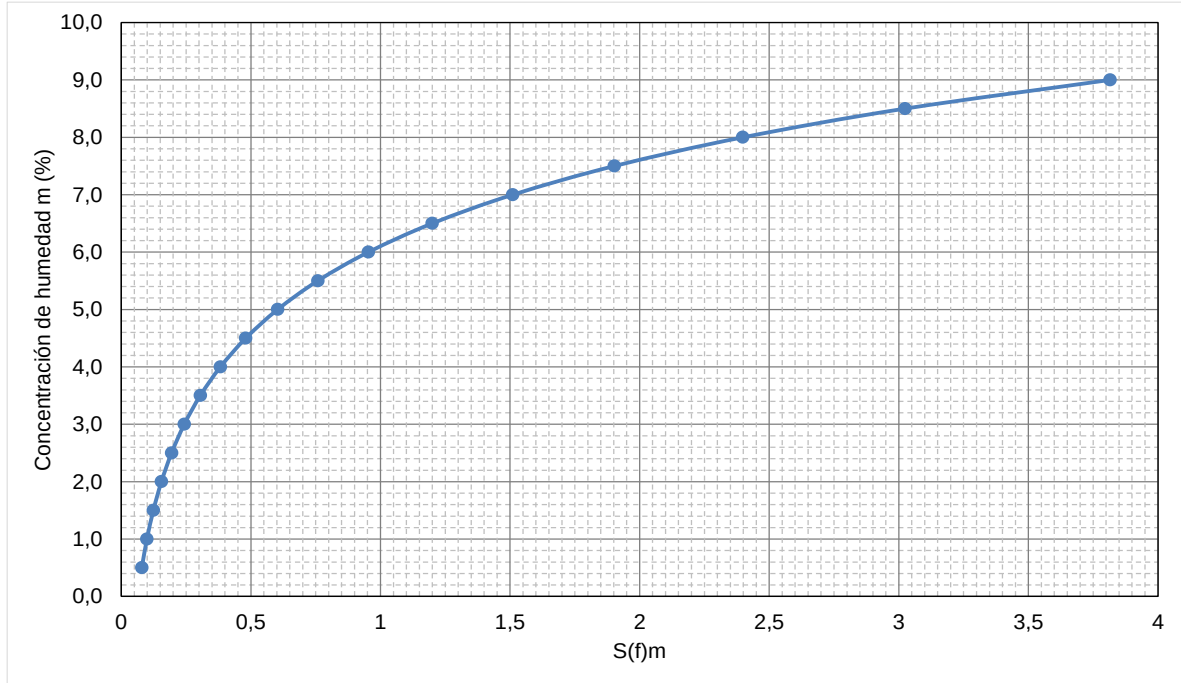
Las ecuaciones que más se aproximan al comportamiento de los datos calculados corresponden a un polinomio de grado 10, con un coeficiente de correlación de 1 con 15 cifras significativas. Se requiere un coeficiente de correlación lo más cercano a 1 posible ya que la función que se obtenga será posteriormente integrada para hallar su área bajo la curva, procedimiento que es altamente dependiente de la “forma” de la función, por lo tanto, se debe hacer lo más cercana al comportamiento de los datos para reducir el error del valor de la integral. Finalmente, la función que describe al parámetro $\tan(\delta)_{(f)}$ para una humedad determinada m es de la forma presentada en la ecuación (14).

$$\begin{aligned} \tan(\delta)_{(f)_m} = & e^{(a_1 \ln(f)^{10} + a_2 \ln(f)^9 + a_3 \ln(f)^8 + a_4 \ln(f)^7 + a_5 \ln(f)^6 \\ & + a_6 \ln(f)^5 + a_7 \ln(f)^4 + a_8 \ln(f)^3 + a_9 \ln(f)^2 + a_{10} \ln(f) \\ & + a_{11})} \end{aligned} \quad (14)$$

Dado que la expresión (14) no tiene una función explícita que corresponda a su integral, se usa un método numérico para encontrar el valor de la integral para cada valor de humedad m en el rango pre-establecido. Posterior al cálculo de $S_{(f)m}$ (ecuación (12)), se representan en un gráfico el contenido de humedad en la

celulosa m versus $S_{(f)m}$, para obtener la función que mejor describa la tendencia de estos datos, tal y como se muestra en la Figura 29.

Figura 29. Concentración de humedad m vs $S_{(f)m}$.



La función que mejor describe la tendencia de los datos de la Figura 29, corresponde a la ecuación (15), cuyos parámetros se presentan en la Tabla 10.

$$m(S_{(f)}) = e^{\left(a_1 \ln(S_{(f)})^5 + a_2 \ln(S_{(f)})^4 + a_3 \ln(S_{(f)})^3 + a_4 \ln(S_{(f)})^2 + a_5 \ln(S_{(f)}) + a_6\right)} \quad (15)$$

Tabla 10. Parámetros de la función aproximada de $m(S_{(f)})$.

Parámetro	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
$m(S_{(f)})$	-3,36892 E-7	1,17634 E-5	1,20840 E-4	-1,13100 E-2	2,17797	6,10372
Coeficiente de correlación R^2 de $m(S_{(f)})$				1,0		

En la Figura 29, la concentración de humedad m se dibujó hasta un valor de 9%, sin embargo las formulas presentadas en la Tabla 9 se obtuvieron con concentraciones de humedad entre 0,5% y 4%, por lo tanto es importante determinar la validez de la

ecuación (15) para datos superiores al 4% de concentración de humedad. Para esto, se prepararon 3 muestras más con un valor de humedad mayor al obtenido en las muestras que fueron sometidas al experimento, con el objetivo de comparar el valor obtenido con la ecuación (15) y el valor de referencia encontrado por medio de las curvas de equilibrio que se presentan en la Tabla 11. Las mediciones de FDS se presentan en la Figura 30, estas se realizaron a una temperatura de 25 °C.

Figura 30. Curvas de $\tan(\delta)$ de las muestras usadas para validar la ecuación (15).

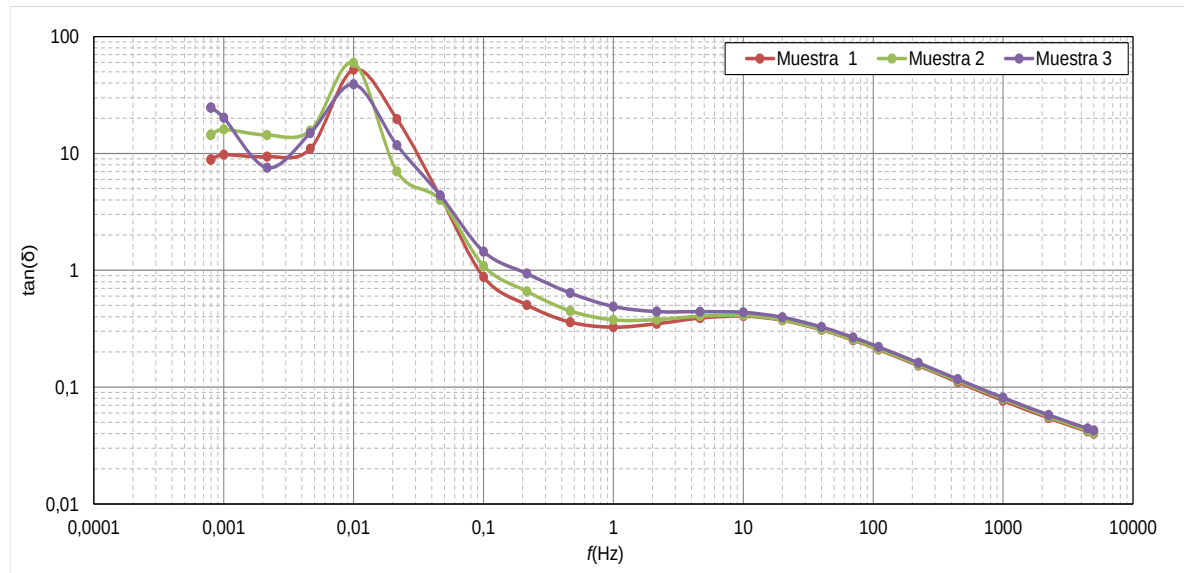


Tabla 11. Humedad de las muestras usadas para validar la ecuación (15) estimada con las curvas de equilibrio.

Temperatura		PPM _{oil} [ppm]	PPM _{sat} [ppm]	RH [%]	pv _{sat} [atm]	pv [atm]	C _{equil} [%]
[°C]	[K]						
25	298,15	31	65,89	47,1	0,0312	0,01470	9,894

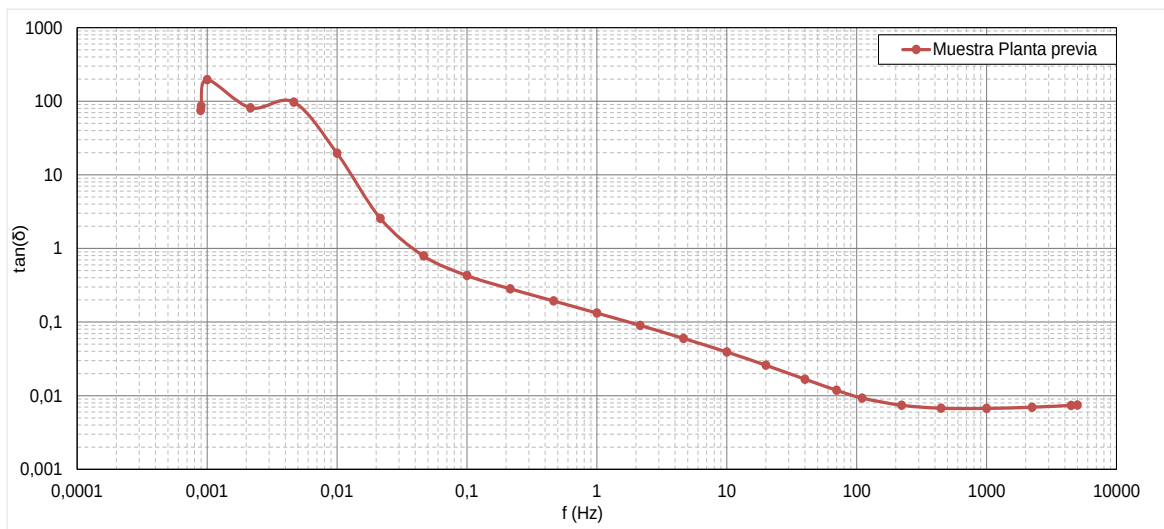
En la Tabla 12 se presentan los valores de concentración de humedad obtenidos utilizando la ecuación (15), con sus correspondientes valores de $S_{(f)}$, calculados después de corregir las curvas de $\tan(\delta)_{(f)}$ por temperatura, junto con el error presentado respecto al valor de referencia.

Tabla 12. Humedad m de las muestras estimada con la ecuación (15).

Muestra	$S(f_{Tref})$	$m(S(f_{Tref}))$ [%]	Desviación estándar de m	Promedio de m [%]	Error respecto a C_{equil} (Tabla 11) [%]
1	5,41585	9,762	0,165	9,858	0,36
2	5,42044	9,764			
3	6,17513	10,048			

Como se puede observar en la Tabla 12, el error entre el promedio de los valores obtenidos de 3 mediciones realizadas con el método del FDS, aplicando la ecuación (15), fue del 0,36% respecto al valor de referencia. Incluso si se considera el valor de la muestra 3 como un dato atípico, el valor promedio sería 9,763% de humedad y se obtendría un error del 1,33% que es satisfactorio. El dato de la muestra 3 se puede considerar atípico usando el criterio de único valor atípico [42], donde se obtendría para este punto un estadístico $T = (10,048 - 9,858) / 0,165 = 1,1547$, que es superior al valor crítico de 1,1546 con una población de 3 y un nivel de riesgo de 1% de rechazar un dato válido, por lo tanto se puede considerar como atípico y rechazarlo del análisis.

Una verificación adicional se realizó usando una de las muestras que se ingresó a la planta antes de iniciar su operación. La medición de FDS de esta muestra se presenta en la Figura 31. El valor estimado de la concentración de humedad de esta muestra usando la ecuación (15) fue de 7,920% frente a un valor de 7,99% obtenido de las curvas de equilibrio (Tabla 8), siendo el error en este caso de 0,88%.

Figura 31. Curva de $\tan(\delta)$ de una muestra antes de iniciar la operación de la planta experimental, temperatura 26 °C.

Con esto se puede concluir que la estimación de la concentración de humedad usando la ecuación (15) sería válido para concentraciones entre 0,5% y hasta 9,894%.

De esta manera se obtiene una estimación de la concentración de humedad por medio del parámetro $\tan(\delta)_{(f)}$ a una temperatura de referencia.

Para corregir las mediciones a la temperatura de referencia, se realiza el siguiente procedimiento denominado “curva maestra”, basado en el hecho de que el espectro dieléctrico no varía en forma con la temperatura ni con el contenido de humedad, pero si hay un cambio en la amplitud y la frecuencia, por lo tanto, es posible crear una “curva maestra”, con factores de corrección de temperatura apropiados, que contengan información sobre los contenidos de humedad en el papel aún después de realizar la corrección por temperatura [43] [41].

El objetivo es desplazar en el eje de la frecuencia la curva de la permitividad, a una temperatura dada, hasta otra curva que está a una temperatura de referencia, sin alterar el valor de la permitividad compleja. Esto se logra por medio de un factor que relaciona la temperatura y la frecuencia, como se muestra en la ecuación (16) [44].

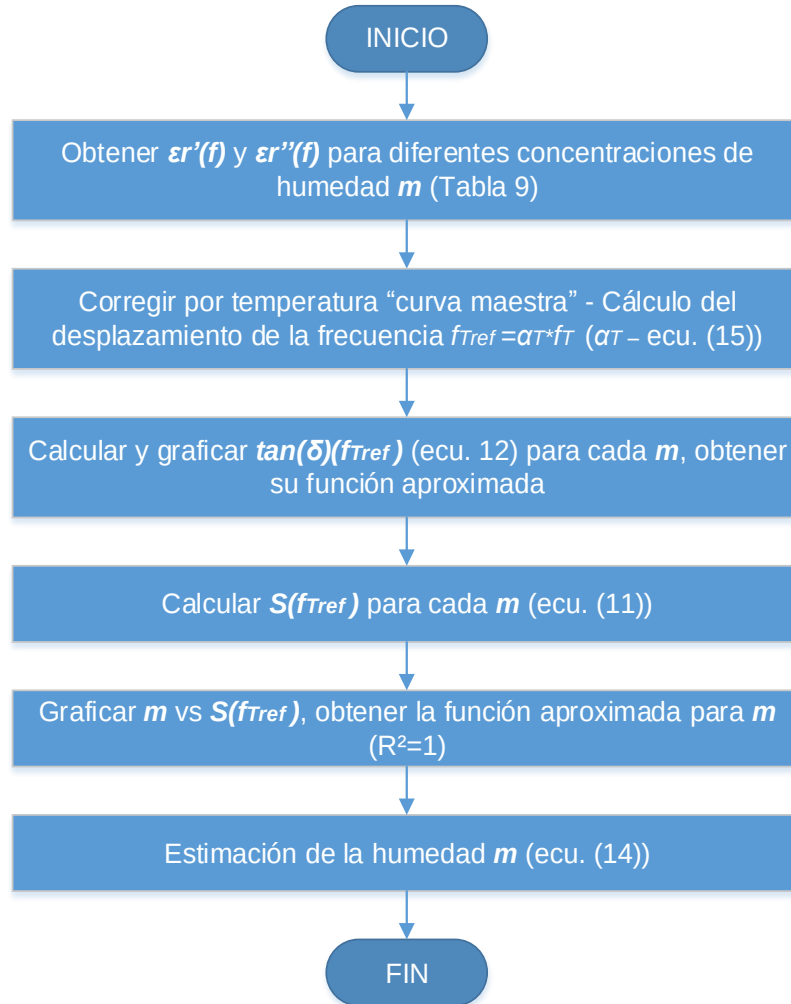
$$\alpha_T = e^{\left(-\frac{E}{k_B} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right)} \quad (16)$$

Donde α_T es el factor de desplazamiento de la frecuencia, E es la energía de activación (típicamente 1,07 eV para un DP de 1000 [45]), k_B es la constante de Boltzmann ($8,617385 \cdot 10^{-5}$ eV/K), T_{ref} es la temperatura de referencia (indicada en K) y T es la temperatura original en (expresada en K). La nueva frecuencia correspondiente la permitividad compleja original se calcularía con la ecuación (17).

$$f_{T_{ref}} = \alpha_T * f_T \quad (17)$$

Donde $f_{T_{ref}}$ es la frecuencia desplazada (expresada en Hz) a la temperatura de referencia T_{ref} y f_T es la frecuencia (indicada en Hz) a la temperatura original T . En el diagrama de flujo de la Figura 32 se resume el procedimiento descrito sobre la caracterización del sensor.

Figura 32. Diagrama de flujo del procedimiento de caracterización del sensor.



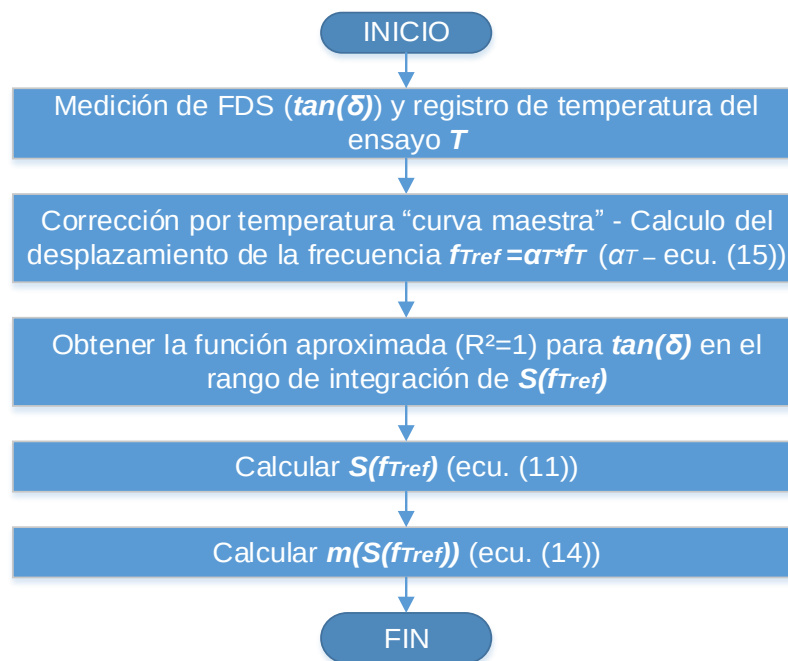
4.2.6 Estimación de la concentración de humedad en la celulosa.

Las mediciones realizadas con el equipo de FDS entregan valores de la capacitancia compleja y $\tan(\delta)$, sin embargo, todas las mediciones fueron tomadas a diferente temperatura, por lo tanto, es necesario hacer la corrección por temperatura para llevarlas al valor de referencia, usando la metodología de la "curva maestra" descrita anteriormente. Como la corrección por temperatura no afecta la magnitud de las permitividades real e imaginaria, y teniendo en cuenta la ecuación (13), se puede afirmar que el desplazamiento en la frecuencia puede realizarse directamente en la curva de $\tan(\delta)$ sin inconvenientes.

La temperatura se toma como el promedio de las mediciones minuto a minuto en la celulosa durante la ejecución del ensayo de FDS.

Después de hacer la corrección de la curva por temperatura, se calcula el valor de $S(f)$ para cada medida, ecuación (12), luego se estima el valor de la concentración de humedad en la celulosa con la ecuación (15). En el diagrama de flujo de la Figura 33 se resume el procedimiento descrito para estimar la concentración de humedad de las mediciones realizadas en la planta experimental.

Figura 33. Diagrama de flujo para la estimación de la concentración de humedad en la celulosa.



5 RESULTADOS Y VALIDACIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de las estimaciones de concentración de humedad, obtenidas por medio de mediciones durante el experimento junto con las entregadas por el modelo propuesto por R. Villarroel. También se presenta un análisis de los resultados obtenidos, la validación del modelo y la propuesta de mejora para este mismo.

5.1 CONCENTRACIÓN DE HUMEDAD OBTENIDA POR MEDICIONES

El experimento duró cerca de 52 días, donde se presentaron algunos eventos que afectaron la reproducción idónea de la temperatura en las cubas, estos eventos eran interrupciones prolongadas no programadas del suministro de energía (>1 hora de duración) y tres cortes programados del suministro. En estas situaciones fue necesario realizar las mediciones de temperatura de forma manual usando los sensores de la planta y tres equipos externos (Fluke 54 II) para medición con termopar. Debido a esto se observan distorsiones en las gráficas presentadas en el Anexo D, sin embargo esto no afecta la validación del modelo ya que se mantuvieron los registros de las temperaturas, datos que serán parte de la información de entrada al modelo que se desea validar.

Durante el experimento, se realizaron mediciones de FDS cada 7 días, para un total de 8 mediciones ejecutadas desde el 22 julio de 2017 hasta el 9 de septiembre del 2017, estas se presentan en el Anexo E, con los registros de inicio y fin de cada ensayo, las temperaturas promedio del devanado (porta-muestras) y del aceite, junto con la curva corregida por temperatura. Adicionalmente en las gráficas del Anexo D se indica el momento donde se realizaron cada una de las mediciones de FDS, para poder relacionar los resultados de las mediciones con los eventos previos que pueden dar lugar a comportamientos atípicos en la distribución de la humedad, estos se describen posteriormente.

Usando el procedimiento presentado en la sección 4.2.6, se estiman las concentraciones de humedad de cada una de las muestras al momento de realizar las 8 mediciones de FDS. Para realizar la corrección por temperatura se utiliza la medición de temperatura del devanado, ya que es la temperatura a la que está expuesta la muestra de papel.

En la Tabla 13 se presentan los valores calculados de la integral de $S(f_{Tref})$, obtenidos por medio de la ecuación (12) para cada medición. En la Tabla 14 se presentan los valores de concentración de humedad estimados con la ecuación (15), usando los datos de la Tabla 13.

Tabla 13. Calculo de la integral $S(f_{Tref})$ para cada medición de FDS realizada en la planta.

Medición	Cuba 1	Cuba 2	Cuba 3	Cuba 4	Cuba 5
Medida 1	0,174	0,444	0,753	1,306	1,820
Medida 2	0,771	0,715	1,039	1,455	1,947
Medida 3	0,586	0,586	1,319	1,346	1,936
Medida 4	0,653	0,690	1,302	1,299	1,937
Medida 5	0,766	2,656	1,362	1,315	1,975
Medida 6	0,689	2,566	1,553	1,317	2,064
Medida 7	0,572	0,670	1,168	1,039	1,635
Medida 8	0,478	0,549	0,858	0,823	1,196

Tabla 14. Concentración de humedad m de las muestras estimada con la ecuación (15) en % de la masa seca.

Medición	Cuba 1	Cuba 2	Cuba 3	Cuba 4	Cuba 5
Medida 1	2,272*	4,312	5,464	6,664	7,386
Medida 2	5,517	5,351	6,165	6,898	7,533
Medida 3	4,918	4,918	6,686	6,729	7,521
Medida 4	5,155	5,274	6,656	6,653	7,522
Medida 5	5,502	8,210	6,754	6,678	7,565
Medida 6	5,270	8,134	7,041	6,681	7,660
Medida 7	4,867	5,210	6,419	6,166	7,152
Medida 8	4,474	4,775	5,749	5,659	6,471

Nota: *Corresponde a un dato atípico que será discutido más adelante en detalle.

En la Tabla 14 se puede observar que en la medida 1 la humedad va aumentando desde la Cuba 1 hasta la Cuba 5, lo que era de esperar teniendo en cuenta que la Cuba 1 es la de mayor temperatura de operación y esta se reduce hasta la Cuba 5.

En la medida 2, la humedad de la Cuba 1 da ligeramente mayor que en la Cuba 2, como consecuencia del evento presentado alrededor del minuto 10400 hasta cerca del minuto 13000 (ver gráficas del Anexo D), donde la temperatura de la Cuba 1 se

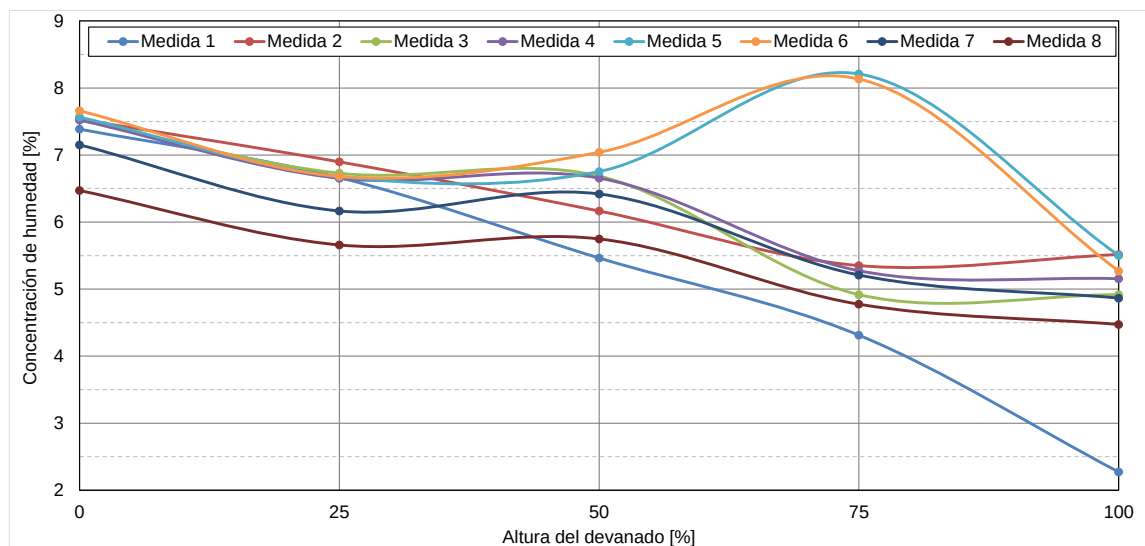
redujo hasta un valor de 17 °C, mientras en la Cuba 2 el valor mínimo fue de 20°C para ese mismo periodo, lo que pudo conducir a que la humedad en la muestra de la Cuba 1 se incrementará un poco más que la muestra de la Cuba 2, dificultando la reducción de la humedad en ella cuando se restableciera el proceso. Esto también justifica la cercanía entre las concentraciones de humedad de las Cubas 1 y 2 en las mediciones 3 y 4.

En la medida 4, de las Cubas 3 y 4, se observa mucha cercanía entre las humedades de ambas muestras, esto también es consecuencia de la reducción de temperatura que se produjo un día antes de las mediciones de FDS por un corte prolongado de energía, lo que facilitó la humectación de las muestras, y dado que la medición se realizó al día siguiente del evento, la humedad de la muestra de la Cuba 3, de mayor temperatura, no logró reducirse lo suficiente para ser menor a la humedad contenida en la muestra de la Cuba 4.

Las medidas 5 y 6 de la Cuba 2 presentan una humedad muy elevada, esto fue debido a una falla en la resistencia que calentaba al cilindro porta-muestra, como consecuencia la temperatura en este punto se redujo hasta valores cercanos a la temperatura del aceite en esa cuba. Esta condición se mantuvo por cerca de 12 días, lo que facilitó que la muestra ganara humedad.

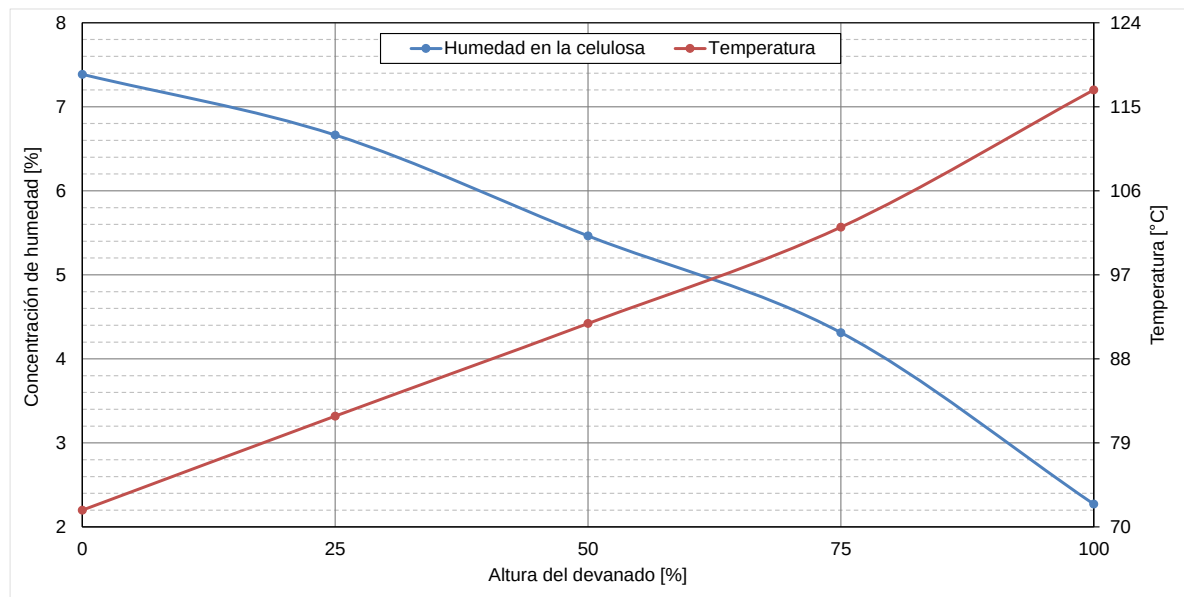
Debido a estas eventualidades se presentó una distribución atípica de la humedad a lo largo de la altura del transformador tal y como se presenta en la Figura 34.

Figura 34. Distribución de la humedad con la altura obtenida en la planta para cada medición.



Sin embargo en la primera medición, que no tuvo perturbaciones, si se logra observar una distribución de la humedad en la celulosa que es acorde a lo esperado según la teoría (Figura 11), esta distribución se presenta en la Figura 35. Es importante aclarar que en la Figura 35 la distribución está levemente afectada por el tiempo entre una medición y otra, ya que entre ellas pueden darse cambios pequeños de temperatura y humedad, lo ideal sería realizar las mediciones en el mismo instante en todas las cubas para poder conocer la distribución de la humedad en un mismo tiempo. Con esto se podría decir que la planta experimental es capaz de reproducir tanto el perfil de temperatura como la distribución de humedad en la altura del devanado, siempre y cuando no se presenten perturbaciones en el suministro de energía.

Figura 35. Distribución de la humedad y temperatura en la altura del devanado obtenida en la planta experimental en la primera medición de FDS.



5.2 CONCENTRACIÓN DE HUMEDAD OBTENIDA POR EL MODELO MULTIFÍSICO

El modelo multifísico de humedad – temperatura desarrollado por R. Villarroel requiere de la información de entrada presentada en la Tabla 15.

Tabla 15. Información de entrada al modelo multifísico de humedad - temperatura.

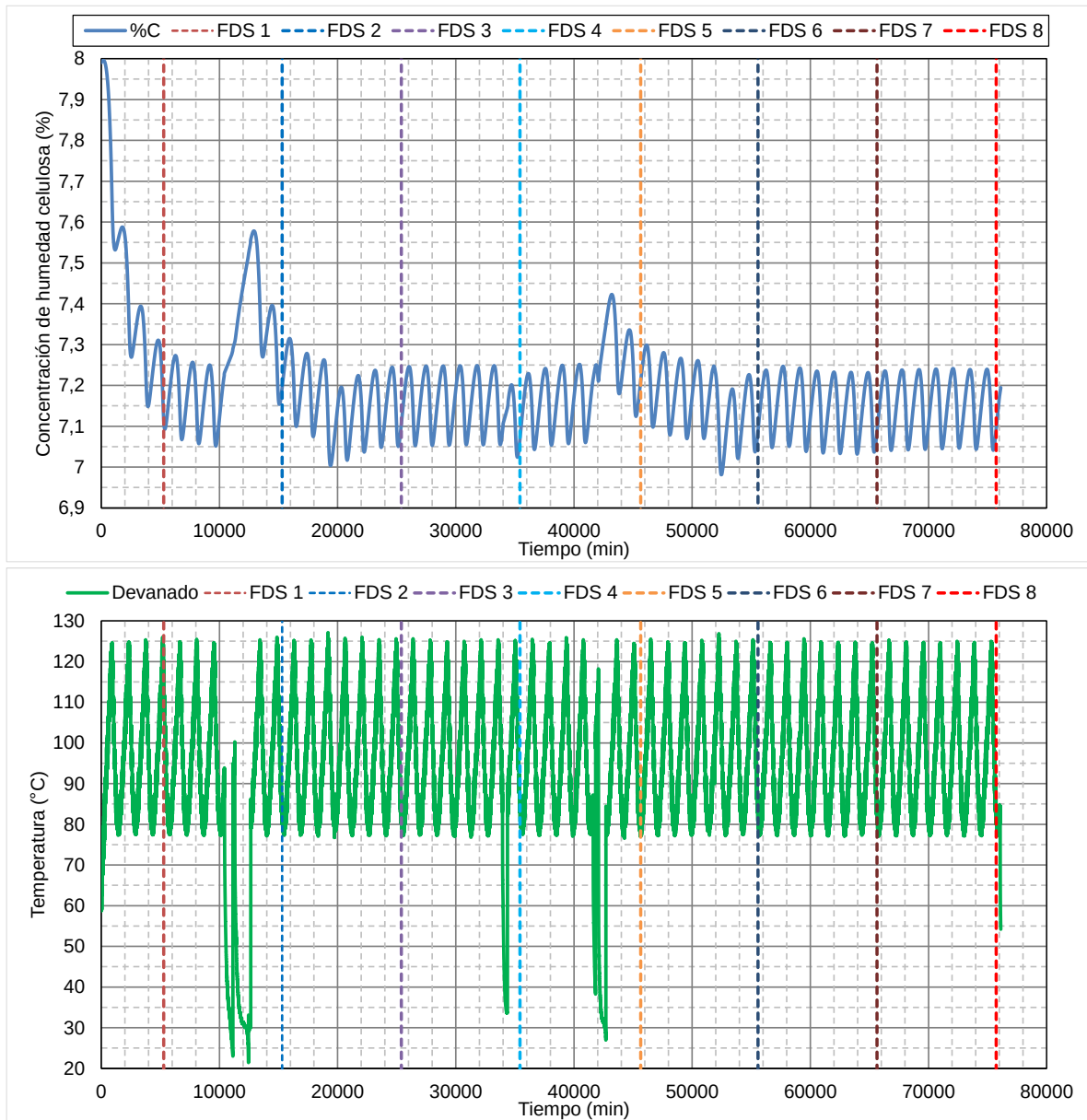
Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura del aceite	Registro de la planta	°C
Masa total de aceite	43,710	kg
Masa total del papel	1,4057	kg
Humedad inicial del aceite	110	ppm
Humedad inicial del papel	7,99	%
Masa total de agua	0,11712	kg

En la Figura 36 se presenta la concentración de humedad en la celulosa calculada por medio del modelo multifísico en la Cuba 1, en esa grafica se puede observar la variación de la humedad en el papel conforme cambia la temperatura a la que se encuentra expuesta. Los resultados obtenidos con el modelo en todas las cubas se presentan en el Anexo F, de estos se extraen en la Tabla 16 los valores que coinciden en tiempo con los ensayos de FDS.

Tabla 16. Concentración de humedad de las muestras obtenida por medio del modelo multifísico.

Medición	Cuba 1	Cuba 2	Cuba 3	Cuba 4	Cuba 5
Medida 1	6,645	7,060	7,415	7,721	7,923
Medida 2	7,409	7,626	7,784	7,929	8,033
Medida 3	7,409	7,627	7,757	7,921	8,026
Medida 4	7,359	7,570	7,730	7,907	8,013
Medida 5	7,594	7,578	7,830	7,955	8,027
Medida 6	7,407	7,497	7,756	7,873	7,848
Medida 7	7,400	7,612	7,754	7,912	8,023
Medida 8	7,396	7,638	7,768	7,921	8,027

Figura 36. Concentración de humedad en la celulosa y temperatura del devanado de la Cuba 1.



5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Las mediciones de FDS que se ejecutaron en la planta presentan cierta distorsión en los valores de baja frecuencia, esto puede ser debido al ruido que perturba la medición, ya que el equipo DIRANA usa el método de PDC para bajas frecuencias y este es muy sensible al ruido [45]. Este ruido puede atribuirse, entre otras causas,

al control On-Off de las resistencias de calentamiento e incluso por leves movimientos en los contactos como consecuencia de vibraciones en la planta por la operación de la bomba de aceite.

A pesar de esto, las distorsiones no intervienen en la estimación de la humedad siguiendo el procedimiento de la sección 4.2.6, ya que al momento de realizar la corrección de la temperatura, las bajas frecuencias se desplazan quedando por fuera del rango de integración. Esto fue posible debido a que se seleccionó una temperatura de referencia lo suficientemente baja (30 °C).

En la Tabla 17 se presenta el error entre la concentración de humedad en la muestra obtenida por medio de medición y el valor encontrado por medio del modelo, en porcentaje del valor medido.

Tabla 17. Error entre el valor de humedad en el papel obtenido por el modelo con referencia al valor medido por medio del FDS (ecuación (15)).

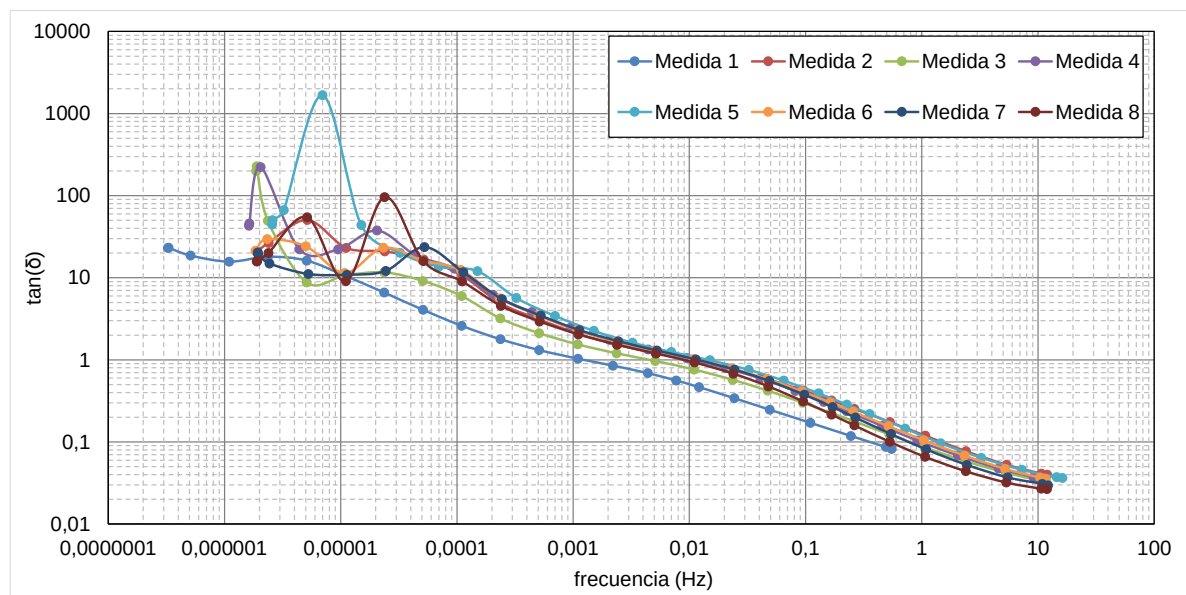
Cuba 1	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
Modelo [%]	6,645	7,409	7,409	7,359	7,594	7,407	7,400	7,396
Medición [%]	2,272	5,517	4,918	5,155	5,502	5,270	4,867	4,474
Error [%]	192,5	34,3	50,7	42,8	38,0	40,5	52,0	65,3
Cuba 2	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
Modelo [%]	7,060	7,626	7,627	7,570	7,578	7,497	7,612	7,638
Medición [%]	4,312	5,351	4,918	5,274	8,210	8,134	5,210	4,775
Error [%]	63,7	42,5	55,1	43,5	7,7	7,8	46,1	60,0
Cuba 3	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
Modelo [%]	7,415	7,784	7,757	7,730	7,830	7,756	7,754	7,768
Medición [%]	5,464	6,165	6,686	6,656	6,754	7,041	6,419	5,749
Error [%]	35,7	26,3	16,0	16,1	15,9	10,1	20,8	35,1
Cuba 4	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
Modelo [%]	7,721	7,929	7,921	7,907	7,955	7,873	7,912	7,921
Medición [%]	6,664	6,898	6,729	6,653	6,678	6,681	6,166	5,659
Error [%]	15,9	14,9	17,7	18,8	19,1	17,8	28,3	40,0
Cuba 5	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
Modelo [%]	7,923	8,033	8,026	8,013	8,027	7,848	8,023	8,027
Medición [%]	7,386	7,533	7,521	7,522	7,565	7,660	7,152	6,471
Error [%]	7,3	6,6	6,7	6,5	6,1	2,4	12,2	24,0

Nota: Las celdas destacadas en color rojo indican un error mayor al 10%, por el contrario, las celdas en color verde presentan un error menor al 10%.

De la Tabla 17 se puede indicar que del total de 40 datos comparados, solamente 8 de ellos presentaron un error menor al 10%, el 80% de los datos presenta un error superior al 10%.

En la medición 1 de la Cuba 1, se observa un error del 192,5%, sin embargo este error está asociado al proceso de tratamiento de la medición, ya que la medida de FDS al momento de ser corregida por temperatura, no alcanza abarcar el rango de integración de la ecuación (11), quedando por debajo del valor de 10 Hz, tal y como se muestra en la Figura 37, por lo tanto, la función aproximada que describe los datos de esta medición se estaría extrapolando, añadiendo error al cálculo de la integral y por ende, al valor de concentración de humedad obtenido por medio de la ecuación (14). Esto se presentó por la elevada temperatura a la que se encontraba expuesta la muestra de papel al momento de la medición de FDS, que corresponde a 116,81 °C frente a 82,2 °C en promedio cuando se realizaron las otras mediciones de FDS en la misma cuba (ver Anexo E, Tabla E-1).

Figura 37. Mediciones de FDS en la Cuba 1 corregidas por temperatura.



De acuerdo a lo anterior, es recomendable utilizar un espectro más amplio de frecuencia para las mediciones de mayor temperatura, con el fin de evitar este tipo de error.

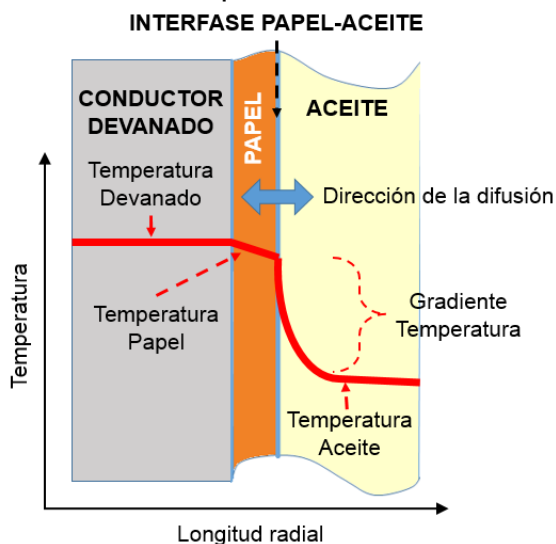
Omitiendo la medición 1 de la Cuba 1, la diferencia tan significativa entre los datos puede atribuirse a las siguientes causas:

a) El error porcentual va incrementando desde la cuba de menor temperatura (Cuba 5) hasta la cuba de mayor temperatura (Cuba 1), excepto en el caso de las mediciones 5 y 6 de la Cuba 2, ya que en ese periodo la temperatura de operación del papel era muy cercana a la del aceite por una falla en la resistencia que calentaba el porta-muestra.

Esto se puede atribuir a la definición del cálculo de la concentración de equilibrio, donde R. Villarroel propone usar la temperatura del aceite en la ecuación (3), para representar la temperatura en la interfase papel-aceite. Sin embargo, la temperatura del aceite puede resultar inferior a la temperatura real en ese punto, así el papel tendrá mayor “dificultad” de liberar humedad al aceite según la definición propuesta por R. Villarroel.

Una interpretación de este comportamiento de la temperatura entre el devanado-papel-aceite se presenta en la Figura 38 donde; la temperatura del devanado es uniforme en la dirección radial, considerando que es un buen conductor térmico, en el papel puede ocurrir una leve reducción de la temperatura, dependiendo de su capacidad de conducción térmica, por otra parte, en el aceite se puede presentar un gradiente de temperatura en una vecindad cercana al papel, por lo tanto la temperatura de la interfase papel-aceite puede ser mayor a la del aceite.

Figura 38. Comportamiento de la temperatura entre el devanado-papel-aceite.



Para verificar esta hipótesis, se realizó un nuevo cálculo del modelo propuesto por R. Villarroel, utilizando la temperatura del devanado para la interfase del papel-

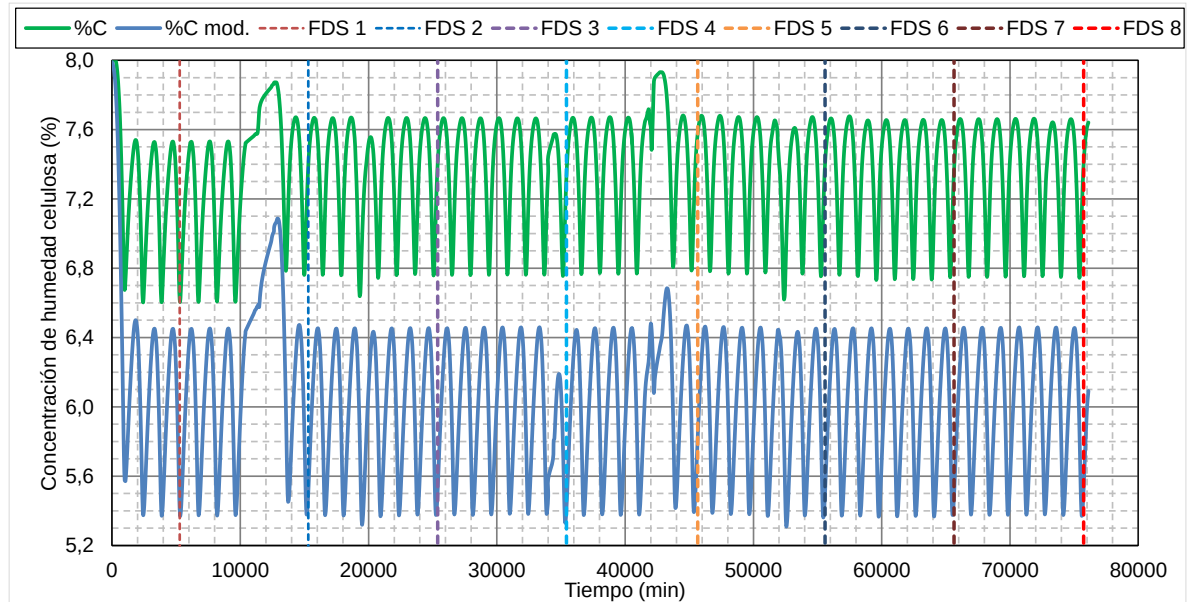
aceite como aproximación a la temperatura real en ese punto. Como resultado se presenta en la Tabla 18 los errores encontrados entre el modelo modificado y las mediciones de FDS, donde se observa una reducción del error en al menos 23 de las 40 mediciones, es decir un 57,5%, esto demuestra que la temperatura de la interfase papel-aceite tiene una gran incidencia en los resultados y es diferente a la temperatura del aceite. En la Figura 39 se presenta la humedad calculada en el papel con el modelo original y con la modificación en la Cuba 1, donde se observa una gran diferencia en el valor de la concentración de humedad obtenida entre ambos casos. La comparación en las demás cubas se presenta en el Anexo G.

Tabla 18. Error entre el valor de humedad en el papel obtenido por el modelo modificado con referencia al valor medido.

Cuba 1	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
Modelo [%]	5,411	5,530	5,530	5,453	5,866	5,516	5,530	5,526
Medición [%]	2,272	5,517	4,918	5,155	5,502	5,270	4,867	4,474
Error [%]	138,2	0,2	12,4	5,8	6,6	4,7	13,6	23,5
Cuba 2	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
Modelo [%]	5,898	6,087	6,085	5,971	7,377	7,306	6,020	6,055
Medición [%]	4,312	5,351	4,918	5,274	8,210	8,134	5,210	4,775
Error [%]	36,8	13,8	23,7	13,2	10,1	10,2	15,5	26,8
Cuba 3	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
Modelo [%]	6,408	6,582	6,522	6,461	6,703	6,515	6,525	6,549
Medición [%]	5,464	6,165	6,686	6,656	6,754	7,041	6,419	5,749
Error [%]	17,3	6,8	2,5	2,9	0,8	7,5	1,7	13,9
Cuba 4	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
Modelo [%]	6,864	6,996	6,969	6,923	7,072	6,960	6,955	6,970
Medición [%]	6,664	6,898	6,729	6,653	6,678	6,681	6,166	5,659
Error [%]	3,0	1,4	3,6	4,1	5,9	4,2	12,8	23,2
Cuba 5	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
Modelo [%]	7,241	7,321	7,299	7,266	7,322	7,286	7,291	7,301
Medición [%]	7,386	7,533	7,521	7,522	7,565	7,660	7,152	6,471
Error [%]	2,0	2,8	3,0	3,4	3,2	4,9	1,9	12,8

Nota: Las celdas destacadas en color rojo indican un error mayor al 10%, por el contrario, las celdas en color verde presentan un error menor al 10%.

Figura 39. Concentración de humedad en la celulosa obtenida con el modelo sin modificar (%C) y modificado (%C mod.) en la Cuba 1.



Por todo lo anterior, es necesario considerar este efecto para determinar la temperatura en la interfaz del papel-aceite al momento de calcular las condiciones de equilibrio de humedad.

b) En el modelo se utilizaron los parámetros A y B calculados por R. Villarroel para la saturación de agua en el aceite mineral (ecuación (6)). Sin embargo estos valores pueden no ser los más adecuados para usar de forma general para el aceite mineral, ya que estos pueden variar entre fabricantes o incluso dependiendo del estado del aceite [35].

Para demostrar el efecto de este parámetro, se realizó un nuevo cálculo del modelo modificado, cambiando los parámetros A y B por los obtenidos por Oommen ($A=7,42$ y $B=1670$) [34], como resultado se encontraron los errores presentados en la Tabla 19 al comparar los nuevos cálculos con las mediciones obtenidas por medio del FDS. En este caso la cantidad de mediciones con error menor al 10% ascendió a 30 de 40, es decir un 75%, evidenciando el efecto del uso de los parámetros A y B del aceite, ya que estos inciden en el cálculo de las condiciones de equilibrio.

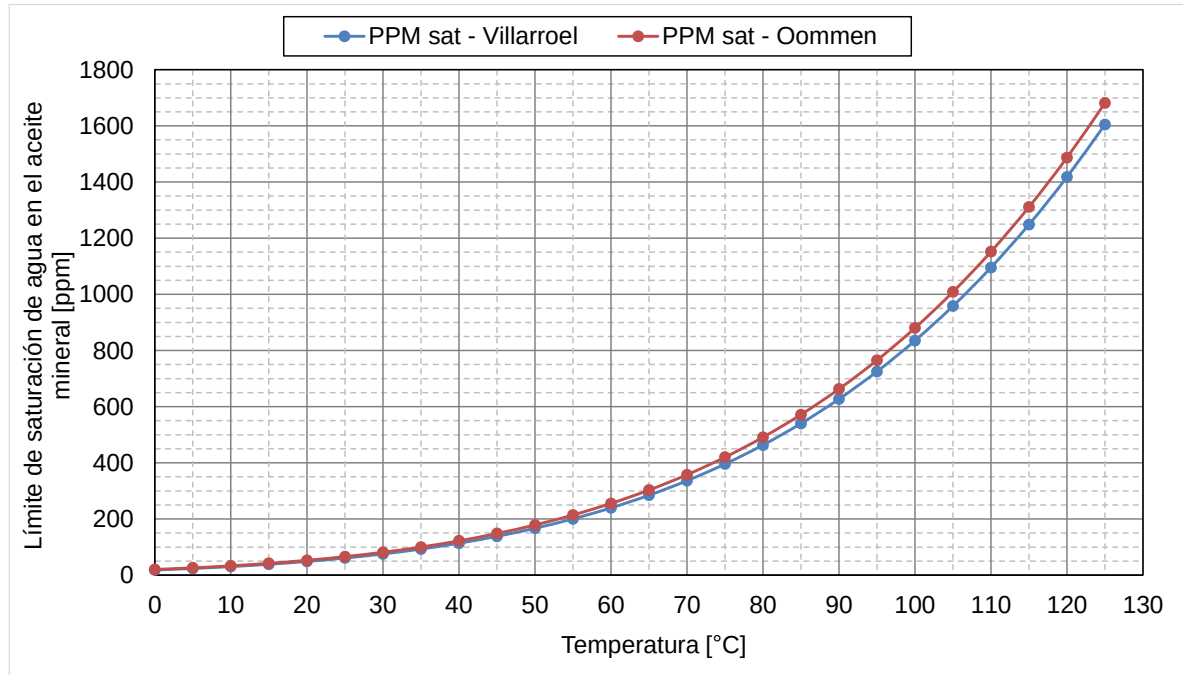
Tabla 19. Error entre el valor de humedad en el papel obtenido por el modelo modificado (con los valores *A* y *B* de Oommen) y las mediciones con FDS.

Cuba 1	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
Modelo [%]	4,988	5,080	5,077	4,995	5,411	5,064	5,077	5,073
Medición [%]	2,272	5,517	4,918	5,155	5,502	5,270	4,867	4,474
Error [%]	119,5	7,9	3,2	3,1	1,7	3,9	4,3	13,4
Cuba 2	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
Modelo [%]	5,493	5,671	5,665	5,542	7,167	7,085	5,598	5,633
Medición [%]	4,312	5,351	4,918	5,274	8,210	8,134	5,210	4,775
Error [%]	27,4	6,0	15,2	5,1	12,7	12,9	7,4	18,0
Cuba 3	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
Modelo [%]	6,040	6,222	6,152	6,082	6,355	6,145	6,157	6,183
Medición [%]	5,464	6,165	6,686	6,656	6,754	7,041	6,419	5,749
Error [%]	10,5	0,9	8,0	8,6	5,9	12,7	4,1	7,5
Cuba 4	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
Modelo [%]	6,554	6,705	6,669	6,614	6,792	6,659	6,654	6,672
Medición [%]	6,664	6,898	6,729	6,653	6,678	6,681	6,166	5,659
Error [%]	1,7	2,8	0,9	0,6	1,7	0,3	7,9	17,9
Cuba 5	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
Modelo [%]	7,000	7,099	7,068	7,027	7,098	7,052	7,058	7,071
Medición [%]	7,386	7,533	7,521	7,522	7,565	7,660	7,152	6,471
Error [%]	5,2	5,8	6,0	6,6	6,2	7,9	1,3	9,3

Nota: Las celdas destacadas en color rojo indican un error mayor al 10%, por el contrario, las celdas en color verde presentan un error menor al 10%.

Comparando los errores presentados en la Tabla 18 con los mostrados en la Tabla 19, se puede decir que el cambio de los parámetros *A* y *B* afectan los valores de las cubas de mayor temperatura, esto es coherente con el comportamiento de estos factores en temperaturas altas, donde la diferencia entre los dos autores es más notoria, tal y como se presenta en la Figura 40.

Figura 40. Límite de saturación de agua en el aceite mineral.



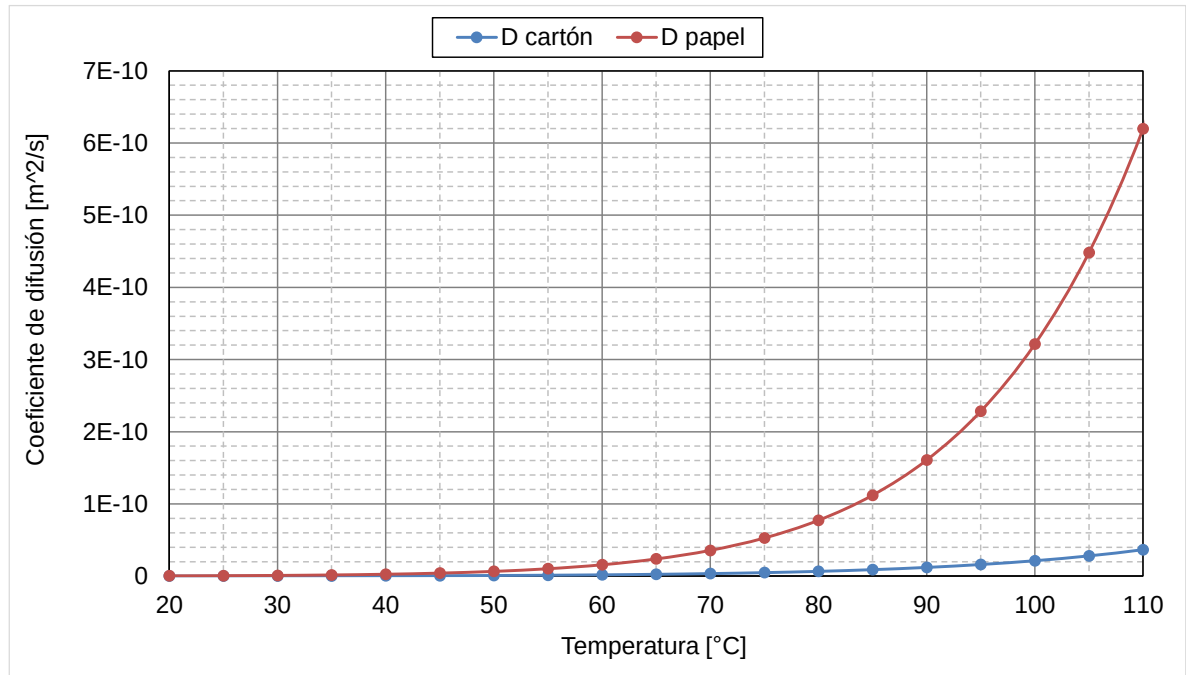
c) El modelo propuesto cuando calcula la distribución de la humedad entre el aceite y la celulosa, considera en la ecuación (4), la masa total de celulosa afectada por la humedad inicial del papel Kraft, esto no es totalmente cierto ya que al interior del transformador los diversos materiales celulósicos, que se pueden clasificar tal y como se describe en la sección 2.2.4, pueden poseer diferentes concentraciones de humedad inicial, lo que afecta al balance inicial de agua al interior del transformador, tal y como se presentó en el experimento, donde el papel Kraft y el cartón ingresaron con humedades diferentes.

Además, cada grupo de material celulósico tiene un coeficiente de difusión de humedad diferente [23], lo que implica una reacción diferente de cada material celulósico frente a la difusión de humedad. A esto se suma la diferencia en espesor, concentración de humedad y temperatura de operación. Por ejemplo, en la Figura 41 se presentan los valores de la difusión de la humedad en el cartón y el papel usando el coeficiente de difusión en el papel de la ecuación (2) con una concentración igual a la inicial en el papel de 7,99% y un espesor de 5 mm, por otra parte, para el caso del cartón, se usa el coeficiente de difusión de la ecuación (18) con una concentración inicial en el cartón de 9,577% y un espesor de 2 mm.

$$D = 2,89 \cdot 10^{-5} \cdot l^{6,791} \cdot e^{\left(0,2 \cdot c - \frac{6419 \cdot l^{0,27}}{T}\right)} \quad (18)$$

Donde D es el coeficiente de difusión de la humedad efectivo (expresado en m^2/s), c es la concentración de humedad local del aislamiento (expresada en % del peso seco), T es la temperatura del aislamiento (expresada en K) y l el espesor del aislamiento celulósico (indicado en mm).

Figura 41. Coeficiente de difusión de la humedad en el cartón y el papel.



Teniendo en cuenta el comportamiento presentado en la Figura 41, y considerando que la temperatura de operación del papel es mayor a la temperatura del cartón, se presenta, por cada tipo de aislamiento, un aporte distinto en el intercambio de humedad en cada instante de tiempo, por lo tanto el balance de humedad sería diferente al calculado por medio de la ecuación (4). Esta distinción no se hace en el modelo de difusión de humedad, donde solo se considera la difusión del papel delgado caliente.

Por lo tanto, es necesario incluir en el balance del agua total al interior del transformador, el porcentaje real de masa de cada tipo de aislamiento celulósico, afectado por la concentración de humedad correspondiente a cada uno y distinguir los modelos de difusión de cada tipo de aislamiento celulósico.

d) El modelo propuesto no considera el incremento de la humedad al interior del transformador por otras fuentes de humedad. En este caso, teniendo en cuenta la duración del experimento, tal y como se indican en la Tabla 1, intervendría principalmente la liberación de agua del cartón. Por lo tanto, es necesario considerar en el modelo el incremento con el tiempo de la humedad al interior del transformador causado por las diversas fuentes.

e) El uso de curvas de equilibrio para calcular las fronteras del modelo de difusión de humedad acarrea algunos errores. Los métodos de evaluación de la humedad del aislamiento sólido sobre la base del contenido de agua en el aceite tienen muchos puntos débiles, su aplicación será adecuada si se incluye en la evaluación el tipo de aislamiento (tipo de celulosa y de aceite) y su envejecimiento. Ambos factores afectan significativamente la solubilidad en agua en el aceite y la higroscopicidad de la celulosa [35] [36], estos factores no son tenidos en cuenta dentro del modelo propuesto.

f) Es recomendable considerar el efecto de la histéresis en la adsorción y desorción de la humedad, ya que el contenido de humedad en la celulosa depende también de su “historial inmediato”, es decir la dirección del cambio de humedad. Este cambio se puede dar por modificación de la humedad relativa o por cambio de la temperatura, este último ha sido poco estudiado [46], en comparación con el primero, y es el efecto que se presenta cuando un transformador está en funcionamiento.

Por lo tanto, este fenómeno puede aportar al error que afectaría al valor de humedad al que llegaría la celulosa dependiendo si la temperatura es decreciente o va en aumento.

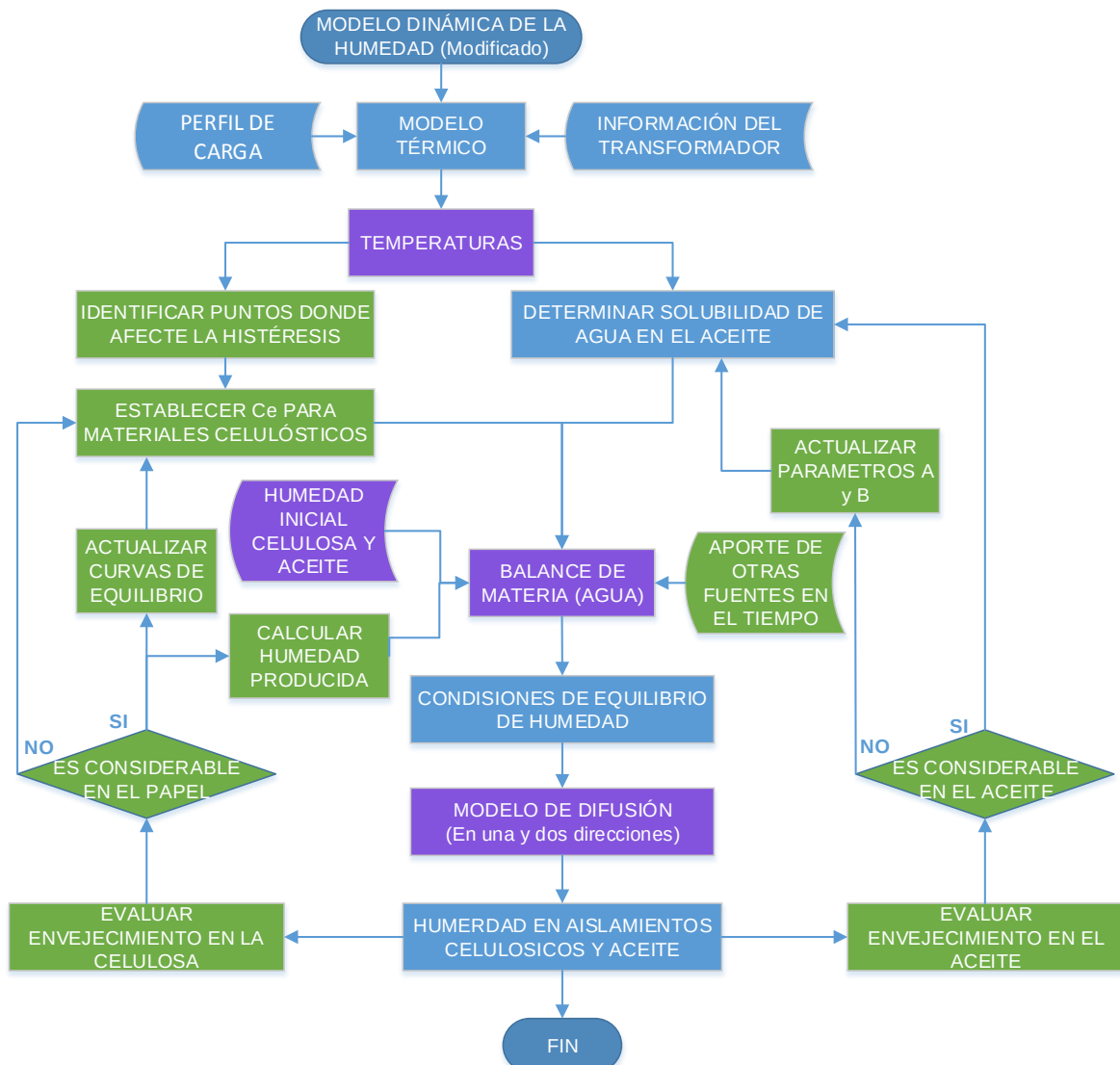
5.4 PROPUESTA DE MEJORA DEL MODELO MULTIFÍSICO

Teniendo en cuenta todo lo anterior se recomienda como mejora para el modelo agregar los componentes que se presentan en color verde en la Figura 42 y modificar los que están en color violeta. A continuación se describen las mejoras propuestas:

a) En el cálculo de las temperaturas de operación, se debe considerar el gradiente de temperatura en el aislamiento celulósico para el cálculo de la difusión

de humedad en el papel y como la humedad afecta su capacidad de conducción térmica [47]. En el caso de la temperatura presente en la interfase papel-aceite para calcular el coeficiente de las condiciones de equilibrio, se recomienda considerar una temperatura diferente a la del aceite, para esto es necesario determinar primero como calcular su valor o considerarla igual a la temperatura del papel como una buena aproximación.

Figura 42. Propuesta de mejora para el modelo multifísico de humedad-temperatura.



Nota: Los elementos en azul corresponden a componentes que ya existían en el modelo original, los de color violeta representan las etapas que recomiendan modificarse y los elementos verdes son los procesos nuevos propuestos.

b) Identificar los puntos donde se presenta histéresis por variación cíclica de temperatura. Para esto es necesario primero, investigar sobre la histéresis que se presenta en la humedad cuando hay ciclos de temperatura, de esta manera se puede cuantificar si es justificable considerar su efecto dentro del modelo y, como introducirlo en él o como compensarlo. Por el contrario, si su efecto es reducido, podría asumirse dentro de los errores de aproximación que posee el modelo. Se deja este paso en la propuesta hasta que se pueda demostrar que no incide en el resultado de la humedad.

c) Se recomienda establecer las ecuaciones de concentración de equilibrio para todos los tipos de materiales celulósicos, según su condición de envejecimiento, ya que estas ecuaciones se usarán para establecer las condiciones de equilibrio de humedad, en conjunto con el balance de agua al interior del transformador.

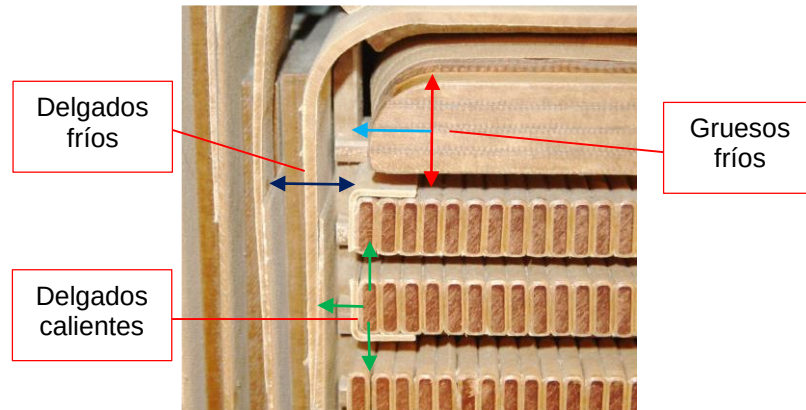
d) En el balance de materia, que corresponde al total de agua que existe al interior del transformador y como se distribuye, se propone considerar la masa de cada uno de los grupos de aislamiento celulósico de forma separada y afectada por su propia humedad. Además, se recomienda introducir las otras fuentes de humedad, que tienen un aporte pequeño al corto tiempo, si el tiempo de estudio es prolongado (alrededor de 1 año), de esta manera se pueden percibir cambios en la humedad al interior por aire que ingresa sin estar totalmente seco o por deterioro de los empaques, e incluso si es muy extendido el tiempo de análisis (> 1 año), considerar el aporte de la degradación de los materiales y el efecto Knudsen.

Para implementar esta etapa es necesario realizar investigaciones que permitan establecer una función o relación que facilite la cuantificación de los aportes de estas fuentes que no han sido consideradas hasta el momento.

e) Dado que se agregan otros materiales celulósicos al estudio, se recomienda modificar el modelo de difusión de humedad para incluir la difusión en las dos caras del cartón delgado frío, que se presentan en la misma dirección, junto con la difusión en dos direcciones que se presenta en los aislamientos gruesos fríos, ya que en este último si puede presentarse intercambio de humedad en al menos dos direcciones, debido a sus dimensiones y geometría, tal y como se presentan en la Figura 43 y Figura 44. Esto con el fin de poder cuantificar la cantidad de humedad que van cediendo, o ganando, los aislamientos delgados fríos y los aislamientos gruesos, ya que estos son fuente de la variación de humedad al interior del transformador que puede ser cuantificada de esta forma.

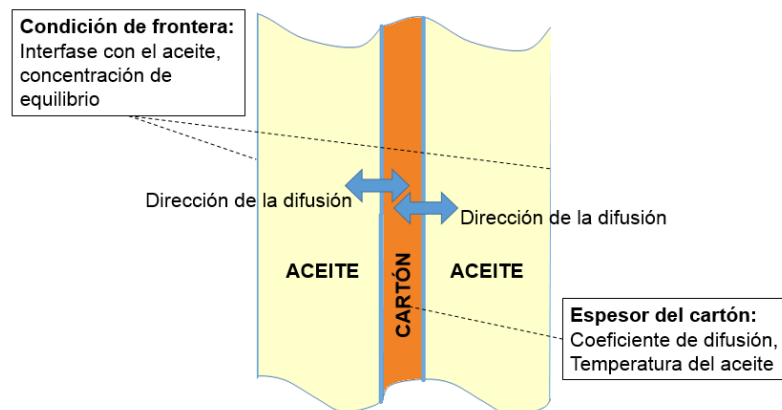
Las temperaturas de operación pueden suponerse como; la del aceite en el caso de los aislamientos delgados fríos, dado que estos se usan como conductos para dirigir el aceite, y en el caso de los aislamientos gruesos se puede asociar su temperatura con la del aceite en la parte superior e inferior, ya que estos se ubican principalmente en estas zonas como elementos de fijación.

Figura 43. Direcciones de la difusión de humedad en los materiales celulósicos.



Fuente: L. E. Lundgaard et al., CIGRE 323 Ageing of Cellulose in Mineral-Oil Insulated Transformers, no. October. CIGRE, 2007 p 21. Modificada.

Figura 44. MEF para estimar la humedad en el cartón.



f) Al final, después de obtener el valor de humedad en los diversos aislamientos, se adiciona una etapa donde se evalúa el envejecimiento que han sufrido los materiales debido al contenido de humedad y la temperatura, esto con dos fines que son:

1. Determinar si el envejecimiento de la celulosa o el aceite es suficiente como para requerir de la actualización de las curvas de equilibrio o los parámetros A y B del aceite, ya que ambos cambian conforme los materiales se degradan.

2. Determinar si hay producción de agua como subproducto del envejecimiento y adicionar su valor al balance de materia, para incluir esta fuente de humedad dentro de la dinámica.

Lo anterior debe evaluarse en cada punto de interés ya que el envejecimiento no es uniforme en todo el transformador. Para esto es necesario elaborar curvas de equilibrio para diversas degradaciones de todos los materiales celulósicos donde su cambio sea significativo.

También es necesario conocer la variación de los parámetros A y B con el envejecimiento para actualizar sus valores en la medida en que se degraden.

Además, se requiere de la aplicación de funciones que permitan obtener el grado de envejecimiento a partir de la temperatura y la humedad (y en lo posible la oxidación), para relacionarlo con la generación de humedad.

6 CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el comportamiento de la humedad y la temperatura obtenidas en la primera medición de FDS, se puede decir que la planta experimental es capaz de reproducir el perfil de temperatura del devanado y como consecuencia de esto, induce la distribución de humedad en la celulosa, siempre y cuando no se presenten perturbaciones en el suministro de energía que afecten la generación de calor por largos periodos.

Durante la caracterización de la respuesta dieléctrica del porta-muestras, se usaron metodologías distintas a las típicas para obtener la humedad de la celulosa cuando se utiliza la medición de FDS, como por ejemplo la comparación entre los puntos de dos curvas. En este trabajo se buscó eliminar el inconveniente de la geometría utilizando el valor del $\tan(\delta)$, y se aplicó el uso del área bajo la curva formada por este parámetro en función de la frecuencia, después de corregir la medición a una temperatura de referencia. Esta metodología resultó satisfactoria al momento de compararla con resultados obtenidos por medio de las curvas de equilibrio.

Para la implementación de la “curva maestra”, se recomienda utilizar un valor de temperatura de referencia razonablemente bajo, para poder eliminar las distorsiones que se presentan en las mediciones en baja frecuencia, cuando se usa el método combinado de PDC+FDS. Además, es prudente utilizar un amplio espectro de medición para evitar que la curva pueda verse truncada en el intervalo de integración de S , si la temperatura de medición es muy alta o muy baja respecto a la referencia.

Se presentaron ciertas diferencias entre el valor de la concentración de humedad en la celulosa obtenido por medio de mediciones y el encontrado por medio del modelo que se deseaba validar. Estas diferencias se atribuyeron a diversas causas, principalmente en la temperatura de operación que fue seleccionada para la interfaz papel-aceite, el uso de parámetros A y B generalizados, junto con la omisión de la distribución de la humedad y el cambio del coeficiente de difusión de humedad en los diferentes tipos de aislamientos celulósicos. Además, se identificaron otras fuentes de error en el modelo como la generalización de las curvas de equilibrio y la solubilidad del agua en el aceite, y tampoco se consideró la participación de la histéresis de la humedad por ciclos de temperatura o el aporte de otras fuentes de humedad.

6.1 TRABAJOS FUTUROS

Una mejora que se puede realizar al modelo multifísico de humedad – temperatura, está relacionada con la investigación reciente sobre el efecto que tiene la humedad sobre la respuesta térmica del aislamiento, que afectaría al modelo térmico del transformador [47]. Este aspecto no fue discutido en el análisis de los resultados ya que no es deducible de la experimentación realizada, teniendo en cuenta que, en nuestro caso, el comportamiento térmico siempre fue reproducido por la planta y no se deriva de una respuesta a los cambios de las propiedades térmicas de los materiales. Por lo tanto, se recomienda estudiar la posibilidad de integrar el efecto de la humedad en el modelo térmico.

Adicionalmente se puede mejorar la estimación de la temperatura al interior del transformador considerando el efecto de la radiación solar como en [48], ya que es un parámetro medio ambiental que puede afectar las temperaturas de operación del transformador.

Se recomienda estudiar la histéresis de la humedad cuando se presentan ciclos de temperatura, ya que este efecto no se ha estudiado ampliamente según [46].

Aplicar las mejoras sugeridas para el modelo multifísico de humedad – temperatura y realizar un nuevo experimento que permita validarlo.

Se recomienda realizar un ajuste también al experimento, en caso de repetirse, donde las condiciones iniciales de los materiales presenten un menor grado de humedad inicial.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. F. García Gómez, “Determinación de coeficientes de difusión de humedad en papeles aislantes de transformador,” Carlos III de Madrid, 2012.
- [2] M. Wang, A. J. Vandermaar, and K. D. Srivastava, “Review of condition assessment of power transformers in service,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 6, pp. 12–25, 2002.
- [3] R. Pérez, D. Pérez, and S. Fernández, “EVALUACIÓN POR RIESGO DEL PESO DE LAS FALLAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA,” in *Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI’2013)*, 2013, pp. 1–11.
- [4] J. Gielniak et al., “Moisture in cellulose insulation of power transformers - statistics,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 3, pp. 982–987, Jun. 2013.
- [5] L. E. Lundgaard et al., *CIGRE 323 Ageing of Cellulose in Mineral-Oil Insulated Transformers*, no. October. CIGRE, 2007.
- [6] D. F. Garcia, B. Garcia, J. C. Burgos, and R. Villarroel, “Transformer field drying improvement by applying low-frequency-heating,” in *2012 Workshop on Engineering Applications, WEA 2012*, 2012.
- [7] R. Villarroel, D. F. Garcia, B. Garcia, and J. C. Burgos, “Comparison of the drying times for kraft paper and pressboard in transformer factory drying,” in *Proceedings - 2012 20th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2012*, 2012, pp. 1233–1237.
- [8] J. A. Almendros-Ibañez, J. C. Burgos, and B. Garcia, “Transformer field drying procedures: A theoretical analysis,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 4, pp. 1978–1986, 2009.
- [9] Y. Li, G. Wu, W. Li, Y. Cui, and B. Gao, “Influence of moisture and oxygen on aging of oil-paper insulation,” in *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2013, pp. 120–123.
- [10] L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, and T. J. Painter, “Aging of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 1, pp. 230–239, 2004.
- [11] D. Martin, Y. Cui, C. Ekanayake, H. Ma, and T. Saha, “An Updated Model to Determine the Life Remaining of Transformer Insulation,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 1, pp. 395–402, Feb. 2015.
- [12] IEEE, “C57.91-2011 - IEEE Guide for Loading Mineral- Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators.” IEEE, p. 106, 2012.
- [13] R. Villarroel, “Moisture dynamics in transformers insulated with natural esters,” Carlos III de Madrid, 2015.
- [14] R. Del Vecchio, B. Poulin, P. Feghali, D. Shah, and R. Ahuja, *Transformer Design Principles With Applications to Core-Form Power Transformers*, 2nd ed. CRC Press, 2010.
- [15] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer engineering*, 2nd ed. CRC

- Press, 2012.
- [16] M. E. MUÑOZ LEUDO, "METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA CARGA EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN," Universidad del Valle, 2008.
 - [17] IEC, "IEC 60076-7 Power Transformers - Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers." IEC, Madrid, España, p. 58, 2005.
 - [18] V. Sokolov *et al.*, *CIGRE 349 Moisture Equilibrium And Moisture Migration Within Transformer Insulation Systems*, no. June. CIGRE, 2008.
 - [19] R. B. Jadav, T. K. Saha, and C. Ekanayake, "Understanding moisture diffusion process in oil-impregnated pressboard insulation of transformer," in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011, pp. 1–8.
 - [20] H. P. Gasser, C. Krause, and T. Prevost, "Water Absorption of Cellulosic Insulating Materials used in Power Transformers," in *Solid Dielectrics, 2007. ICSD '07. IEEE International Conference on*, 2007, pp. 289–293.
 - [21] R. Villarroel, B. Garcia, J. C. Burgos, and D. F. Garcia, "Experimental study on moisture dynamics in transformers insulated with natural-esters," in *Proceedings of IEEE International Conference on Solid Dielectrics, ICSD*, 2013, pp. 545–548.
 - [22] R. Villarroel, D. Garcia, B. Garcia, and J. Burgos, "Diffusion coefficient in transformer pressboard insulation part 2: Mineral oil impregnated," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 1, pp. 394–402, 2014.
 - [23] D. F. Garcia, R. D. Villarroel, B. Garcia, and J. C. Burgos, "Effect of the Thickness on the Water Mobility Inside Transformer Cellulosic Insulation," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 3, pp. 955–962, 2016.
 - [24] W. A. Fessler, T. O. Rouse, W. J. McNutt, and O. R. Compton, "A Redefined Mathematical Model For Prediction of Bubble Evaluation In Transformers," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 4, no. 1, pp. 391–404, 1989.
 - [25] S. D. Foss and L. Savio, "Mathematical and Experimental Analysis of the Field Drying of Power Transfofwer Insulation," *Power Deliv.*, vol. 8, no. 4, pp. 1820–1828, 1993.
 - [26] ASTM Committee D01, "Standard Test Methods for Moisture in Cellulose - ASTM D1348 - 94 (Reapproved 2008)," *ASTM International, West Conshohocken, PA.*, no. Reapproved 2008. ASTM, p. 6, 2008.
 - [27] ASTM Committee D27, "ASTM D1533-12 Standard Test Method for Water in Insulating Liquids by Coulometric Karl Fischer Titration." American Standard Test Methods - ASTM, pp. 1–5, 2012.
 - [28] W. Correa, A. Cespedes, and D. Garcia, "Temperature Control Experimental Plant for Moisture Model Assessment in Power Transformers," in *2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 2017, pp. 1–4.
 - [29] B. Garcia, G. Robles, and D. F. Garcia, "Moisture sensor to characterize transformer solid insulations in transformers under non-equilibrium conditions," in *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, 2013, pp. 1028–1031.
 - [30] A. Cespedes, D. Garcia, and B. Garcia, "Modelling the dielectric response of

- a water-in-solid-insulation sensor for power transformer monitoring,” in *2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*, 2016, pp. 915–918.
- [31] IEEE Standards Association, “IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors,” *IEEE Std C57.152-2013*. IEEE, pp. 1–121, 2013.
 - [32] M. Koch, M. Krueger, and S. Tenbohlen, “On-site methods for reliable moisture determination in power transformers,” *2010 IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Smart Solut. a Chang. World*, 2010.
 - [33] K. Budin and M. Lee, “En busca del agua,” *OMICRON Magazine*, pp. 12–15, 2012.
 - [34] Y. Du, A. V. Mamishev, B. C. Lesieutre, M. Zahn, and S. H. Kang, “Moisture Solubility for Differently Conditioned Transformer Oils,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 8, no. 5, pp. 805–811, 2001.
 - [35] P. Przybylek, “Water Saturation Limit of Insulating Liquids and Hygroscopicity of Cellulose in Aspect of Moisture Determination in Oil-Paper Insulation,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 3, pp. 1886–1893, Jun. 2016.
 - [36] D. Martin and T. Saha, “A Review of the Techniques Used by Utilities to Measure the Water Content of Transformer Insulation Paper,” pp. 8–16, 2017.
 - [37] J. Liu, L. Zhou, Y. Luo, X. Huang, and G. Wu, “Dielectric frequency response of oil-paper composite insulation with transient moisture distribution,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 4, pp. 1380–1387, 2013.
 - [38] M. K. Pradhan, J. H. Yew, and T. K. Saha, “Influence of the geometrical parameters of power transformer insulation on the frequency domain spectroscopy measurement,” *IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES*, pp. 1–8, 2008.
 - [39] M. K. Pradhan and K. J. H. Yew, “Experimental investigation of insulation parameters affecting power transformer condition assessment using frequency domain spectroscopy,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 6, pp. 1851–1859, Dec. 2012.
 - [40] W. Wang, Y. Liu, J. Bi, Y. Gong, and Y. Deng, “Effect Factors Analysis of Frequency Domain Spectroscopy Test,” in *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2012, pp. 1–5.
 - [41] Y. Zhang *et al.*, “Understanding and analysis on frequency dielectric parameter for quantitative diagnosis of moisture content in paper–oil insulation system,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 9, no. 3, pp. 213–222, Mar. 2015.
 - [42] ASTM Committee E11, “Standard Practice for Dealing With Outlying Observations - ASTM E178-16a,” *ASTM International, West Conshohocken, PA*. ASTM, pp. 1–17, 2016.
 - [43] Y. Du, M. Zahn, N. Altamirano, M. Sarda, A. V. Mamishev, and B. C. Lesieutre, “Moisture and temperature effects on the dielectric spectrum of transformer pressboard,” in *2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2002, pp. 878–881.
 - [44] R. Liao, J. Hao, G. Chen, and L. Yang, “Quantitative analysis of ageing condition of oil-paper insulation by frequency domain spectroscopy,” *IEEE*

- Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 3, pp. 821–830, 2012.
- [45] D. Linhjell, L. Lundgaard, and U. Gäfvert, “Dielectric response of mineral oil impregnated cellulose and the impact of aging,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 1, pp. 156–169, 2007.
- [46] D. Martin, C. Perkasa, and N. Lelekakis, “Measuring Paper Water Content of Transformers: A New Approach Using Cellulose Isotherms in Nonequilibrium Conditions,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 3, pp. 1433–1439, 2013.
- [47] Y. Cui, S. Member, H. Ma, S. Member, T. Saha, and S. Member, “Moisture Dependent Thermal Modelling of Power Transformer,” vol. 8977, no. c, pp. 1–11, 2016.
- [48] B. Gorgan, P. V. Notingham, J. M. Wetzter, H. F. a. Verhaart, P. a. a. F. Wouters, and a. Van Schijndel, “Influence of solar irradiation on power transformer thermal balance,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 6, pp. 1843–1850, 2012.

ANEXOS

Anexo A

Modelo de elementos finitos – MEF en COMSOL Multiphysics

Definición de la física del problema: La física corresponde al transporte de especies diluidas dependiente del tiempo. En este caso la variable dependiente corresponde a la concentración de humedad a través del papel, para encontrarla se utiliza la segunda ley de Fick, ecuación (1), donde el coeficiente de difusión es introducido al modelo según la ecuación (2). Este coeficiente es dependiente de la temperatura, el espesor y la concentración local de humedad, los dos primeros son parámetros del problema.

Construcción de la geometría: La geometría corresponde a una línea de longitud igual al espesor del papel donde se considera solamente la difusión en una dirección “x” perpendicular al conductor, ya que el devanado posee una gran longitud en la dirección “y” en comparación con la porción de los extremos donde se puede presentar difusión en la dirección “y”, por otra parte, en la dirección “z” no se presenta difusión por la geometría cilíndrica del problema.

Construcción de la malla: La malla se ajustó usando la construcción automática del software, con un tamaño de elemento denominado “Extremadamente fina”, de esta manera se obtuvieron dos elementos de contorno y la división del dominio en 100 elementos.

Definición de los elementos de contorno o condiciones de frontera: En uno de los extremos de la línea se encuentra el material conductor del devanado, donde no existe difusión teniendo en cuenta que el material es impermeable. El otro extremo corresponde a la interfase papel-aceite donde si hay difusión de humedad, en este punto se asume que la humedad es igual a la alcanzada en equilibrio.

Definición de las condiciones iniciales: La condición inicial del dominio corresponde a la concentración inicial en el papel. Para el primer cálculo, esta corresponde a la obtenida por medio de mediciones previas en el papel, para los cálculos posteriores esta condición inicial es la concentración media de la humedad en el papel obtenido en el cálculo anterior.

Definición de los parámetros: Los parámetros utilizados en el modelo corresponden a la temperatura del medio de difusión, la concentración inicial de humedad, la concentración de equilibrio, el espesor y el tiempo de simulación. Este último corresponde al periodo durante el cual la temperatura se puede asumir como la misma.

Manipulación de la variable dependiente: El resultado del MEF es la distribución de la concentración de la humedad a lo largo del espesor, sin embargo es de interés conocer la concentración media de la humedad, por lo tanto, al resultado obtenido se realiza un pos-proceso, integrando la variable dependiente a lo largo del espesor del papel, que lo puede hacer directamente el COMSOL Multiphysics, y luego dividiendo el resultado por el espesor del papel, obteniendo así la concentración media de la humedad.

En la Figura 13 se puede observar la descripción del modelo MEF.

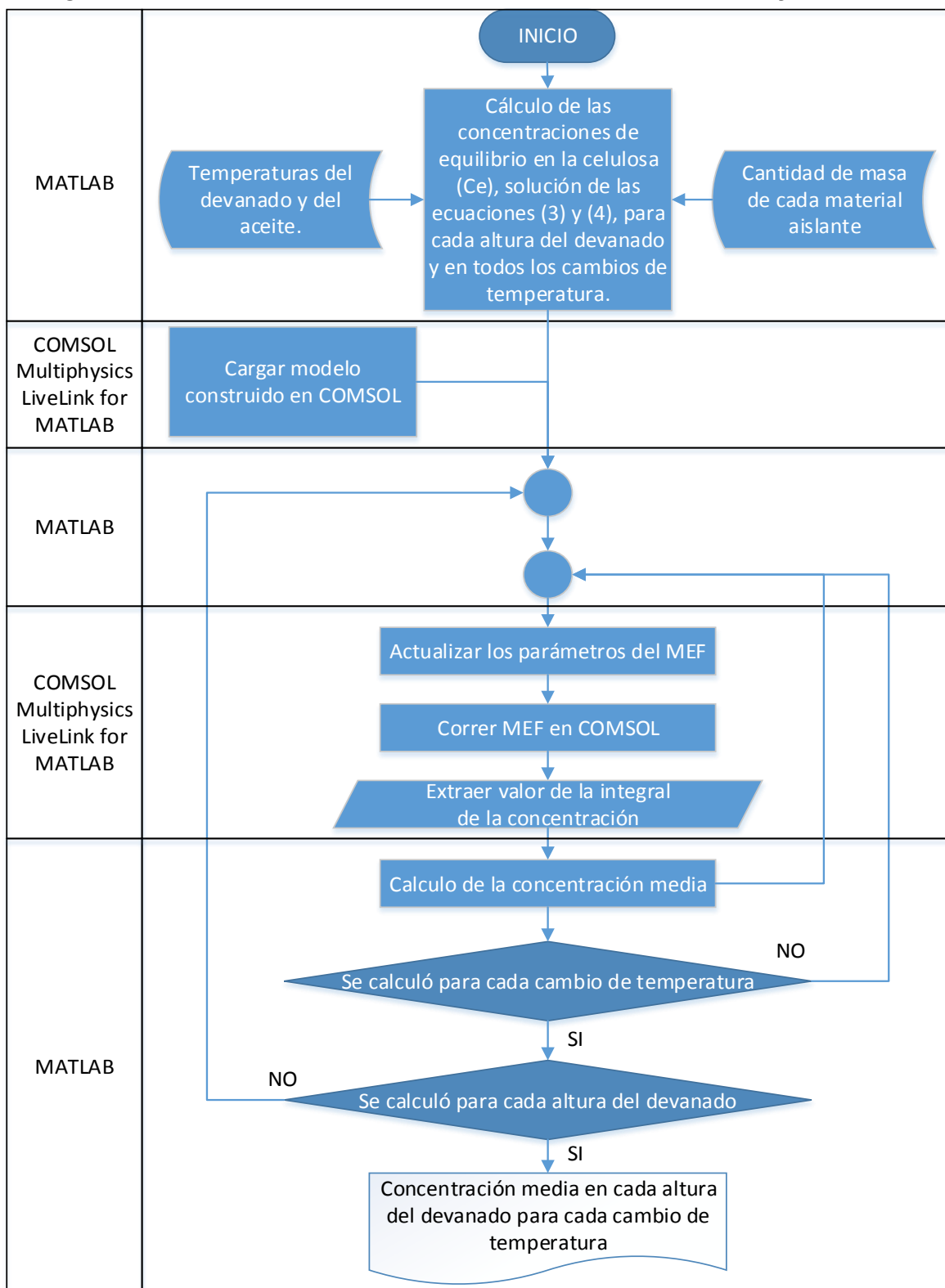
Interacción entre MATLAB y COMSOL Multiphysics

Teniendo en cuenta la necesidad que surgía de resolver un gran número de MEF para obtener la concentración media de la humedad en el papel, que a su vez dependían uno del resultado anterior, se aprovechó la ventaja que tiene el software COMSOL Multiphysics al permitir la interacción con MATLAB comunicándose en dos sentidos, ya sea MATLAB hacia COMSOL Multiphysics o viceversa por medio del módulo de LiveLink for MATLAB.

De esta forma podía programarse una secuencia de tareas en un script en MATLAB que “llame” al modelo en COMSOL Multiphysics, cambiando los parámetros que fueron definidos anteriormente, dar la orden de resolver el modelo y extraer la información deseada para ser presentada posteriormente.

En la Figura A-1, se presenta un diagrama de flujo del proceso de cálculo donde interactúan los dos software.

Figura A-1. Proceso de cálculo entre los software MATLAB y COMSOL.



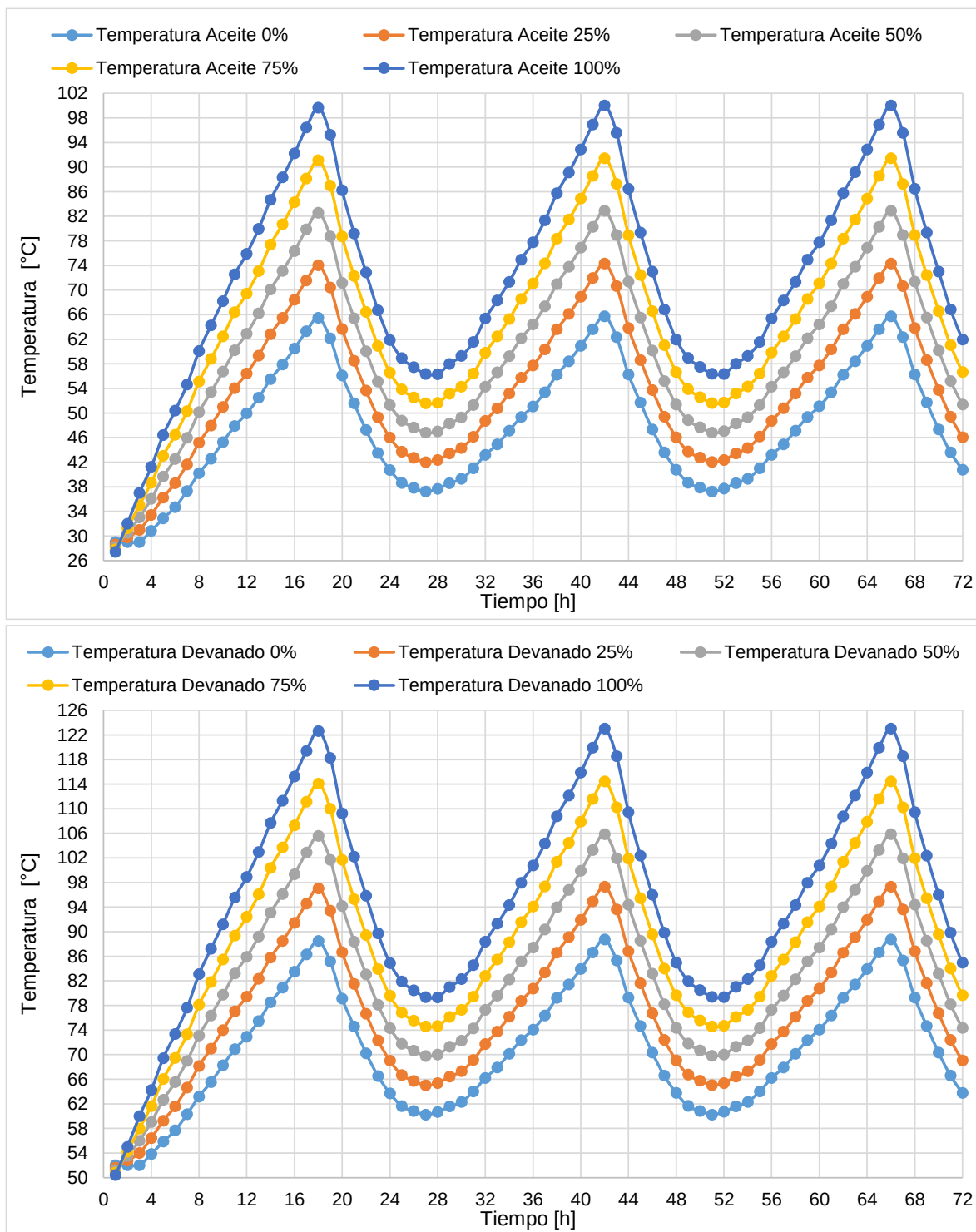
Anexo B

Tabla B-1. Datos del transformador del caso de estudio.

Parámetro	Valor	Unidad
Incremento de la temperatura promedio del devanado sobre el ambiente a los kVA base del ciclo de carga	65	°C
kVA base para las pérdidas	28000	kVA
Temperatura Base para pérdidas en los kVA base	75	°C
Pérdidas I^2R del devanado a carga nominal	51690	W
Pérdidas de Eddy a carga nominal	0	W
Pérdidas de dispersión a carga nominal	21078	W
Pérdidas del núcleo sin carga	36986	W
Elevación de temperatura promedio del devanado sobre el ambiente, obtenida por ensayado o nominal	63	°C
Incremento de la temperatura del punto caliente del devanado por encima del ambiente	80	°C
Incremento de la temperatura del fluido en la parte superior a carga nominal	55	°C
Incremento de la temperatura del fluido en la parte inferior a carga nominal	25	°C
Pérdidas de Eddy en la ubicación del punto caliente de bobinado, por unidad de pérdida de I^2R	0	PU
Constante de tiempo del devanado	5	min
Temperatura ambiente nominal en la base kVA para el ciclo de carga	30	°C
Ubicación del punto caliente en por unidad de la altura del devanado	1	PU
Volumen del Fluido	4910	Galón
¿Ocurre sobre excitación del núcleo?	No	-
Tiempo cuando ocurre la sobre excitación	-	h
Pérdidas del núcleo cuando ocurre la sobre excitación	36986	W
Tiempo de incremento para la impresión de los cálculos	60	min
Número de puntos sobre el ciclo de carga	1440	-
Temperatura del devanado en el punto caliente	35,86	°C
Temperatura promedio del devanado	33	°C
Temperatura superior en el tanque y radiador	31,73	°C
Temperatura en la parte superior del ducto	32	°C
Temperatura en el fluido de la parte inferior	22	°C

Anexo C

Figura C-1. Perfiles de temperatura obtenidos con el modelo térmico.



Anexo D

Mediciones de Temperatura

Los registros de temperatura en el aceite y devanados, junto con el momento de inicio de los ensayos de FDS se presentan desde la Figura D-1 hasta la Figura D-5.

Figura D-1. Perfiles de temperatura obtenidos durante el experimento con la planta experimental – Cuba 1.

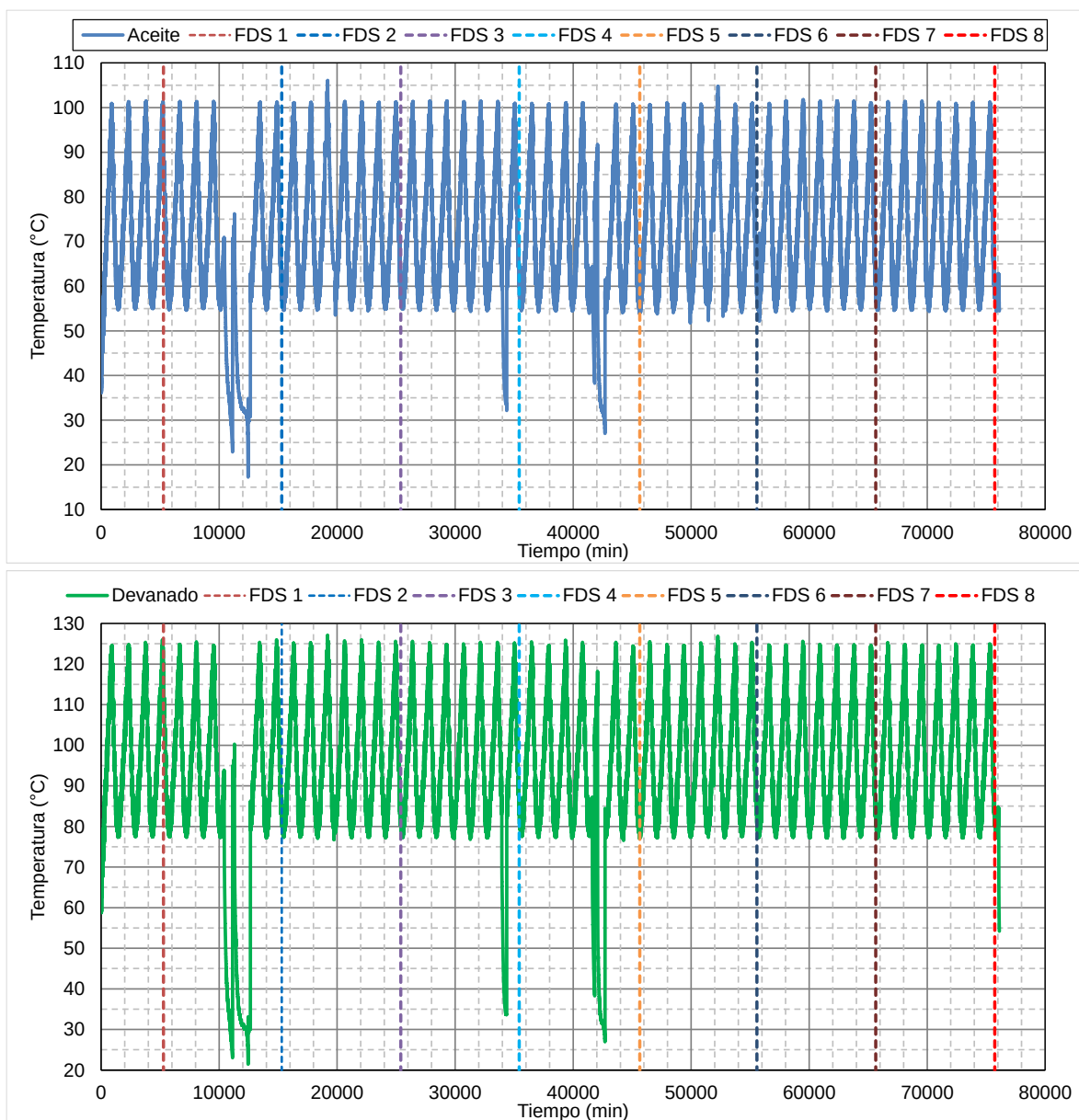


Figura D-2. Perfiles de temperatura obtenidos durante el experimento con la planta experimental – Cuba 2.

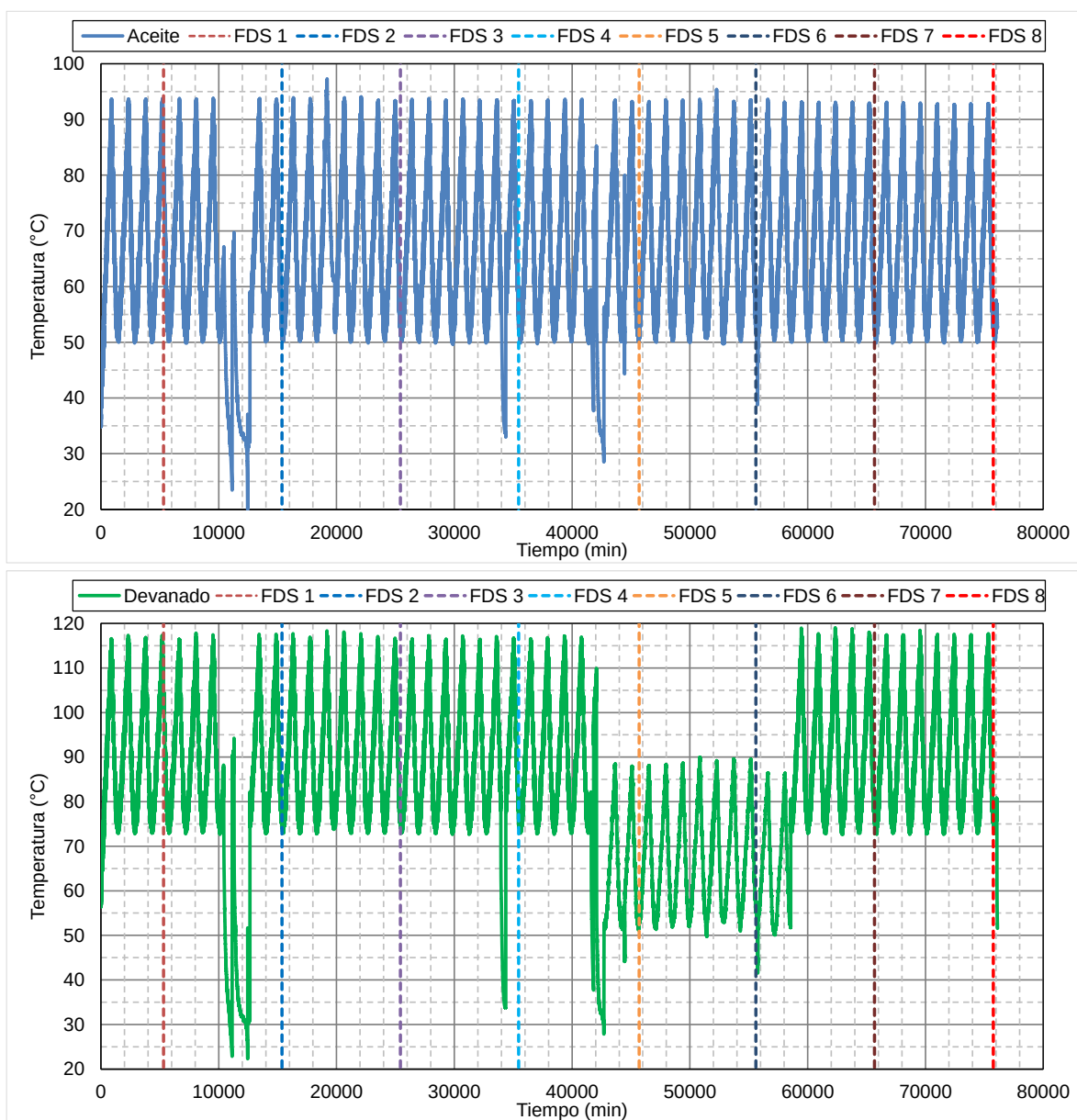


Figura D-3. Perfiles de temperatura obtenidos durante el experimento con la planta experimental – Cuba 3.

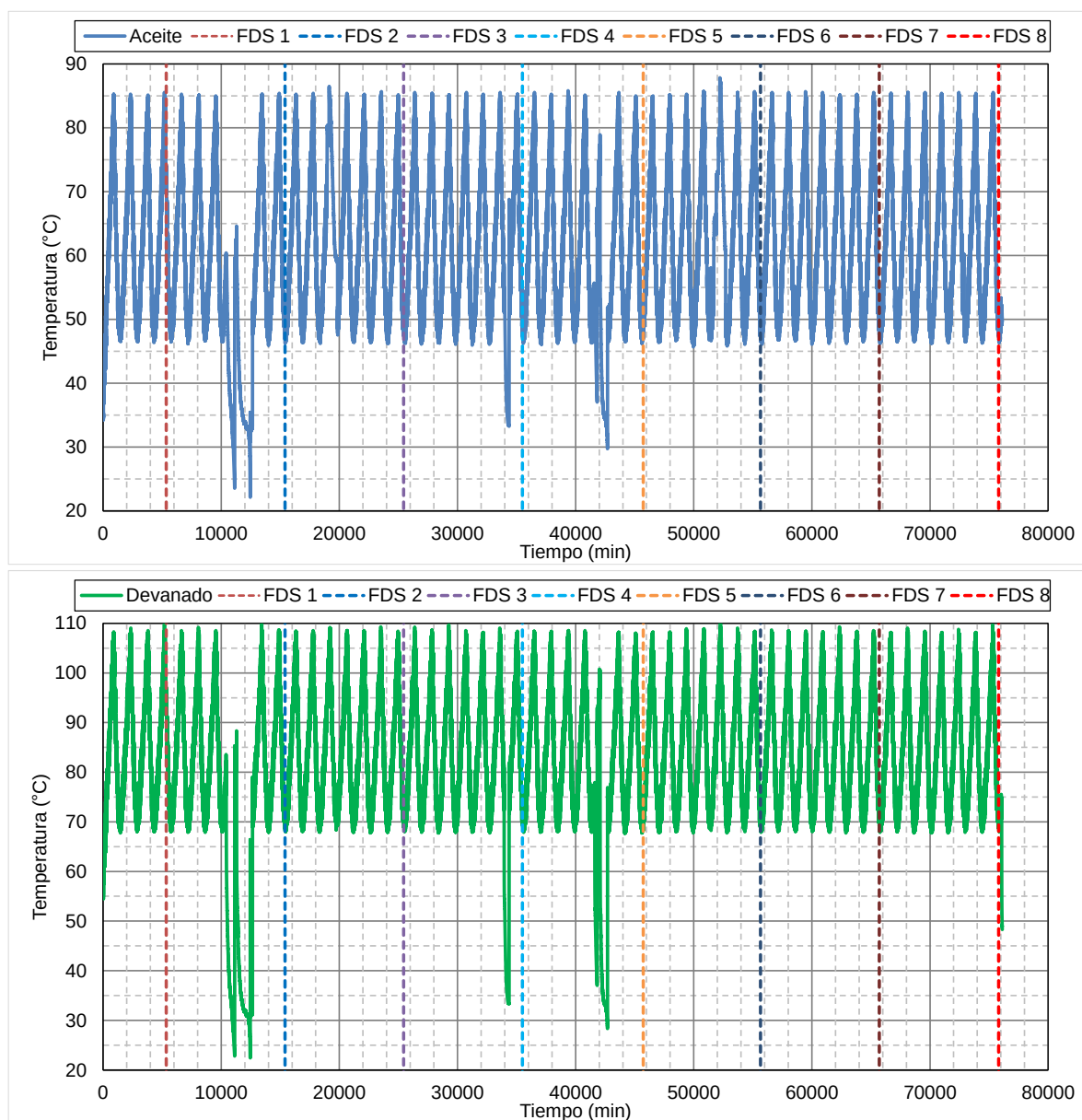


Figura D-4. Perfiles de temperatura obtenidos durante el experimento con la planta experimental – Cuba 4.

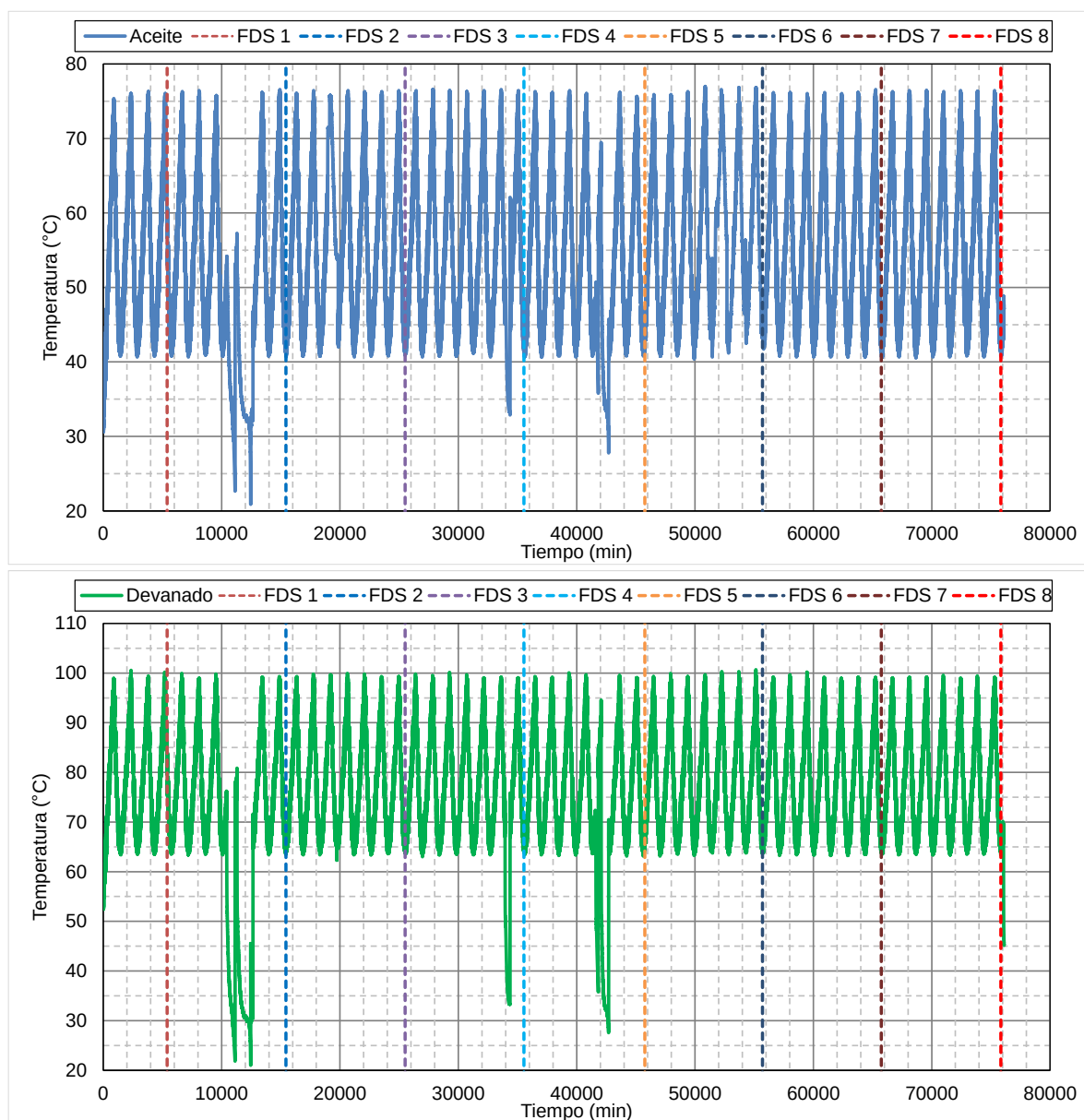
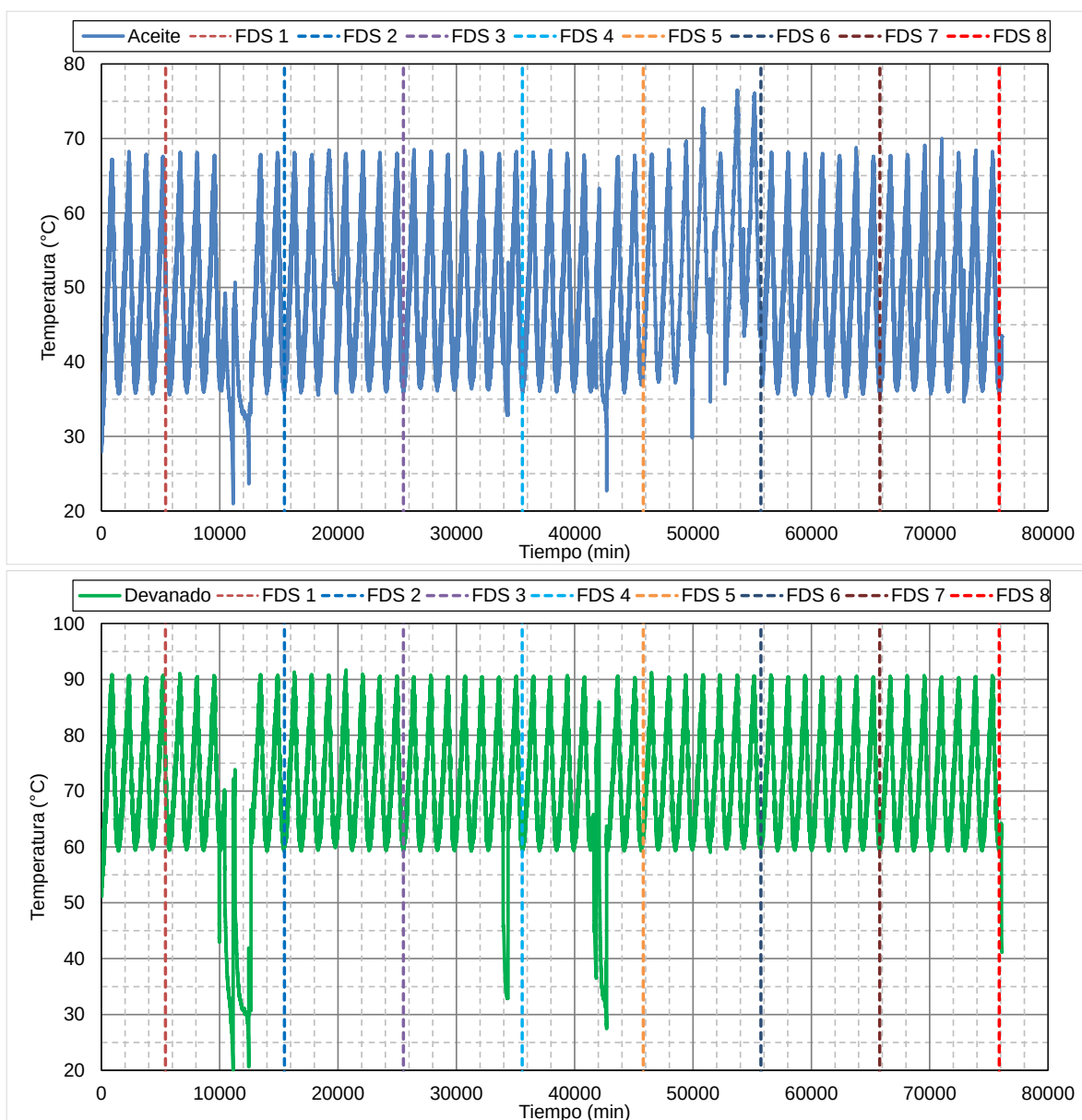


Figura D-5. Perfiles de temperatura obtenidos durante el experimento con la planta experimental – Cuba 5.



Anexo E

Mediciones de FDS

Los valores tomados de temperatura en el aceite y devanados, junto con el registro de tiempo en el momento de inicio y fin de los ensayos de FDS se presentan desde la Tabla E-1 hasta la Tabla E-5. Desde la Figura E-1 hasta la Figura E-5 se presentan las mediciones de FDS sin y con corrección por temperatura. El valor indicado en minuto corresponde al tiempo acumulado desde el inicio del experimento hasta la hora de inicio o fin, para relacionarla fácilmente en las gráficas de los otros anexos.

Tabla E-1. Registros de las mediciones – Cuba 1

Medición	Fecha	Hora				Temperatura promedio [°C]	
		Inicio	(minuto)	Fin	(minuto)	Aceite	Papel
1	22/07/2017	9:42	5285	10:12	5315	93,20	116,81
2	29/07/2017	8:46	15305	9:18	15337	59,79	82,39
3	05/08/2017	8:50	25387	9:21	25418	59,93	82,53
4	12/08/2017	8:23	35432	8:54	35463	61,33	84,00
5	19/08/2017	10:54	45653	11:24	45683	56,94	79,35
6	26/08/2017	8:24	55577	8:54	55607	61,25	82,68
7	02/09/2017	8:20	65646	8:50	65676	60,14	82,21
8	09/09/2017	8:37	75735	9:07	75765	60,22	82,43

Tabla E-2. Registros de las mediciones – Cuba 2

Medición	Fecha	Hora				Temperatura promedio [°C]	
		Inicio	(minuto)	Fin	(minuto)	Aceite	Papel
1	22/07/2017	10:17	5320	10:49	5352	78,73	102,11
2	29/07/2017	9:55	15374	10:24	15403	53,32	76,19
3	05/08/2017	9:23	25420	9:43	25440	53,93	76,56
4	12/08/2017	8:56	35465	9:26	35495	54,49	77,41
5	19/08/2017	11:29	45688	12:00	45719	52,51	52,95
6	26/08/2017	8:57	55610	9:27	55640	54,61	56,15
7	02/09/2017	8:54	65680	9:24	65710	53,57	76,99
8	09/09/2017	9:10	75768	9:40	75798	53,07	76,59

Tabla E-3. Registros de las mediciones – Cuba 3

Medición	Fecha	Hora				Temperatura promedio [°C]	
		Inicio	(minuto)	Fin	(minuto)	Aceite	Papel
1	22/07/2017	10:51	5354	11:22	5385	69,18	91,79
2	29/07/2017	10:26	15405	10:57	15436	47,88	70,52
3	05/08/2017	9:45	25442	10:15	25472	48,63	71,41
4	12/08/2017	9:28	35497	9:58	35527	49,05	71,77
5	19/08/2017	12:04	45723	12:34	45753	49,21	71,88
6	26/08/2017	9:36	55649	10:06	55679	48,35	71,61
7	02/09/2017	9:27	65713	9:57	65743	48,76	71,21
8	09/09/2017	9:44	75802	10:14	75832	48,62	71,32

Tabla E-4. Registros de las mediciones – Cuba 4

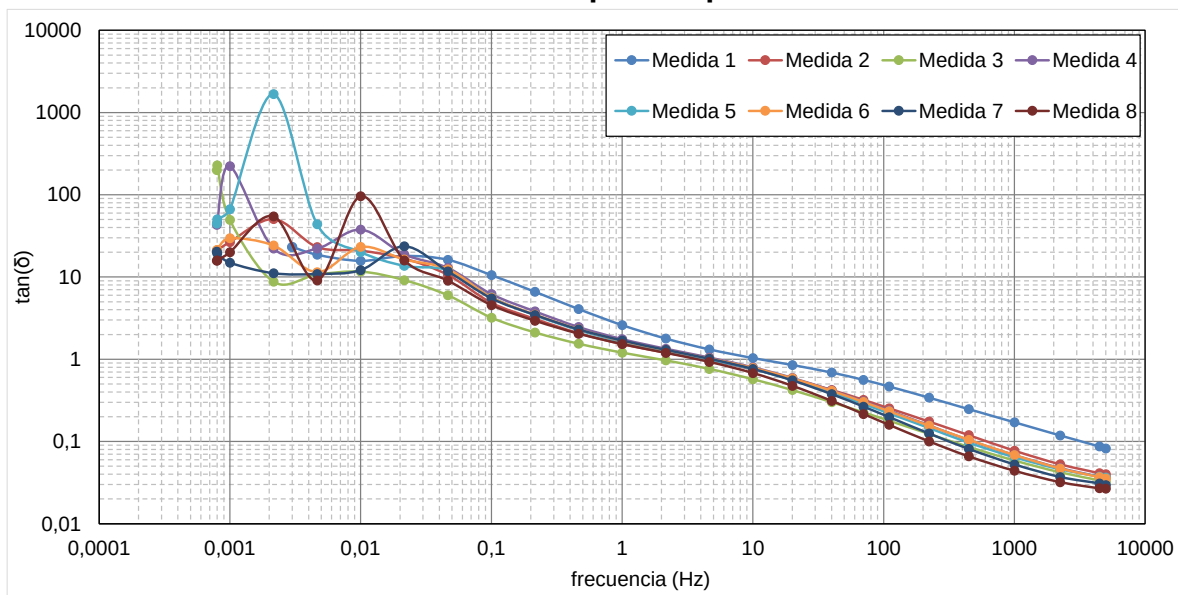
Medición	Fecha	Hora				Temperatura promedio [°C]	
		Inicio	(minuto)	Fin	(minuto)	Aceite	Papel
1	22/07/2017	11:27	5390	11:59	5422	58,65	81,87
2	29/07/2017	10:58	15437	11:28	15467	42,89	65,56
3	05/08/2017	10:40	25497	11:11	25526	42,95	65,65
4	12/08/2017	10:06	35535	10:36	35565	43,43	66,29
5	19/08/2017	12:41	45760	13:12	45791	44,40	67,28
6	26/08/2017	10:26	55699	10:56	55729	45,03	65,59
7	02/09/2017	10:00	65746	10:30	65776	43,16	65,64
8	09/09/2017	10:21	75839	10:51	75869	42,99	65,55

Tabla E-5. Registros de las mediciones – Cuba 5

Medición	Fecha	Hora				Temperatura promedio [°C]	
		Inicio	(minuto)	Fin	(minuto)	Aceite	Papel
1	22/07/2017	12:01	5424	12:32	5455	48,59	71,80
2	29/07/2017	11:34	15473	12:05	15504	38,33	61,30
3	05/08/2017	11:13	25528	11:43	25558	38,09	61,04
4	12/08/2017	10:39	35568	11:09	35598	37,75	60,71
5	19/08/2017	13:20	45799	13:50	45829	40,30	62,81
6	26/08/2017	10:59	55732	11:29	55762	44,96	61,21
7	02/09/2017	10:36	65782	11:06	65812	37,86	60,72
8	09/09/2017	10:54	75872	11:24	75902	38,01	60,95

Figura E-1. Mediciones de FDS – Cuba 1.

Sin corrección por temperatura



Con corrección por temperatura

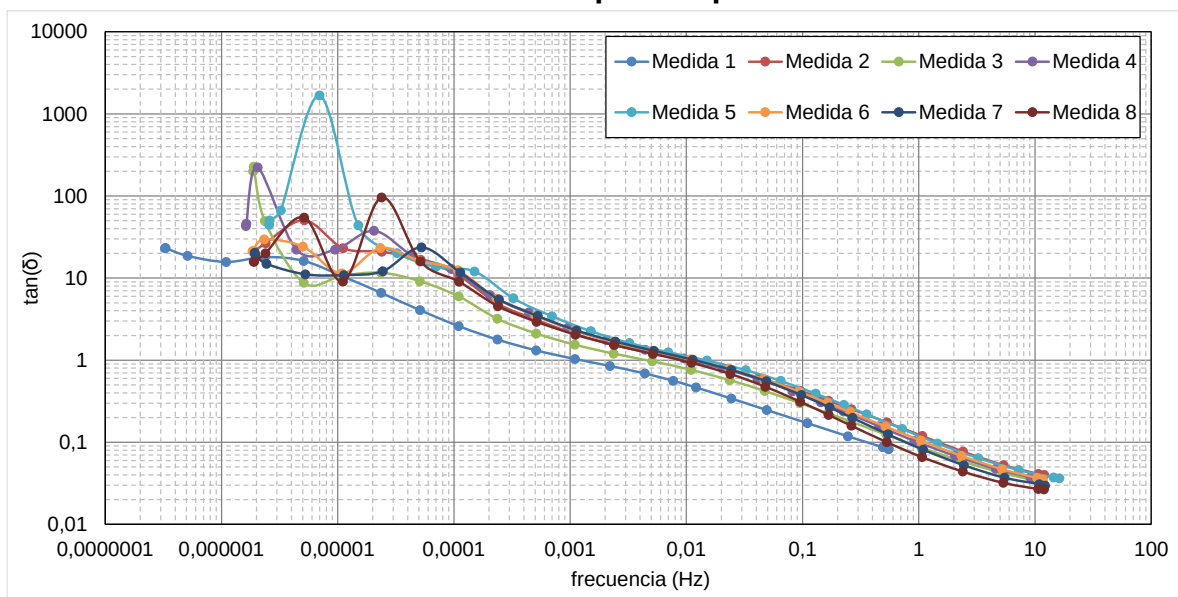
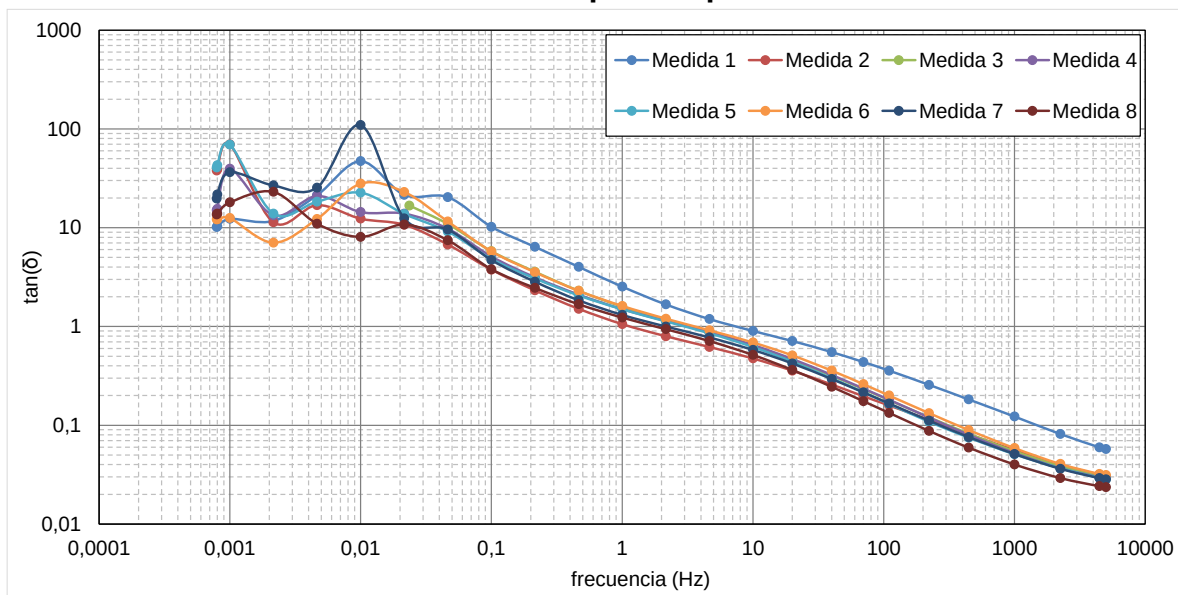


Figura E-2. Mediciones de FDS – Cuba 2.

Sin corrección por temperatura



Con corrección por temperatura

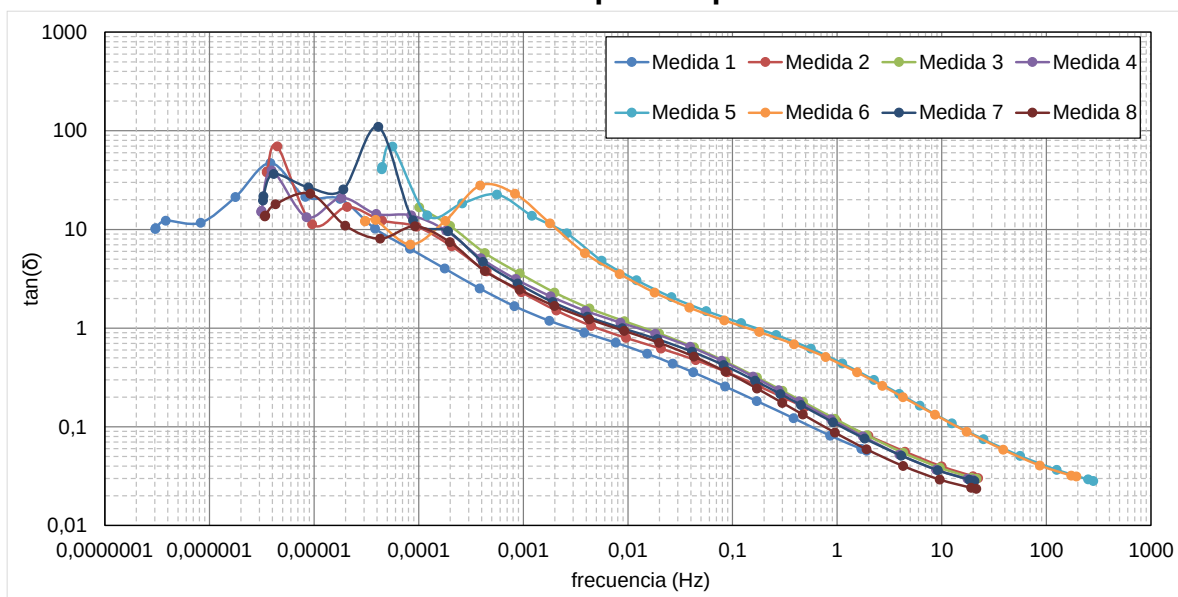
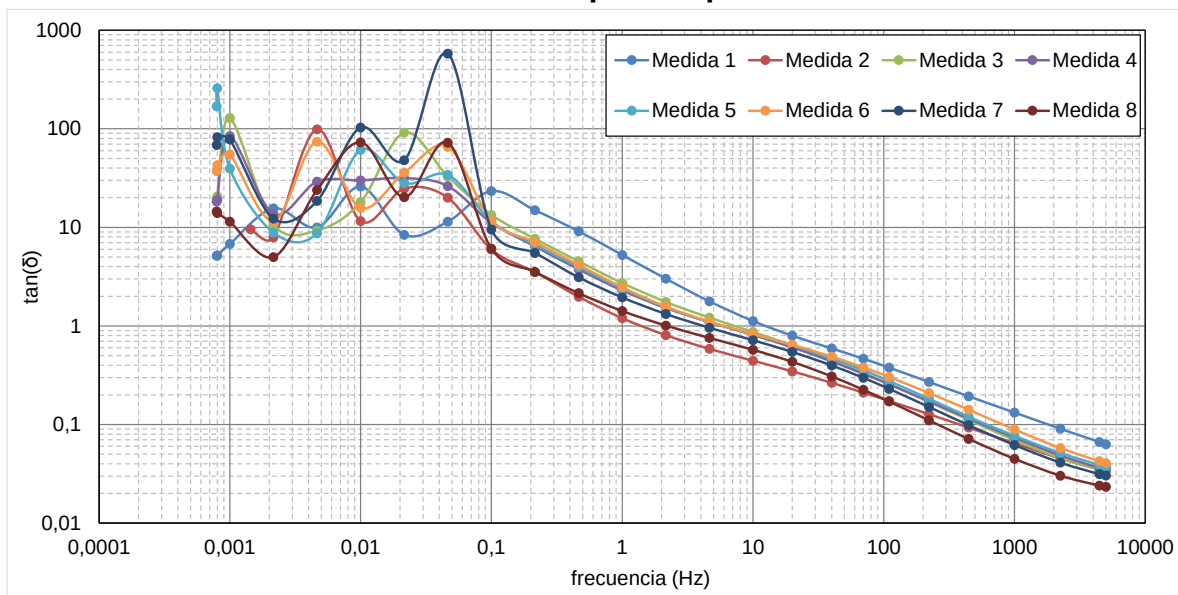


Figura E-3. Mediciones de FDS – Cuba 3.

Sin corrección por temperatura



Con corrección por temperatura

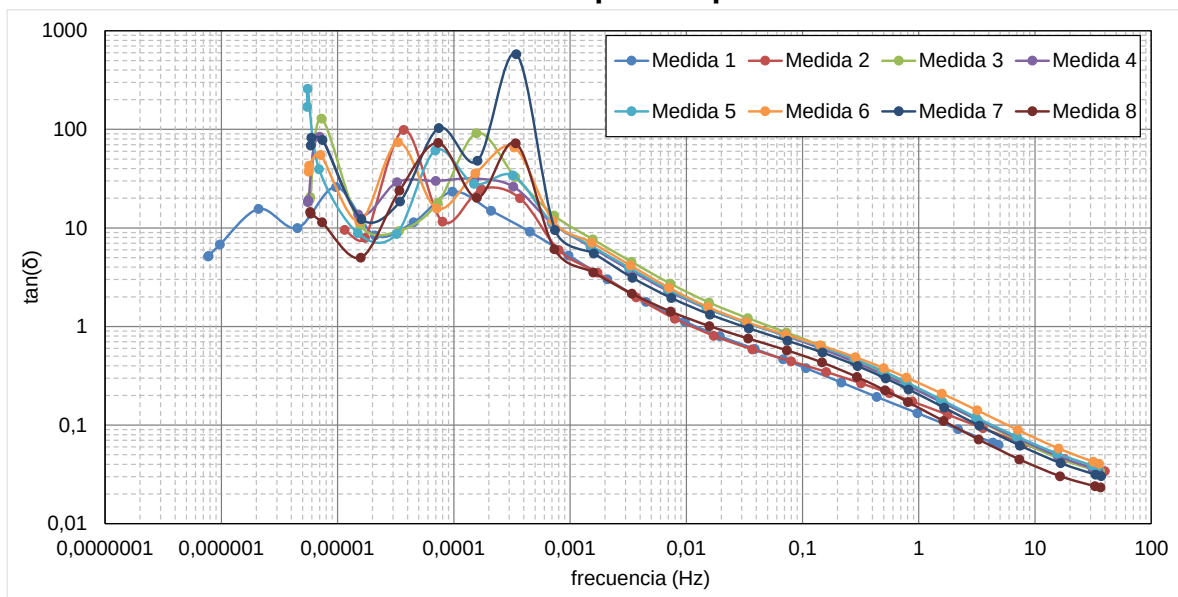
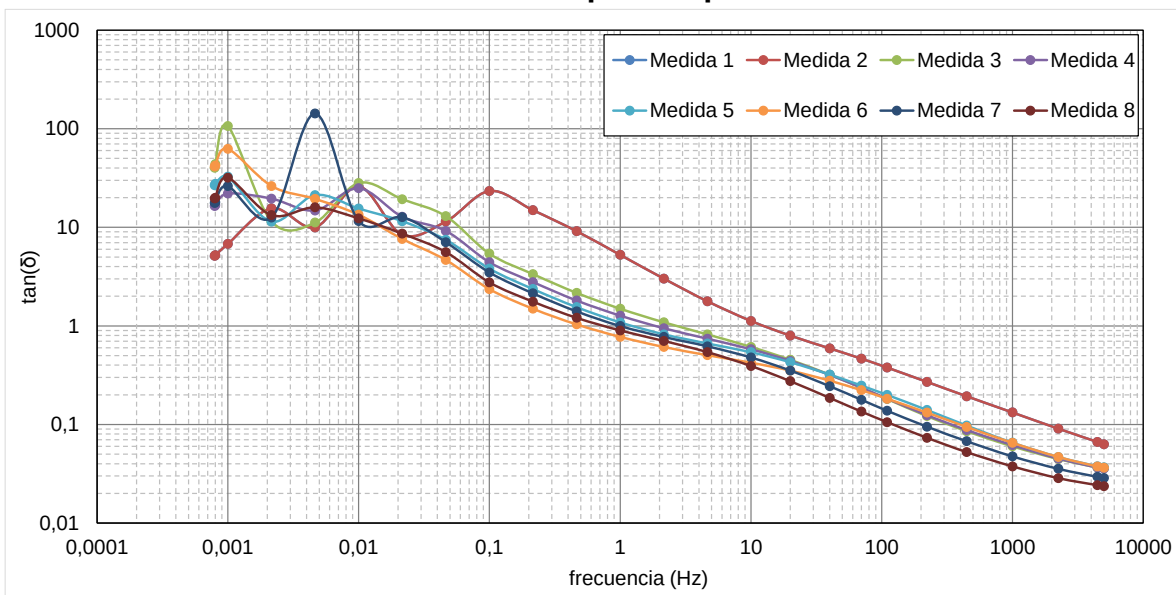


Figura E-4. Mediciones de FDS – Cuba 4.

Sin corrección por temperatura



Con corrección por temperatura

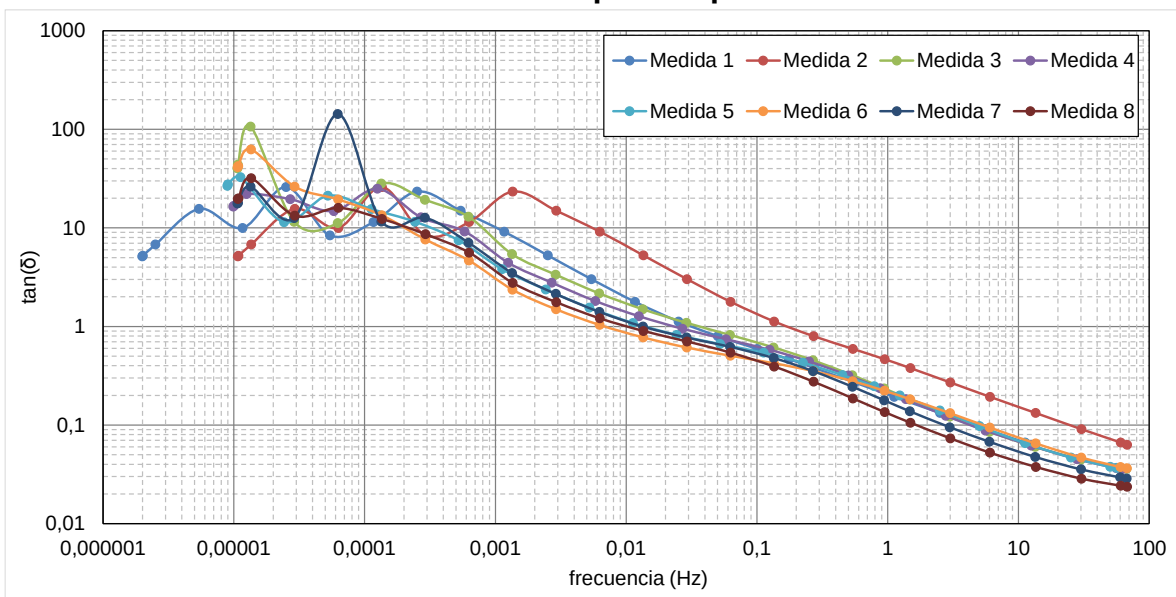
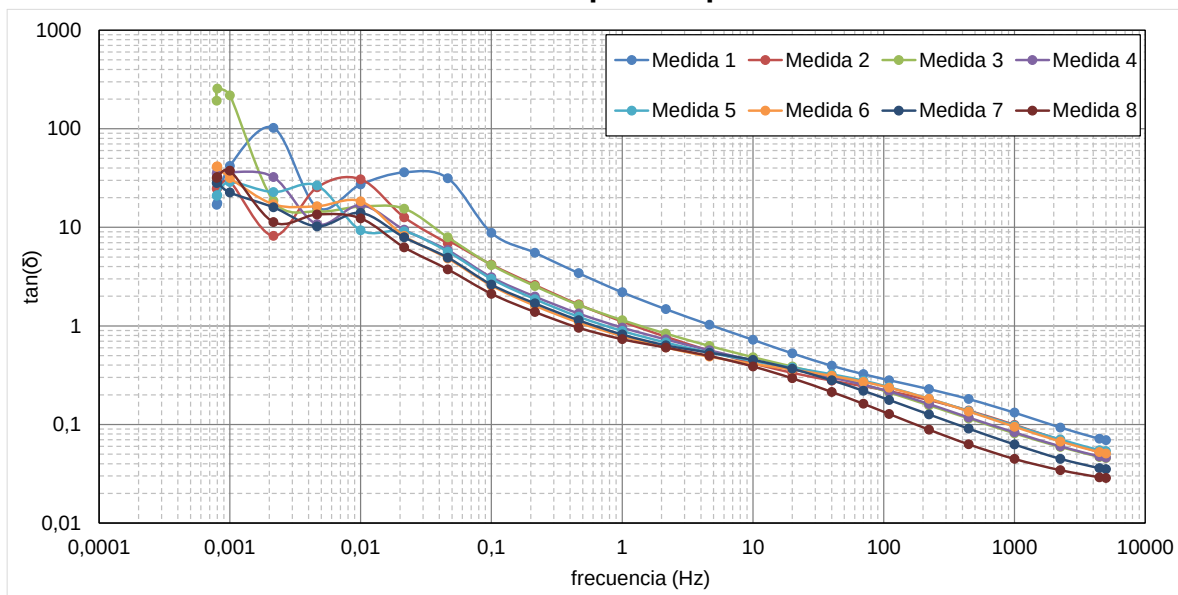
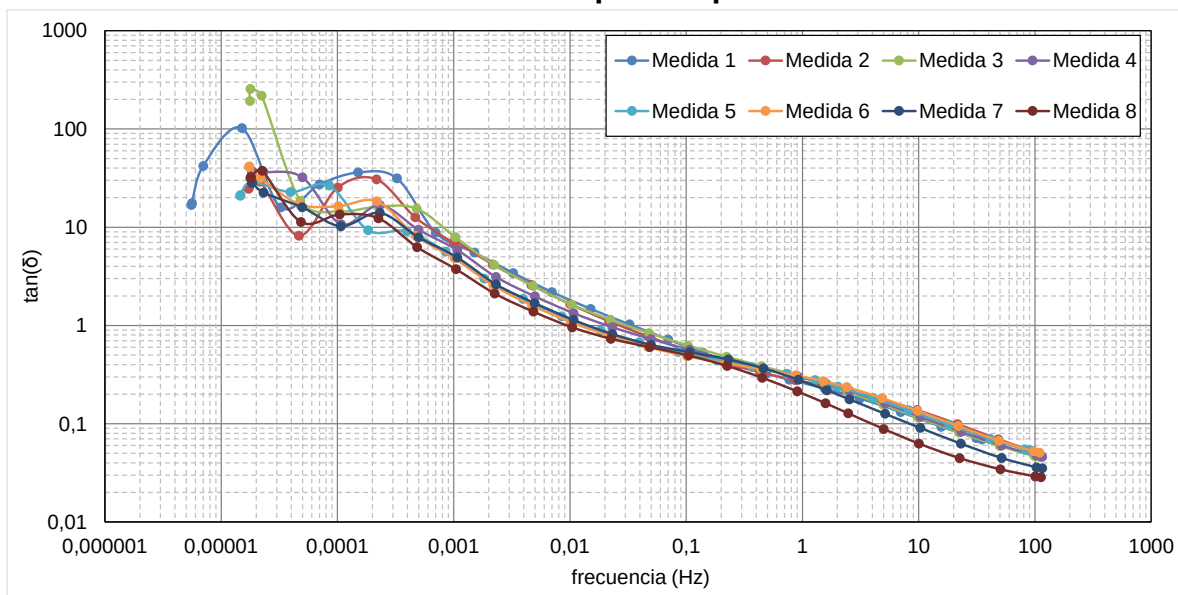


Figura E-5. Mediciones de FDS – Cuba 5.

Sin corrección por temperatura



Con corrección por temperatura



Anexo F

Resultados del modelo multifísico de humedad – temperatura

Los valores de concentración de humedad en la celulosa y de humedad en el aceite obtenidos por el modelo se presentan desde la Figura F-1 hasta la Figura F-5, donde también se presenta el momento de la medición de FDS y el valor de humedad obtenido por medio de ella y la ecuación (14).

Figura F-1. Concentración de humedad en la celulosa y humedad en el aceite – Cuba 1.

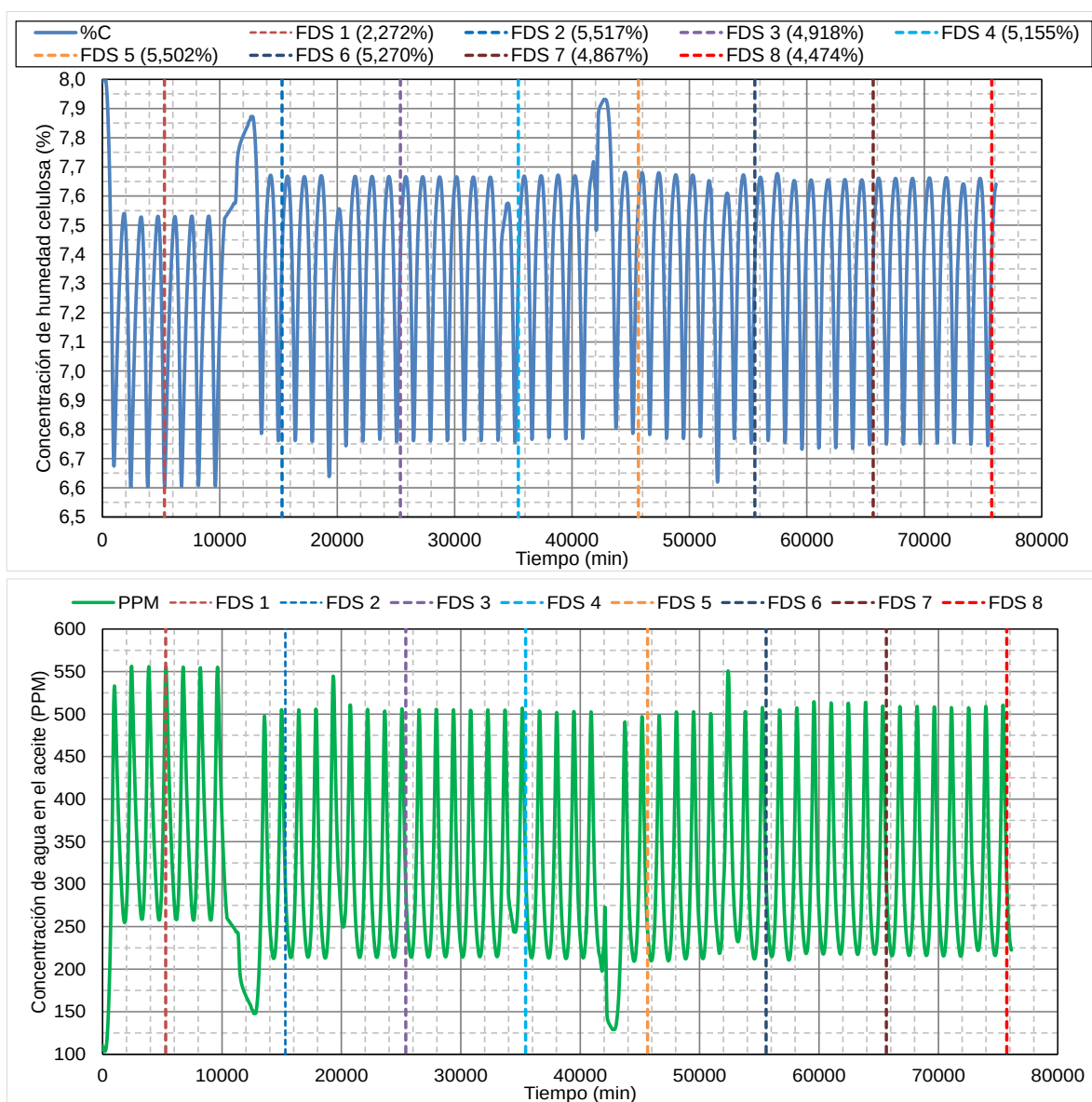
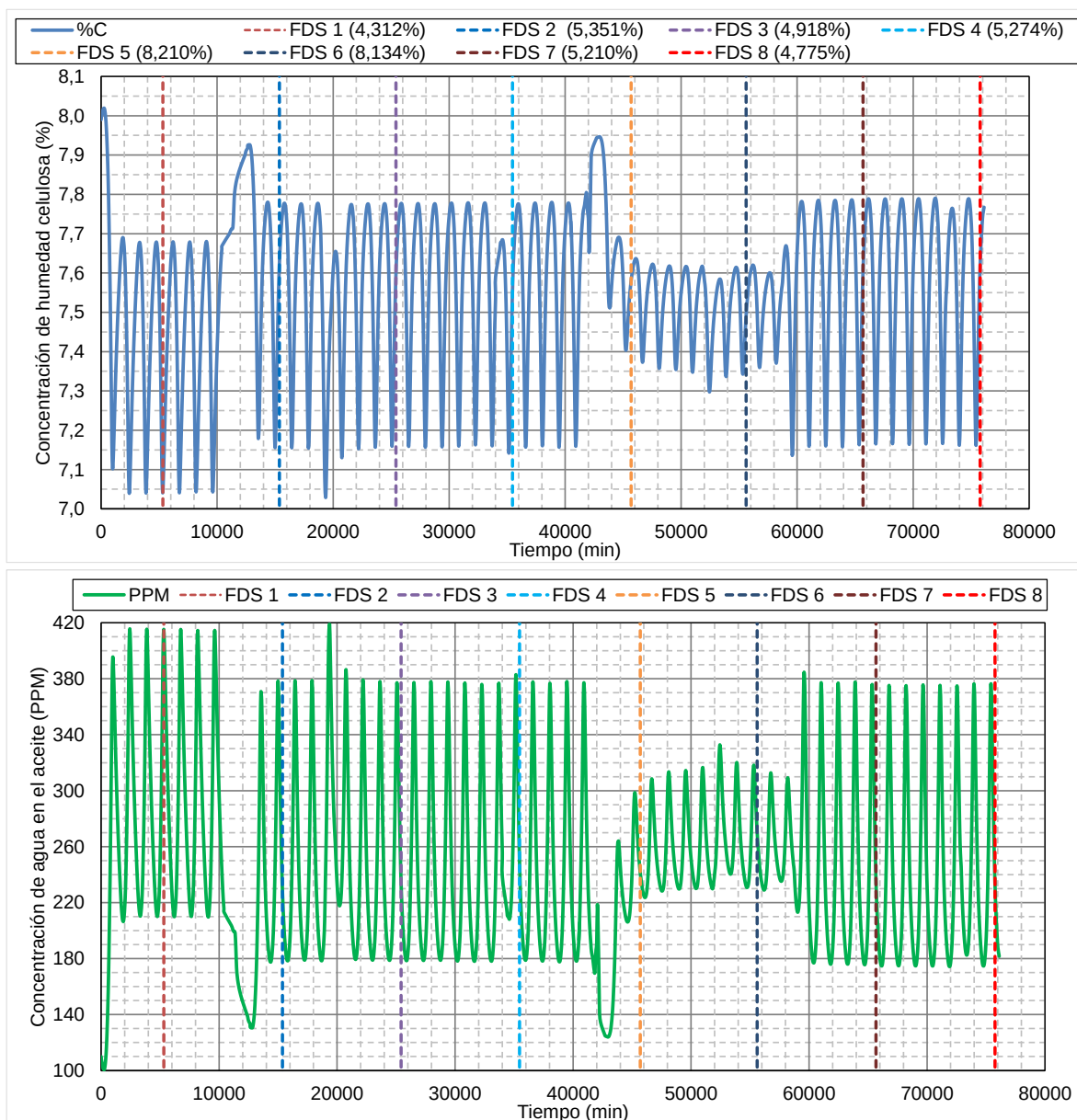
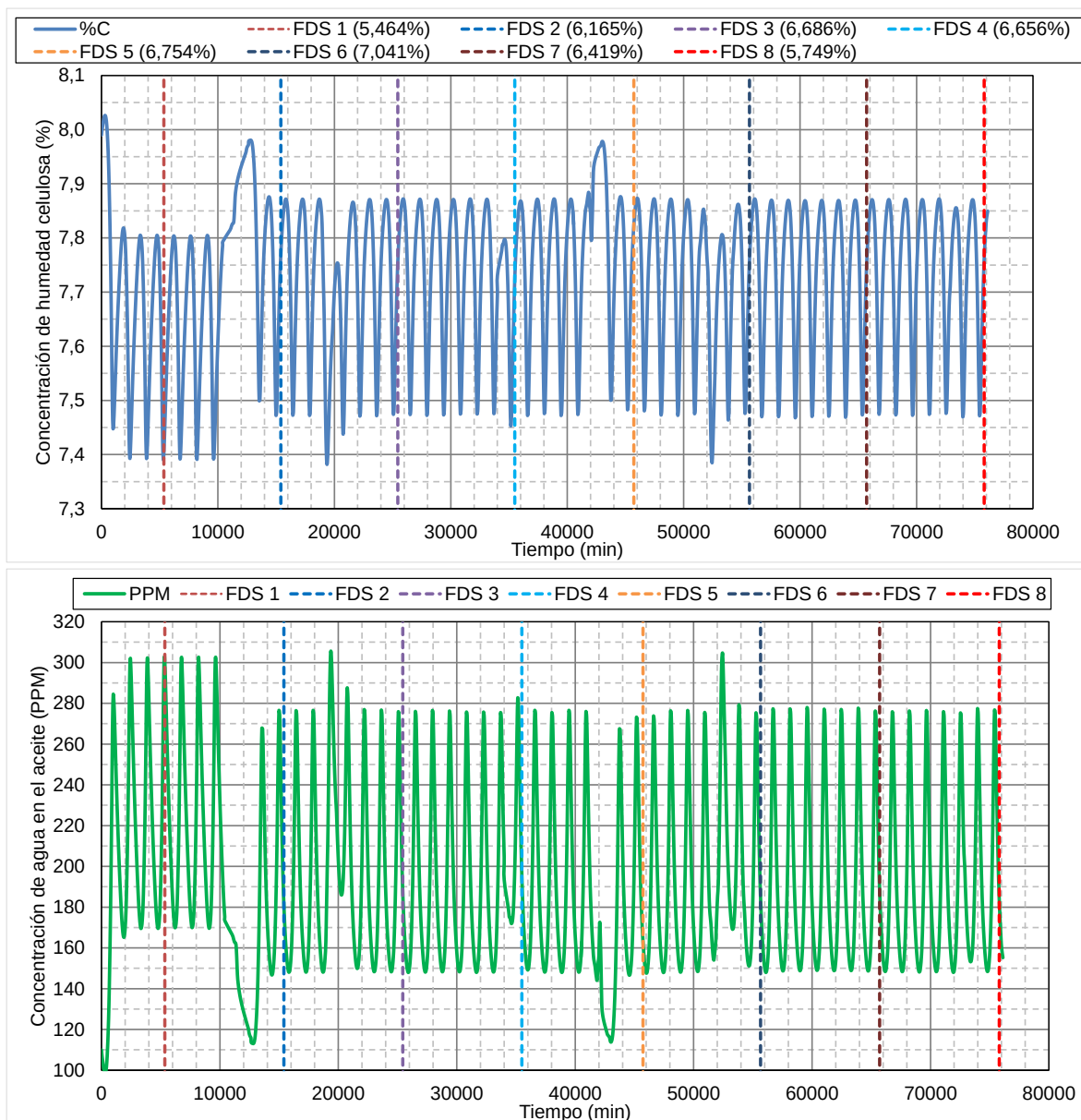


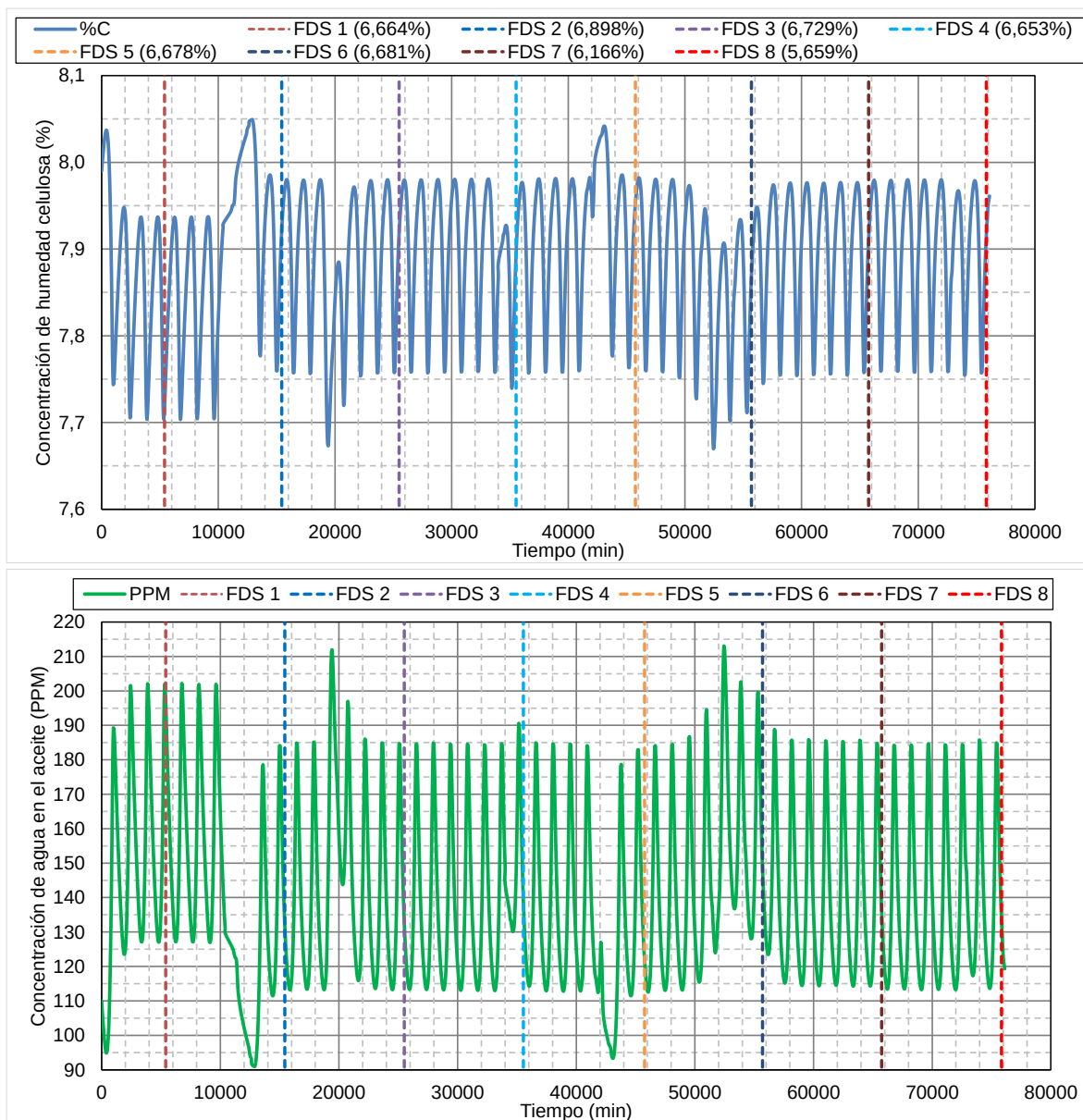
Figura F-2. Concentración de humedad en la celulosa y humedad en el aceite – Cuba 2.



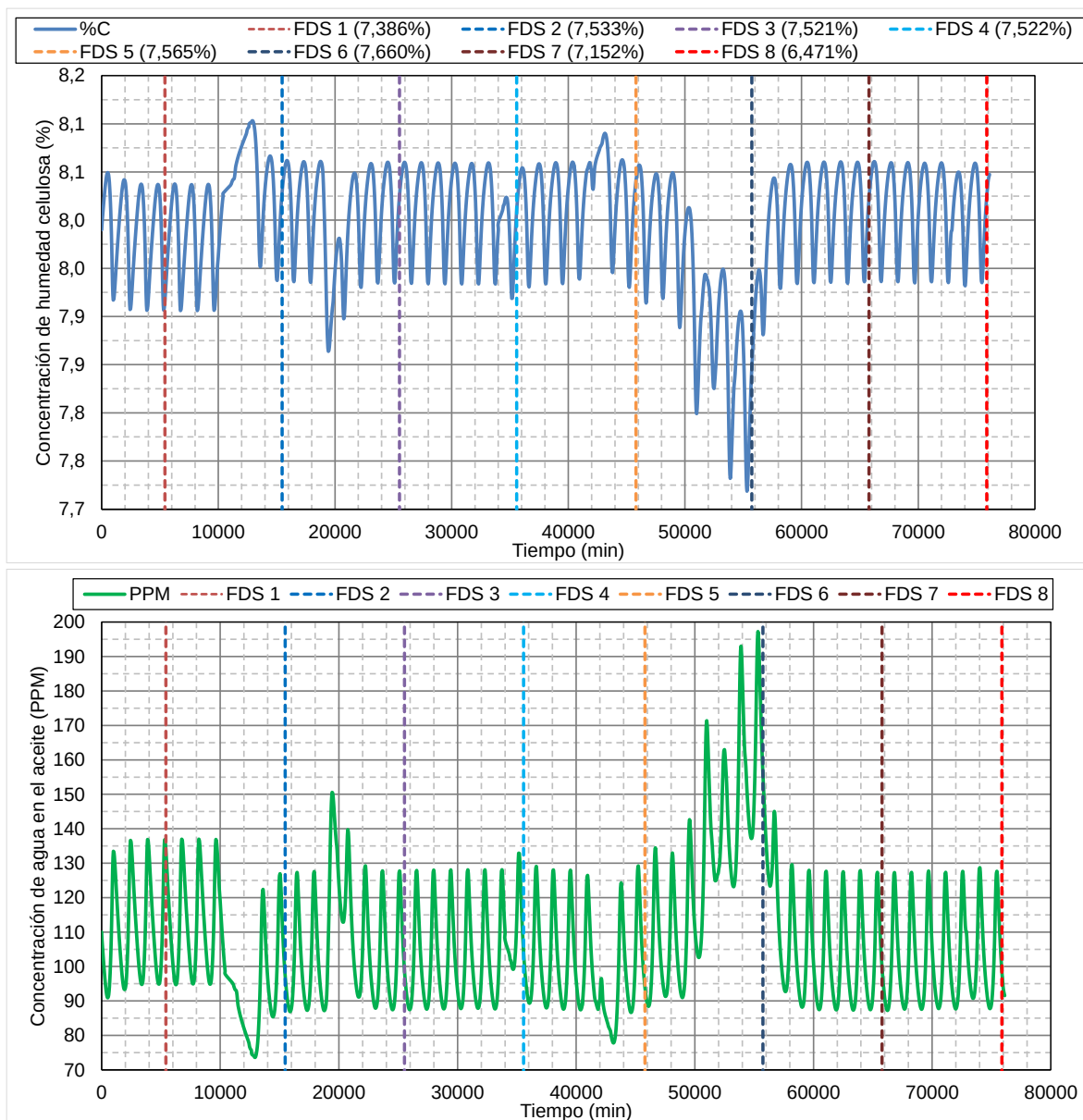
**Figura F-3. Concentración de humedad en la celulosa y humedad en el aceite
– Cuba 3.**



**Figura F-4. Concentración de humedad en la celulosa y humedad en el aceite
– Cuba 4.**



**Figura F-5. Concentración de humedad en la celulosa y humedad en el aceite
– Cuba 5.**



Anexo G

Resultados del modelo multifísico de humedad – temperatura – Modificado

Los valores de concentración de humedad en la celulosa obtenidos por el modelo con y sin modificación se presentan desde la Figura G-1 hasta la Figura G-5, donde también se presenta el momento de la medición de FDS y el valor de humedad obtenido por medio de ella y la ecuación (14).

Figura G-1. Concentración de humedad en la celulosa – Cuba 1.

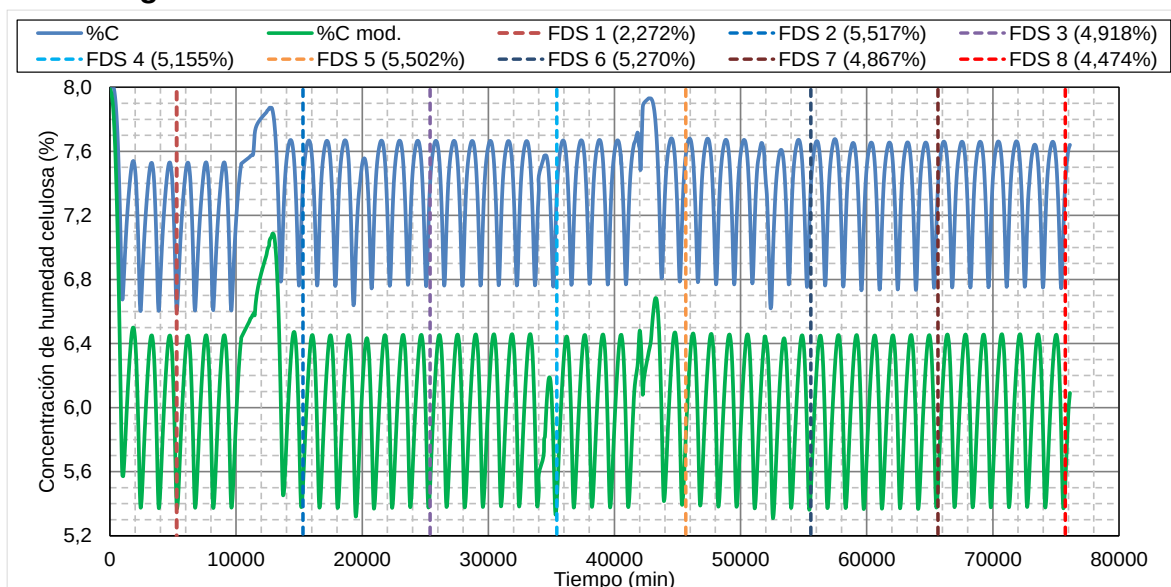


Figura G-2. Concentración de humedad en la celulosa – Cuba 2.

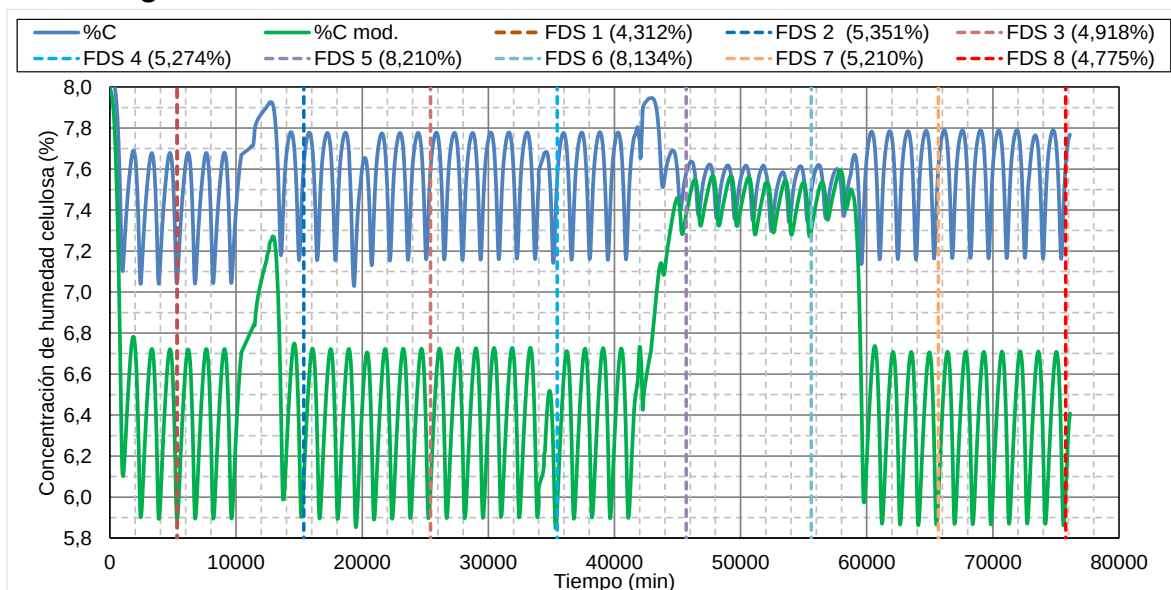


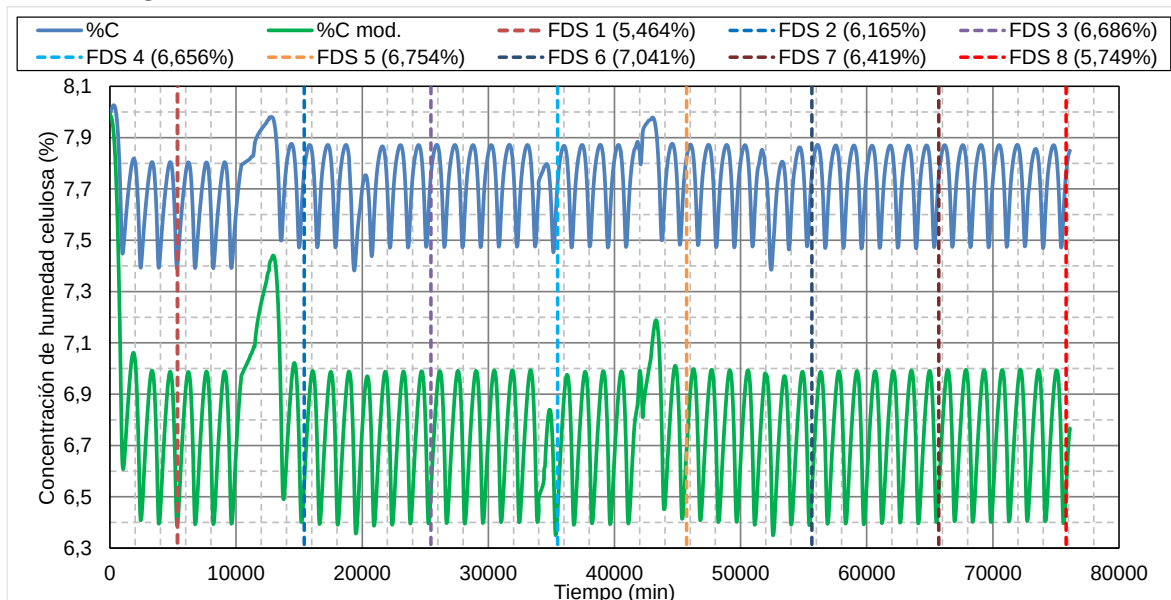
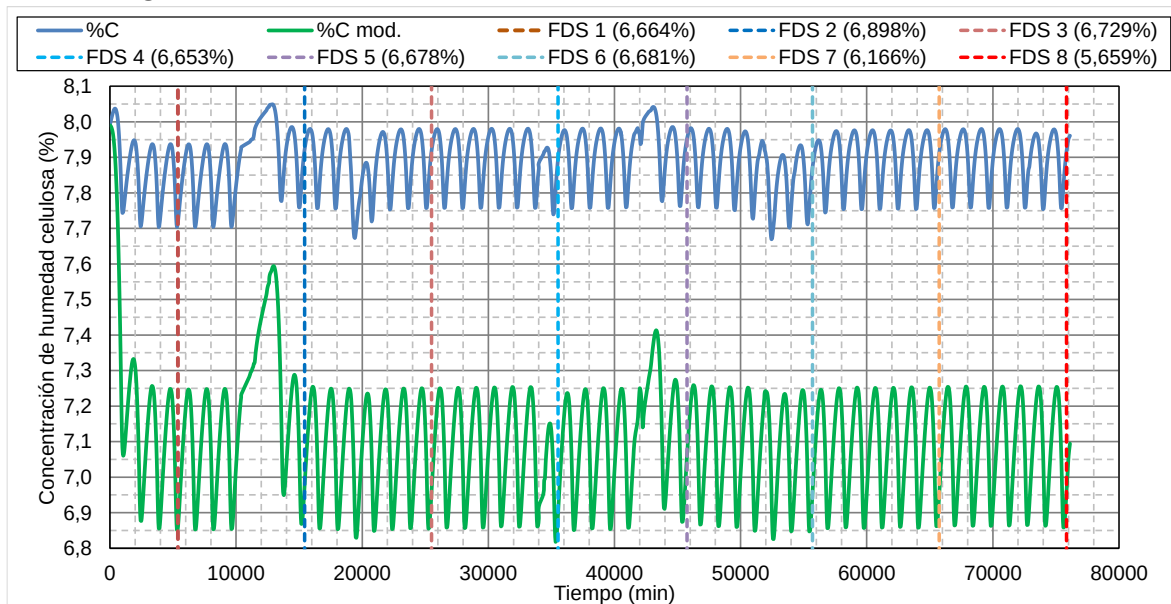
Figura G-3. Concentración de humedad en la celulosa – Cuba 3.**Figura G-4. Concentración de humedad en la celulosa – Cuba 4.**

Figura G-5. Concentración de humedad en la celulosa – Cuba 5.