



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Degradación térmica de los sistemas de aislamiento de transformadores

Oscar Julián Soto Marín

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Manizales, Colombia
2022

Degradación térmica de los sistemas de aislamiento de transformadores

Oscar Julián Soto Marín

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctorado en Ingeniería

Director:

Dr. Ing. Eduardo Antonio Cano Plata

Codirector:

Dr. Ing. Armando Jaime Ustariz Farfán

Línea de Investigación en Automática

Grupo de Investigación en Redes de Distribución y Potencia "GREDyP"

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

Manizales, Colombia

2022

Dedicatoria

A mi madre Ana Ligia por su amor y apoyo incondicional.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Oscar Julián Soto Marín
Nombre

Fecha 07/Dic/2022

Agradecimientos

A mis tutores Eduardo Antonio Cano Plata y Armando Jaime Ustariz Farfan por la paciencia en el desarrollo de este trabajo, la motivación en los momentos de desánimo y la dirección para lograr la culminación de esta tesis.

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, por brindarme los medios físicos y económicos para culminar exitosamente los estudios de maestría, y su apoyo para la participación en congresos.

A todos los compañeros del GREDyP y demás personas que en algún momento me brindaron su apoyo y colaboración desinteresada.

Resumen

Este trabajo de investigación está enfocado al diagnóstico de los sistemas de aislamiento de los transformadores. Para este propósito, es necesario primero determinar la ley de envejecimiento de activo, el cual está centrado en la identificación de los factores o causas que originan la degradación del transformador. Dentro de este mismo proceso es necesario identificar el efecto sobre el transformador (reducción del nivel de aislamiento, disminución de la capacidad de refrigeración, pérdida de eficiencia, etc.), esto es el modo de falla. Con la comprensión e identificación plena de los factores presentes en el proceso del desarrollo de la falla, es posible medir los parámetros más apropiados para realizar el diagnóstico preciso del sistema del transformador que está presentando la falla, esto permitirá determinar las mejores prácticas en la gestión eficiente del transformador.

La tesis propone el desarrollo de métodos de diagnósticos basados en los resultados de ensayos de envejecimiento acelerado realizados a los transformadores en aceite, transformadores tipo seco y transformadores de mediana frecuencia, fundamentado en la teoría de la cinética química. El realizar el estudio sobre diferentes tipos de aislamientos, permite realizar analogías de los procesos de degradación y diagnósticos; igualmente, comparar la ley de envejecimiento de cada tipo de transformador.

Palabras clave: Envejecimiento acelerado, Ecuación de Arrhenius, Diagnóstico del transformador, Transformador inmerso en aceite, Transformadores de media frecuencia.

Abstract

Thermal degradation of transformer insulation systems

This research work is focused on the diagnosis of transformer insulation systems. For this purpose, it is first necessary to determine the asset aging law, which is focused on the identification of the factors or causes that cause deterioration of the transformer. Within this same process, it is necessary to identify the effect on the transformer (reduced insulation level, decreased cooling capacity, loss of efficiency, etc.), that is, the failure mode. With the full understanding and identification of the factors present in the fault development process, it is possible to measure the most appropriate parameters to perform an accurate diagnosis of the transformer system that is presenting the fault, this will allow to determine the best practices in the efficient management of the transformer.

The thesis proposes the development of diagnostic methods based on the results of accelerated aging tests carried out on oil-filled transformers, dry-type transformers and medium-frequency transformers, based on the theory of chemical kinetics. Carrying out the study on different types of insulation allows analogies to be made of the degradation and diagnostic processes; similarly, compare the law of aging of each type of transformer.

Keywords: Accelerated aging, Arrhenius equation, Transformer diagnosis, Oil immersed transformer, Medium frequency transformers.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas	XVII
Capítulo I.....	19
1. Introducción general	19
1.1 Antecedentes.....	22
1.2 Identificación del problema.....	23
1.3 Objetivos de la tesis	25
1.3.1 Objetivo general.....	26
1.3.2 Objetivos específicos.....	26
1.4 Estado del arte.....	26
1.5 Aportes de la tesis	27
1.6 Metodología	28
1.6.1 Determinación de las variables de esfuerzo y cuantificadores de degradación	29
1.6.2 Ensayos de envejecimiento acelerado.....	30
1.6.3 Análisis de datos e interpretación de resultados	31
1.7 Estructura del documento	31
Capítulo II.....	33
2. Definiciones y conceptos matemáticos	33
2.1 Introducción	33
2.2 Reacciones químicas	34
2.3 Energía de las reacciones químicas	34
2.3.1 Termodinámica	35
2.3.2 Cinética química	37
2.4 Velocidad de reacción	39
2.5 Número de colisiones en el tiempo	39
2.5.1 Fracción con la suficiente energía.....	40
2.5.2 Constante de velocidad k	41
2.6 Desarrollo de la reacción química.....	43
2.6.1 Fracción molar de la reacción	43
2.6.2 Fracciones molares de reacciones simultáneas	44
2.6.3 Entalpía o calor de reacción	45
2.6.4 Energía libre de Gibbs	47
2.7 Múltiples reacciones.....	48

2.8	Estimación experimental de la vida media.....	48
2.9	Síntesis	50
Capítulo III.....		51
3.	Modelo cinético-químico aplicado al transformador inmerso en aceite.....	51
3.1	Introducción	51
3.2	Determinación de las variables de esfuerzo y cuantificadores de degradación 52	
3.2.1	Aceite mineral	53
3.2.2	Descomposición del aceite aislante	54
3.3	Ensayos de envejecimiento acelerado de transformadores inmersos en aceite 55	
3.3.1	Objetivos de los ensayos de envejecimiento	56
3.3.2	Construcción de la cámara de ensayos de envejecimiento.....	56
3.3.3	Desarrollo de los ensayos de envejecimiento acelerado.....	59
3.3.4	Conclusiones de los ensayos de envejecimiento	65
3.4	Análisis e interpretación de resultados	65
3.4.1	Indagación en los cuantificadores de degradación.....	66
3.4.2	Modelo cinético-químico del transformador inmerso en aceite	73
3.4.3	Desarrollo del método de diagnóstico	78
3.4.4	Aplicación del modelo difuso al diagnóstico de transformadores.....	84
3.4.5	Estudio estadístico.....	86
3.5	Síntesis	91
Capítulo IV		93
4.	Modelo cinético-químico aplicado al transformador de media frecuencia.....	93
4.1	Introducción	93
4.2	Determinación de la variable de esfuerzo y cuantificadores de degradación. 95	
4.2.1	Identificación de los modos de falla	96
4.2.2	Mediciones de la resistencia de los devanados y permeabilidad.....	98
4.2.3	Prueba de circuito abierto [112][115]	98
4.2.4	Prueba de corto circuito [112].....	100
4.3	Ensayos de envejecimiento acelerado de transformadores de media frecuencia	101
4.3.1	Objetivos de los ensayos de envejecimiento	101
4.3.2	Construcción de la cámara de envejecimiento	102
4.3.3	Desarrollo de los ensayos de envejecimiento.....	102
4.3.4	Conclusiones de los ensayos de envejecimiento acelerado	105
4.4	Análisis de datos e interpretación de resultados	105
4.4.1	Estudio estadístico.....	105
4.4.2	Modelo cinético-químico del transformador de media frecuencia	111
4.4.3	Método de diagnóstico.....	114
4.5	Síntesis	115
Capítulo V		117
5.	Modelo cinético-químico aplicado al transformador de tipo seco.....	117
5.1	Introducción	117
5.2	Determinación de las variables de esfuerzo y cuantificadores de degradación 119	
5.2.1	Identificación de los modos de falla	119
5.3	Ensayos de envejecimiento acelerado en transformadores tipo seco	120

5.3.1	Objetivos de los ensayos de envejecimiento	120
5.3.2	Cámara de envejecimiento	121
5.3.3	Desarrollo de los ensayos de envejecimiento acelerado.....	121
5.3.4	Conclusiones de los ensayos:	122
5.4	Análisis de datos e interpretación de resultados	122
5.4.1	Estudio estadístico.....	122
5.4.2	Modelo cinético-químico del transformador tipo seco.....	126
5.4.3	Método de diagnóstico.....	128
5.5	Síntesis	129
Capítulo VI		131
6.	Esquema comparativo de evaluación de degradación de los sistemas de aislamiento	131
6.1	Introducción	131
6.2	Modelos de degradación	131
6.3	Modos de falla	134
6.4	Métodos de diagnóstico	136
6.5	Síntesis	137
Capítulo VII		138
7.	Conclusiones y futuras investigaciones	138
7.1	Conclusiones generales	138
7.2	Futuras investigaciones.....	140
7.3	Discusiones académicas.....	141
Referencias bibliográficas.....		142
Apéndice A		151
Apéndice B		153
B.1	Diseño y construcción de los transformadores de media frecuencia	153
B.2	Consideraciones del núcleo magnético.....	154
B.1	Consideraciones de los devanados.....	156

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Pruebas en transformadores.....	21
Figura 2-1: Energía libre de Gibbs de las reacciones.....	35
Figura 2-2: Energía de disociación de enlaces.....	37
Figura 2-3: Energía de activación.....	38
Figura 2-4: Aumento de las colisiones con la temperatura.	39
Figura 2-5: Fracción de moléculas con suficiente energía para reaccionar	40
Figura 2-6: Ruta de cálculo de ΔHT_0	46
Figura 3-1: Descomposición del aceite aislante en transformadores	52
Figura 3-2: Representación de las estructuras parafínicas del aceite mineral	54
Figura 3-3: Representación de la estructura de algunos cicloalcanos [82].....	54
Figura 3-4: Productos finales de la descomposición del aceite.....	55
Figura 3-5: Soporte estructural de la cámara de envejecimiento.....	56
Figura 3-6: Fuente resistiva de calor.....	57
Figura 3-7: Instalación del motor centrífugo.....	57
Figura 3-8: Diagrama de conexiones del método de espalda-espalda.....	58
Figura 3-9: Carga simulada con el método espalda-espalda.....	59
Figura 3-10: Diagnóstico de previo al proceso de envejecimiento	61
Figura 3-11: Proceso de envejecimiento	62
Figura 3-12: Control del envejecimiento.....	62
Figura 3-13: Variables de esfuerzo en función del tiempo	63
Figura 3-14: Temperatura de punto caliente	63

Figura 3-15:	Diagnóstico de transformadores envejecidos	65
Figura 3-16:	Mapas de potencial electrostático	66
Figura 3-17:	Descomposición del aceite mineral, modificado de [109]	68
Figura 3-18:	Descomposiciones simples	69
Figura 3-19:	Diagrama de flujo para calcular reacciones simples	70
Figura 3-20:	Perfil de la descomposición térmica del C_3H_8	71
Figura 3-21:	Diagrama de flujo para el cálculo de reacciones simultáneas.....	72
Figura 3-22:	Descomposición térmicas de C_7H_{16} , C_7H_{14} , C_6H_{14} y C_5H_{10}	73
Figura 3-23:	Transformación del sistema de coordenadas.....	74
Figura 3-24:	Descomposición del C_2H_4	75
Figura 3-25:	Descomposición del C_2H_4 en el triángulo equilátero.....	75
Figura 3-26:	Mapa térmico de falla	76
Figura 3-27:	Mapa térmico de falla y triángulo 1 de Duval	77
Figura 3-28:	Diagrama de flujo del modelo difuso	78
Figura 3-29:	Conjuntos difusos de la variable x	78
Figura 3-30:	Conjuntos difusos de la variable y	79
Figura 3-31:	Mapa térmico dividido en retículas	79
Figura 3-32:	Cálculo de las ecuaciones de ponderación.....	80
Figura 3-33:	Cálculo de las ecuaciones de ponderación.....	80
Figura 3-34:	Representación de las ecuaciones de ponderación	81
Figura 3-35:	Sistema de inferencia difuso.....	82
Figura 3-36:	Gráfica de superficie del modelo difuso.....	83
Figura 3-37:	Error de ajuste del modelo difuso	83
Figura 3-38:	Resultados de los transformadores envejecidos	84
Figura 3-39:	Relación entre el factor de envejecimiento y temperatura de falla	85
Figura 3-40:	Ajuste de los datos experimentales a la ecuación lineal.....	87
Figura 3-41:	Modelo de Arrhenius	89
Figura 3-42:	Factor de aceleración de envejecimiento	90

Figura 4-1:	Estructura básica del transformador de estado sólido	94
Figura 4-2:	Transformador de media frecuencia	94
Figura 4-3:	Pérdida de aislamiento de los hilos del cable Litz	96
Figura 4-4:	Entrehierros en el núcleo por efecto térmico.....	97
Figura 4-5:	Mediciones en laboratorio	98
Figura 4-6:	Circuito de pruebas de circuito abierto.	99
Figura 4-7:	Cámara de envejecimiento	102
Figura 4-8:	Pérdidas en el núcleo por envejecimiento, mediciones a 5 kHz...	103
Figura 4-9:	Gráfica de ajuste a la ecuación lineal para 150 °C	107
Figura 4-10:	Gráfica de ajuste a la ecuación lineal para 170 °C	109
Figura 4-11:	Gráfica de ajuste a la ecuación lineal para 190 °C	110
Figura 4-12:	Modelo de Arrhenius del transformador de media frecuencia	113
Figura 4-13:	Factor de aceleración de envejecimiento	114
Figura 5-1:	Gráficas de ajuste probabilística para los niveles de esfuerzo	125
Figura 5-2:	Modelo de Arrhenius para el transformador tipo seco	127
Figura 5-3:	Factor de aceleración versus temperatura.....	128
Figura 6-1:	Función de probabilidad del transformador inmerso en aceite....	133
Figura 6-2:	Función de probabilidad del transformador de media frecuencia	133
Figura 6-3:	Funciones de probabilidad del transformador tipo seco	134
Figura 6-4:	Fallas en transformadores inmersos en aceite.....	134
Figura 6-5:	Comparación de los factores de envejecimiento	135
Figura B-1:	Núcleo de aleaciones amorfas	155
Figura B-2:	Dimensiones del núcleo 2605SA1-AMCC 6.3	156
Figura B-4:	Densidad de flujo óptimo.....	163

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1: Temperaturas dentro de la cámara.....	57
Tabla 3-2: Resultados de la cromatografía de gases	60
Tabla 3-3: Resultados del diagnóstico previo a los ensayos de envejecimiento .	61
Tabla 3-4: Resultados del factor envejecimiento acelerado <i>FEA</i>	64
Tabla 3-5: Temperatura de falla según el método Triangulo Térmico.....	85
Tabla 3-6: Ajuste a la distribución lognormal por mínimos cuadrados.....	86
Tabla 3-7: Ajuste a la ecuación de Arrhenius por mínimos cuadrados	88
Tabla 4-1: Parámetros eléctricos de funcionamiento.....	95
Tabla 4-2: Mediciones de los ensayos de envejecimiento	104
Tabla 4-3: Mediciones de los ensayos de envejecimiento	104
Tabla 4-4: Ajuste a la lognormal por mínimos cuadrados para 150 °C.....	106
Tabla 4-5: Ajuste a la lognormal por mínimos cuadrados para 170 °C.....	108
Tabla 4-6: Ajuste a la lognormal por mínimos cuadrados para 190 °C.....	110
Tabla 4-7: Ajuste a la ecuación de Arrhenius por mínimos cuadrados	111
Tabla 5-1: Comparación entre transformadores tipo seco e inmerso en aceite. .	118
Tabla 5-2: Mediciones de los ensayos de envejecimiento a 130 °C	121
Tabla 5-3: Mediciones de los ensayos de envejecimiento a 150 °C	121
Tabla 5-4: Mediciones de los ensayos de envejecimiento a 170 °C	122
Tabla 5-5: Ajuste a la lognormal por mínimos cuadrados para 130 °C.....	123
Tabla 5-6: Ajuste a la lognormal por mínimos cuadrados para 150 °C.....	123
Tabla 5-7: Ajuste a la lognormal por mínimos cuadrados para 170 °C.....	124
Tabla 5-8: Ajuste a la ecuación de Arrhenius por mínimos cuadrados	126

Tabla B-1: Parámetros eléctricos de diseño	153
Tabla B-3: Dimensiones del núcleo.....	155
Tabla B-4: Propiedades físicas	156

Capítulo I

Este capítulo presenta la identificación del problema, hipótesis de solución, objetivos y la metodología implementada en el desarrollo de la tesis. Por último, se muestra la estructura general del documento de tesis.

1. Introducción general

Los transformadores son los elementos de mayor importancia en la infraestructura del sistema eléctrico. De ellos dependen los sistemas de transmisión y distribución para realizar los enlaces entre las distintas partes del sistema que están a diferentes niveles de tensión. En consideración a que el nivel de confiabilidad requerido por un sistema debe ser establecido de acuerdo con la criticidad de las cargas y la cantidad de usuarios, se debe asegurar especialmente en los transformadores de potencia alta fiabilidad en la operación continua sin someterlo a esfuerzos mayores a los establecidos en las especificaciones técnicas. El aseguramiento en la continuidad de suministro de energía es un asunto prioritario para las empresas de transmisión y distribución de energía; consecuentemente, el diagnóstico del transformador es un factor esencial. El cálculo de la vida remanente de los transformadores es un factor decisivo para gestionar el riesgo asociado a la confiabilidad del sistema de transmisión y distribución; y por supuesto, para asegurar la calidad en el suministro de energía.

Una de las tecnologías emergentes que están siendo integradas en la infraestructura de la red eléctrica, es el transformador electrónico de potencia o transformador de estado sólido (o SST del *solid state transformer*); los cuales, están encaminados a reemplazar los transformadores de distribución tradicionales inmersos en aceite. El principio de operación del transformador electrónico es la transformación de la tensión mediante aislamiento

galvánico por medio de transformadores que operan a frecuencias entre 3 kHz y 20 kHz [1]-[5], más conocido como transformadores de media frecuencia. Por lo tanto, reduce considerablemente el volumen y el peso del núcleo en comparación con el transformador de distribución tradicional. La utilización de transformadores electrónicos hace posible el flujo potencia entre sistemas de diferentes características (es decir, en términos de magnitud de tensión y frecuencias). Además, brinda la oportunidad de incorporar los controles de tensión, frecuencia y calidad de la energía [4][5].

Importantes trabajos de investigación sobre la evaluación del envejecimiento del aislamiento de los transformadores de distribución tradicionales, llenos de aceite y de tipo seco, han proporcionado la base teórica para los modelos de confiabilidad y las condiciones de operación de sobrecarga. Sin embargo, no se han adelantado investigaciones significativas de modelos térmicos y métodos de diagnóstico de transformadores de media frecuencia. La creciente popularidad de estos transformadores requiere el desarrollo de modelos para determinar la ley de envejecimiento y los factores que afectan la confiabilidad del transformador.

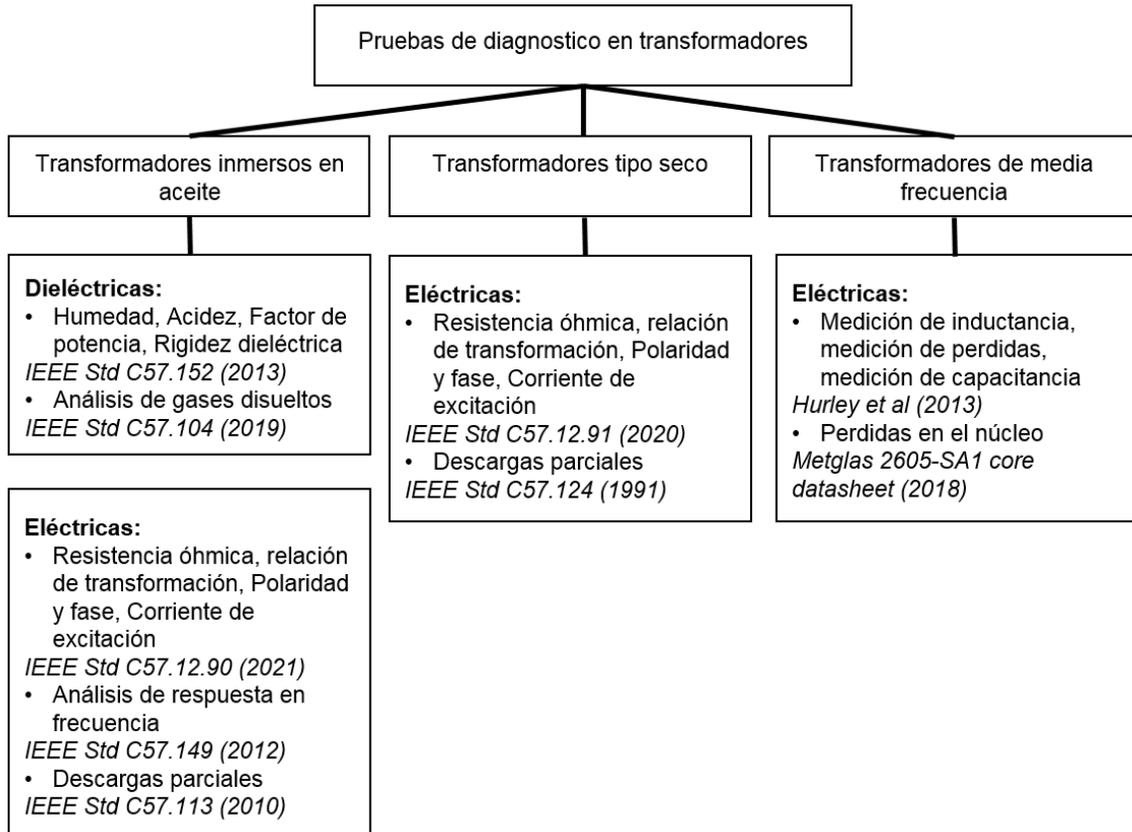
Dependiendo del tipo de transformador en aceite, tipo seco o media frecuencia, tendrán ventajas y desventajas las cuales deben ser valoradas y consideradas para la aplicación requerida. La principal diferencia entre estos transformadores es el sistema de aislamiento; el cual, es el elemento que mayor degradación presenta ante los esfuerzos eléctricos, térmicos, mecánicos y ambientales a los cuales está sometido. En todos los tipos de transformadores, el aislamiento es sensible a diferentes tasas de envejecimiento y fenómenos destructivos dependiendo de las características propias de cada tipo y condiciones de operación.

La Figura 1-1 resume las principales pruebas utilizadas para realizar el diagnóstico de los transformadores. En el caso de los transformadores de aislamiento seco (transformadores tipo seco y transformadores de media frecuencia), el diagnóstico está restringido a pruebas eléctricas.

La degradación de los materiales utilizados en los sistemas de aislamiento es por naturaleza causada por los cambios en las propiedades físicas o químicas intrínsecas de los materiales a lo largo del tiempo [6]-[12]. Por definición, la rapidez en la que se

desarrollan estos cambios se define como la tasa de reacción química [13]-[15], este concepto es explicado en el campo de la fisicoquímica, y específicamente se llama cinética química [13]-[15].

Figura 1-1: Pruebas en transformadores



La presencia de productos derivados de la formación o ruptura de enlaces químicos, así como alteraciones de los materiales del aislamiento, afectan sus características físicas, térmicas y eléctricas [8][11], ocasionando el detrimento de las propiedades de diseño: disipación de calor, nivel básico de aislamiento y eficiencia. El detrimento del transformador está directamente relacionado a la vida útil; por lo tanto, puede ser vinculado a la confiabilidad.

El enfoque de la tesis está orientado al estudio en la ciencia de la degradación de los materiales aislantes de transformadores. Los resultados de la tesis proporcionan una mejor comprensión de la operación del transformador; el cual, permitirá desarrollar métodos de diagnóstico que permita evaluar la degradación y confiabilidad del equipo.

1.1 Antecedentes

Halstead en el año 1973 [16] planteó uno de los primeros estudios en el diagnóstico del transformador a partir del análisis de gases disueltos fundamentado en la teoría de la termodinámica. En su investigación, presenta una correlación gráfica en escala logarítmica entre la presión parcial de los gases en función de la temperatura de equilibrio. Este trabajo estableció las bases para los algoritmos de los métodos de diagnósticos clásicos actualmente aplicados en la IEC 60599 (IEC, 2007) e IEEE C57.104 (IEEE, 2009) [17][18]. Estos métodos fueron complementados con datos empíricos obtenidos de transformadores fallados.

En 1977, Shirai [19] presentó un algoritmo de descomposición térmica del aceite aislante a partir de la molécula del alcano $C_{20}H_{42}$, dado que es el principal compuesto del aceite. En su trabajo presenta los resultados de las simulaciones de la descomposición térmica en equilibrio del alcano $C_{20}H_{42}$, en moléculas de menor peso molar, H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_3H_6 y C_2H_8 .

En años posteriores, se desarrollaron métodos de diagnóstico basados en diferentes esquemas utilizando métodos numéricos o gráficos para establecer la correlación entre los gases disueltos y el tipo de falla; tales como Dörnenburg 1974 [20], Roger 1978 [21] y Método de gases clave 1987 [17][22][23]. Duval en el año 1989 presenta un método de diagnóstico gráfico basado en la proporción de los gases clave conocido como triángulo de Duval [22]-[28]. Estos métodos de diagnóstico son utilizados actualmente por las normas internacionales IEC599 y IEEE C57.104. Siendo el triángulo de Duval el más popular y utilizado debido a que presenta mayor tasa de precisión en el diagnóstico [22][23].

A partir del 1985 se presentaron los primeros diseños de diagnóstico de transformadores utilizando algoritmos computacionales. Lowe [29] en su propuesta presentó un método de diagnóstico utilizando inteligencia artificial como una mejora del diagnóstico por análisis de gases. Dukarm en 1993 [30] desarrolló un software comercial basado en lógica difusa y redes neuronales para automatizar los métodos DGA estándar de la época.

Posteriormente, numerosas investigaciones y tesis académicas sobre DGA basadas en algoritmos computacionales fueron publicadas. Se desarrollaron algoritmos en redes neuronales [31][32], lógica difusa [33]-[37], programación genética [38] y máquinas de soporte vectorial [39]-[41], formulados a partir de los métodos de diagnósticos clásicos publicados en las normativas [17][18]. En el año 2014, Duval [42] publica un nuevo método gráfico de diagnóstico que utiliza las relaciones de los 5 principales gases residuales de la descomposición del aceite. Adicionalmente, se desarrollaron algoritmos que incluyen los resultados de los parámetros fisicoquímicos del aceite (tensión interfacial, contenido de agua, número ácido y factor de disipación) con la intención de alcanzar una valoración más integra del transformador [43][44]. También se han calculado índices de salud del transformador incluyendo diferentes métodos de ponderación de la energía de los gases como el cálculo de la entalpía [45]-[51].

En relación a los transformadores de estado sólido, actualmente no se cuentan con métodos de diagnóstico para cuantificar su nivel de degradación. El primer transformador de estado sólido fue propuesto por McMurray en 1970 [52], Posteriormente, la Armada de los Estados Unidos desarrolló un convertidor reductor CA/CA [53]. Años después, surgen nuevas propuestas [54][55]; sin embargo, debido a la lenta conmutación y baja potencia de los semiconductores, las aplicaciones de SST en la industria no tuvieron mayor desarrollo. En la última década, con los avances tecnológicos en semiconductores, el transformador de estado sólido ha emergido como una solución eficiente para afrontar nuevos desafíos, generación distribuida [56][27], sistemas de tracción eléctrica [57][58] y sistemas de navegación marítima [59][60].

1.2 Identificación del problema

Los métodos de análisis de gases se han aplicado por décadas como principal herramienta de mantenimiento predictivo en la gestión de transformadores inmersos en aceite; especialmente, en transformadores de potencia.

Sin embargo, los métodos de diagnóstico clásicos están basados en modelos termodinámicos simplificados y datos empíricos de transformadores fallados. El consenso general de los métodos de diagnóstico sobre la categorización de la falla según la gravedad se presenta a continuación [17][18]:

Fallas térmicas

- T1, fallo térmico por debajo de 300 ° C
- T2, fallo térmico entre 300 y 700 ° C
- T3, fallo térmico más de 700 ° C

Fallas eléctricas:

- DP, descargas parciales
- D1, Descargas de baja energía
- D2, Descargas de alta energía

Dentro del procedimiento de diagnóstico aplicado por los ingenieros en la industria, se establecen niveles de severidad según el tipo de falla y la ubicación:

- Fallas de mayor severidad: fallas de arco de alta energía D2 en aceite y papel, fallas de arco de baja energía D1 en papel y puntos calientes en papel a altas temperaturas T3 y T2.
- Fallas de menor severidad: fallas de arco de baja energía D1 en el aceite, puntos calientes T3 y T2 en aceite, y puntos calientes en papel de baja temperatura, descargas parciales con alto nivel de hidrógeno.
- Fallas iniciales: Fallas térmicas T1 en el aceite, descargas parciales tipo corona.

En consecuencia, la cuantificación en la severidad de la falla en transformadores inmersos en aceite está restringida a niveles discretos por tipo de falla.

Con el propósito de cuantificar la severidad de la falla, se han desarrollado herramientas de diagnóstico de transformadores considerando los valores de cambio de entalpía desde el concepto de la termodinámica [45]-[51]. Estos métodos pierden precisión en los casos donde las reacciones ocurren con significativos cambios en entropía, u ocurren a altas temperaturas [61]-[65]. Esto toma importancia en las reacciones correspondientes a las fallas de alta energía como las de arco eléctrico donde las moléculas tienen mayor entropía y temperatura [8][63][65]. Además, estos métodos no han trascendido en aplicaciones industriales. Por lo tanto, es evidente la necesidad de desarrollar un método de diagnóstico

que proporcione la estimación de la severidad de la falla con un nivel de precisión adecuado.

De igual forma, no se han adelantado investigaciones significativas de modelos de envejecimiento y métodos de diagnóstico de transformadores de media frecuencia.

Con base en las carencias surge la pregunta de investigación:

¿Cómo cuantificar la severidad de la falla en los transformadores a partir de la teoría de la cinética química?

La solución que propone la tesis centra su atención en caracterizar la dependencia entre la causa (variable independiente) y efecto (variable dependiente) para resolver el problema de investigación planteado. Para esto, la formulación matemática de las ecuaciones de reacciones químicas de la descomposición de la materia tomadas de la literatura, permitirá establecer el nivel de degradación del sistema dependiente de la temperatura. En otras palabras, la correlación entre la energía térmica disipada por una falla y la descomposición de la materia, implica una temperatura de equilibrio de la reacción química, debido a que cada isómero de gas requiere una energía de activación diferente para romper los enlaces químicos. Por lo tanto, la temperatura de la falla en el aislamiento se puede utilizar como indicador de la severidad de la falla.

En esta tesis, se propone un modelo termodinámico diseñado desde la teoría de la cinética-química que permita calcular la severidad de la falla en función de la concentración de los gases disueltos en el aceite en primera instancia; Igualmente, la teoría de la cinética química es aplicada para desarrollar la metodología de valoración de los transformadores de aislamiento seco (transformadores tipo seco y de media frecuencia) que permita establecer el nivel de degradación de estos transformadores.

1.3 Objetivos de la tesis

El trabajo de investigación plantea métodos de diagnóstico de los aislamientos de transformadores elaborados desde el concepto de la cinética química, considerando las actuales tendencias y perspectivas futuras en los diferentes tipos de transformadores.

1.3.1 Objetivo general

Aplicar la teoría de la cinética-química para desarrollar métodos de diagnóstico que permitan valorar la degradación térmica y el aumento de temperatura de los transformadores en aceite, transformadores de media frecuencia y transformadores tipo seco; a partir de ensayos experimentales de envejecimiento acelerado en laboratorio

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar las metodologías de envejecimiento acelerado en los transformadores inmersos en aceite, transformadores de media frecuencia y transformadores tipo seco; que permita establecer reglas heurísticas para medir la degradación del transformador.
- Formular métodos de diagnóstico de la degradación térmica de los transformadores inmersos en aceite, transformadores tipo seco y transformadores de media frecuencia; para calcular la severidad de la falla a partir de la cinética-química.
- Realizar el esquema comparativo de la evolución y evaluación de la degradación de los sistemas de aislamientos que describa las diferencias de las teorías aplicadas de la cinética-química.

1.4 Estado del arte

En los últimos años, la mayoría de los estudios e investigaciones se han enfocado en implementar los métodos de diagnósticos clásicos, Método de Gases clave, Método de Roger, y Triángulo de Duval; en sistemas expertos o computacionales. Al respecto, se han formulado algoritmos en lógica difusa [66]-[69], redes neuronales [70]-[73], máquinas de soporte vectorial [74]-[76] y algoritmos de optimización basados en inteligencia artificial [77].

Esta tendencia está justificada al considerar que tradicionalmente las interpretaciones de los diagnósticos son realizadas por personas expertas que aplican su conocimiento y experiencia utilizando técnicas estándar. Gran parte de la literatura sobre los resultados del DGA, resaltan la importancia en el conocimiento y la experticia de la persona más que la formulación matemática. Considerando que los sistemas expertos tienen la capacidad

de representar y emular el conocimiento para llevar a cabo la toma de decisiones [7], los hacen adecuados para afrontar este tipo de problemas.

No obstante, no se hallaron investigaciones en modelos termodinámicos sobre la degradación de los sistemas de aislamiento aplicados al diagnóstico de transformadores en años recientes. Sin duda en la rama donde se presenta mayor evolución en el desarrollo de nuevas investigaciones y aplicaciones, es en los algoritmos computacionales y sistemas expertos aplicados a los métodos de diagnósticos clásicos.

En cuanto a transformadores de media frecuencia, no se encuentran en la literatura investigaciones destacadas sobre modelos de degradación térmica o de diagnóstico. Con la creciente popularidad del transformador de estado sólido, es de gran importancia desarrollar modelos que permitan explorar la ley de envejecimiento, y determinar los factores que afectan la confiabilidad del transformador de media frecuencia.

1.5 Aportes de la tesis

Los aportes de esta tesis de doctorado están orientados a innovar en las actuales limitaciones del diagnóstico de transformadores, en proponer nuevos enfoques metodológicos en pruebas y ensayos experimentales.

El aporte de mayor relevancia de la tesis corresponde al desarrollo del método de diagnóstico de transformadores inmersos en aceite, nombrado en la tesis como método del Triángulo Térmico. El método del Triángulo Térmico es un método gráfico por lo que proporciona al operario una perspectiva cualitativa de la severidad de la falla. Esto brinda la oportunidad de tener un control valorativo desde la percepción del operador sobre el crecimiento o evolución de la tasa de falla.

Adicionalmente, el método del Triángulo Térmico tiene la ventaja de calcular la tasa de falla cuantificable lo que permite incorporarlo en programas sistematizados de gestión de activos. En efecto, la inclusión del método desarrollado de la tesis en los programas de gestión de activos perfeccionará la toma de decisiones correctas para promover la vida útil y minimizar el costo operativo del equipo.

Se desarrolla un novedoso algoritmo de inferencia difusa del tipo Takagi-Sugeno para proporcionar la severidad de la falla cuantificable a partir del mapa térmico desarrollado en la tesis. El algoritmo fue implementado en Matlab el cual recibe tres variables que mediante una transformación lineal puede ser representado gráficamente en el sistema cartesiano.

Además, se muestran los diseños y las implementaciones de los planes de envejecimiento acelerado de los tipos de transformadores de la investigación experimental de la tesis. Los diseños de los planes presentan procedimientos óptimos de los ensayos en laboratorio que suministran información confiable de la respuesta de los sistemas bajo prueba. Posteriormente, los resultados de los ensayos son analizados mediante métodos estadísticos que derivan conclusiones válidas y objetivas. Este esquema metodológico puede ser extendido a otros estudios en que se requiera estudiar la ley de envejecimiento de esos equipos.

La investigación experimental sobre el transformador de media frecuencia suministra valiosa información que ayuda a tener una comprensión más profunda del comportamiento físico y manifestación de los fenómenos eléctricos en el dispositivo. Estos nuevos hallazgos propician la formulación del método de diagnóstico para valorar el nivel de degradación del transformador cuando opera en condiciones de sobrecarga.

1.6 Metodología

Establecido el problema de investigación y los objetivos propuestos en la tesis, fue necesario plantear la metodología que permitió desarrollar la investigación. Esto involucró seleccionar el tipo y diseño de la investigación, su aplicación al contexto particular del estudio, selección de los instrumentos y técnicas de medición para el registro de los datos.

Para llevar a cabo los estudios de degradación del transformador bajo condiciones controladas (de aplicación de esfuerzo y toma de mediciones), fue necesario desarrollar ensayos de envejecimiento acelerado tanto en los transformadores en aceite, transformadores tipo seco y transformadores de media frecuencia.

Los ensayos de envejecimiento acelerado se han utilizado ampliamente para evaluar el sistema de aislamiento de motores, generadores y transformadores [78]. Y así simular en

un corto periodo de tiempo, los efectos de la degradación que ocurren durante el funcionamiento normal en muchos años, esto permite identificar diseños de sistemas de aislamiento con mayor vida útil y evaluar la confiabilidad del sistema sometido a diferentes niveles de esfuerzo.

Sin embargo, las aplicaciones de esfuerzos no controlados pueden enmascarar modos de fallas impropias a los del envejecimiento normal del equipo. Por consiguiente, es fundamental diseñar el plan de envejecimiento donde el elemento bajo prueba solo sea afectado por un único esfuerzo, sin la influencia de factores externos que podrían alterar los resultados; tales como, variaciones de tensión, agentes contaminantes, condiciones ambientales, etc. Igualmente, el proceso debe permitir registrar todos los datos requeridos para el desarrollo del modelo.

El plan de los ensayos de envejecimiento acelerado debe cumplir con los siguientes tópicos:

- Determinar las variables de esfuerzo y cuantificadores de degradación
- Ensayos de envejecimiento acelerado
- Análisis de datos e Interpretación de resultados

1.6.1 Determinación de las variables de esfuerzo y cuantificadores de degradación

Está bien documentado en la literatura que el principal factor que afecta la vida útil de los aislamientos en los equipos es el esfuerzo térmico [7]-[12].

Los flujos de corrientes en los devanados dan lugar a pérdidas eléctricas por efecto pelicular y de proximidad, las cuales se manifiestan en forma de calor. De igual forma, las pérdidas por el fenómeno de histéresis y corrientes parásitas en los núcleos también contribuyen al aumento de temperatura. Por lo tanto, el aumento de temperatura es un parámetro de diseño que define el punto de operación del transformador [6]. En conclusión, se determinó que la variable de esfuerzo que se debe aplicar en los ensayos de envejecimiento es la temperatura.

La variable dependiente o variable de medición debe asegurar en proveer información acertada sobre el cuantificador de la degradación, es decir, el efecto producido por el esfuerzo térmico. Para cada tipo de transformador se debe identificar la variable de medición y el indicador o cuantificador de la degradación, los métodos de deducción y justificación de estas variables para cada transformador son expuestos en cada capítulo.

1.6.2 Ensayos de envejecimiento acelerado

El diseño experimental de los ensayos de envejecimiento consideró los siguientes principios básicos: replicación, aleatoriedad, uniformidad y control local [52].

- Replicación: la cual se refiere a que cada procedimiento sobre un transformador debe ser aplicado en las mismas condiciones a todas las unidades de la muestra.
- Aleatoriedad: Consiste en que las unidades de muestra y el orden en que se realizan los ensayos se realizaron aleatoriamente garantizando la independencia en los resultados. Los ensayos no deben ser influenciados por simpatías personales hacia determinado tratamiento que pudiera sesgar los resultados.
- Uniformidad: Esta característica busca que todas las unidades de la muestra tengan las mismas características.
- Control local: Los ensayos de envejecimiento deben asegurar el control y vigilancia de todas las causas que influyen en los resultados del proceso.

Para controlar la aplicación del esfuerzo térmico a los transformadores, se construyeron cámaras de envejecimiento tanto para los transformadores en aceite como para los transformadores de aislamiento seco (transformadores tipo seco y transformadores de media frecuencia). De esta forma, se tuvo el control local y registro completo de las variables que afectan el proceso de envejecimiento acelerado (tensión, sobrecarga y temperatura) sin la influencia de factores externos que podrían afectar el proceso. La construcción de la cámara aseguró los criterios de replicación y de control.

Los transformadores fueron sometidos a ciclos de envejecimiento con la aplicación de esfuerzos térmicos aumentando la temperatura ambiente y sobrecarga proporcionadas por la cámara; por consiguiente, el aislamiento se degrada de forma progresiva en cada ciclo de envejecimiento. Las cámaras de envejecimiento se diseñaron para sobrecargar los transformadores entre el 100% y 150% de la potencia nominal y suministrar temperaturas dentro de la cámara hasta 200°C. Para evaluar el estado del transformador de manera no destructiva se realizaron diagnósticos por medio de análisis de gases y pruebas eléctricas.

1.6.3 Análisis de datos e interpretación de resultados

El análisis de datos de los ensayos busca cuantificar los cambios en los materiales que afectan las características de vida del componente bajo prueba a través del uso de distribuciones estadísticas.

Por definición, cuando los cambios en los materiales son debido a efectos térmicos, estos son estudiados por la rama de la química física llamada cinética [65]. Por lo tanto, los modelos apropiados para describir el comportamiento de la degradación deben originarse a partir de la cinética.

En la tesis, cualquier cambio en los materiales aislantes motivado por el aumento de temperatura, ya sea que implique la ruptura y formación de enlaces químicos, se establece como un cambio cinético-químico. En consecuencia, el particular de interés en la tesis es la medición del avance de la reacción química para establecer el nivel de degradación, que dependiendo del tipo de transformador que se esté analizando, se deberán afrontar diferentes mecanismos de medición que son explicados en cada capítulo.

1.7 Estructura del documento

Capítulo 1. Presenta la introducción general de la tesis, explicando el contexto de la investigación, se expone el problema de investigación, los objetivos de la tesis y la metodología de investigación.

Capítulo 2. Se realiza un estudio de los procesos químicos presentes durante la degradación del transformador; por lo que se presenta la teoría de la descomposición de

la materia basado en la cinética-química. Esto permite, que en los capítulos posteriores se pueda exponer los métodos de diagnóstico desarrollados en esta investigación.

Capítulo 3. Se estudian los mecanismos para desarrollar el envejecimiento acelerado de los transformadores inmersos en aceite. Se realizaron ensayos y mediciones que respaldaron los métodos de diagnóstico del transformador. Además, presenta el método de diagnóstico.

Capítulo 4. Se diseñan y construyen los transformadores de media frecuencia que se utilizaron en el envejecimiento acelerado. Se realizan los ensayos y las mediciones del envejecimiento de estos transformadores, y se elabora el modelo de envejecimiento.

Capítulo 5. Se realizan los ensayos y las mediciones de envejecimiento acelerado de los transformadores tipo seco y se elaboró el modelo de envejecimiento.

Capítulo 6. Se analiza el comportamiento de la ley de envejecimiento de cada tipo de aislamiento y se elaboraron los esquemas de comparación de los tres sistemas.

Capítulo 7. Presenta las conclusiones de la tesis doctoral, se proponen futuros desarrollos y se presentan las discusiones académicas presentadas durante la investigación.

Apéndice A. Expone el método numérico de Newton-Raphson utilizado para la solución de sistemas de ecuaciones no lineales de las reacciones químicas.

Apéndice B. Presenta el procedimiento para diseñar transformadores de media frecuencia según los parámetros de funcionamiento proporcionados.

Capítulo II

2. Definiciones y conceptos matemáticos

Este capítulo presenta inicialmente una revisión crítica del estado del arte de los conceptos de la cinética química con énfasis principalmente en las reacciones de descomposición de la materia. Donde el propósito principal es comprender la influencia de la energía sobre las reacciones químicas, lo que permite la formulación de modelos para predecir la velocidad de descomposición de la materia en función de la temperatura. Luego, se presentan las teorías de la formulación de los modelos cinético-químicos a partir de ensayos experimentales.

2.1 Introducción

Para hacer autocontenida a esta tesis, se presenta a continuación el desarrollo matemático convencional de las metodologías y las técnicas utilizadas actualmente en la cinética-química presente en la literatura [61]-[65]; y a partir de estos conocimientos, se elabora la metodología para el desarrollo de la tesis.

Los sistemas de aislamiento están sometidos a procesos de transformación debido a esfuerzos térmicos que son el origen de su degradación y la consiguiente modificación de sus propiedades. Algunos materiales tienen un margen amplio de maniobra entre la temperatura de operación y la de degradación, en otros materiales este margen es más estrecho. El conocimiento del mecanismo de degradación de los sistemas de aislamiento a través de los análisis termodinámicos y cinéticos asegurará la integridad y confiabilidad de los equipos.

En este capítulo se presentan los conceptos de la termodinámica y cinética química en el marco de la degradación de los materiales, partiendo de las definiciones de las reacciones

químicas, modelo de Arrhenius, estado de transición, hasta definir el concepto de energía de activación. La cuantificación de la energía de activación permite medir el grado de modificación de los materiales como consecuencia de la reacción química. Por lo tanto, la energía de activación es el parámetro físico por el cual se realiza la valoración de la degradación.

2.2 Reacciones químicas

Actualmente, la mayoría de los materiales utilizados en la industria se obtienen por medio de reacciones químicas, las cuales son procesos termodinámicos de transformación de la materia. Una reacción química es un proceso donde una sustancia, llamado reactivo, cambia su estructura molecular rompiendo y formando nuevos enlaces entre los átomos para formar otra sustancia llamada producto [63][65]. En otras palabras, las reacciones químicas son la transformación de la materia por la redistribución de los enlaces entre los átomos.

La transformación de la materia en las reacciones químicas debe tener igual proporción de los elementos, de tal forma que la misma cantidad de cada elemento presente en el producto, esté en los reactivos. De esta forma, se cumple la ley de conservación de masa o ley de Lavoisier [63][64]; que afirma, en una reacción química la suma de la masa de los reactivos es igual a la suma de la masa de los productos.

2.3 Energía de las reacciones químicas

La energía de la reacción es el principal parámetro utilizado para medir el avance de una reacción química [61]-[65]. En este propósito existen dos ramas de la química orgánica para cuantificar la energía de la reacción, la termodinámica y la cinética química. La termodinámica es la rama de la química que mide cuantitativamente los intercambios energéticos de los procesos químicos (reacciones químicas) y físicos (cambios de estado). Por el contrario, la cinética química estudia las velocidades de las reacciones y las energías requeridas para desarrollar la reacción [63]-[65]. De forma relevante, el desarrollo de una reacción química consume o libera energía durante el proceso.

2.3.1 Termodinámica

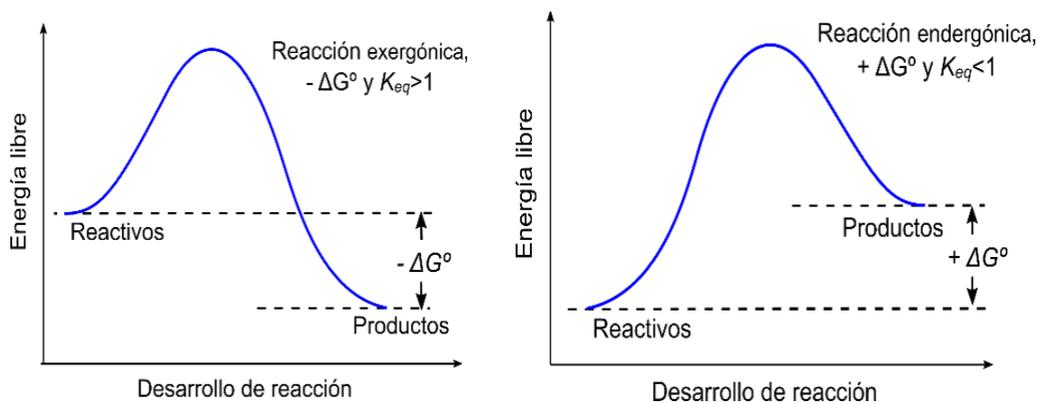
La termodinámica mide la diferencia de la energía relativa de los reactivos y productos cuando la reacción ha alcanzado el equilibrio. Estos cambios de niveles de energía de la reacción química pueden ser debido a energía consumida o energía liberada al medio.

La diferencia entre la energía de los productos y la energía de los reactivos en condiciones estándar se denomina cambio de energía libre de Gibbs estándar, ΔG° . El símbolo $^\circ$ se utiliza para indicar la condición del estado estándar o estado de referencia (concentración de 1M, a temperatura de 25 °C y una presión de 1 atm) [63]-[65].

$$\Delta G^\circ = (\text{Energía de Gibbs de productos}) - (\text{Energía de Gibbs de reactivos}) \quad (2.1)$$

De la ecuación se observa que, si los productos tienen menor energía que los reactivos, ΔG° será negativa. Esto significa que la reacción libera más energía en la formación de los enlaces de los productos que la que consume en la ruptura de los enlaces de los reactivos. Una reacción con ΔG° negativa, se llama reacción exotérmica [63]-[65]. Por el contrario, una reacción con ΔG° positiva, se llama reacción endotérmica. Los dos tipos de reacciones son representados en los diagramas de coordenadas de reacción de la Figura 2-1 [65].

Figura 2-1: Energía libre de Gibbs de las reacciones.



En una reacción con reactivos que contiene a moles de A y b moles de B para formar productos con c moles de C y d moles de D , se representa por ecuación:



La concentración relativa de la masa entre los reactivos y productos en estado estable se expresa numéricamente con la constante de equilibrio, K_{eq} . Numéricamente es igual a:

$$K_{eq} = \frac{[Productos]}{[Reactivos]} = \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b} \quad (2.3)$$

Cuando los productos son favorecidos energéticamente en el equilibrio, ΔG° es positivo y K_{eq} es menor que 1. De forma análoga, cuando los productos terminan en un nivel más bajo de energía en el equilibrio, ΔG° es negativo y K_{eq} es mayor que 1. Por lo tanto, ya sea que los productos sean favorecidos o no en el equilibrio, el estado de la reacción puede ser medida por la constante de equilibrio o por el cambio de la energía libre de Gibbs estándar. Estas dos cantidades se relacionan por la ecuación [63]-[65]:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln(K_{eq}) \quad (2.4)$$

Donde R es la constante de los gases (8.314 J/molK) y T es la temperatura en grados Kelvin ($K=^\circ C+273.15$). El cambio de energía libre de Gibbs (ΔG°) tiene una componente de entalpía ΔH° y una componente de entropía ΔS° las cuales se relacionan por la ecuación:

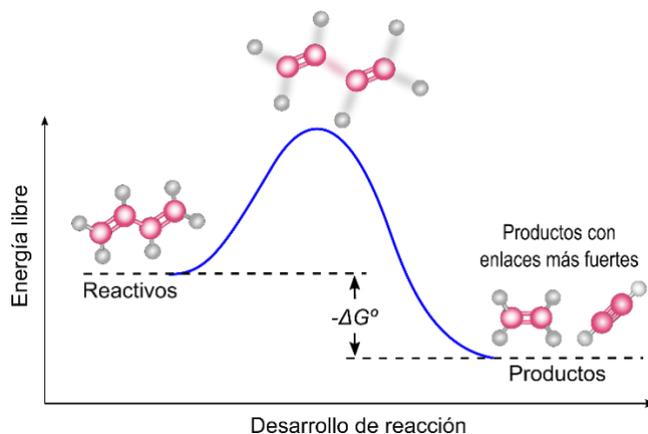
$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (2.5)$$

El término entalpía ΔH° representa la cantidad de calor consumido o liberado durante la reacción. La molécula consume calor cuando los enlaces atómicos se rompen, y liberan calor con la formación de nuevos enlaces. Por lo tanto, ΔH° es una medida de la energía en forma de calor por la ruptura y formación de los enlaces que ocurre durante la reacción química, y es conocida como energía de disociación de enlaces.

$$\Delta H^\circ = (\text{Energía de los enlaces rotos}) - (\text{Energía de los enlaces formados}) \quad (2.6)$$

Cuando ΔH° es negativa significa que se liberó energía al medio, mientras que si ΔG° es positiva, la molécula gana energía. Por esta razón, la liberación de energía ocasiona productos con un nivel más bajo de energía potencial, igualmente significa que los enlaces rotos del reactivo son más débiles que los enlaces formados. Este concepto es representado en la Figura 2-2 [64][65].

Figura 2-2: Energía de disociación de enlaces



Mientras que la componente de entropía ΔS° es una medida de aleatoriedad o desorden en el sistema. Cuanta más libertad de movimiento tienen las moléculas, mayor es el valor de entropía. Por ejemplo, las moléculas de los gases se mueven más libremente que las moléculas de los líquidos, y por lo tanto los gases tienen mayor entropía.

$$\Delta S^\circ = (\text{Desorden de los productos}) - (\text{Desorden de los reactivos}) \quad (2.7)$$

En resumen, el cambio de la energía total o energía libre de Gibbs, es función de dos factores: de la energía de la disociación de los enlaces, diferencia de entalpía ΔH° ; y el cambio en la libertad de movimiento de las moléculas, diferencia de entropía ΔS° .

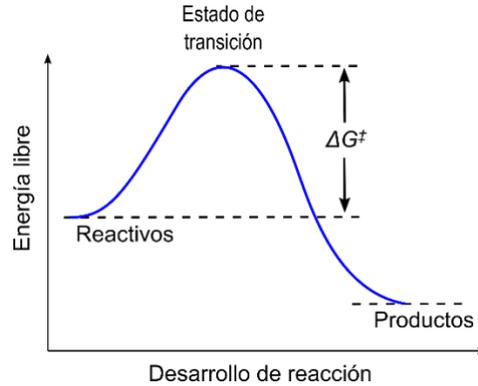
2.3.2 Cinética química

La cinética es el campo de la química que estudia la velocidad o tasa de reacción química y los factores que las afectan. Para completar la transformación molecular de una estructura a otra, la reacción debe pasar por un estado intermedio de mayor energía llamado estado de transición. El estado de transición, también llamado complejo activado, es un estado intermedio de la reacción donde la energía es máxima.

El estado de transición es muy inestable debido a su alto nivel de energía; por consiguiente, las moléculas están obligadas a avanzar de inmediato en el desarrollo de la reacción. Mientras que, si la energía cinética de las moléculas no es superior a la energía del estado de transición, la reacción no se llevará a cabo y la molécula volverá a su estado inicial. La

energía del estado de transición, indicada en la Figura 2-3 por ΔG^\ddagger , es más ampliamente conocida como energía de activación de Gibbs, y representa el aporte de energía mínima requerida del entorno para iniciar la reacción.

Figura 2-3: Energía de activación



Al aumentar la temperatura del medio también aumenta la energía cinética de las moléculas; por consiguiente, una mayor fracción de las moléculas del reactivo tendrá la energía suficiente para superar la barrera de energía de activación necesaria para completar la reacción. Matemáticamente, la energía de activación es la diferencia entre la energía del estado de transición y la energía libre de los reactivos:

$$\Delta G^\ddagger = (\text{Energía del estado de transición}) - (\text{Energía de los reactivos}) \quad (2.8)$$

Similar a ΔG^0 , la energía libre de activación ΔG^\ddagger , también tiene una componente de entalpía representada por ΔH^\ddagger , y una componente de entropía representada por ΔS^\ddagger , como se muestra a continuación:

$$\Delta G^\ddagger = \Delta H^\ddagger - T\Delta S^\ddagger \quad (2.9)$$

Donde:

$$\Delta H^\ddagger = (\text{Entalpía del estado de transición}) - (\text{Entalpía de los reactivos}) \quad (2.10)$$

$$\Delta S^\ddagger = (\text{Entropía del estado de transición}) - (\text{Entropía de los reactivos}) \quad (2.11)$$

2.4 Velocidad de reacción

La velocidad de una reacción es la cantidad de sustancia del reactivo que se consume por unidad de tiempo, o en forma equivalente, la cantidad del producto que se forma por unidad de tiempo. La representación matemática del cambio en la concentración de las sustancias a lo largo del tiempo está dada por la siguiente ecuación:

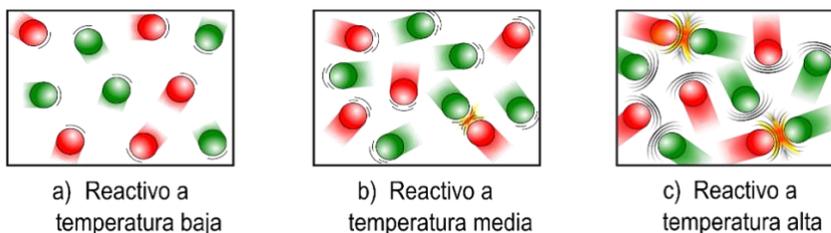
$$v = -\frac{1}{a} \frac{\Delta[A]}{\Delta t} = -\frac{1}{b} \frac{\Delta[B]}{\Delta t} = \frac{1}{c} \frac{\Delta[C]}{\Delta t} = \frac{1}{d} \frac{\Delta[D]}{\Delta t} \quad (2.12)$$

El signo negativo presente en los términos de los reactivos se emplea para evidenciar la disminución de la sustancia con el tiempo. La constante de velocidad es un factor de proporcionalidad en la ley de velocidad de la cinética química que relaciona la concentración molar de los reactivos o productos con la velocidad de reacción. Para propósitos experimentales, la constante de velocidad se determina a partir del número de colisiones y la fracción de las moléculas con energía para reaccionar.

2.5 Número de colisiones en el tiempo

La fuente de la energía de activación para la reacción normalmente es el calor. Cuando la sustancia del reactivo absorbe la energía en forma de calor de su entorno, acelera el movimiento de las moléculas aumentando la energía cinética, esto a su vez incrementa la frecuencia y la fuerza de las colisiones entre moléculas; de igual forma, agita los enlaces y los átomos al interior de la molécula aumentando la probabilidad de que los enlaces se rompan. El efecto del aumento de la temperatura sobre las colisiones se representa en la Figura 2-4 [65].

Figura 2-4: Aumento de las colisiones con la temperatura.



Adicional a la limitación de la energía mínima de activación, las moléculas deben tener la orientación adecuada al momento de la colisión para iniciar la ruptura de los enlaces, esta

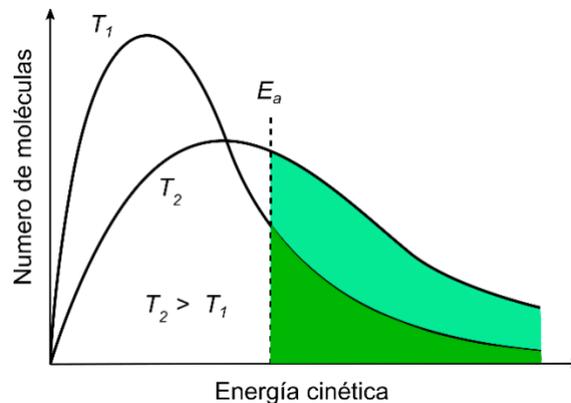
restricción se acrecienta en moléculas de estructuras más complejas. Debido a que las moléculas tienen movimientos imprevisibles, siempre existirá una proporción con la orientación adecuada para producir colisiones exitosas que originen la reacción. Sin embargo, cuanto más restrictiva sea la condición de la orientación, menor será la proporción de colisiones exitosas.

2.5.1 Fracción con la suficiente energía

Si la energía cinética de las moléculas es baja, menor que la energía de activación, las colisiones no tendrán la fuerza suficiente para iniciar el proceso de ruptura de los enlaces; en consecuencia, las moléculas no reaccionan. Por lo tanto, el factor de importancia a considerar es la fracción de moléculas que tienen energías iguales o superiores a la energía de activación.

De acuerdo con la teoría de la cinética química, un sistema de moléculas a una temperatura determinada se distribuye con densidades de energías establecidas por la ley de distribución de Maxwell-Boltzmann [64]. Las gráficas representadas en la Figura 2-5 corresponden a distribuciones de energías cinéticas a diferentes temperaturas, siendo T_2 mayor que T_1 . El área sombreada bajo la curva representa el número de moléculas que poseen la energía suficiente para reaccionar en el momento que se presentan las colisiones. De la gráfica se deduce que la fracción de moléculas con energía mayor a la energía libre de activación aumenta rápidamente a medida que aumenta la temperatura [49].

Figura 2-5: Fracción de moléculas con suficiente energía para reaccionar



Estos dos factores, frecuencia de colisiones y la fracción de moléculas con suficiente energía, establecen la constante de velocidad k .

2.5.2 Constante de velocidad k

La constante de velocidad, k , es un factor de proporcionalidad que indica la relación entre la concentración molar de reactivos y la velocidad de la reacción química. Para efectos de medición se establece como el producto de la frecuencia de colisiones y la fracción de las moléculas con suficiente energía.

$$k = (\text{Frecuencia de colisiones})(\text{Fracción con la suficiente energía}) \quad (2.13)$$

Svante Arrhenius en 1859 estableció la relación matemática entre la constante de velocidad en función de la temperatura por medio de la siguiente ecuación [63][64]:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2.14)$$

Donde

R , es la constante de los gases (8.314J/mol K)

T , es la temperatura en grados Kelvin

E_a , energía de activación

A , factor pre exponencial

La parte exponencial de la ecuación representa la fracción de las moléculas del reactivo que tienen la energía cinética suficiente para reaccionar según la ley de distribución de Maxwell-Boltzmann. En la ecuación RT es la energía cinética promedio, por consiguiente, la fracción del exponente es la relación entre la energía de activación E_a y la energía cinética promedio. El factor de frecuencia o factor pre exponencial A , representa la fracción de las colisiones con la orientación adecuada para la reacción exitosa.

La ecuación de Arrhenius surge de estudios empíricos y ha sido ampliamente utilizada para determinar las barreras de energía de las reacciones o energía de activación de estudios experimentales.

Es necesario tener en consideración la diferencia entre la energía libre de Gibbs de activación y la energía de activación experimental. La energía libre de activación tiene tanto una componente de entalpía como una componente de entropía, mientras que la energía experimental E_a tiene solo una componente de entalpía, ya que la componente de entropía está implícita en el término pre exponencial A de la ecuación de Arrhenius. Así, considerando la Ecuación (2.14), la energía de activación es igual a la energía libre de Gibbs de activación.

$$k = e^{\left(-\frac{\Delta G^\ddagger}{RT}\right)} \quad (2.15)$$

La diferenciación del logaritmo natural de K con respecto a la temperatura es igual a:

$$\left(\frac{\partial \ln(K)}{\partial T}\right)_P = -\left(\frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{\Delta G^\ddagger}{RT}\right)\right)_P = -\frac{1}{RT}\left(\frac{\partial \Delta G^\ddagger}{\partial T}\right)_P + \frac{\Delta G^\ddagger}{RT^2} = \frac{\Delta S^\ddagger}{RT} + \frac{\Delta G^\ddagger}{RT^2} \quad (2.16)$$

Despejado ΔH^\ddagger de la Ecuación (2.9):

$$\Delta H^\ddagger = \Delta G^\ddagger + T\Delta S^\ddagger \quad (2.17)$$

Y reemplazando en 2.15

$$\left(\frac{\partial \ln(k)}{\partial T}\right)_P = \frac{\Delta S^\ddagger}{RT} + \frac{\Delta G^\ddagger}{RT^2} = \frac{\Delta H^\ddagger}{RT^2} \quad (2.18)$$

De modo que:

$$E_a = \Delta H^\ddagger \quad (2.19)$$

Usando la Ecuación (2.9) y reemplazando en la Ecuación (2.15), se tiene que la constante de reacción k es igual a:

$$k = Ae^{\frac{\Delta S^\ddagger}{R}} e^{-\frac{\Delta H^\ddagger}{RT}} \quad (2.20)$$

2.6 Desarrollo de la reacción química

El desarrollo de la reacción o avance de la reacción se puede medir por medio de la fracción molar de la reacción.

2.6.1 Fracción molar de la reacción

El avance de la reacción se representa por la variable ξ , y cuantifica el cambio de la cantidad de sustancia química que se transforma de producto a reactivo. La unidad de medida de la cantidad de sustancia es el mol. El cambio infinitesimal del avance de la reacción $d\xi$ depende del cambio infinitesimal dn de las sustancias de los reactivos A y B que se consumen para formar los productos C y D afectadas por los factores estequiométricos. Por lo tanto, el avance de la reacción está definido por:

$$\frac{dn_1}{v_1} = \frac{dn_2}{v_2} = \frac{dn_3}{v_3} = \frac{dn_4}{v_4} = \dots \equiv d\xi \quad (2.21)$$

En de forma general, la relación de cada sustancia que conecta el cambio diferencial dn_i con $d\xi$ es:

$$dn_i = v_i d\xi \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2.22)$$

La integración de la Ecuación (2.22) desde un estado inicial sin reaccionar, es decir $\xi = 0$ y $n_i = n_{i_0}$, a un estado arbitrario ξ después de haber iniciado la reacción es:

$$\int_{n_{i_0}}^{n_i} dn_i = v_i \int_0^\xi d\xi \quad (2.23)$$

Donde la solución es:

$$n_i = n_{i_0} + v_i \xi \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2.24)$$

La suma de todas las sustancias da como resultado:

$$n = n_0 + v \xi \quad (2.25)$$

Donde

$$n \equiv \sum_i n_i \quad n_0 \equiv \sum_i n_{i_0} \quad v \equiv \sum_i v_i \quad (2.26)$$

Reemplazando en la Ecuación (2.24), el número total de moles en la reacción es:

$$n = n_0 + v\xi \quad (2.27)$$

Así, la fracción molar de la sustancia i , representada por y_i , en función del avance de reacción, es la relación entre los moles de la sustancia i y los moles totales de la reacción.

$$y_i = \frac{n_i}{n} = \frac{n_{i_0} + v_i \xi}{n_0 + v \xi} \quad (2.28)$$

2.6.2 Fracciones molares de reacciones simultáneas

Cuando dos o más reacciones independientes se desarrollan simultáneamente, un segundo subíndice, indicado por j , se utiliza como índice de reacción. El avance de la reacción se representa por ξ_j . Los números estequiométricos tienen doble subíndice para identificar la asociación de la sustancia i y la reacción j . Así, v_{ij} simboliza el factor estequiométrico de la sustancia i en la reacción j . La ecuación general análoga a la Ecuación (2.22) para reacciones simultáneas es:

$$dn_i = \sum_j v_{i,j} d\xi_j \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2.29)$$

La integración desde $n_i = n_{i_0}$ y $\xi_{ij} = 0$ a un estado arbitrario n_i y ξ_j es:

$$n_i = n_{i_0} + \sum_j v_{i,j} \xi_j \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2.30)$$

La sumatoria de todas las sustancias en una reacción es:

$$n = \sum_j n_{i_0} + \sum_i \sum_j v_{i,j} \xi_j = n_0 + \sum_j (\sum_i v_{i,j}) \xi_j \quad (2.31)$$

El número estequiométrico total de la reacción j , está definido por:

$$v_j \equiv \sum_i v_{i,j} \quad (2.32)$$

De dónde

$$n = n_0 + \sum_j v_j \xi_j \quad (2.33)$$

Con la combinación de las Ecuaciones (2.30) y (2.33), se obtiene la fracción molar de la sustancia i en función del avance de reacción ξ_j .

$$y_i = \frac{n_{i_0} + \sum_j v_{i,j} \xi_j}{n_0 + \sum_j v_j \xi_j} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2.34)$$

2.6.3 Entalpía o calor de reacción

En procesos de sistemas cerrados la transferencia de calor es igual al cambio de entalpía [13]. Por consiguiente, la entalpía se puede calcular a partir de la capacidad térmica por medio de la ecuación:

$$dH = C_p dT \quad (2.35)$$

$$\Delta H = Q = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (2.36)$$

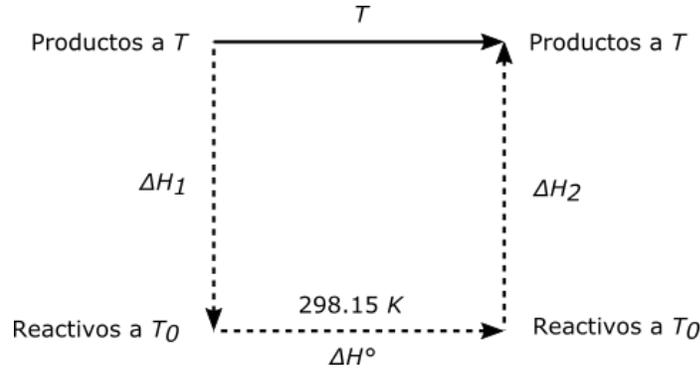
Esto es correcto para gases ideales, y aproximadamente correcto para gases reales a baja presión y alta temperatura. La evaluación de la integral (2.36) requiere conocer la dependencia de la capacidad térmica sobre la temperatura. Esta dependencia generalmente viene dada por una ecuación empírica de la forma:

$$C_p^\circ = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \quad (2.37)$$

Los valores de las constantes A , B , C , D , y E son tabulados en tablas en las referencias para los gases orgánicos e inorgánicos [13][15]. El diferencial $dH = C_p dT$ solo tiene en cuenta los cambios de temperatura y no considera el cambio en la entalpía molar. Por lo tanto, para determinar ΔH° dependiente de la temperatura se emplea el hecho de que la entalpía es una propiedad de estado: el cambio de entalpía molar está determinada inequívocamente por su estado; es decir, el cambio en la entalpía es independiente de la trayectoria. La entalpía de reacción se puede calcular a cualquier temperatura T a partir de la representación de la Figura 2-6. Inicialmente, se obtiene la entalpía estándar a la temperatura de referencia de 298.15 K o 25 °C; posteriormente, la reacción es desarrollada

bajo condiciones estándar para obtener los productos. Finalmente, los productos se vuelven a llevar a la temperatura del sistema T .

Figura 2-6: Ruta de cálculo de ΔH_T^o



De la figura ΔH_1 y ΔH_2 son iguales a:

$$\Delta H_1 = - \int_{T_{\text{reactivos}}}^{298.15} \sum v_i (A_i + B_i T + C_i T^2 + D_i T^{-2} + E_i T^3) dT \quad (2.38)$$

$$\Delta H_2 = \int_{298.15}^{T_{\text{productos}}} \sum v_i (A_i + B_i T + C_i T^2 + D_i T^{-2} + E_i T^3) dT \quad (2.39)$$

La suma de las tres trayectorias de la Figura 2-6 es igual a:

$$\Delta H_T^o - \Delta H_R^o = \int_{T_R}^T \Delta C_P^o dT \quad (2.40)$$

Donde ΔH_T^o es la entalpía estándar a una temperatura T , y ΔH_R^o es la entalpía estándar a la temperatura de referencia T_R . Las entalpías a la temperatura de referencia 298.15 K se encuentran en tablas de las referencias [13][15] para los principales gases. La Ecuación (2.40) se expresa convenientemente para cálculos como:

$$\Delta H_T^o = \Delta H_R^o + \int_{T_R}^T \Delta C_P^o dT \quad (2.41)$$

La evaluación de la integral de la Ecuación (2.41) se logra mediante la sustitución de C_P de la Ecuación (2.37) que está en función de la T . Para los límites de temperatura entre T_R y T , el cambio de entalpía es igual a:

$$\Delta H_T^o = \Delta H_R^o + \Delta A(T - T_R) + \frac{\Delta B}{2}(T^2 - T_R^2) + \frac{\Delta C}{3}(T^3 - T_R^3) + \frac{\Delta D}{4}(T^4 - T_R^4) + \frac{\Delta E}{5}(T^5 - T_R^5) \quad (2.42)$$

Finalmente, la entalpía de estado estándar de la reacción es igual a la suma de las entalpías de todas las especies afectadas por el número estequiométrico, es decir:

$$\Delta H^\circ = \sum_i \nu_i \Delta H^\circ_i = \sum_k \nu_k \Delta H^\circ_{\text{Productos}} - \sum_h \nu_h \Delta H^\circ_{\text{Reactivos}} \quad (2.43)$$

2.6.4 Energía libre de Gibbs

La dependencia de ΔG° sobre la temperatura está determinada por la Ecuación (2.43).

$$\frac{d\left(\frac{\Delta G^\circ_T}{RT}\right)}{dT} = -\left(\frac{\Delta H^\circ_T}{RT^2}\right) \quad (2.44)$$

Que es conocida como ecuación Van't Hoff [14][15][65]. Al integrar la Ecuación (2.44) desde la temperatura de referencia T_R , hasta la temperatura arbitraria T :

$$\int_{T_R}^T \frac{\Delta G^\circ_T}{RT} dT = \int_{T_R}^T \frac{\Delta H^\circ_T}{RT^2} dT \quad (2.45)$$

Siendo la solución:

$$\frac{\Delta G^\circ_T}{RT} - \frac{\Delta G^\circ_{T_R}}{RT_R} = \left(\frac{\Delta H^\circ_T}{RT}\right) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R}\right) \quad (2.46)$$

Y es expresada convenientemente como:

$$\frac{\Delta G^\circ_T}{RT} = \frac{\Delta G^\circ_{T_R}}{RT_R} + \left(\frac{\Delta H^\circ_T}{RT}\right) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R}\right) \quad (2.47)$$

La solución de la Ecuación (2.47) en función de la temperatura se realiza a través de la capacidad calorífica de los gases. Reemplazando ΔH°_T de la Ecuación (2.42), se obtiene la energía libre de Gibbs en función de la temperatura.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta G^\circ_T}{RT} = & \frac{\Delta G^\circ_{T_R}}{RT_R} + \frac{J}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R}\right) - \frac{\Delta A}{R} \ln\left(\frac{T}{T_R}\right) - \frac{\Delta B}{2R} \ln(T - T_R) - \frac{\Delta C}{6R} \ln(T^2 - T_R^2) - \frac{\Delta D}{12R} \ln(T^3 - T_R^3) - \\ & \frac{\Delta E}{20R} \ln(T^4 - T_R^4) \end{aligned} \quad (2.48)$$

Entonces es posible calcular ΔG_T^o a cualquier temperatura a partir de los parámetros de estado de referencia, ΔG_R^o , ΔH_R^o , T_R y las capacidades caloríficas. Con el valor ΔG_T^o es posible calcular la constante de equilibrio K , y así, finalmente despejar ξ de la ecuación de la constante de equilibrio.

2.7 Múltiples reacciones

Cuando el estado de equilibrio en un sistema depende de dos o más reacciones químicas independientes, la composición de equilibrio se puede encontrar mediante una extensión directa de los métodos desarrollados para reacciones individuales. Se puede modelar el equilibrio de un sistema en el que ocurren múltiples reacciones simultáneamente aplicando la restricción de la constante de equilibrio a cada reacción individualmente.

La solución de los sistemas de ecuaciones en equilibrio requiere métodos numéricos debido a que siempre se tendrán ecuaciones no lineales. El método numérico de Newton-Raphson descrito en el Apéndice A [79][80], tiene la ventaja de que tiene buena velocidad de convergencia, y se puede generalizar para la solución de sistemas de ecuaciones no lineales.

2.8 Estimación experimental de la vida media

A continuación se describe el análisis estadístico para datos de pruebas de envejecimiento acelerado térmicamente. El objetivo es obtener una estimación significativa de los parámetros fundamentales de confiabilidad, a partir de procedimientos de pruebas para la estimación experimental de la vida útil de los sistemas de aislamientos [78].

La ecuación de Arrhenius da la constante de reacción química en función de la temperatura [87][89]. En teoría de confiabilidad, la característica de vida, que es representada por L , es inversamente proporcional a la constante de velocidad k . Al aplicar la relación inversa a la ecuación de Arrhenius (2.14) se obtiene:

$$L = \frac{1}{A} e^{\left(\frac{E_a}{RT}\right)} = B e^{\left(\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (2.49)$$

donde:

L representa el estadístico de la vida media.

T representa los valores de temperatura en grados Kelvin.

E_a es la energía de activación.

B es otra constante característica del modelo.

R es la constante de los gases

Los constantes B y E_a se estiman ajustando la Ecuación (2.48) a los datos experimentales por medio del método de mínimos cuadrados [87][89][92]. La transformación lineal de la Ecuación (2.48) se muestra a continuación.

$$\ln(L) = \left(\frac{E_a}{R}\right)\frac{1}{T} + \ln(B) \quad (2.50)$$

La Ecuación (2.50) tiene la forma de una ecuación lineal donde:

$\ln(L)$ es variable independiente

E_a/R es la pendiente de la ecuación lineal

$1/T$ es la variable dependiente

$\ln(B)$ es la constante independiente

Para cualquier temperatura de prueba de envejecimiento, los tiempos de vida hasta la falla se distribuirán alrededor de una media estadística. Donde, la vida media, tiempo medio a la falla, se define matemáticamente como [89][90][92]:

$$L_{media} = \int_0^{\infty} tf(f)dt \quad (2.51)$$

La relación entre la vida media y la temperatura se determina a través de la regresión lineal de la Ecuación (2.52) considerando que $y_i = \ln(L_{media_i})$ y $x_i = (1/T_i)$.

Donde

$$y_i = ax_i + b \quad (2.52)$$

$$\hat{a} = \frac{N \sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum(X^2) - (\sum X)^2} \quad (2.53)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum Y - b(\sum X)}{N} \quad (2.54)$$

El índice de correlación en el método de mínimos cuadrados se calcula mediante:

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n}}} \quad (2.55)$$

2.9 Síntesis

El cálculo de la energía de activación permite realizar seguimiento del avance de las reacciones de descomposición. Esto ofrece la oportunidad de la formulación de modelos térmicos para predecir la velocidad de reacción en función de la temperatura siempre que se tenga el conocimiento de la composición química.

La correlación entre la energía de activación y la concentración de los diferentes tipos de gases comprende una temperatura de equilibrio de reacción, ya que cada gas requiere de una energía de activación específica para romper los enlaces químicos.

Se estableció la diferencia entre la energía libre de Gibbs de activación ΔG^\ddagger y la energía de activación experimental E_a en la ecuación de Arrhenius. La energía libre de activación ($\Delta G^\ddagger = \Delta H^\ddagger - T\Delta S^\ddagger$) tiene tanto una componente de entalpía como una componente de entropía, mientras que la energía experimental de activación ($E_a = \Delta H^\ddagger + RT$) tiene solo una componente de entalpía, ya que la componente de entropía está implícita en el término preexponencial A de la ecuación de Arrhenius. La ecuación de Arrhenius surge de estudios empíricos, ha sido ampliamente utilizada en estudios de degradación de sistemas de aislamientos. En los estudios experimentales, los coeficientes del modelo térmico se calculan ajustando la ecuación de Arrhenius a los datos experimentales a través de modelos estadísticos.

Capítulo III

3. Modelo cinético-químico aplicado al transformador inmerso en aceite

En este capítulo se presenta el desarrollo de un nuevo método de diagnóstico del transformador sustentado sobre la teoría de la cinética-química. Basado en el concepto de la energía de activación de las reacciones químicas, se elaboró el modelo térmico para calcular la temperatura de falla en función de los valores de los gases residuales en el aceite. Para esto, la temperatura necesaria para el desarrollo de la reacción, energía de activación, es utilizada como indicador de la severidad de la falla.

3.1 Introducción

El diagnóstico de transformadores, especialmente en los de potencia, es un asunto prioritario para las empresas de transmisión y distribución de energía. Consecuentemente, la aplicación de esfuerzos eléctricos, magnéticos o térmicos por encima de los valores nominales conduce a la degradación prematura del transformador; y posiblemente, causará su falla anticipada [7]-[12].

En consideración a la enorme inversión que representa la adquisición de un nuevo transformador de potencia y el tiempo de retraso en el proceso de compra, que puede tomar más de un año entre el pedido, construcción y entrega; es indispensable implementar programas de mantenimiento soportado en un monitoreo adecuado que garantice la continuidad en el suministro de energía. Por supuesto, el éxito del sistema de monitoreo del transformador depende de la selección de los parámetros de medida, procedimiento de los ensayos, procesamiento de los resultados y de la efectividad del método de diagnóstico.

Cuando el transformador está operando en condiciones nominales, somete al aislamiento a un proceso de degradación lenta y continua. Sin embargo, el proceso de degradación puede acelerarse abruptamente debido a una cantidad mayor de energía disipada por una falla eléctrica o térmica en los devanados; así como, corrientes circulantes y descargas entre partes activas y no activas. La degradación del aislamiento se evidencia físicamente en la oxidación del aceite aislante, menor solubilidad, color y aumento de partículas de lodo, ver figura 3-1.

Figura 3-1: Descomposición del aceite aislante en transformadores



3.2 Determinación de las variables de esfuerzo y cuantificadores de degradación

Como se presenta en la sección 1.6.1, la variable de esfuerzo que se debe aplicar en los ensayos de envejecimiento es la temperatura. El calor generado por el funcionamiento del transformador, temperaturas externas y las de fallas internas; afectan negativamente las propiedades térmicas y aislantes del equipo reduciendo su vida útil.

La cuantificación de la degradación se realiza a través del análisis de gases residuales producidos por la descomposición del aceite. Las principales funciones del aceite son el control térmico y aislamiento eléctrico; adicionalmente, un beneficio bien aprovechado por la industria e investigadores es el hecho de que el aceite está en contacto directo con las partes activas del transformador. Esto proporciona la oportunidad de examinar el aceite para identificar indicios o residuos derivados de fallas, como gases residuales por descomposición térmica. La presencia de una falla eléctrica o térmica conlleva al aumento en las concentraciones de hidrocarburos de menor peso molar, y son conocidos como gases residuales disueltos en el aceite.

El aceite mineral ha sido el aislamiento más efectivo debido a sus excelentes propiedades dieléctricas, capacidad para disipar el calor y su relativo bajo costo.

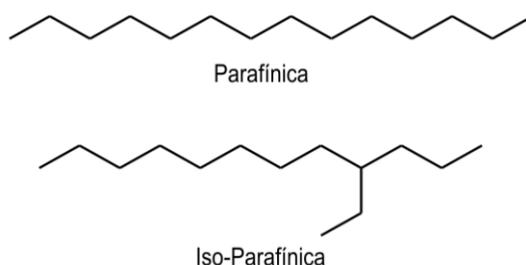
3.2.1 Aceite mineral

El aceite mineral ha sido ampliamente utilizado en los sistemas de aislamiento de equipos de alta tensión y potencia, tales como reactores, transformadores, capacitores etc., lo convierten en la opción más utilizada por su alta relación entre los beneficios y los costos. El aceite aislante, y en especial el aceite mineral en combinación con el papel de celulosa, proporcionan un medio adecuado de aislamiento entre los conductores de los devanados y las partes no activas del transformador. Adicionalmente, el aceite en los transformadores es utilizado como medio de conducción del calor generado en la parte activa para disiparse en los radiadores. El aceite mineral se ha mantenido como la opción más popular en los sistemas de aislamiento y refrigeración en equipos de alta potencia. A través de los años, se han producido y comercializado otros tipos de aceites aislantes, por ejemplo, aceites vegetales, los cuales tienen gran interés en la industria por su biodegradabilidad y mayor punto de inflamación [8]. Actualmente, debido a las protecciones ambientales, la utilización de aceite mineral está sujeto a requisitos de manipulación y tratamiento de residuos [82].

El aceite mineral se obtiene mediante el refinado, reformado y de la mezcla de productos del petróleo con otros hidrocarburos y aditivos. En el aceite mineral se encuentran dos principales grupos de compuestos, estos dependen de la estructura que los conforman: parafínica y nafténica [8][82]. Las moléculas de estructura parafínica, pertenecen al grupo de hidrocarburos alcanos que tienen la fórmula C_nH_{2n+2} [82], donde n es el número de átomos de carbono. Parafínica, o hidrocarburo de parafina, es el nombre técnico de los alcanos; aunque, específicamente se refiere a los alcanos de cadena lineal [8][87], en los casos donde poseen ramificaciones, es decir, isoalcanos son llamados isoparafinas. Estos dos tipos de estructuras son representados en la Figura 3-2.

Las moléculas nafténicas tienen estructuras de alcanos cíclicos. La estructura del anillo cíclico, puede contener de cinco a siete átomos de carbono, siendo el anillo de seis átomos el más común.

Figura 3-2: Representación de las estructuras parafínicas del aceite mineral



Los compuestos nafténicos tienen mejores propiedades a baja temperatura que las parafínicas; adicionalmente, también son mejores disolventes para los productos de oxidación [82]. Sin embargo, se encuentra en menor proporción que los compuestos parafínicos [8][82]. En la Figura 3-3 se muestran algunas representaciones típicas de las estructuras nafténicas.

Figura 3-3: Representación de la estructura de algunos cicloalcanos [82]



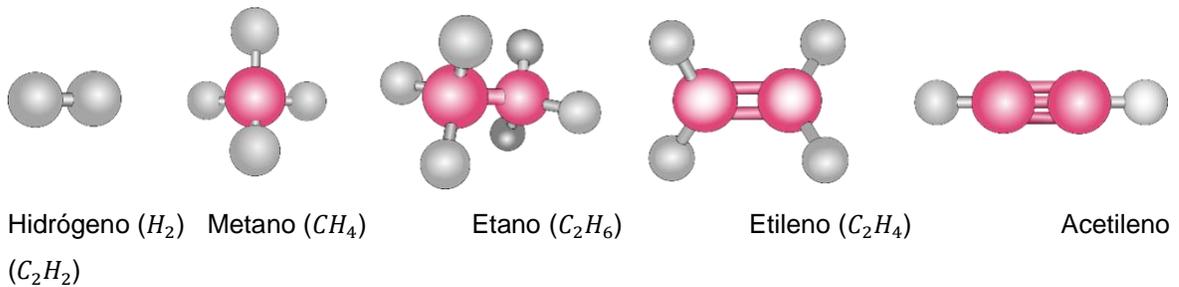
La distinción del aceite aislante entre nafténico o parafínico, estriba en la composición dominante en el aceite. Si el compuesto del aceite contiene entre 56% y 65% de parafina ligada con carbono, el aceite se designa como parafínico. Si contiene entre 42% y 50% de parafina ligada con carbono, el aceite se designa nafténico. Los aceites entre estos porcentajes se consideran intermedios [8].

3.2.2 Descomposición del aceite aislante

En el diagnóstico por análisis de gases disueltos, el transformador puede ser considerado como un reactor químico, donde se desarrollan reacciones entre los compuestos orgánicos e inorgánicos presentes dentro del transformador: hidrocarburos del aceite, papel de celulosa, cobre de los conductores, etc. La energía requerida para llevar a cabo las reacciones tiene su origen en las pérdidas de potencia dentro del transformador en forma de calor generado por la operación normal, pérdidas en cobre y pérdidas en el núcleo; o por la energía térmica puntual originada por condiciones anormales debido a una falla. La

tasa de reacción química impulsada por las energías de las fallas se desarrolla más rápido debido a que se manifiestan a temperaturas más altas. Estas reacciones químicas cambian la estructura molecular rompiendo y formando nuevos enlaces entre los átomos de los reactivos, principalmente de los hidrocarburos, originando productos de menor peso molar. Los principales productos finales de la descomposición de las moléculas de aceite se muestran en la Figura 3-4.

Figura 3-4: Productos finales de la descomposición del aceite



Los productos de la reacción química son medibles a través de procesos como la cromatografía de gases, lo que permite realizar correlaciones entre la energía de la reacción y las cantidades de productos finales. Estas correlaciones presentan la oportunidad de desarrollar herramientas útiles para la industria e investigadores que buscan valorar el estado del transformador.

3.3 Ensayos de envejecimiento acelerado de transformadores inmersos en aceite

Los ensayos experimentales de envejecimiento acelerado de transformadores inmersos en aceite fueron desarrollados por el Grupo de Investigación en Redes de Distribución y Potencia (GREdyP), en asociación con CODENSA (Empresa de energía de Bogotá) y el Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales (LABE) de la Universidad Nacional en la sede Bogotá [96].

A continuación, se enumeran los objetivos experimentales que se desean alcanzar.

3.3.1 Objetivos de los ensayos de envejecimiento

- Crear las condiciones necesarias para la aplicación del esfuerzo térmico en los escenarios planificados en condiciones controladas.
- Elevar la temperatura de punto caliente de los transformadores para generar degradación acelerada de los componentes del aislamiento.
- Registrar las mediciones de las variables de esfuerzo térmico, cuantificadores de degradación y factores de control.

Los ensayos de envejecimiento se llevaron a cabo en dos etapas. La primera comprende el diseño y construcción de la cámara de envejecimiento en el Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales (LABE). La segunda etapa corresponde al desarrollo de los ensayos de envejecimiento y la evaluación de degradación del aislamiento.

3.3.2 Construcción de la cámara de ensayos de envejecimiento

La cámara con dimensiones de 2mx2mx2m requiere la incorporación de una capa de fibra de vidrio como aislamiento térmico para evitar la pérdida de calor. La fibra de vidrio está protegida con láminas de aluminio que ayudan a mantener la temperatura homogénea dentro de la cámara como se muestra en las fotografías de la Figura 3-5.

Figura 3-5: Soporte estructural de la cámara de envejecimiento



La fuente de calor que proporciona el incremento de temperatura dentro de la cámara está conformada por un banco de resistores como se muestra en la Figura 3-6. La homogeneidad de la temperatura dentro de la cámara es alcanzada con la ayuda de un motor centrífugo instalado en la parte superior de la cámara, Figura 3-7. El motor distribuye

el aire caliente que se acumula en la zona alta direccionándolo uniformemente dentro de la cámara.

Figura 3-6: Fuente resistiva de calor



Figura 3-7: Instalación del motor centrífugo



Se realizaron mediciones en diferentes puntos dentro de la cámara para verificar la uniformidad en la distribución del calor. Los resultados de las mediciones se muestran en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Temperaturas dentro de la cámara

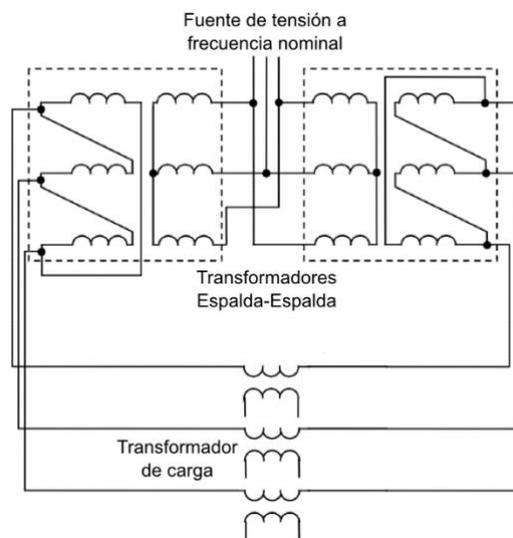
Motor centrífugo (medición a 1.6 m)	Zona media de la cámara (medición a 0.9 m)	Banco de resistencias (medición a 0.4 m)
94.48 °C	95.41 °C	96.66 °C

Para evaluar la homogeneidad de la temperatura se mide el diferencial entre el punto más caliente y el punto más frío dentro de la cámara; es decir, entre las posiciones del banco

de resistencias y el motor centrifugo. Esta diferencia es de 2.18 °C que equivale al 2.28% de variación. La recirculación del aire dentro de la cámara no es afectada por obstáculos y la construcción geométrica de la cámara (con dimensiones 2mx2mx2m) asegura que no se presentaran diferenciales de temperatura en el plano horizontal. Por lo que se concluye que la temperatura dentro de la cámara se distribuye de forma casi homogénea.

Para llevar el transformador a la condición de sobrecarga se utilizó el método de espalda-espalda. El diagrama de conexiones se muestra en la Figura 3-8.

Figura 3-8: Diagrama de conexiones del método de espalda-espalda



El método espalda-espalda, requiere que las tensiones secundarias estén en fase; además, ambos transformadores deben tener la misma relación de transformación. Para sobrecargar los transformadores bajo prueba, se utilizan transformadores en el lado de alimentación con una potencia nominal del doble de potencia de los transformadores bajo prueba. Con esta configuración es posible generar una sobrecarga del 200% de la potencia nominal en periodos de tiempo prolongados. La Figura 3-9 muestra los transformadores conectados en la configuración espalda-espalda.

La construcción de la cámara de envejecimiento asegura el control en la aplicación del esfuerzo térmico y registro de las mediciones sin la afluencia de factores externos que podrían afectar el proceso estudiado. Por lo tanto, la cámara garantiza los principios de replicación y control detallados en la sección 1.6.2.

Figura 3-9: Carga simulada con el método espalda-espalda



A continuación, se muestra el proceso de envejecimiento acelerado llevado a cabo a los 15 transformadores

3.3.3 Desarrollo de los ensayos de envejecimiento acelerado

Se seleccionó un tamaño de muestra de 15 transformadores de distribución inmersos en aceite mineral de entre 75 kVA y 150 kVA. Si bien los transformadores son de diferente potencia, la física de degradación del aislamiento, así como las pruebas de análisis de gases disueltos son iguales, siempre y cuando el tipo de aceite sea el mismo [8][26], en este caso aceite mineral. Sin embargo, se sabe de la literatura que los ensayos experimentales repetitivos sobre el mismo tipo de elementos no son iguales [94][95]. La dispersión de las mediciones está inversamente relacionada con la fiabilidad del equipo de medida, errores operativos, perturbaciones por factores externos, o falta de homogeneidad de los elementos bajo prueba.

Por lo tanto, las unidades de la muestra deben cumplir con el criterio de uniformidad; asimismo, el control local y vigilancia durante los ensayos minimiza la dispersión de las mediciones. Por lo tanto, el tamaño de la muestra puede ser pequeño siempre que acate los criterios ya mencionados. El concepto expuesto cumple con la teoría de la estadística para pequeños números de observaciones [95], la cual establece que al disminuir la desviación de los datos aumenta la precisión de la medida estadística.

Previo a los ensayos de envejecimiento se realizaron pruebas a los transformadores para evaluar el estado inicial de los transformadores y niveles de degradación de los aislamientos. Los resultados de las mediciones de la generación de gases se muestran en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Resultados de la cromatografía de gases

Nro. Equipo	Cromatografía de Gases en ppm					
	H_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	GCD
1	117.31	12.25	0	1.83	0	275.23
2	0	0	0	0.6	0	0.6
3	0	83.18	6.09	124.74	0	434.18
4	0	9.57	48.89	6.07	0	420.12
5	7.1	21.96	105.53	37.26	3.09	654.4
6	0	0	0.74	0	0	177.98
7	1182.97	118.1	10.38	11.53	0	1433.88
8	97.05	25.98	0.56	8.88	0	170.51
9	0	0	0.82	0	0	8.06
10	751.26	740.68	3.15	383.38	8.22	12415.41
11	9.85	7.1	6.22	2.32	0	364.96
12	874.87	606.09	29.18	216.08	3.49	7713.81
13	0	3.39	2.57	2	0	91.73
14	35733.18	7060.54	1.66	1671.36	0	44481.76
15	47.04	17.94	16.64	6.83	0	405.55

De los resultados, los transformadores con Nro. Equipo: 14, 7, 12 y 10, se hallaron con cantidades de gases combustibles por encima de los límites mínimos según el estándar [26] lo que indicaría presencia de fallas. Para realizar el diagnóstico de estos cuatro transformadores, se utilizó el método del Triángulo 1 de Duval debido a que es el método de mayor confiabilidad en la identificación y clasificación de fallas [26][27].

El método del Triángulo 1 de Duval es un método gráfico, y el análisis involucra el porcentaje relativo de los gases CH_4 , C_2H_4 y C_2H_2 en un arreglo de coordenadas sobre un triángulo equilátero, como se muestra en la Figura 3-10.

La Tabla 3-3 presenta el resumen de los resultados del diagnóstico de los cuatro transformadores con fallas. El transformador 10 presenta la condición más crítica con una falla térmica de 300 a 700 °C.

Figura 3-10: Diagnóstico de previo al proceso de envejecimiento

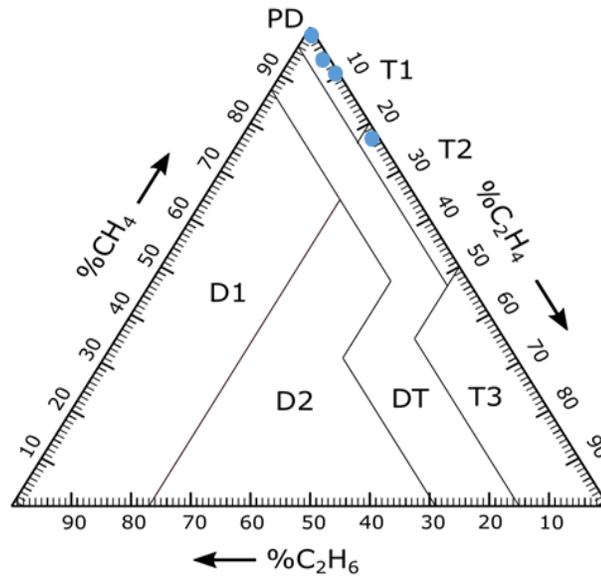


Tabla 3-3: Resultados del diagnóstico previo a los ensayos de envejecimiento

Nro. Equipo	Tipo de falla
14	Descargas parciales
7	Falla térmica menor de 300 °C
12	Falla térmica menor de 300 °C
10	Falla térmica entre 300 a 700 °C

El desarrollo de las pruebas se llevó a cabo bajo condiciones controladas de seguridad industrial y supervisión de las mediciones en todo momento. Un protocolo de prevención del riesgo y seguridad industrial fue implementado previo a las pruebas de cada transformador:

- Examinar las conexiones de los conductores activos y de los puntos de conexión a tierra.
- Verificar las barreras de seguridad y las distancias de aislamiento entre partes activas y las puestas a tierra, ver Figura 3-11.
- Identificar puntos calientes con la cámara termografía durante el desarrollo de los ensayos de envejecimiento, ver Figura 3-12.

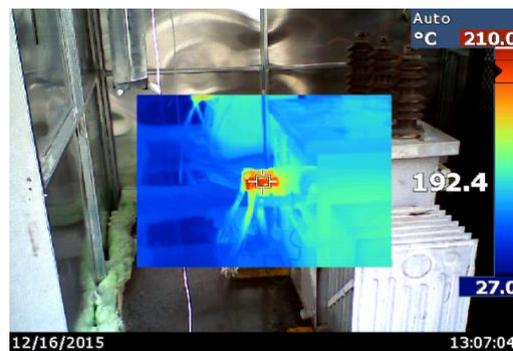
- Vigilar comportamientos extraños del transformador, tales como fugas de aceite, emisión de gases o cualquier otra condición que pudiera generar condiciones de riesgo.

Un principio intrínseco de los ensayos de envejecimiento que debe estar presente es no causar efectos impropios a los de envejecimiento normal. Esto es, el envejecimiento sólo debe acelerar la física de la falla, no debe cambiar la física de la falla [78][88]. En consideración a lo anterior, la aplicación de los esfuerzos se realizó de forma incremental en el tiempo desde el estado de operación normal, temperatura ambiente de 25 °C y carga nominal, hasta un estado de máximo sobre esfuerzo, temperatura ambiente de 95 °C y sobrecarga del 200%.

Figura 3-11: Proceso de envejecimiento



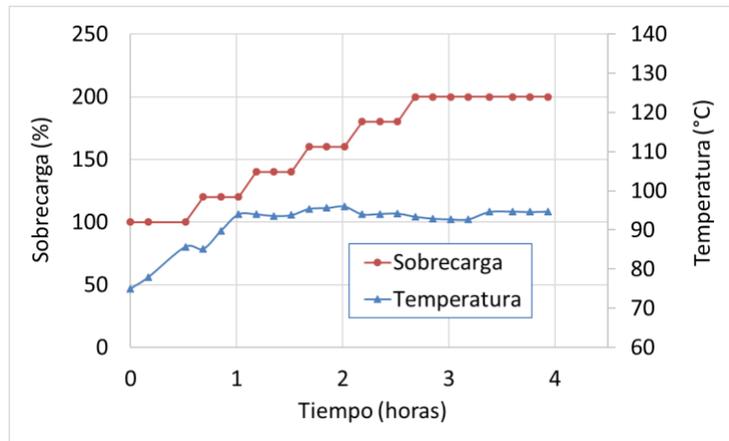
Figura 3-12: Control del envejecimiento



El aumento de carga al transformador se realiza en incrementos discretos del 20% de la carga nominal en intervalos de tiempo de 20 minutos hasta llegar al 200% de la carga nominal. La temperatura dentro de la cámara, que corresponde a la temperatura ambiente dentro del proceso, se incrementó de forma continua con el tiempo hasta los 95°C. En la

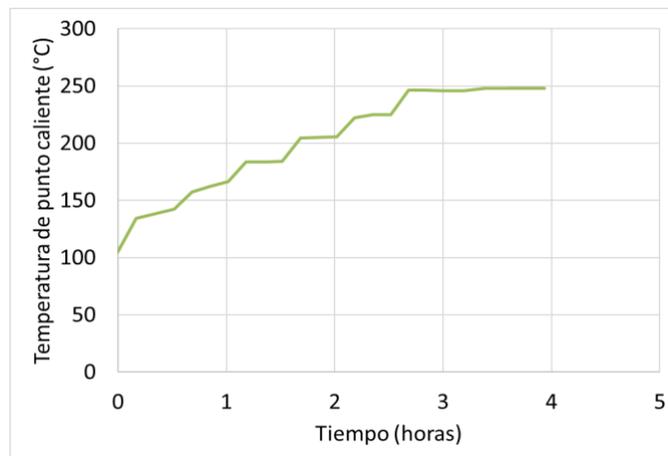
Figura 3-13, se muestra la evolución de las dos variables de esfuerzo en el tiempo a los que se sometió uno de los transformadores de la muestra de 75 kVA. El incremento de las variables de esfuerzo en el tiempo, tienen como propósito imitar el comportamiento transitorio del aumento de temperatura de punto caliente, y así no causar efectos impropios a los del envejecimiento normal.

Figura 3-13: Variables de esfuerzo en función del tiempo



Dada la relación entre el esfuerzo térmico y la degradación del aislamiento, el parámetro relevante para cuantificar el envejecimiento es la temperatura de punto caliente del transformador. La temperatura de punto caliente, θ_H , se calculó según el procedimiento detallado en el estándar IEEE Std C57.91 [102], el resultado dependiente de la temperatura y de la sobrecarga se muestra en la Figura 3-14.

Figura 3-14: Temperatura de punto caliente



Cada transformador fue sometido a diferentes niveles de esfuerzo, variando el tiempo de exposición a la sobrecarga y temperatura ambiente. El envejecimiento equivalente del transformador F_{EA} , es calculado utilizando la Ecuación (3.1). Los resultados para los 15 transformadores se muestran en la Tabla 3-4.

$$F_{EA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA,n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (3.1)$$

Donde

F_{EA} factor de envejecimiento equivalente para el período de tiempo total.

$F_{AA,n}$ factor de envejecimiento acelerado para el intervalo de tiempo, Δt_n .

n índice del intervalo de tiempo, Δt_n .

N número total de intervalos en el período.

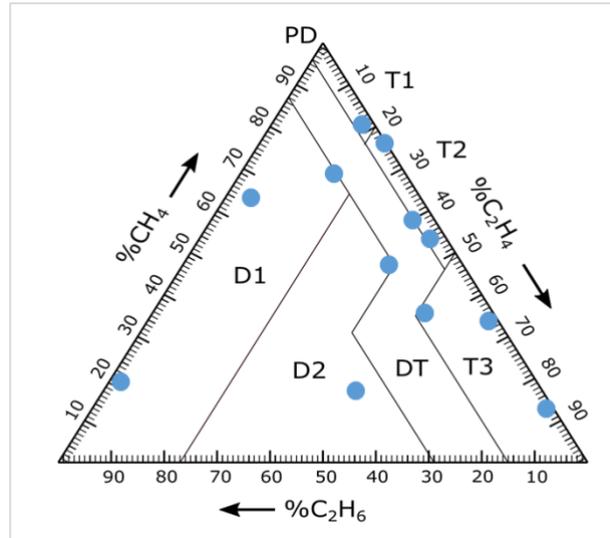
Δt_n intervalo de tiempo en horas.

Tabla 3-4: Resultados del factor envejecimiento acelerado F_{EA}

Nro. Transformador	F_{EA}
1	1168.4
2	1875.6
3	2665.8
4	3534.5
5	4304
6	4987.3
7	6971.9
8	8987.8
9	9005.1
10	10898
11	11278.2
12	11647.2
13	13108.1
14	13630.6
15	10898

Finalizado el experimento de envejecimiento acelerado, nuevamente se realizaron los diagnósticos utilizando el Triángulo 1 de Duval; y así, evaluar el nivel de degradación del transformador en función de los esfuerzos a los que fue sometido. Los resultados del método del Triángulo 1 de Duval se muestran en la Figura 3-15.

Figura 3-15: Diagnóstico de transformadores envejecidos



3.3.4 Conclusiones de los ensayos de envejecimiento

- Se diseñó e implementó la metodología para llevar a cabo los ensayos de envejecimiento acelerado de transformadores inmersos en aceite de forma exitosa.
- Los transformadores fueron sometidos a incrementos continuos de temperatura y sobrecarga, se observó que es necesario un tiempo en promedio de tres horas para lograr una temperatura de punto caliente de 250 °C.
- De los ensayos de envejecimiento acelerado, se logra ocasionar fallas de los tipos térmicos y eléctricos que son identificados por análisis de gases disueltos con la aplicación del método del Triángulo 1 de Duval.

3.4 Análisis e interpretación de resultados

Con base en la teoría cinética-química de las reacciones, es posible calcular la temperatura de la falla incipiente en el aislamiento; y así, la temperatura de la falla puede ser utilizada como indicador de la severidad de la falla. La relación entre la energía disipada por una falla y la concentración de los diferentes tipos de gases implica una temperatura de equilibrio diferente para cada reacción, debido a que cada isómero de gas requiere una cantidad de energía de activación diferente para romper y formar nuevos enlaces químicos. Las propiedades cinéticas de la descomposición del aceite en gases residuales y los

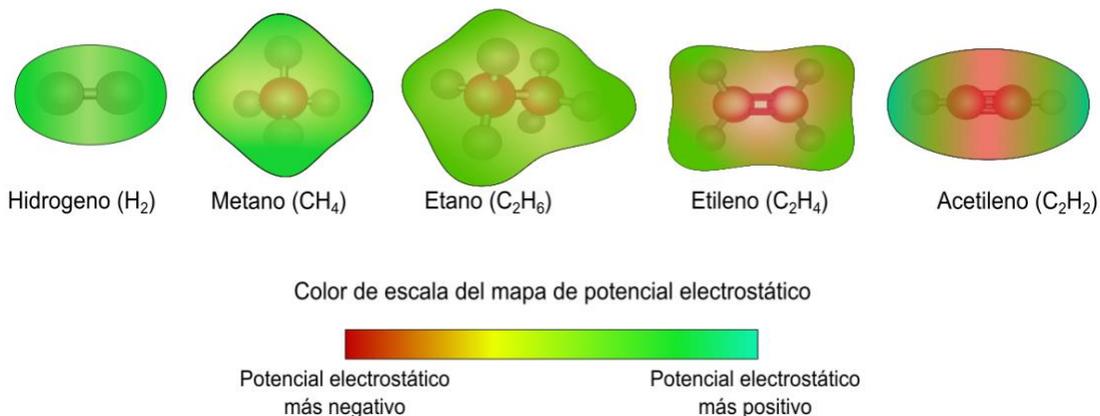
niveles de energía de activación, son aprovechadas para desarrollar el método de diagnóstico y valorar la severidad de la falla.

3.4.1 Indagación en los cuantificadores de degradación

La aplicación de energía en forma de calor al aceite, la cual es debido a pérdidas por operación normal, fallas eléctricas o térmicas, favorecen las reacciones de descomposición de las moléculas de aceite. Los subproductos o gases residuales derivados del proceso de descomposición del aceite son H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 y C_2H_2 ; ver Figura 3-16. Estos gases residuales permanecen disueltos en el aceite hasta alcanzar los límites de solubilidad, después de lo cual evolucionarán como gases libres o burbujas [8][11].

Cada tipo de enlace químico de la molécula, requiere un nivel diferente de energía para romper o formar un nuevo enlace químico [63][65]. Los mapas de potencial electrostático, también conocidos como mapas de energía potencial, ilustran la distribución de carga en la molécula, ver Figura 3-16. En el nivel más elemental, las fuerzas que gobiernan la estructura y las propiedades en los enlaces de los átomos, son las fuerzas de atracción entre cargas opuestas y las repulsiones entre cargas similares; es decir, entre protones y electrones. Los colores en el mapa de potencial indican el nivel en que los átomos en una molécula atraen partículas cargadas. La superficie en color rojo simboliza el potencial electrostático más negativo, y el azul se usa para superficies con el potencial electrostático más positivo. En conclusión, la mayor densidad de electrones entre los núcleos es lo que une a los átomos; por lo tanto, cuanto mayor es la densidad de electrones en la región entre los enlaces de las moléculas, más fuerte es el enlace.

Figura 3-16: Mapas de potencial electrostático



Al comparar las fuerzas y longitudes de los enlaces simples, dobles y triples del carbono-carbono, cuantos más enlaces mantienen juntos los dos átomos de carbono, más corto y fuerte es el enlace. El enlace triple del acetileno es más fuerte que el enlace doble del etileno; y a su vez, el enlace del etileno es más fuerte que el enlace simple carbono-carbono del etano [63][65].

La medición de los cambios de energía que se presenta durante la reacción química, se pueden realizar por medio de los fundamentos de termodinámica o cinética química. La termodinámica mide la energía relativa de los reactivos y productos cuando la reacción ha alcanzado el equilibrio, cinética se refiere a la velocidad o tasa a la que cambian las concentraciones de reactivos y productos. La diferencia entre la energía libre de los productos y la energía libre de los reactivos bajo condiciones estándar (a una concentración de 1M, a presión de 1 atm y temperatura de 25°C), se denomina cambio de energía libre de Gibbs, Ecuación (3.2) [63][65]:

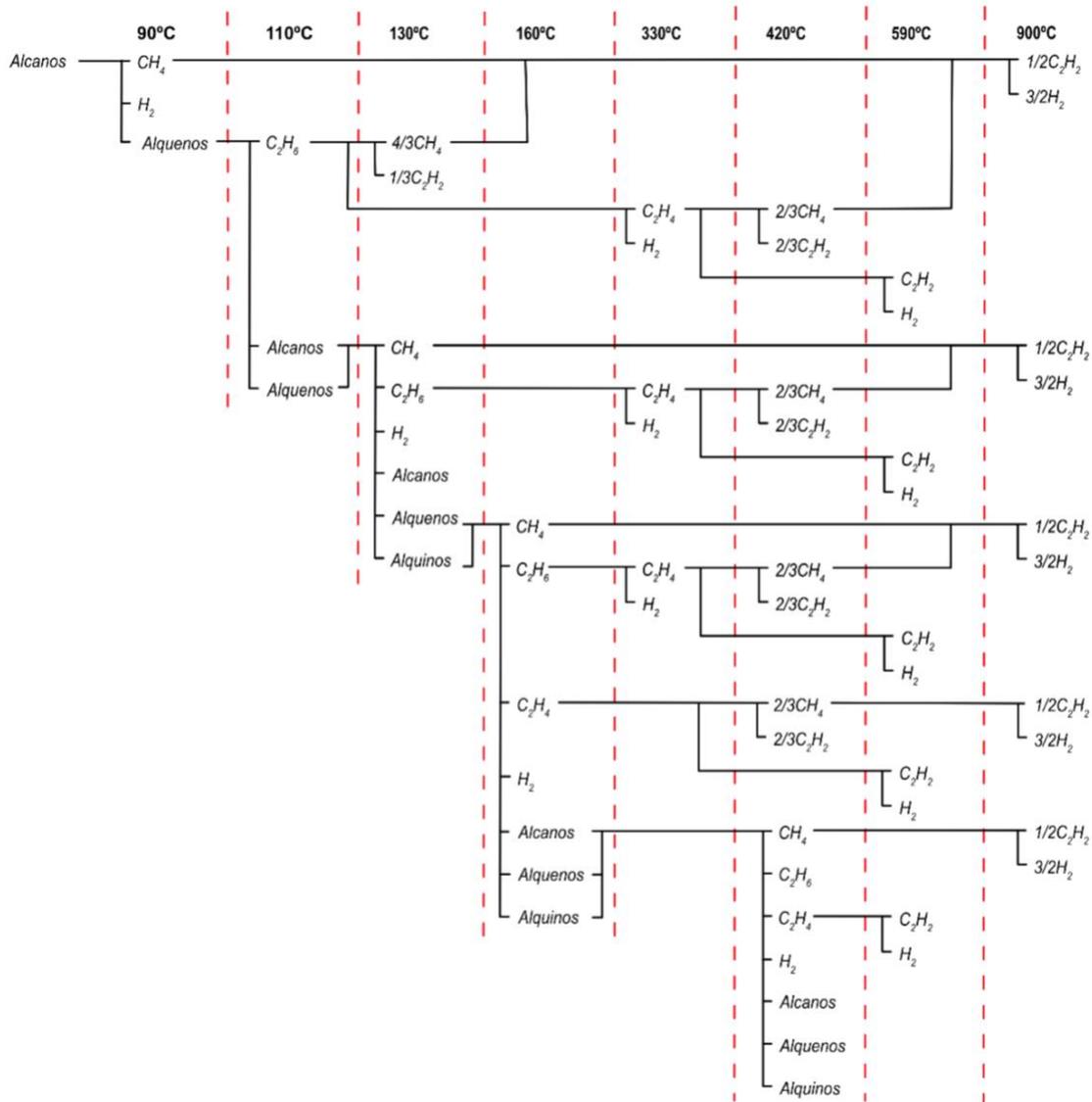
$$\Delta G^\circ = (\text{Energía libre de los productos}) - (\text{Energía libre de los reactivos}) \quad (3.2)$$

De la anterior ecuación, la energía libre de Gibbs tendrá valor negativo si los productos tienen energía menor que los reactivos; en otros términos, los productos son más estables que los reactivos. Es decir, la energía consumida por la disociación de los enlaces de los reactivos, es menor que la energía liberada en formación de los nuevos enlaces de los productos [63].

Si los enlaces que se forman en una reacción son más fuertes que los enlaces que se rompen, se libera energía al medio y la energía de Gibbs será negativa, y se llama reacción exotérmica. Si los enlaces que se forman son más débiles que los que se rompen, la energía de Gibbs será positiva y recibe el nombre de reacción endotérmica. La formación de cada uno de los gases H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 y C_2H_2 tienen dependencias únicas de la temperatura. Por ejemplo, la presencia de acetileno, la molécula con mayor número de enlaces, sugiere que se ha producido una falla eléctrica de alta temperatura [8][9]; la presencia de metano, molécula sin enlaces, está asociado principalmente a fallas térmicas o eléctricas de menor temperatura [8][9].

Cuando el aceite mineral se calienta a baja temperatura, los enlaces covalentes se rompen y ocurre inicialmente la deshidrogenación de los alcanos, dando origen a las primeras moléculas de alquenos (compuestos con enlaces dobles). En el aceite mineral la ruptura de los enlaces se refiere principalmente a la del alcano $C_{20}H_{42}$ para formar moléculas de menor peso molar con carbonos entre $C_1 - C_4$. En la Figura 3-17. se representa la estructura de la descomposición térmica del aceite mineral. De la figura se observa que los primeros gases en formarse son el metano y el hidrógeno, alrededor de los 90°C . [109].

Figura 3-17: Descomposición del aceite mineral, modificado de [109]



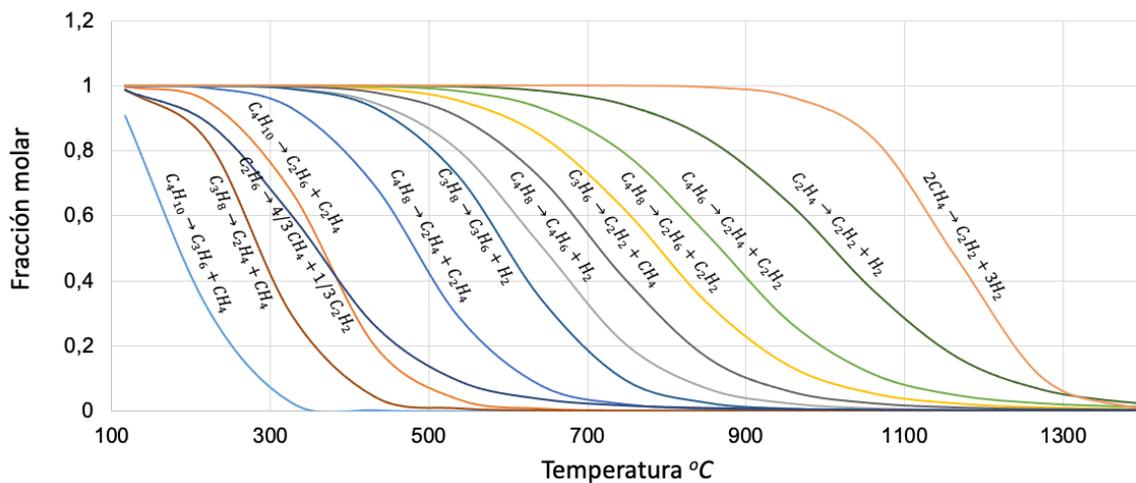
Con el aumento de temperatura, cerca de los 110°C , el etano es generado. Alrededor de los 130°C , inicia la deshidrogenación de los alquenos y surgen compuestos alquinos

(compuestos con enlaces triples) en proporciones muy bajas, como el acetileno. Los gases hidrógeno, metano y etano; son conocidos en la industria como gases de falla de baja temperatura [8][109]. A partir de los 160°C, se empiezan a generar las primeras trazas de etileno. A medida que aumenta la temperatura, la disociación de los enlaces van cambiando de compuestos de cadena larga, a disociaciones de cadenas más cortas; y a su vez, aumenta la formación de compuestos con enlaces cada vez más fuertes. A continuación, se representa la secuencia en la descomposición de los alcanos [19]:



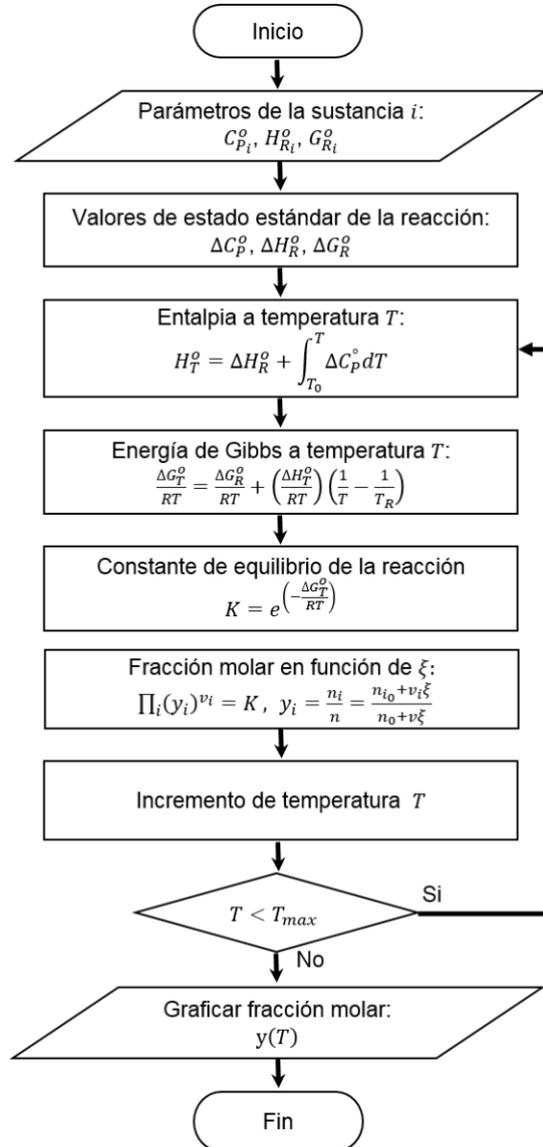
La Figura 3-18. muestra la descomposición simple de algunos reactivos en función de la temperatura. Como se observa en la figura, las primeras reacciones corresponden a la descomposición de alcanos los cuales la mayoría tienen enlaces simples. Al aumentar la temperatura, inicia las disociaciones de los alquenos para formar otros alquenos y alquinos los cuales requieren mayor energía para desarrollar la reacción.

Figura 3-18: Descomposiciones simples



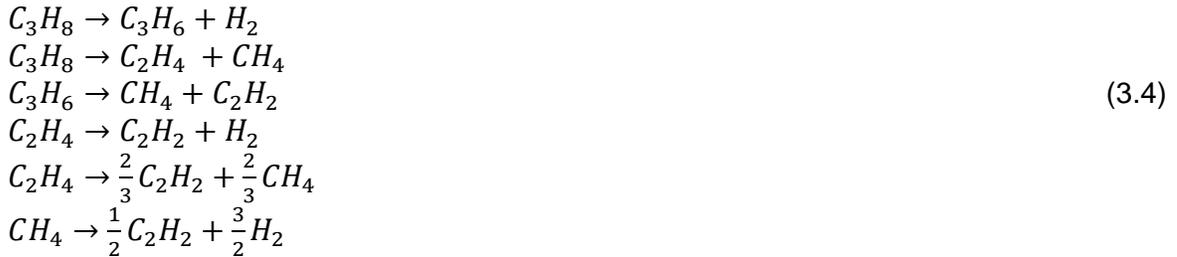
La Figura 3-19 muestra el algoritmo para calcular la descomposición de las reacciones en función de la temperatura.

Figura 3-19: Diagrama de flujo para calcular reacciones simples



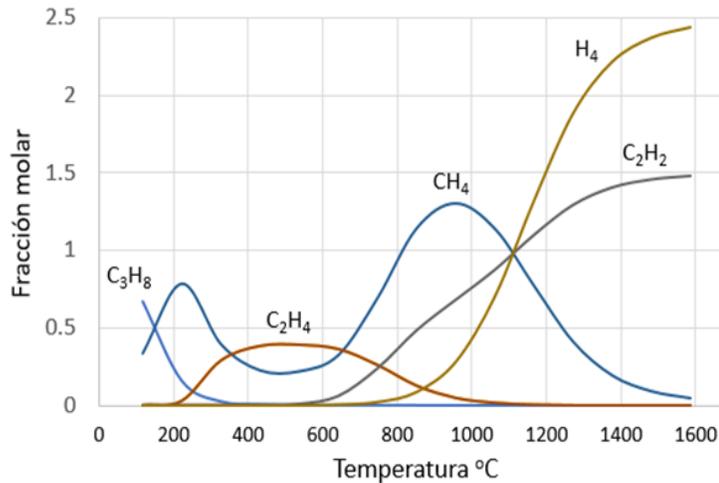
Desarrollar el cálculo de todas las reacciones de los compuestos presentes en el transformador para establecer un patrón de generación de gases sería una tarea imposible. Por ejemplo, el icosano $C_{20}H_{42}$ tiene 366319 isómeros [101]. Sin embargo, es posible estudiar la descomposición de algunos compuestos para establecer un perfil de formación de gases en función de la temperatura. Por ejemplo, al desarrollar la descomposición simultánea del propano C_3H_8 en todos los compuestos residuales, se tiene una

representación bastante clara sobre la formación de cada uno de los gases en función de la temperatura. A continuación, se presenta la estructura de descomposición simultánea del propano cuando ha alcanzado el estado de equilibrio térmico.



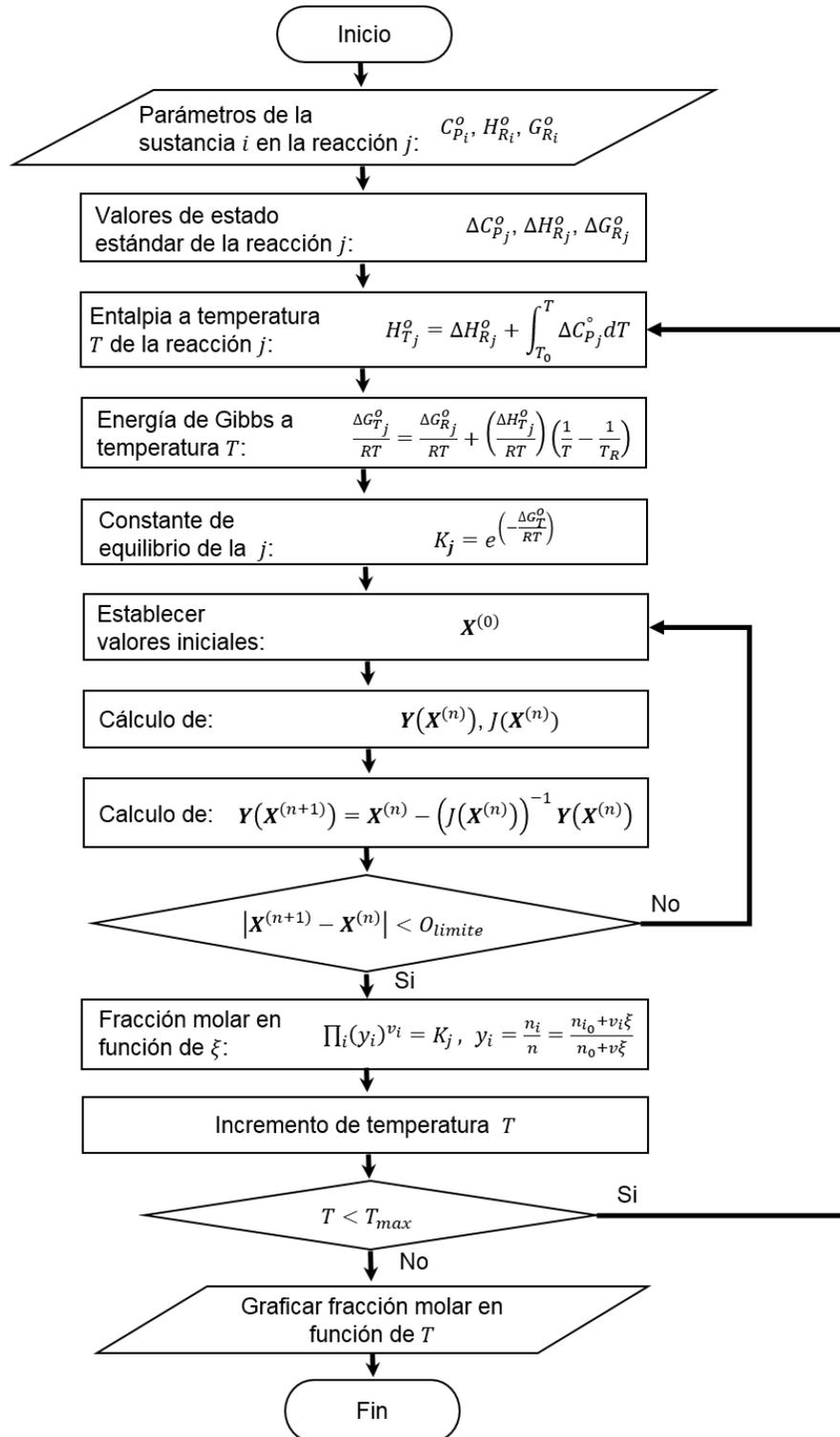
Como se puede apreciar en la Figura 3-20, las proporciones de los gases son diferentes en cada nivel de temperatura; en otras palabras, cada gas es dominante en diferentes niveles de temperatura.

Figura 3-20: Perfil de la descomposición térmica del C_3H_8



La Figura 3-21, presenta el algoritmo del cálculo de reacciones simultáneas [13][15]. El sistema de ecuaciones no lineales originado por la formulación de las constantes de reacción, se desarrolla utilizando el método de Newton-Raphson multivariado explicado en el Apéndice A [79][80].

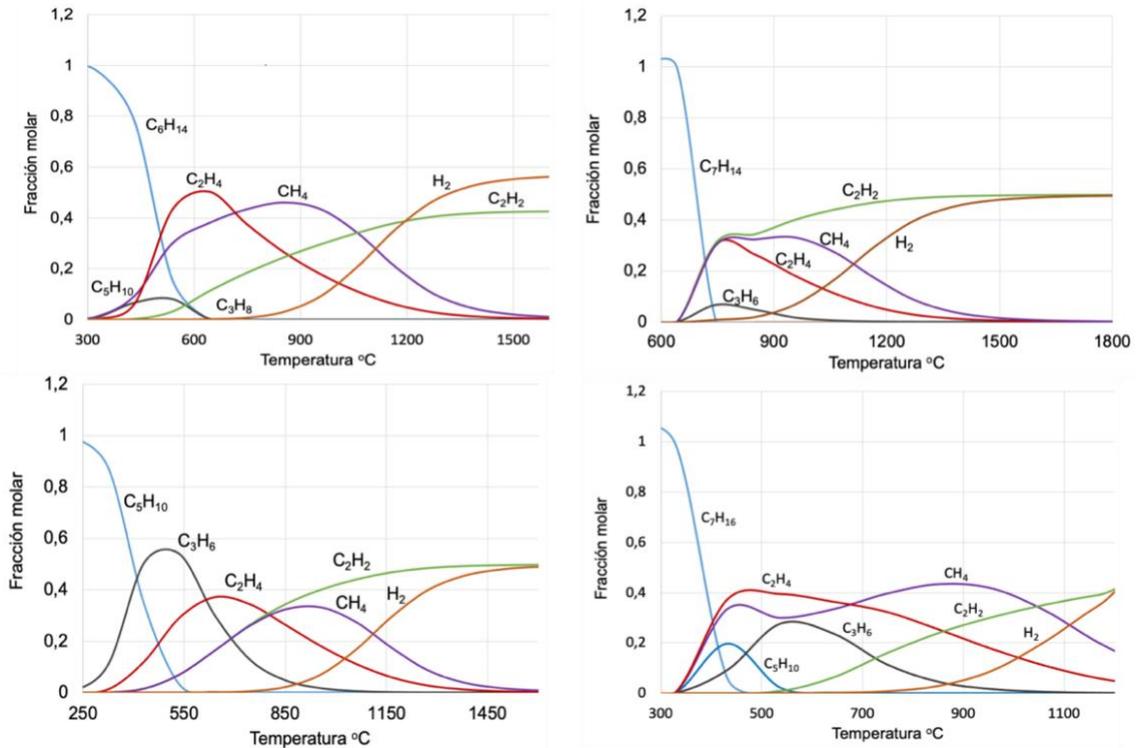
Figura 3-21: Diagrama de flujo para el cálculo de reacciones simultáneas



Este mismo procedimiento fue aplicado a diferentes moléculas obteniéndose diferentes perfiles de descomposición de los gases en función de la temperatura. Por ejemplo, en la

Figura 3-22 se presentan los perfiles de la descomposición de las moléculas C_7H_{16} , C_7H_{14} , C_6H_{14} y C_5H_{10} .

Figura 3-22: Descomposición térmica de C_7H_{16} , C_7H_{14} , C_6H_{14} y C_5H_{10} .



Presentado el panorama general de la relación entre la temperatura y las variables de cuantificación de la tesis, gases residuales, se procede a realizar el modelo cinético-químico del transformador.

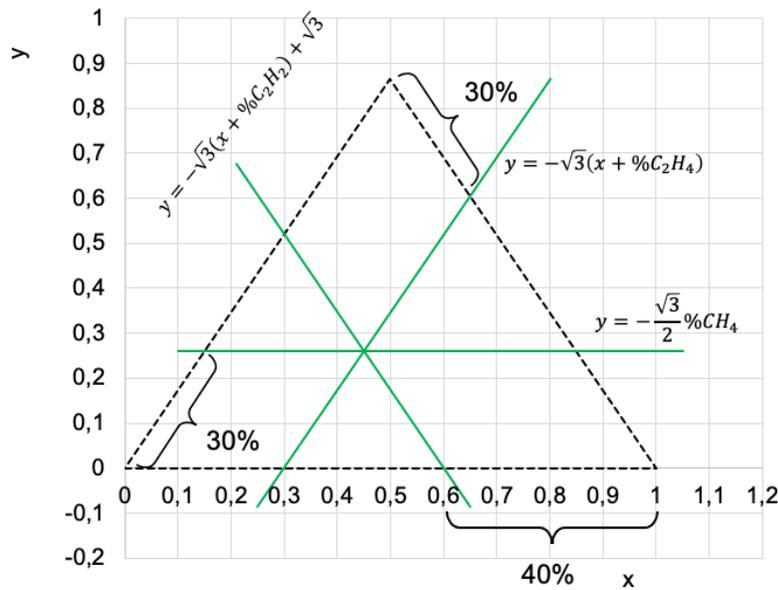
3.4.2 Modelo cinético-químico del transformador inmerso en aceite

Los diferentes perfiles de descomposición de los compuestos son utilizados para construir el método de severidad de falla. Por conveniencia del método desarrollado en la tesis se utiliza la estructura del Triángulo 1 de Duval con los mismos gases.

El desarrollo computacional del método propuesto en la tesis, el cual tendrá el nombre Método del Triángulo Térmico, se consiguió al llevar la representación gráfica del Triángulo

1 de Duval al plano cartesiano. Esto se logró con la transformación lineal del sistema de coordenadas de las tres variables $\%CH_4$, $\%C_2H_4$ y $\%C_2H_2$ del triángulo al plano cartesiano de 2 coordenadas, x y y . Para esto, se formularon ecuaciones lineales en función de los valores de los gases; por lo tanto, el punto de intersección de las ecuaciones lineales corresponde al punto de coordenadas cartesianas. La Figura 3-23 muestra la representación de las ecuaciones lineales para los valores de: $CH_4 = 30\%$, $C_2H_4 = 30\%$ y $C_2H_2 = 40\%$.

Figura 3-23: Transformación del sistema de coordenadas



La solución del sistema de ecuaciones en función de los tres gases queda definida por la matriz mostrada en la Ecuación (3.5).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & 0 & -1 \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \%CH_4 \\ \%C_2H_4 \\ \%C_2H_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 100 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} 100 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

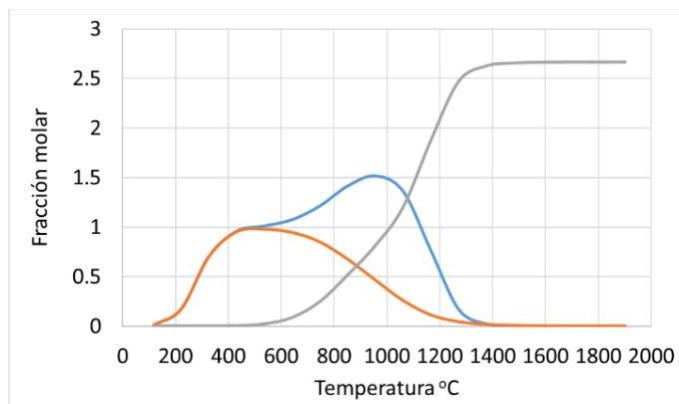
Los valores de los gases están dados en porcentajes en el que se debe cumplir la condición:

$$\%CH_4 + \%C_2H_4 + \%C_2H_2 = 100\% \quad (3.6)$$

Al graficar en el triángulo equilátero los perfiles de descomposición de diferentes moléculas de gases utilizando la Ecuación (3.5), se puede crear un mapa térmico en función de los gases residuales: metano, etileno y acetileno (CH_4 , C_2H_4 y C_2H_2). La Figura 3-24 muestra la descomposición de la siguiente reacción múltiple.

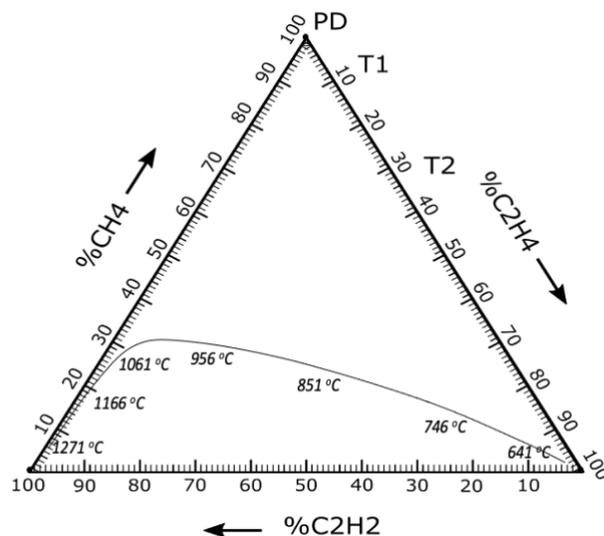


Figura 3-24: Descomposición del C_2H_4



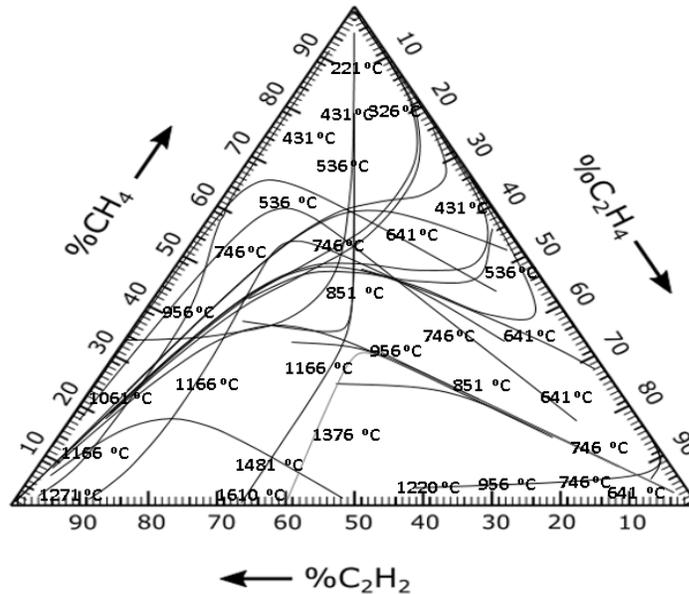
La representación en el triángulo equilátero con los correspondientes valores de temperatura se muestra en la Figura 3-25.

Figura 3-25: Descomposición del C_2H_4 en el triángulo equilátero



Al extender este mismo procedimiento a diferentes descomposiciones se obtiene un mapa térmico en función del metano, etileno y acetileno, ver Figura 3-26.

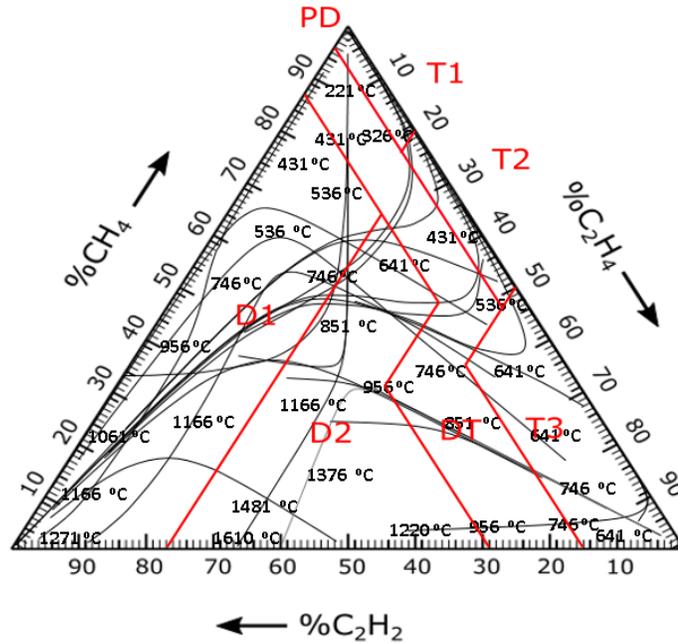
Figura 3-26: Mapa térmico de falla



La Figura 3.27 compara los resultados del mapa térmico contra las fronteras de las zonas de falla del Triángulo 1 de Duval [27]. Como se puede observar, los valores de temperatura hallados en el desarrollo del mapa térmico en la tesis, coinciden con los límites de temperatura para las fallas térmicas T1 y T2, falla menor a 300 °C y falla entre 300 y 700 °C respectivamente, establecidas por Duval [26][27]. Para la falla térmica de más de 700 °C, la coincidencia de los dos métodos se presenta con el aumento del acetileno, por encima del 13%.

Del mapa térmico se observa que el área de mayor temperatura está ubicada en la parte inferior del triángulo dentro de la zona D2 del Triángulo 1 de Duval, falla eléctrica de alta energía. Esto es, cuando la proporción de acetileno es dominante, alrededor de $C_2H_2=70\%$, $C_2H_4=30\%$ y CH_4 cerca de cero. Esto coincide con el conocimiento experimental acumulado de los ingenieros analistas, las fallas de mayor gravedad están ubicadas en el área inferior de la zona D2 del triángulo de Duval, Figura 3-27

Figura 3-27: Mapa térmico de falla y triángulo 1 de Duval



Debido a las múltiples reacciones en la descomposición del aceite mineral, se encuentran puntos en las trayectorias con diferentes temperaturas. La Figura 3-18 muestra como un gas en particular puede ser producido por diferentes descomposiciones en diferentes niveles de temperaturas. Por lo tanto, el mapa térmico en función de los tres gases se consigue a través del estadístico de valor esperado o valor medio de las coordenadas para cada temperatura. Las coordenadas de la temperatura media se calculan por medio de la Ecuación (3.8):

$$E[X, Y]_{Temp} = (\bar{x}, \bar{y}) \tag{3.8}$$

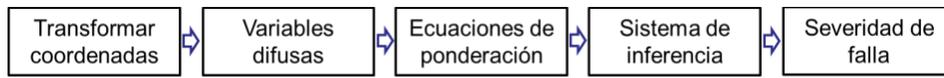
Estos resultados generaron nuevos conocimientos valiosos que pueden ser utilizados en el diagnóstico de transformadores en los programas de gestión de activos. El mapa térmico permite identificar las zonas de mayor energía; asimismo, proporciona un enfoque cuantitativo de la severidad de falla desde una perspectiva gráfica proporcionando una mejor herramienta en la vigilancia y control en la evolución de la falla. Sin embargo, para llevar el modelo a los programas computacionales de gestión de transformadores y ser aplicado como un método de diagnóstico, es necesario desarrollar una herramienta computacional que incluya el mapa térmico donde se complete la interpolación con la

superficie suave de los espacios faltantes del mapa. A continuación, se presenta el desarrollo del método de diagnóstico basado en lógica difusa utilizando el modelo de takagi-Sugeno [110][111] para calcular la severidad de la falla.

3.4.3 Desarrollo del método de diagnóstico

El sistema de inferencia difuso de Takagi-Sugeno es adecuado para modelar sistemas no lineales complejos mediante la interpolación suavizada de múltiples planos lineales. La Figura 3-28 muestra el diagrama de flujo del modelo difuso implementado en Matlab.

Figura 3-28: Diagrama de flujo del modelo difuso



Las variables difusas o variables de entrada al modelo son las transformaciones de las coordenadas del triángulo equilátero, es decir x y y . Cada variable de entrada se divide en cinco subconjuntos difusos con función de pertenencia definida por la función gaussiana, Ecuación (3.9). La Figura 3-29 muestra las funciones de pertenencia para cada variable de entrada con rangos de 0 a 100.

$$f(x, \sigma, c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.9)$$

Figura 3-29: Conjuntos difusos de la variable x

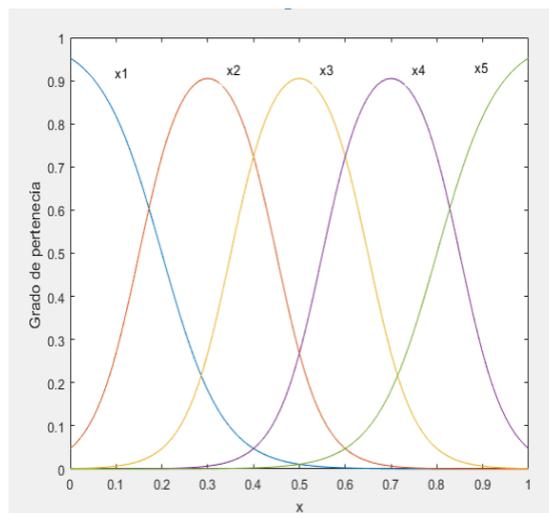
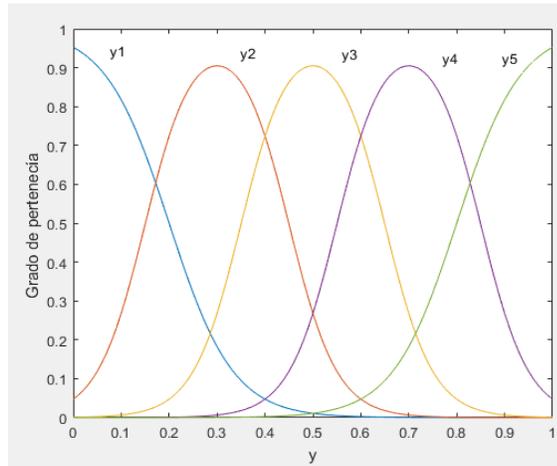


Figura 3-30: Conjuntos difusos de la variable y



Para completar el desarrollo computacional del modelo difuso, el paso a seguir corresponde al cálculo de las ecuaciones lineales de las funciones de ponderación, z_i [82]. El mapa térmico de la Figura 3-26 es fraccionado en retículas de igual tamaño como se muestra en la Figura 3.31. Cada una de las retículas corresponde a la función de ponderación del sistema de inferencia difuso. Por lo tanto, el objetivo es hallar las ecuaciones de los planos de mejor ajuste a cada una de las retículas del triángulo equilátero. El cálculo de las funciones de ponderación de cada retícula, se realiza a partir de la teoría de algebra lineal: conocidos tres puntos en el plano, se puede calcular el plano de la retícula con mínimo error de ajuste a los puntos, ver Figura 3-32

Figura 3-31: Mapa térmico dividido en retículas

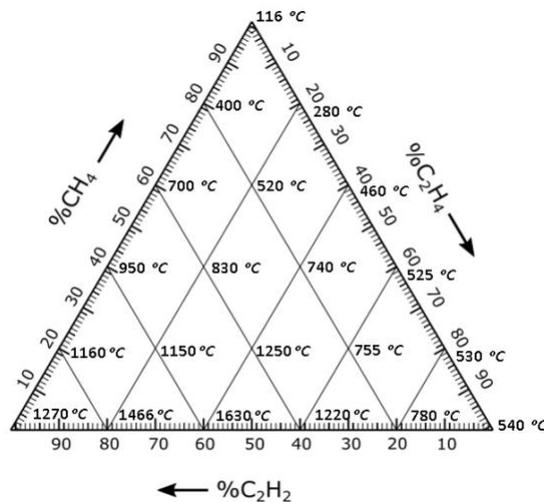
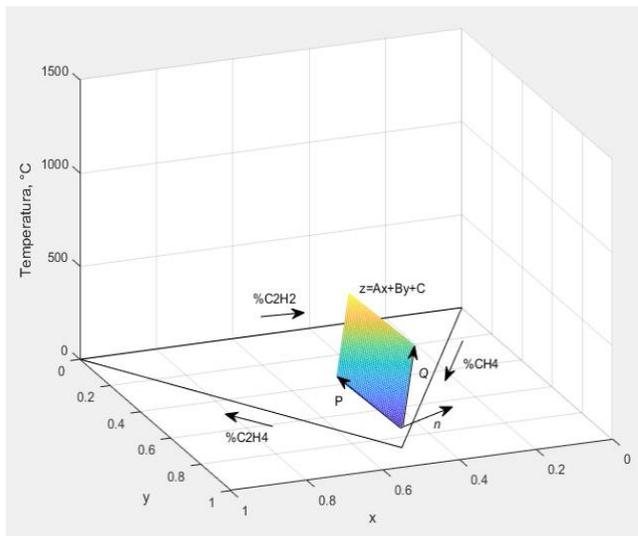
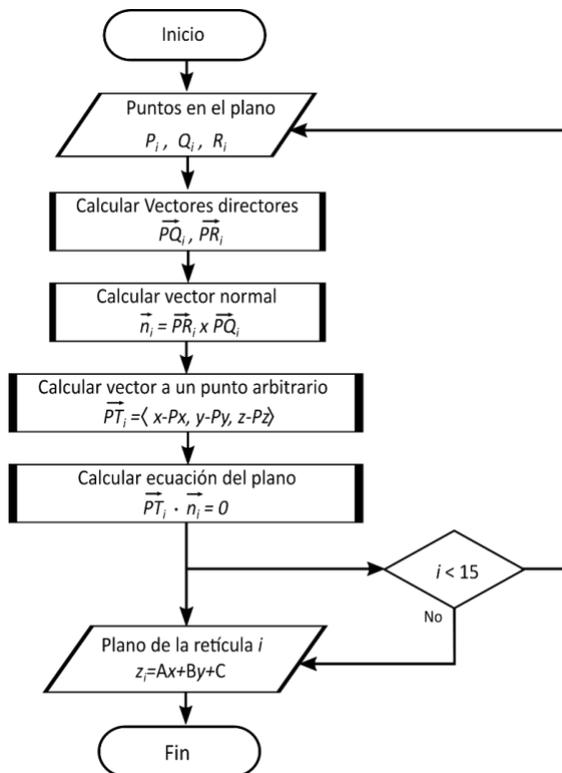


Figura 3-32: Cálculo de las ecuaciones de ponderación



La Figura 3-33 muestra el proceso del cálculo de las ecuaciones de ponderación.

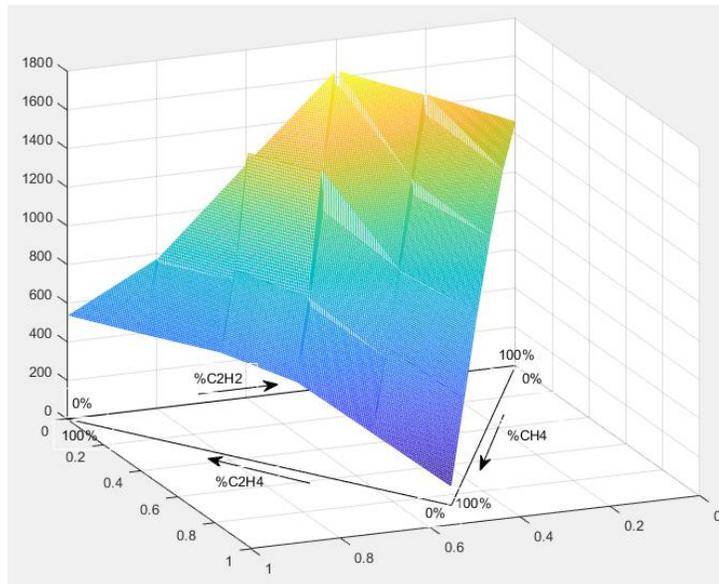
Figura 3-33: Cálculo de las ecuaciones de ponderación



Las ecuaciones de las 15 retículas se muestran en Ecuación (3.10), y la representación gráfica de las retículas se muestra en la Figura 3-34.

$$\begin{aligned}
 z_1 &= 900x + 1500y + 100 \\
 z_2 &= 600x + 1500y + 100 \\
 z_3 &= 650x + 1250y + 200 \\
 z_4 &= 1000x + 1050y + 320 \\
 z_5 &= 1530x + 550y + 720 \\
 z_6 &= 900x + 1200y + 100 \\
 z_7 &= 1100x + 1550y - 10 \\
 z_8 &= 2100x + 1600y - 230 \\
 z_9 &= 2500x + 1580y - 230 \\
 z_{10} &= 325x + 1400y + 330 \\
 z_{11} &= 75x + 2550y + 200 \\
 z_{12} &= -150x + 2000y + 510 \\
 z_{13} &= 25x + 1150y + 510 \\
 z_{14} &= 125x + 2325y + 215 \\
 z_{15} &= 50x + 1250y + 490
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

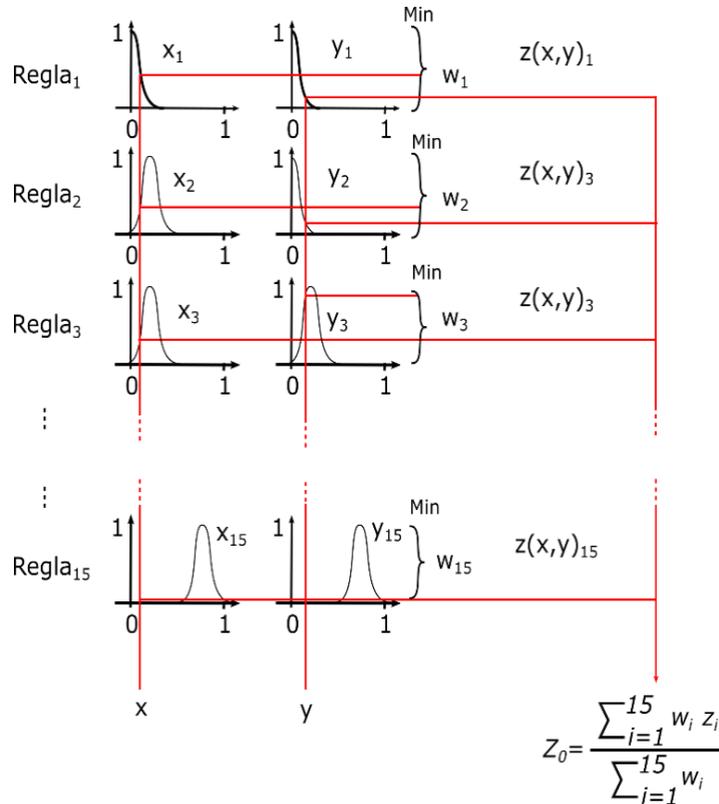
Figura 3-34: Representación de las ecuaciones de ponderación



El sistema de inferencia difuso es presentado en la figura 3-35. Cada regla del sistema de inferencia difusa, relaciona los conjuntos difusos por medio de la norma T-norm mínima, operador de intersección difuso [110]. El consecuente de cada regla difusa w_i , es una combinación lineal de las entradas. Y la salida del modelo difuso es una combinación lineal

ponderada de los consecuentes, Ecuación (3.11). Donde z_i corresponde a la función de ponderación de cada una de las reglas del sistema de inferencia.

Figura 3-35: Sistema de inferencia difuso

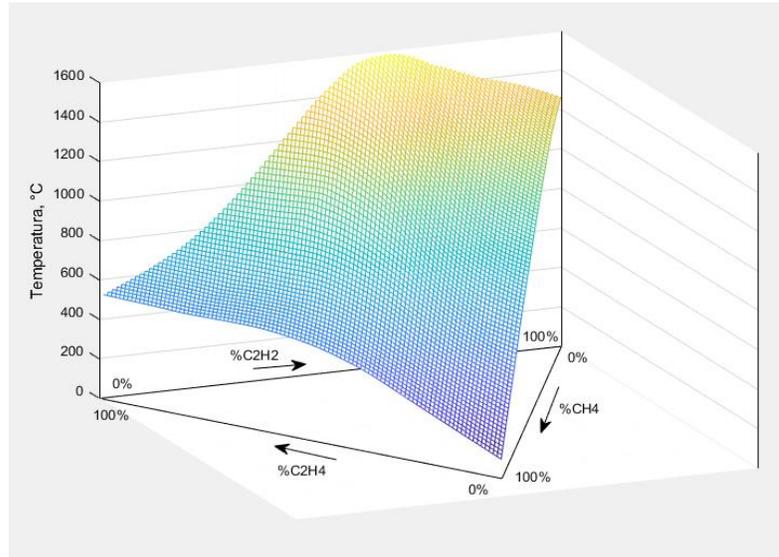


El resultado del sistema difuso o severidad de falla es el promedio ponderado de todas las reglas del sistema de inferencia, calculado como:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^{15} w_i z_i}{\sum_{i=1}^{15} w_i} \quad (3.11)$$

La Figura 3-36 muestra el gráfico de superficie del modelo difuso que relaciona la dependencia de la temperatura a los porcentajes de los tres gases. El área crítica, la cual corresponde al valor de temperatura más alta, se encuentra alrededor de los 1670 °C. Esta área coincide con la zona de fallas de más alta energía del método del Triángulo 1 de Duval, fallas eléctricas de alta energía tipo D2. Estas fallas se forman por arcos o flameos eléctricos resultantes de la ruptura del aislamiento entre partes activas, o entre activas y no activas.

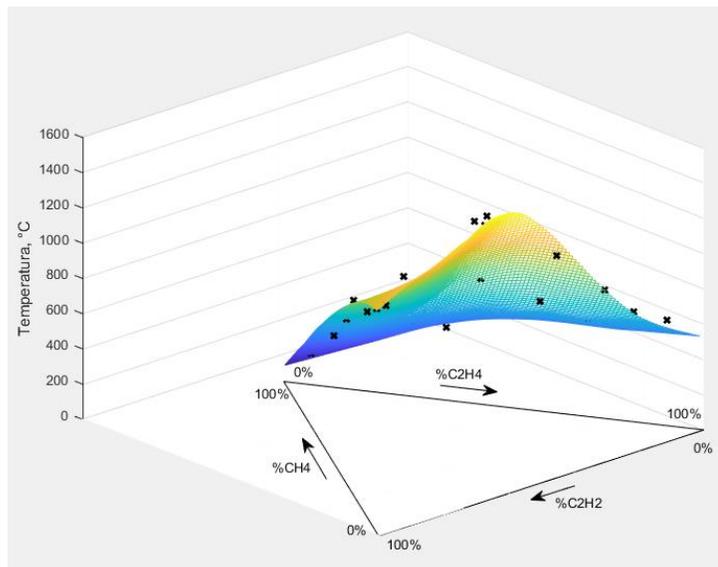
Figura 3-36: Gráfica de superficie del modelo difuso



Con el fin de validar el método de lógica difusa implementado sobre el mapa térmico, se calculó el error de ajuste utilizando la Ecuación (3-12). El error de ajuste del modelo difuso a las temperaturas del mapa térmico se muestra en la Figura 3-37.

$$Ajuste = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{15} (\hat{T}_{M. difuso} - T_{M. cinetico})^2}{n}} \tag{3.12}$$

Figura 3-37: Error de ajuste del modelo difuso

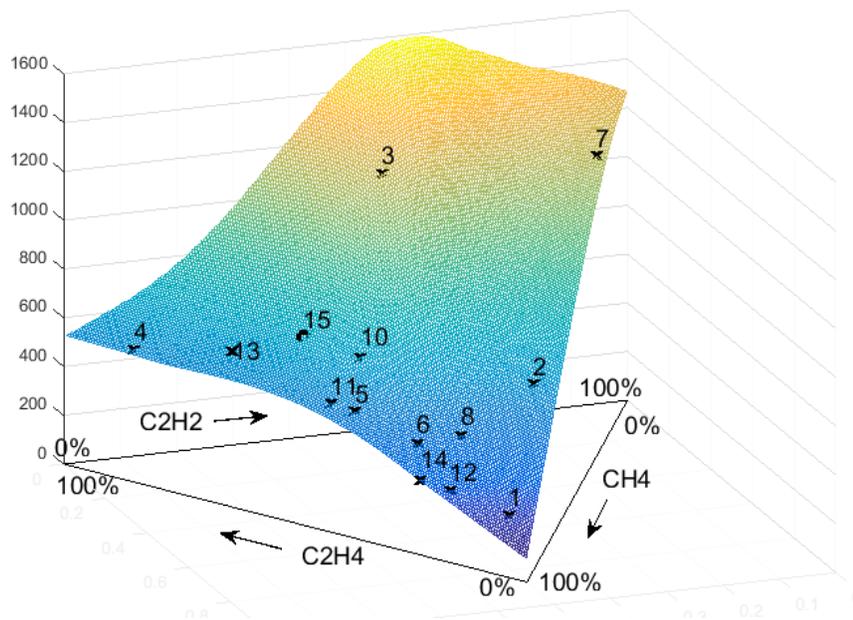


A continuación, se presenta la aplicación del modelo desarrollado a los datos experimentales del laboratorio para calcular la severidad de cada uno de los transformadores.

3.4.4 Aplicación del modelo difuso al diagnóstico de transformadores

Completada la herramienta computacional para calcular la severidad de falla utilizando la lógica difusa, el siguiente paso corresponde a validar su efectividad a través de datos experimentales. En este propósito, se utilizaron los resultados de envejecimiento acelerado de los 15 transformadores presentados en la sección 3.3. Los resultados de análisis de gases fueron analizados con el método de Triángulo Térmico para calcular la severidad de la falla, los resultados son presentados en la Figura 3-38. Los valores de temperatura correspondientes a cada una de las fallas presentes en el transformador se listan en la Tabla 3.5. Como se explicó, la temperatura de falla puede ser utilizada como indicador para cuantificar la severidad.

Figura 3-38: Resultados de los transformadores envejecidos



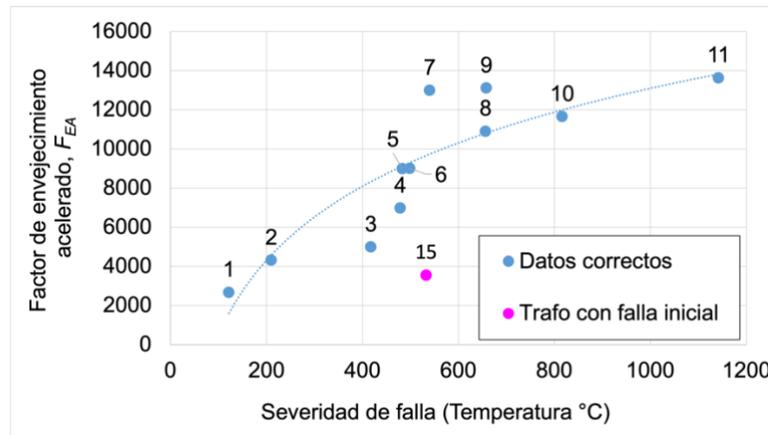
Como se observa en los resultados, las fallas de los transformadores tienen diferentes niveles de severidad o temperatura de falla. Esto debido a que los transformadores se sometieron a diferentes grados de envejecimiento, sección 3.4.

Tabla 3-5: Temperatura de falla según el método Triangulo Térmico

Nro Transformador	Código Transformador	Temperatura de falla según modelo difuso	Factor de envejecimiento, F_{EA}
1	12334	209.09	11278.2
2	10088	656.85	10898
3	9193	1142.23	13630.6
4	9407	532.97	3534.5
5	14756	483.24	8987.8
6	77020	398.21	1168.4
7	4456	816.29	11647.2
8	22048	417.98	4987.3
9	7085	550.68	1875.6
10	42392	479.3	6971.9
11	17640	498.93	9005.1
12	57568	121.88	2665.8
13	31113	540.41	12988
14	17542	209.91	4304
15	77145	658.56	13108.1

Al analizar la correlación entre la temperatura de falla y el grado de envejecimiento de los transformadores, Figura 3-39, se observa la dependencia creciente entre las dos variables. Esto confirma claramente la dependencia entre la severidad de la falla presente en el transformador y la temperatura determinada por el método Triángulo Térmico desarrollado en esta tesis. Los transformadores con los más altos nivel es de temperatura, fueron los transformadores a los que se sometieron a mayores condiciones de envejecimiento.

Figura 3-39: Relación entre el factor de envejecimiento y temperatura de falla



Los resultados de diagnóstico utilizando el método del Triángulo Térmico, muestran claramente que existe una diferencia muy marcada entre las energías de los dos tipos de fallas principales, fallas térmicas y fallas eléctricas. Mientras las fallas térmicas alcanzan su máxima alrededor de los 520 °C con un leve incremento hasta los 740 °C (frontera de las fallas T3 y DT del triángulo 1 de Duval), las fallas eléctricas triplican esta temperatura en su máximo, cerca de 1620 °C. Estos hallazgos ratifican los temores de los ingenieros encargados de la gestión de los transformadores. Los efectos destructivos de las fallas por descargas de alta energía, fallas ubicadas dentro de la zona D2 del Triángulo 1 de Duval, requieren de acciones inmediatas antes de que se produzcan averías catastróficas en el transformador. A continuación, se procede a realizar el análisis estadístico.

3.4.5 Estudio estadístico

La función de probabilidad que mejor se ajusta a los datos experimentales es la distribución logarítmica normal. Los parámetros de la distribución, μ y σ , son calculados por el método de ajuste de mínimos cuadrados [87][90]. La tabla 3-6 muestra los cálculos del ajuste de mínimos cuadrados a la linealización de la logarítmica normal de los datos experimentales.

Tabla 3-6: Ajuste a la distribución lognormal por mínimos cuadrados

Índice	Tiempo de vida (horas)	$F(P_i)$	$X = \ln(L_{vida})$	$Y = \Phi^{-1}F(L_{vida})$	X^2	Y^2	XY
1	1.3330	0.0455	0.2874	-1.6906	0.0826	2.8582	-0.4859
2	1.4166	0.1104	0.3483	-1.2245	0.1213	1.4993	-0.4264
3	2.1667	0.1753	0.7732	-0.9333	0.5978	0.8711	-0.7216
4	2.3450	0.2403	0.8523	-0.7055	0.7264	0.4977	-0.6013
5	3.0856	0.3052	1.1267	-0.5095	1.2695	0.2596	-0.5741
6	3.1300	0.3701	1.1410	-0.3315	1.3020	0.1099	-0.3783
7	3.4167	0.4351	1.2287	-0.1635	1.5096	0.0267	-0.2009
8	3.5000	0.5000	1.2528	0.0000	1.5694	0.0000	0.0000
9	3.8000	0.5649	1.3350	0.1635	1.7822	0.0267	0.2183
10	3.8000	0.6299	1.3350	0.3315	1.7822	0.1099	0.4426
11	3.9000	0.6948	1.3610	0.5095	1.8523	0.2596	0.6934
12	3.9333	0.7597	1.3695	0.7055	1.8755	0.4977	0.9661
13	4.8500	0.8247	1.5790	0.9333	2.4932	0.8711	1.4737
14	5.3400	0.8896	1.6752	1.2245	2.8064	1.4993	2.0512
15	6.0000	0.9545	1.7918	1.6906	3.2104	2.8582	3.0292
Sumas			17.4568	0.0000	22.9808	12.2451	5.4860

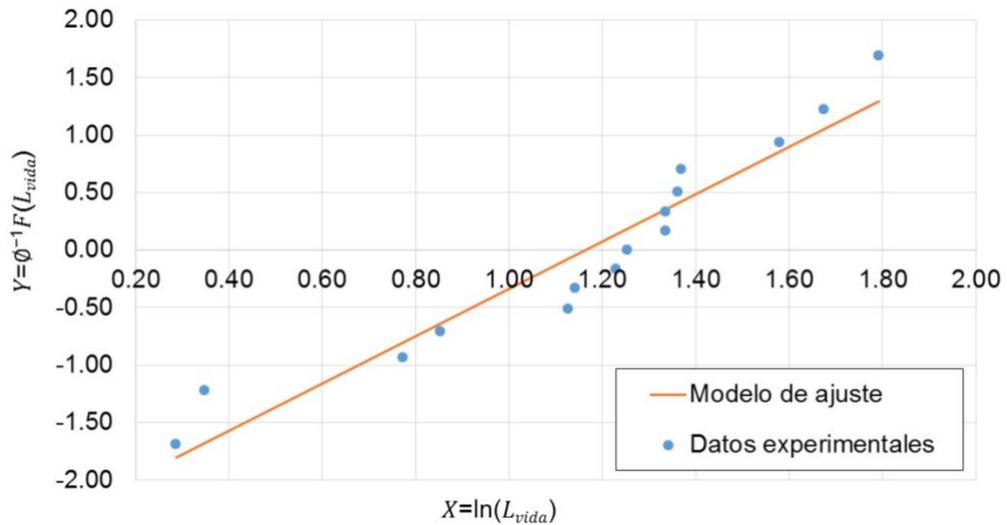
Los parámetros del modelo lineal son:

$$\hat{a} = \frac{N \sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum(X^2) - (\sum X)^2} = 2.058686 \quad (3.13)$$

$$\hat{b} = \frac{\sum Y - b(\sum X)}{N} = -2.39587 \quad (3.14)$$

La Figura 3-40 muestra la comparación entre el modelo de ajuste lineal de la distribución logarítmica normal contra los datos experimentales.

Figura 3-40: Ajuste de los datos experimentales a la ecuación lineal



Por lo tanto, los parámetros de la función de probabilidad logarítmica normal son:

$$\hat{\mu} = -\frac{\hat{b}}{\hat{a}} = 1.1637 \quad (3.15)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{\hat{a}} = 0.4857 \quad (3.16)$$

Y la función de probabilidad es:

$$f(t) = \frac{1}{x(0.4857)\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\ln(t)-1.163785)}{2(0.4857)^2}\right]} \quad (3.17)$$

La vida media y la desviación estándar son iguales a:

$$E[X] = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} = 3.60297 \quad (3.18)$$

$$Var(X) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{(2\mu + \sigma^2)} = 3.4545 \quad (3.19)$$

A continuación, se procede a calcular los parámetros de la ecuación de Arrhenius [87] utilizada para calcular el factor de aceleración del envejecimiento. Al aplicar logaritmo natural a la ecuación de Arrhenius, Ecuación (2.48) de la sección 2.8, se tiene la ecuación linealizada para implementar el método de mínimos cuadrados, es decir:

$$\ln(L) = \ln(A) + \frac{E_a}{R} \frac{1}{T_{Falla}} \quad (3.20)$$

Siendo $X = 1/T_{Falla}$ y $Y = \ln(L_{Vida})$

La Tabla 3-7 muestra los valores de temperatura y vida media para la aplicación del método de mínimos cuadrados.

Tabla 3-7: Ajuste a la ecuación de Arrhenius por mínimos cuadrados

Nro Trafo	T_{Falla} (170 °C)	L_{vida} (horas)	X	Y	X^2	Y^2	XY
1	121.88	4.85	0.002531	1.57898	6.408E-06	2.49317	0.00400
2	209.09	5.34	0.002074	1.67523	4.3E-06	2.80638	0.00347
3	209.91	6.00	0.002070	1.79176	4.285E-06	3.21040	0.00371
4	398.21	3.80	0.001490	1.33500	2.219E-06	1.78223	0.00199
5	417.98	3.42	0.001447	1.22867	2.094E-06	1.50962	0.00178
6	479.3	3.90	0.001329	1.36098	1.766E-06	1.85226	0.00181
7	483.24	3.80	0.001322	1.33500	1.748E-06	1.78223	0.00176
8	498.93	3.09	0.001295	1.12673	1.678E-06	1.26952	0.00146
9	532.97	3.93	0.001241	1.36948	1.539E-06	1.87547	0.00170
10	540.41	3.13	0.001229	1.14103	1.511E-06	1.30196	0.00140
11	550.68	3.50	0.001214	1.25276	1.473E-06	1.56942	0.00152
12	656.85	2.35	0.001075	0.85229	1.156E-06	0.72639	0.00092
13	658.56	1.42	0.001073	0.34826	1.152E-06	0.12128	0.00037
14	816.29	1.33	0.000918	0.28743	8.425E-07	0.08262	0.00026
15	1142.23	2.17	0.000707	0.77319	4.992E-07	0.59782	0.00055
Sumas:			0.021014	17.45678	3.267E-05	22.98077	0.02670

Los parámetros de ajuste de la ecuación lineal son:

$$m = \frac{N \sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum(X^2) - (\sum X)^2} = 695.1668 \quad (3.21)$$

$$b = \frac{\sum Y - m(\sum X)}{N} = 0.18988 \quad (3.22)$$

Despejando los parámetros de la Ecuación (5-20) y reemplazando los valores calculados se obtiene los estimadores de la ecuación de Arrhenius:

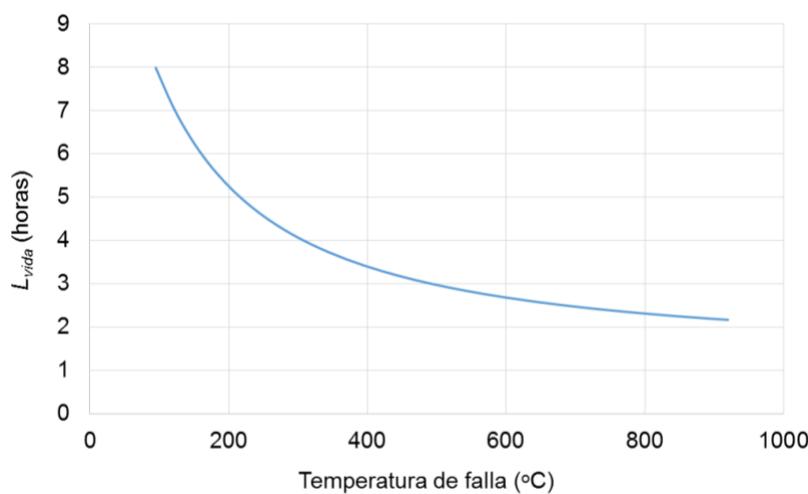
$$E_a = mR = 5779.617 \quad (3.23)$$

$$A = e^b = 1.2091 \quad (3.24)$$

Por lo tanto, el modelo de degradación térmica del transformador tipo seco, está dado por la Ecuación (3.25), la representación gráfica se muestra en la Figura 3-41.

$$L = 1.2091 e^{\left(\frac{5779.617}{8.314(273.15 + \theta_H)}\right)} \quad (3.25)$$

Figura 3-41: Modelo de Arrhenius



El factor de aceleración de envejecimiento F_{AE} que se define como la relación entre la condición operación normal y condiciones de operación sujeto a esfuerzo [87][88], es igual a:

$$F_{AE} = \frac{(L)_{Operación}}{(L)_{Esfuerzo}} \quad (3.26)$$

Donde:

$L_{(Operación)}$: Vida en condiciones de operación

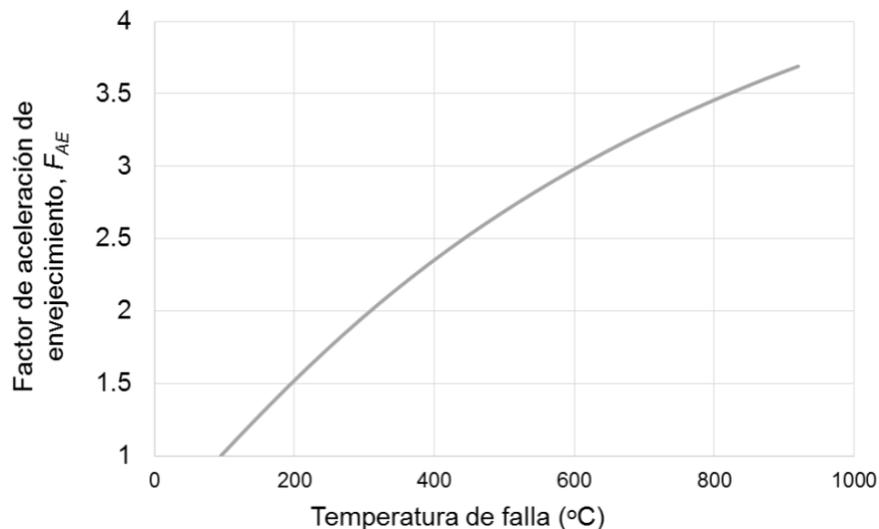
$L_{(Esfuerzo)}$: Vida en un nivel de esfuerzo

Tomando como temperatura de diseño 75 °C para los transformadores tipo seco, y reemplazado los valores en la Ecuación (5-26) el factor de acelerado del envejecimiento es igual a:

$$F_{AE} = e^{\left(\frac{113158096.6}{2894.51} - \frac{113158096.6}{8.314(273.15+\theta_H)} \right)} \quad (3.27)$$

La Figura 3-42 muestra la gráfica del factor de aceleración versus la temperatura.

Figura 3-42: Factor de aceleración de envejecimiento



La temperatura nominal del punto caliente de diseño es del alrededor de los 75 °C, a partir de esta temperatura inicia el proceso de degradación del aislamiento, y se puede observar

de la Figura 5-42 que un aumento de 6.5 °C duplicará el factor de aceleración del envejecimiento.

3.5 Síntesis

En este capítulo se presenta el desarrollo de una nueva herramienta para realizar el diagnóstico de transformadores inmersos en aceite que permite calcular la severidad de la falla.

El método de diagnóstico está basado en formulaciones matemáticas a partir de la teoría de la cinética química de los materiales. Los resultados obtenidos en la investigación muestran que es posible cuantificar la severidad de la falla a partir de la energía de activación requerida para generar cada uno de los gases residuales.

La efectividad del método fue demostrada con la validación de ensayos experimentales desarrollados en laboratorio bajo condiciones controladas. Los resultados del método también coinciden con los conocimientos empíricos de los ingenieros de gestión de activos adquiridos a través de los años. Adicionalmente, los resultados del método desarrollado concuerdan con las fronteras de los tipos de fallas del Triángulo 1 de Duval, el cual es el método actualmente más preciso.

Capítulo IV

4. Modelo cinético-químico aplicado al transformador de media frecuencia

En este capítulo se presenta el desarrollo de las metodologías, ejecución y análisis de los ensayos de envejecimiento acelerado en transformadores de media frecuencia utilizados en transformadores de estado sólido. Los resultados de la investigación proporcionaron una mejor comprensión de la operación del transformador; asimismo, permite identificar los niveles de desgaste según las condiciones de sobrecarga. Esto permite realizar diseños con mayor vida útil y la valoración de la confiabilidad del transformador a diferentes niveles de sobrecarga.

4.1 Introducción

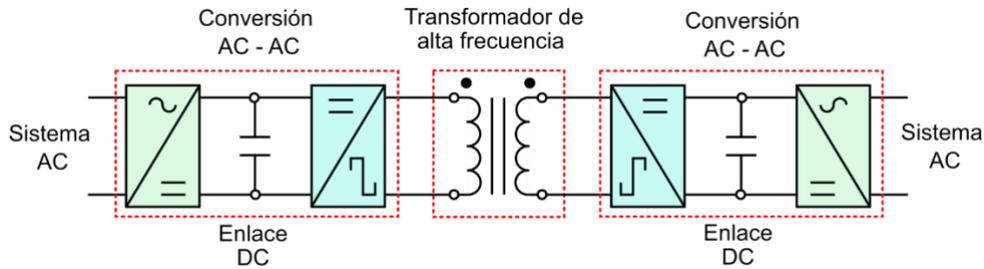
Como ya se mencionó, el transformador de estado sólido se ofrece como una herramienta para cumplir con los requisitos de las redes inteligentes y aplicaciones donde el peso y volumen son factores importantes.

Hay varias configuraciones de transformadores de estado sólido que tienen diferentes complejidades, características de diseño y prestaciones [2][4]. Estas configuraciones pueden integrar etapas entre enlaces de corriente continua CC o corriente alterna AC en el lado de alimentación o de la red; adicionalmente, permite la compensación de potencia reactiva, regulación de corriente y tensión. Los transformadores de estado sólido admiten el flujo de energía bidireccional en la red de distribución, lo que permite la conexión de CC o CA para integrar fuentes de energía renovables como la fotovoltaica y facilitar el flujo de

energía de varias microrredes [3][5]. En la Figura 4-1 se muestra la configuración básica del transformador de estado sólido de conversión AC-AC conformado por las tres etapas:

- Convertidor AC-AC de baja a alta frecuencia.
- Transformador de media frecuencia
- Convertidor AC-AC de alta a baja frecuencia.

Figura 4-1: Estructura básica del transformador de estado sólido



La función de los transformadores de media frecuencia es el mismo que el de los transformadores tradicionales de 60 Hz, la transformación de tensión proporcionando aislamiento galvánico entre los lados de alta y baja tensión.

Es de aclarar que respecto a esta clase de transformador, la investigación de degradación se realiza exclusivamente sobre el transformador de media frecuencia. Sobre este tipo de transformador, se realizan los ensayos de envejecimiento, modelo térmico y método de diagnóstico. La Figura 4-2 presenta una fotografía del transformador de media frecuencia.

Figura 4-2: Transformador de media frecuencia



A continuación se presenta el estudio en el que se identifican las variables de esfuerzo y de cuantificación necesarios para desarrollar el modelo térmico.

4.2 Determinación de la variable de esfuerzo y cuantificadores de degradación

Para proceder con los ensayos de envejecimiento de los transformadores de media frecuencia, se diseñaron y construyeron 8 unidades siguiendo los criterios de construcción y materiales actualmente utilizados por la industria. Estos 8 transformadores conforman la muestra para los ensayos de envejecimiento. El procedimiento de diseño de los transformadores se especifica en el Anexo B. Los parámetros de diseño se muestran en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Parámetros eléctricos de funcionamiento

Parámetro	Símbolo	Valor
Tensión RMS del primario	V_p	60 V
Tensión RMS del secundario	V_s	60 V
Corriente RMS del secundario	I_s	9 A
Frecuencia	f	5 kHz

Las 8 unidades fueron construidas con los mismos materiales y parámetros de diseño con fin de que todas las unidades de la muestra tengan las mismas características de desempeño eléctrico y térmico; y así, cumplir con el principio de uniformidad de las muestras. Esto asegura degradación semejante en las muestras a lo largo del envejecimiento; y así, minimizar las desviaciones de las mediciones. De esta forma, al disminuir las desviaciones de los datos aumenta la precisión de la medida estadística, concepto tomado de la teoría de estadística para pequeños números de observaciones [95].

Igual que en los ensayos de los transformadores inmersos en aceite, la variable de esfuerzo que se debe aplicar en los ensayos de envejecimiento es la temperatura. Ya que, las pérdidas en los devanados y el núcleo se manifiestan en forma de calor, lo que ocasiona la descomposición de la materia. Igualmente, la temperatura externa y las fallas internas ocasionan el mismo proceso de degradación.

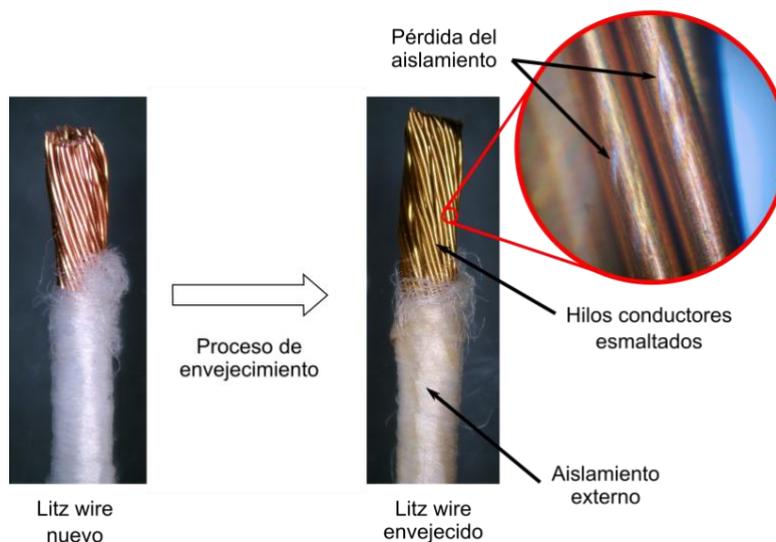
Debido a que no se tienen referencias sobre el proceso de degradación de los transformadores de media frecuencia, es necesario desarrollar ensayos de exploratorios del envejecimiento con el fin de identificar los modos de fallas, procedimientos en las mediciones y reconocer los estimadores que permitan cuantificar la degradación.

4.2.1 Identificación de los modos de falla

En los ensayos de sondeo, los transformadores se sometieron a fuertes condiciones de operación mediante la aplicación de esfuerzo térmico y sobrecarga; y así, identificar los modos de falla y establecer referentes de los límites de esfuerzo que se deben aplicar en los ensayos de envejecimiento acelerado. Posteriormente, se inspeccionaron los transformadores y se realizaron pruebas eléctricas por medio de los cuales se identificaron los modos de falla de los devanados y del núcleo.

Posterior a los ensayos de sondeo, se inspeccionan los conductores de los devanados y se observa pérdida del aislamiento entre los hilos del cable Litz, ver Figura 4-3. Esto ocasionó el aumento de las pérdidas en los devanados por efecto de proximidad [112][113], puesto que el campo magnético de las corrientes en los conductores interfiere con los campos de los conductores cercanos.

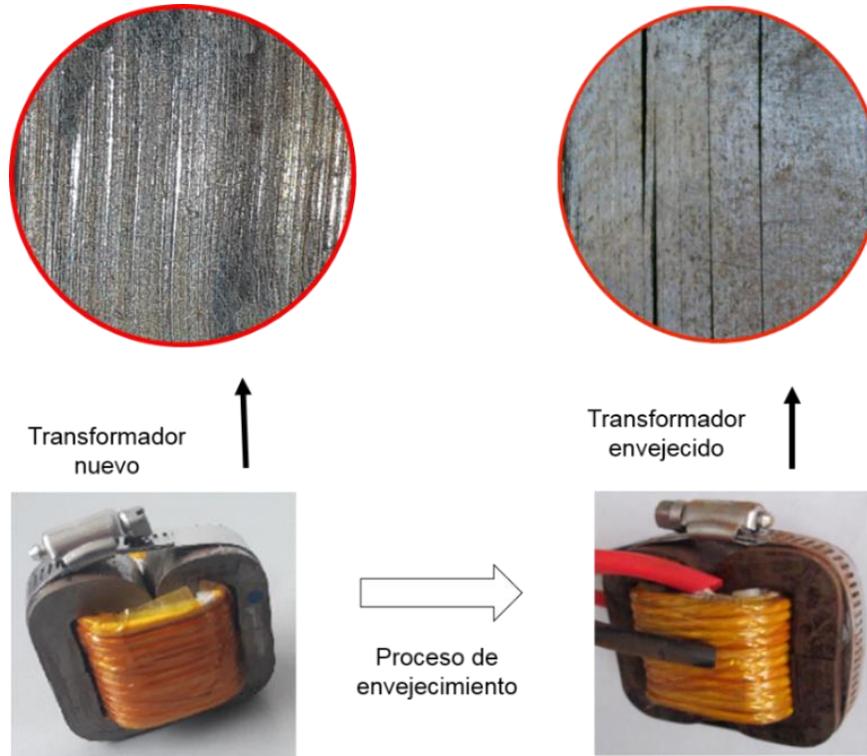
Figura 4-3: Pérdida de aislamiento de los hilos del cable Litz



Con respecto al núcleo, el efecto térmico se manifiesta por originar entrehierros o *gaps* (término del idioma inglés) entre las laminaciones, ver Figura 4-4. Los entrehierros originan

en el circuito magnético el aumento de la reluctancia magnética, término nombrado por Oliver Heaviside, pero publicado por James P. Joule en 1840 donde lo definió como resistencia magnética [87]; es decir, una resistencia al paso del flujo magnético. Sin embargo, las propiedades magnéticas del material del núcleo no fueron afectadas.

Figura 4-4: Entrehierros en el núcleo por efecto térmico



En conclusión, los modos de falla por temperatura, consumo del aislamiento entre los hilos del cable Litz y entrehierros en el núcleo magnético, originan el aumento de las pérdidas totales; y consecuentemente, ocasiona la reducción de la eficiencia del transformador. Sin embargo, los parámetros intrínsecos que caracterizan el estado físico del devanado y del núcleo son la resistencia eléctrica y permeabilidad magnética respectivamente. Estos parámetros están relacionados directamente a las pérdidas del devanado y del núcleo. Por lo tanto, estos dos parámetros son las variables que deben ser utilizadas para cuantificar la degradación del transformador.

A continuación, se presentan los procedimientos para llevar a cabo las mediciones de estos dos parámetros.

4.2.2 Mediciones de la resistencia de los devanados y permeabilidad

Estos parámetros se pueden medir mediante dos pruebas bien conocidas, prueba de corto circuito a corriente nominal y prueba de circuito abierto. Estas pruebas son ampliamente conocidas y aplicadas en transformadores tradicionales excitados a la frecuencia de la red de 60 Hz. En transformadores de alta frecuencia estas pruebas se pueden llevar a cabo en el rango de frecuencias de diseño del transformador. En este caso, las mediciones en los devanados y en el núcleo se pueden desarrollar utilizando un generador de señales y un amplificador de potencia, lo que permite reajustar los parámetros de la prueba rápido y fácil para tomar las mediciones. Las formas de ondas con amplitud y frecuencia configurable son suministradas por generador de señales, estas señales son amplificadas por medio del amplificador de potencia TZT FPA101A. La Figura 4-5 muestra la disposición de los equipos en una de las mediciones del diagnóstico del núcleo magnético.

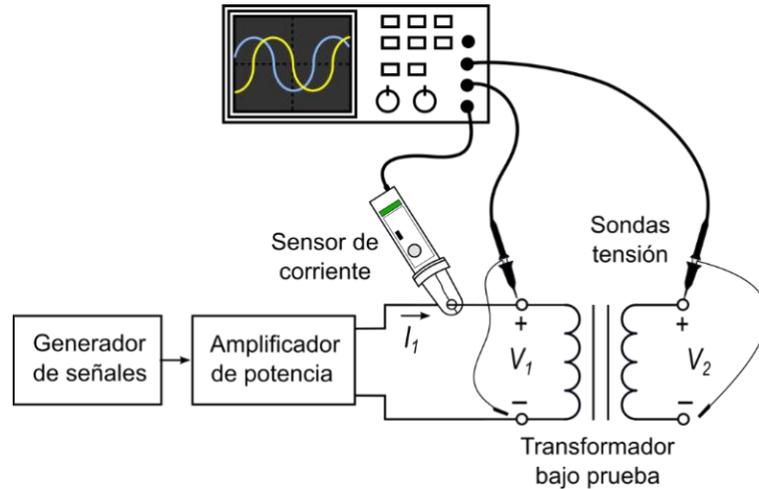
Figura 4-5: Mediciones en laboratorio



4.2.3 Prueba de circuito abierto [112][115]

Dado que en este caso se pretende parametrizar el núcleo magnético, las cantidades de interés en estas pruebas son intensidad de campo magnético representado por H , y densidad de flujo magnético B . El circuito de pruebas para la medición de los parámetros representativos del núcleo se muestra en la Figura 4-6

Figura 4-6: Circuito de pruebas de circuito abierto.



El Amplificador de potencia excita el devanado primario del transformador; y su vez, se mide la corriente del devanado primario y tensiones en el primario y secundario. Con los valores de corriente se calculan las intensidades del campo magnético en el núcleo por medio de la ecuación [87]:

$$H = \frac{N_p i}{l_N} \tag{4.1}$$

Donde N_p es el número de vueltas en el devanado primario y l_N es la longitud media del camino magnético. La tensión se mide en el devanado de circuito abierto para evitar errores asociados con caídas de tensión debidas al flujo de corrientes en el devanado que está siendo excitado [87]. A partir de la tensión medida en el secundario, se calcula densidad de flujo en el núcleo por medio de:

$$B_{max} = \frac{V_{pico}}{2\pi f N_p A_N} \tag{4.2}$$

Con este circuito de pruebas, es posible medir las pérdidas en el núcleo y compararlas con los parámetros de diseño del fabricante [118]. Las pérdidas del núcleo se expresan generalmente en vatios por unidad de masa (W/kg) y pueden ser calculadas a partir de la ecuación empírica de Steinmetz [112], Ecuación (4.3).

$$P_{Fe} = K_C f^\alpha B_{max}^\beta \quad (4.3)$$

Donde P_{Fe} son las pérdidas en el núcleo por unidad de masa y K_C , α y β son los coeficientes de Steinmetz. La permeabilidad relativa del núcleo se mide en función de la densidad de flujo e intensidad de campo magnético, matemáticamente se calcula con:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (4.4)$$

Donde μ_0 es la permeabilidad magnética del espacio libre $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

4.2.4 Prueba de corto circuito [112]

Con un devanado en cortocircuito, normalmente el 5% de la tensión nominal en el otro devanado es suficiente para establecer la corriente nominal a plena carga. Los valores medidos que deben ser registrados son los siguientes:

Tensión primaria de cortocircuito, V_{SC}

Corriente primaria nominal de cortocircuito, I_{SC}

Potencia de cortocircuito, P_{SC}

La impedancia equivalente vista desde los terminales del transformador viene dada por la impedancia de corto circuito:

$$Z_{eq} = Z_{SC} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} = R_{SC} + X_{SC}j \quad (4.5)$$

La componente real de Z_{eq} es la resistencia equivalente R_{eq} de los dos devanados. La resistencia equivalente se compone de la resistencia del devanado primario y la resistencia del devanado secundario reflejada en el primario, y es igual a:

$$R_{eq} = R_{SC} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} \quad (4.6)$$

La componente imaginaria de Z_{eq} es la reactancia de fuga equivalente de los devanados X_{SC} . Consiste en la reactancia de fuga del devanado primario y la reactancia de fuga del devanado secundario reflejado en el devanado primario:

$$X_{eq} = X_{SC} = \sqrt{(Z_{SC}^2 - R_{SC}^2)} \quad (4.7)$$

Establecidas las variables de cuantificación de degradación y método de medición se procede a realizar los ensayos de envejecimiento.

4.3 Ensayos de envejecimiento acelerado de transformadores de media frecuencia

Los ensayos de envejecimiento acelerado en transformadores de media frecuencia fueron desarrollados en el *Engineering Research Center ENRC* de la *University of Arkansas* durante el periodo de pasantía internacional. A continuación, se presentan los objetivos que se persiguen en los ensayos experimentales.

4.3.1 Objetivos de los ensayos de envejecimiento

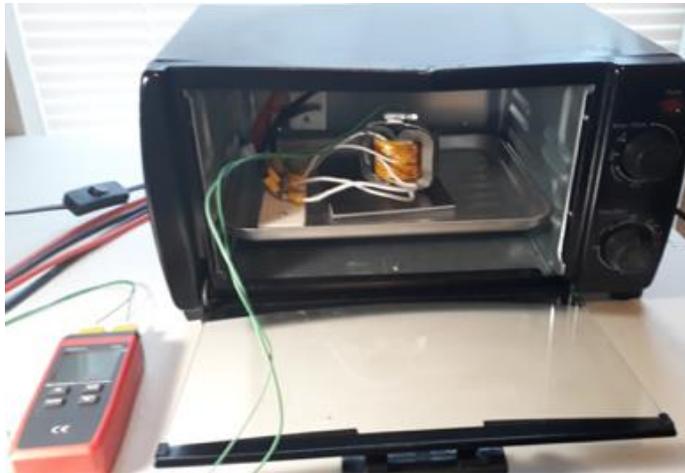
- Crear las condiciones necesarias para la aplicación del esfuerzo térmico en los escenarios planificados en condiciones controladas.
- Elevar la temperatura de punto caliente de los transformadores para generar degradación acelerada de los componentes del aislamiento.
- Registrar las mediciones de las variables de esfuerzo térmico, cuantificadores de degradación y factores de control.

Los ensayos experimentales del envejecimiento de transformadores de media frecuencia se desarrollaron en dos etapas. La primera comprende la construcción de la cámara de envejecimiento que permita desarrollar los ensayos bajo condiciones controladas. La segunda etapa corresponde a los ensayos de envejecimiento con los registros de las variables de esfuerzo, cuantificadores de degradación y factores de control.

4.3.2 Construcción de la cámara de envejecimiento

Se construyó una cámara de envejecimiento acelerado para asegurar el control sobre el aumento de temperatura y aplicación de sobrecarga al transformador sin la influencia de factores externos que pudieran alterar los resultados; así como, el registrar las mediciones de los parámetros que permiten cuantificar la degradación, Figura 4-7. Se utilizó un banco de carga resistiva alimentado por cables siliconados desde el interior de la cámara para llevar el transformador a la condición de sobrecarga. La cámara de envejecimiento asegura el cumplimiento de replicación y control requeridos por el plan de envejecimiento.

Figura 4-7: Cámara de envejecimiento



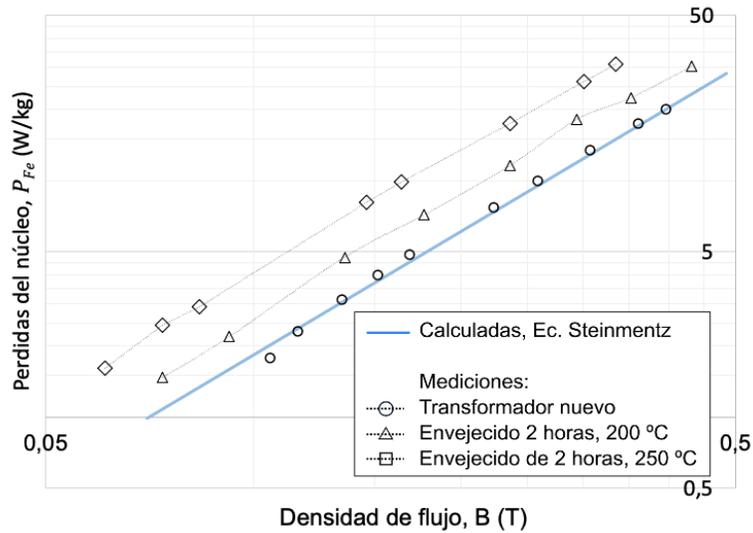
4.3.3 Desarrollo de los ensayos de envejecimiento

Los transformadores fueron sometidos a ciclos de envejecimiento con la aplicación de esfuerzo térmico por medio del aumento de temperatura ambiente y sobrecarga; por consiguiente, el aislamiento se degrada de forma progresiva en cada ciclo de envejecimiento. Cada ciclo varía entre 1 y 6 horas dependiendo del nivel de esfuerzo térmico o temperatura. Con el fin de verificar el estado del transformador de manera no destructiva, se evaluará el estado del transformador a través de pruebas eléctricas. Los ensayos de envejecimiento acelerado están orientados al análisis y modelos de degradación en el tiempo para cada nivel de esfuerzo, ya que el tamaño de muestra y las mediciones de diagnóstico son más adecuados en el propósito de obtener modelo de envejecimiento más preciso. Se instaló un termopar entre los devanados para medir la temperatura del punto caliente durante los ensayos de envejecimiento. La localización del

punto caliente se determinó tras mediciones realizadas ubicando termopares en diferentes lugares del devanado.

Como se presenta en la Sección 4-2, el efecto de la temperatura se manifiesta por ocasionar entrehierros en las laminaciones del núcleo. Esto ocasiona la disminución de la permeabilidad magnética y debido a que cuanto menor sea la permeabilidad de un material, más energía se requerirá para alcanzar el flujo magnético de diseño previamente establecido. La Figura 4-8 muestra el efecto del aumento de las pérdidas en el núcleo debido al proceso de envejecimiento a 200 °C y 250 °C. Los coeficientes de la ecuación de Steinmetz para el núcleo 2605SA1 entregados por el fabricante para excitación sinusoidal son: $K_C=1.36$, $\alpha=1.51$ y $\beta=1.74$ [118]

Figura 4-8: Pérdidas en el núcleo por envejecimiento, mediciones a 5 kHz.



Al analizar los resultados del proceso de envejecimiento del núcleo magnético, se encontró que tienen una temperatura de reacción mucho más alta que la de los devanados. El efecto térmico sobre el núcleo empieza a manifestarse por encima de los 200 °C, mientras que la degradación del aislamiento inicia alrededor de los 150 °C. En consecuencia, el modelo térmico del devanado es dominante al establecer el nivel de degradación del transformador; por lo tanto, la tesis sólo considera los resultados de envejecimiento de los devanados para establecer el modelo de degradación del transformador. Los niveles de esfuerzo térmico seleccionados para los ensayos de envejecimiento acelerado son de 150 °C, 170 °C y 190 °C medidos en el punto caliente de los devanados. Antes y finalizado

cada ciclo de envejecimiento se registraron las mediciones de las pruebas eléctricas de corto circuito. Las Tablas 4.2 y 4-3 muestran los valores de R_{eq} calculados a partir de las mediciones de cada uno de los periodos de envejecimiento.

Tabla 4-2: Mediciones de los ensayos de envejecimiento

Número de ciclo	Transformador 1. Temperatura: 150 °C		Transformador 2. Temperatura: 150 °C		Transformador 3. Temperatura: 170 °C	
	Vida útil (horas)	R_{eq} (mΩ)	Vida útil (horas)	R_{eq} (mΩ)	Vida útil (horas)	R_{eq} (mΩ)
1	1	9.62	1	7.69	1	7.72
2	2	9.10	2	7.91	2	8.31
3	4	8.99	3	8.56	3	7.71
4	5	7.21	4	7.00	4	5.60
5	7	5.63	5	7.04	5	2.46
6	8	4.14	6	6.37	7	3.89
7	9	2.69	8	5.98	8	1.92
8	10	3.07	11	3.84	9	1.57
9	11	2.94	12	3.03		
10	14	1.50	15	2.50		

Tabla 4-3: Mediciones de los ensayos de envejecimiento

Número de ciclo	Transformador 4. Temperatura: 170 °C		Transformador 5. Temperatura: 190 °C		Transformador 6. Temperatura: 190 °C	
	Vida útil (horas)	R_{eq} (mΩ)	Vida útil (horas)	R_{eq} (mΩ)	Vida útil (horas)	R_{eq} (mΩ)
1	1	9.2743	1	11.07	1	9.84
2	2	9.1452	1.5	5.81	1.5	4.59
3	4	3.4702	2	4.88	2	6.15
4	6	2.2427	2.5	5.44	3	4.53
5	7	1.7959	3	2.51	3.5	3.39
6	8	3.1129	3.5	2.40	4	2.36
7	9	1.2774				

4.3.4 Conclusiones de los ensayos de envejecimiento acelerado

- Se llevó a cabo el envejecimiento acelerado de los transformadores de muestra en condiciones controladas, con los registros de temperatura de punto caliente, sobrecarga, y los datos para realizar la valoración de degradación.
- Se identificó claramente los modos de falla de los transformadores con la identificación e interpretación de los cuantificadores para valorar la degradación de los transformadores.
- A partir de las mediciones de los cuantificadores de degradación se logró valorar la condición de los transformadores.

A cualquier nivel temperatura, los tiempos registrados de degradación seguirán una función de probabilidad con datos distribuidos alrededor del valor medio, y que para el estudio corresponde a la vida media de cada nivel de temperatura.

A continuación se presenta el análisis para estimar la vida media.

4.4 Análisis de datos e interpretación de resultados

Con los registros de las variables de causa y efecto, se procede a realizar la preparación de la información para realizar el modelo cinético-químico. Inicialmente, se debe identificar el modelo estadístico de mejor ajuste a los datos para calcular la vida media de cada nivel de temperatura y posteriormente realizar el modelo cinético-químico.

4.4.1 Estudio estadístico

Se determinó que el mejor ajuste a los datos experimentales se logra con la distribución logarítmica normal. Los parámetros de la distribución logarítmica normal, μ y σ , son calculados por el método de ajuste de mínimos cuadrados [87][90]. La Tabla 4-4 resume los cálculos del ajuste de mínimos cuadrados a la linealización de la logarítmica normal de los 2 transformadores envejecidos a 150 °C.

Tabla 4-4: Ajuste a la lognormal por mínimos cuadrados para 150 °C

L_{vida} (horas)	$\hat{F}(L_{vida})$	X	Y	X^2	Y^2	XY
1	0.001	0	-3.0902	0	9.5495	0
1	0.001	0	-3.0902	0	9.5495	0
2	0.0538	0.6931	-1.6082	0.4804	2.5865	-1.1147
2	0.001	0.6931	-3.0902	0.4804	9.5495	-2.1419
3	0.001	1.0986	-3.0902	1.2069	9.5495	-3.3949
4	0.0651	1.3862	-1.5127	1.9218	2.2884	-2.0971
4	0.0897	1.3862	-1.3425	1.9218	1.8025	-1.8612
5	0.2499	1.6094	-0.6747	2.5902	0.4552	-1.0859
5	0.0851	1.6094	-1.3715	2.5902	1.8810	-2.2073
6	0.1723	1.7917	-0.9447	3.2104	0.8925	-1.6927
7	0.4144	1.9459	-0.2160	3.7865	0.0466	-0.4204
8	0.5696	2.0794	0.1754	4.3240	0.0307	0.3648
8	0.2224	2.0794	-0.7638	4.3240	0.5834	-1.5884
9	0.7200	2.1972	0.5831	4.8277	0.3400	1.2812
10	0.6807	2.3025	0.4698	5.3018	0.22072	1.0817
11	0.6944	2.3978	0.5085	5.7499	0.25861	1.2194
11	0.5011	2.3978	0.0029	5.74990	8.7316	0.0070
12	0.6062	2.4849	0.2696	6.1747	0.0726	0.6699
14	0.8438	2.6390	1.0103	6.9646	1.0208	2.6664
15	0.6746	2.7080	0.4528	7.3335	0.2050	1.2264
Sumas		33.5005	-17.3227	68.9396	50.8835	-9.0878

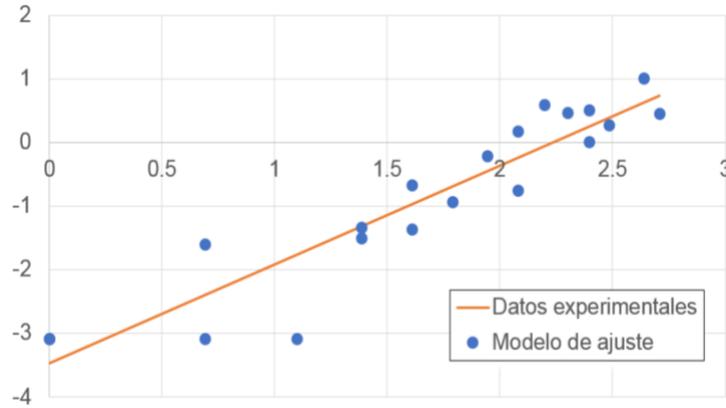
Los parámetros del modelo lineal de ajuste $y = ax + b$ son los siguientes:

$$b = \frac{N \sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum(X^2) - (\sum X)^2} = 1.5538 \quad (4.8)$$

$$a = \frac{\sum Y - b(\sum X)}{N} = -3.4688 \quad (4.9)$$

La Figura 4-9 compara el modelo de ajuste linealizado de la distribución logarítmica normal contra los datos experimentales.

Figura 4-9: Gráfica de ajuste a la ecuación lineal para 150 °C



Por lo tanto, los parámetros de la función de probabilidad logarítmica normal son:

$$\hat{\mu} = -\frac{a}{b} = 2.2324 \tag{4.10}$$

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{b} = 0.6435 \tag{4.11}$$

Y la función de densidad de probabilidad de la degradación a 150 °C es:

$$f(t) = \frac{1}{x(0.6435)\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\ln(t)-2.2324)}{2(0.6435)^2}\right]} \tag{4.12}$$

Por lo tanto, la vida media y la desviación estándar son iguales a:

$$E[X] = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} = 11.4678 \tag{4.13}$$

$$Var(X) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{(2\mu + \sigma^2)} = 8.2148 \tag{4.14}$$

Los cálculos del modelo de ajuste de mínimos cuadrados a las pruebas de los 2 transformadores envejecidos a 170 °C se muestran en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Ajuste a la lognormal por mínimos cuadrados para 170 °C

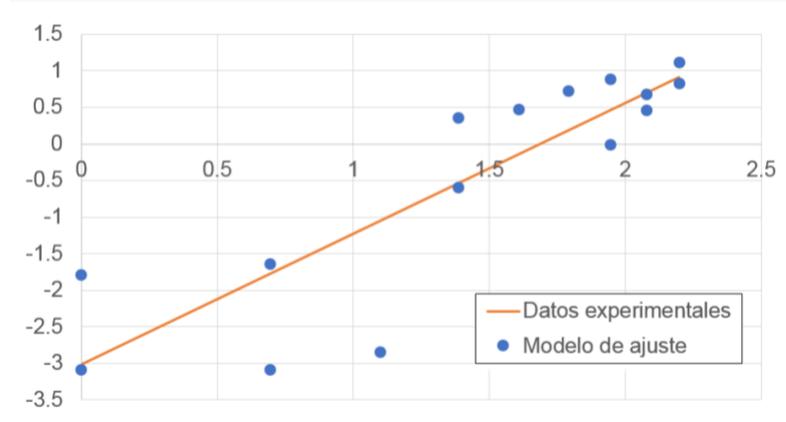
horas	$F(t)$	X	Y	X^2	Y^2	XY
1	0,0010	0,0000	-3,0902	0,0000	9,5495	0,0000
1	0,0364	0,0000	-1,7947	0,0000	3,2208	0,0000
2	0,0010	0,6931	-3,0902	0,4805	9,5495	-2,1420
2	0,0498	0,6931	-1,6470	0,4805	2,7127	-1,1416
3	0,0022	1,0986	-2,8498	1,2069	8,1215	-3,1309
4	0,2745	1,3863	-0,5992	1,9218	0,3590	-0,8307
4	0,6394	1,3863	0,3569	1,9218	0,1274	0,4948
5	0,6810	1,6094	0,4705	2,5903	0,2214	0,7572
6	0,7670	1,7918	0,7289	3,2104	0,5313	1,3060
7	0,4965	1,9459	-0,0087	3,7866	0,0001	-0,0170
7	0,8134	1,9459	0,8905	3,7866	0,7929	1,7328
8	0,7515	2,0794	0,6793	4,3241	0,4615	1,4126
8	0,6765	2,0794	0,4581	4,3241	0,2098	0,9525
9	0,7960	2,1972	0,8274	4,8278	0,6846	1,8180
9	0,8673	2,1972	1,1136	4,8278	1,2401	2,4468
Sumas		21,1038	-7,5548	37,6891	37,7822	3,6586

$$b = \frac{N \sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum(X^2) - (\sum X)^2} = 1.7864 \quad (4.15)$$

$$a = \frac{\sum Y - b(\sum X)}{N} = -3.0171 \quad (4.16)$$

La Figura 4-10 presenta el ajuste de mínimos cuadrados a la linealización de la distribución logarítmica normal.

Figura 4-10: Gráfica de ajuste a la ecuación lineal para 170 °C



Por consiguiente, los parámetros y la función de densidad de probabilidad son:

$$\hat{\mu} = -\frac{a}{b} = 1.6888 \tag{4.17}$$

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{b} = 0.5597 \tag{4.18}$$

$$f(t) = \frac{1}{x(0.5597)\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\ln(t)-1.6888)}{2(0.5597)^2}\right]} \tag{4.19}$$

Donde la vida media y la desviación estándar para 170 °C son:

$$E[X] = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} = 6.3313 \tag{4.20}$$

$$Var(X) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{(2\mu + \sigma^2)} = 3.8406 \tag{4.21}$$

Los cálculos del modelo de ajuste a los datos experimentales de envejecimiento a 190 °C se muestran en la Tabla 4-6. Los parámetros de ajuste de la ecuación lineal son:

$$b = \frac{N \sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum(X^2) - (\sum X)^2} = 2.3176 \tag{4.22}$$

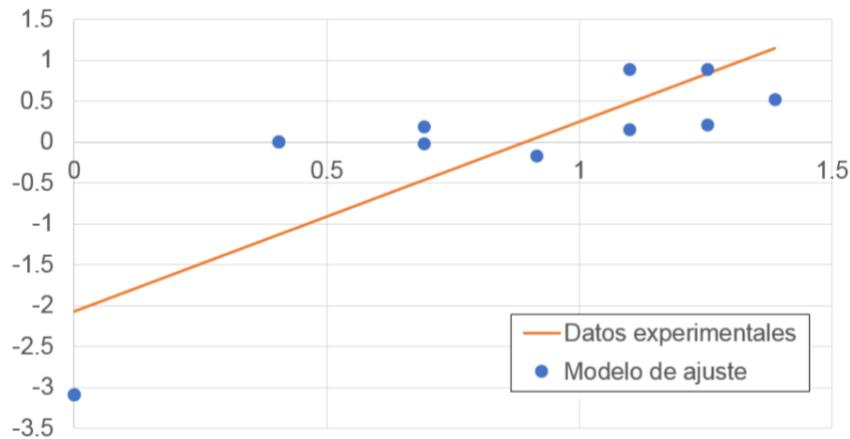
$$a = \frac{\sum Y - b(\sum X)}{N} = -2.0709 \tag{4.23}$$

Tabla 4-6: Ajuste a la lognormal por mínimos cuadrados para 190 °C

horas	$F(t)$	X	Y	X^2	Y^2	XY
1	0,0010	0,0000	-3,0902	0,0000	9,5495	0,0000
1	0,0010	0,0000	-3,0902	0,0000	9,5495	0,0000
1,5	0,5000	0,4055	0,0000	0,1644	0,0000	0,0000
1,5	0,5000	0,4055	0,0000	0,1644	0,0000	0,0000
2	0,4925	0,6931	-0,0187	0,4805	0,0004	-0,0130
2	0,5737	0,6931	0,1858	0,4805	0,0345	0,1288
2,5	0,4341	0,9163	-0,1658	0,8396	0,0275	-0,1520
3	0,8134	1,0986	0,8904	1,2069	0,7927	0,9782
3	0,5586	1,0986	0,1475	1,2069	0,0218	0,1620
3,5	0,8123	1,2528	0,8864	1,5694	0,7857	1,1104
3,5	0,5845	1,2528	0,2135	1,5694	0,0456	0,2675
4	0,6977	1,3863	0,5178	1,9218	0,2681	0,7178
Sumas		9,2026	-3,5236	9,6038	21,0753	3,1998

La Figura 4-11 muestra la comparación entre el modelo de ajuste linealizado de la distribución logarítmica normal contra los datos experimentales.

Figura 4-11: Gráfica de ajuste a la ecuación lineal para 190 °C



Por lo tanto, los parámetros y función de densidad de probabilidad son los siguientes:

$$\hat{\mu} = -\frac{a}{b} = 0.8935 \tag{4.24}$$

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{b} = 0.4314 \tag{4.25}$$

$$f(t) = \frac{1}{x(0.4314)\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\ln(t)-0.8935)}{2(0.4314)^2}\right]} \tag{4.26}$$

Y la vida media y desviación estándar de los ensayos de envejecimiento a 190 °C son:

$$E[X] = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} = 2.6822 \tag{4.27}$$

$$Var(X) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{(2\mu + \sigma^2)} = 1.218 \tag{4.28}$$

4.4.2 Modelo cinético-químico del transformador de media frecuencia

A partir de los valores de vida media de cada temperatura se procede a estimar la ecuación de degradación del transformador en función de la temperatura. Al aplicar logaritmo natural a la ecuación de Arrhenius se tiene la ecuación linealizada para aplicar el método de mínimos cuadrados, es decir:

$$\ln(L) = \ln(A) + \frac{E_a}{R} \frac{1}{\theta_H} \tag{4.29}$$

Donde:

$$X = \frac{1}{(273.15 + \theta_H)} \tag{4.30}$$

$$Y = \ln(L) \tag{4.31}$$

Tabla 4-7: Ajuste a la ecuación de Arrhenius por mínimos cuadrados

Temp (°C)	Vida media (horas)	X	Y	X ²	Y ²	XY
150	11.4678	0.0023640	2.4395431	5.588E-06	5.9513705	0.0057672
170	6.3313	0.0022573	1.8455055	5.095E-06	3.4058908	0.0041659
190	2.6822	0.0021598	0.9866373	4.664E-06	0.9734532	0.0021309
Suma		0.0067812	5.2716860	1.534E-05	10.330714	0.0120641

Los parámetros de ajuste de la ecuación lineal son:

$$b = \frac{N \sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum(X^2) - (\sum X)^2} = 7094.24 \quad (4.32)$$

$$a = \frac{\sum Y - b(\sum X)}{N} = -14.2732 \quad (4.33)$$

Despejando y reemplazando las constantes de la Ecuación (4.29), se obtiene los parámetros de la ecuación de Arrhenius:

$$E_a = aR = 58981.55 \quad (4.34)$$

$$A = e^b = 6.32725 * 10^{-7} \quad (4.35)$$

En consecuencia, el modelo de degradación del transformador de media frecuencia en función de la temperatura, está dado por la ecuación:

$$L = 6.32725 * 10^{-7} e^{\left(\frac{58981.55}{8.314(273.15 + \Theta_H)}\right)} \quad (4.36)$$

Donde:

L : vida media en horas

Θ_H : Temperatura de punto caliente en grados centígrados

La representación gráfica del modelo de Arrhenius para el transformador de media frecuencia se presenta en la Figura 4-12.

Sin embargo, en estudios de confiabilidad es más conveniente modelar los sistemas utilizando el factor de aceleración de envejecimiento F_{AE} . Este se define como la relación entre la condición normal de funcionamiento y condiciones de funcionamiento en esfuerzos, es decir:

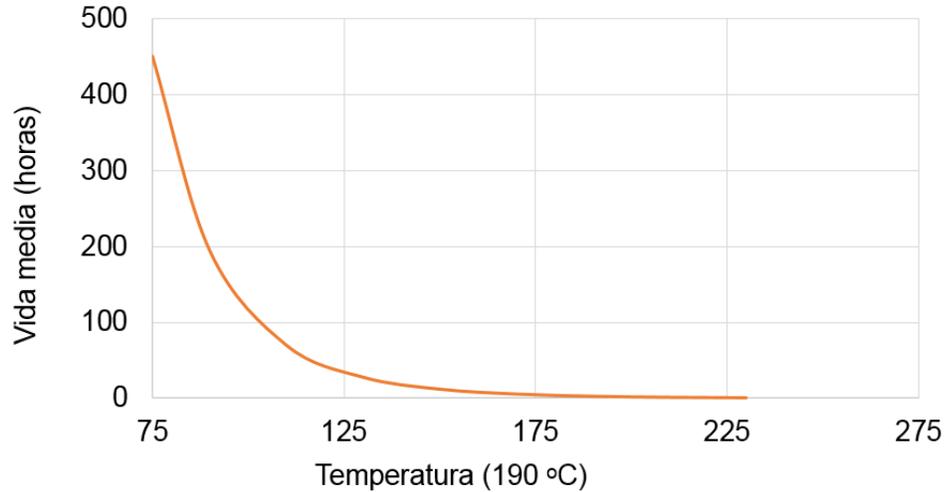
$$F_{AE} = \frac{(L)_{Operación}}{(L)_{Esfuerzo}} \quad (4.37)$$

Donde:

$L_{(Operación)}$: Vida en condiciones de operación

$L_{(Esfuerzo)}$: Vida en el nivel de esfuerzo

Figura 4-12: Modelo de Arrhenius del transformador de media frecuencia

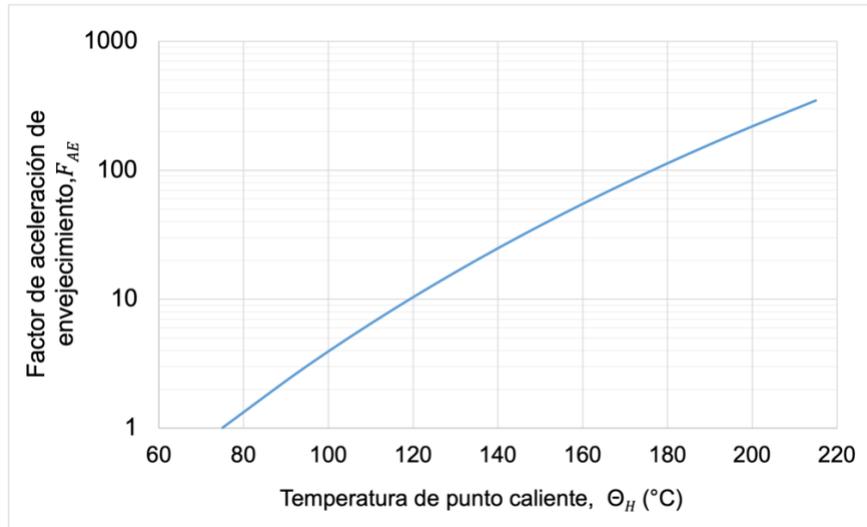


La temperatura de diseño del transformador para funcionamiento en condiciones nominales es de 75 °C, reemplazando los valores en la Ecuación (4-37) se obtiene el factor de envejecimiento acelerado:

$$F_{AE} = e^{\left(\frac{58981.55}{2893.27} - \frac{58981.55}{8.314(273.15+\theta_H)}\right)} \tag{4.38}$$

En ingeniería de confiabilidad, el desarrollo y uso del factor de aceleración F_{AE} es de fundamental importancia para la teoría de las pruebas aceleradas. La conveniencia de utilizar el F_{AE} radica en que es independiente del factor de frecuencia A de la ecuación de Arrhenius. Esto significa que aunque la ecuación de Arrhenius debe expresarse como un distribución de tiempos hasta la falla exclusivo para un dispositivo, el F_{AE} es un factor general e independiente de A . El F_{AE} depende solo de la cinética física de la falla, es decir la energía de activación E_a y no de la variación de dispositivo a dispositivo. La Figura 4-13 muestra la gráfica del factor de aceleración versus la temperatura.

Figura 4-13: Factor de aceleración de envejecimiento



La temperatura nominal del punto caliente de diseño es del alrededor de los 75 °C, a partir de esta temperatura inicia el proceso de degradación del aislamiento, y se puede observar de la Figura 4-13 que un aumento de 12.6 °C duplicará el factor de aceleración del envejecimiento.

4.4.3 Método de diagnóstico

Sabiendo que la degradación del transformador está definida por la extinción del aislamiento entre los hilos del cable Litz, el diagnóstico del transformador queda establecido por la prueba de corto circuito presentada en la sección 4.2.4. Como se demostró, el esfuerzo térmico conlleva al aumento de las pérdidas, y consecuentemente, ocasiona la disminución de la eficiencia del transformador. Por esta razón, la eficiencia del transformador disminuirá durante su vida útil debido al proceso de envejecimiento normal o factores anormales de operación. Evidentemente, tanto los factores técnicos, estratégicos y económicos determinan el final efectivo de la vida útil de los equipos. Esto debido a las condiciones y exigencias de cada aplicación. Es difícil establecer reglas comunes sobre las cuales definir hasta qué punto la operación del equipo deja de ser beneficiosa.

Los transformadores al ser máquinas estáticas, son dispositivos por lo general de muy alta eficiencia. En transformadores de distribución y de potencia se espera una eficiencia superior al 97% y 99% respectivamente; sin embargo, en transformadores de media frecuencia la eficiencia oscila entre 95 y el 98% si son correctamente diseñados. La

diferencia radica en que los transformadores comerciales, de distribución y potencia, cuentan con años de trayectoria en rediseños y programas optimizados.

A partir de los conocimientos empíricos en el desarrollo de esta investigación, se considera que una reducción en la eficiencia del 5% a partir de valor de diseño, se debe realizar un estudio de costo-beneficio para definir la disposición del equipo. El beneficio de un programa de gestión y mantenimiento de la condición del equipo dependerá del nivel de degradación del transformador y de la efectividad del método de diagnóstico que asista en la toma de decisión.

4.5 Síntesis

En este capítulo se presenta el modelo térmico de degradación del transformador de media frecuencia a partir de datos experimentales. Para este propósito, se llevaron a cabo ensayos de envejecimiento acelerado por esfuerzo térmico sobre una muestra de 8 unidades. La muestra de prueba está conformada por transformadores de 540 VA tipo acorazado o Shell (término del idioma inglés) diseñados y construidos con materiales según los procedimientos actualmente aplicados por la industria.

Se desarrolló e implementó la metodología para llevar a cabo los ensayos de envejecimiento acelerado a transformadores de media frecuencia. Para ello, se construyó una cámara de envejecimiento que suministra los requerimientos de esfuerzo térmico y de sobrecarga bajo condiciones controladas sin la influencia de factores externos.

Al analizar los resultados de los ensayos de envejecimiento a los transformadores se identificaron los modos de falla. Se concluyó que el elemento que se degrada más rápidamente debido al efecto térmico es el aislamiento entre los hilos del cable Litz de los devanados. Esto produce un aumento de las pérdidas en los devanados por el efecto de proximidad; por lo tanto, disminución de la potencia suministrada por el transformador. La degradación del sistema de aislamiento de los transformadores de media es bastante lento, el factor acelerado de envejecimiento se duplica cada 12.6 °C

Capítulo V

5. Modelo cinético-químico aplicado al transformador de tipo seco

El capítulo presenta el desarrollo del modelo de degradación del transformador tipo seco basado en la formulación de la cinética-química. Estos ensayos completarán la comprensión de la física de degradación de los transformadores de tipo seco. Para lo cual, se presenta el desarrollo de las metodologías, ejecución y análisis de los resultados de los ensayos de envejecimiento acelerado en transformadores tipo seco.

5.1 Introducción

La instalación de transformadores tipo seco en las redes de distribución ha aumentado año tras año y se prevé un crecimiento anual del 6.1% según estudios de mercado. A diferencia de los transformadores tradicionales que utilizan la recirculación aceite a través de radiadores para controlar el aumento de temperatura, los transformadores tipo seco utilizan refrigeración por aire natural o forzado en lugar de aceite [6]. Los transformadores tipo seco utilizan materiales aislantes de alta temperatura que son seguros y amigables para el medio ambiente.

El transformador tipo seco presenta múltiples ventajas sobre los transformadores inmersos en aceite. La Tabla 5-1 presenta el resumen de las ventajas de cada tipo de transformador. Como los transformadores tipo seco ofrecen menor nivel de riesgo, son más adecuados en instalaciones hospitalarias, escuelas, plantas químicas, edificaciones con grandes aglomeraciones de personas y estructuras donde la seguridad contra incendios es una gran preocupación. Algunas industrias como la del petróleo, producción de gas e insumos

químicos; deben cumplir con estrictos requisitos del nivel de riesgo contra explosiones e incendios. Además, los transformadores tipo seco son de menor peso y espacio reducido, lo que los hace más convenientes en edificios donde se requieren subestaciones en niveles superiores.

Tabla 5-1: Comparación entre transformadores tipo seco e inmerso en aceite

Característica	Transformador tipo seco	Transformador inmerso en aceite
Pruebas fisicoquímicas del aceite	No aplica	Principal método de diagnóstico
Renovación de aceite aislante	No aplica	Requerido para asegurar la integridad del transformador
Riesgo de fuga de aceite	No aplica	Requiere de obras civiles para asegurar la contención del aceite
Bóveda de transformador	Espacio reducido con obras civiles simples	Requiere de mayor espacio (30% a 40% más) con obras civiles especiales
Tiempos de mantenimiento	Mínimo	Los tiempos de mantenimiento son mayores
Riesgo de incendio o explosión	Mínimo	Requiere de obras complejas para minimizar el riesgo
Instalación intemperie	Requiere de una bóveda de transformador	Se puede instalar en intemperie
Inversión Costo	Mayor inversión inicial	Menor inversión inicial
Vida útil	21 años	30 años
Equipos de seguridad para la contención del aceite	No requeridos	Indicador del nivel de aceite, Válvulas de sobrepresión, Relé de Buchholz

Sin embargo, el rendimiento en la disipación de calor de los transformadores tipo seco es relativamente bajo [6], mientras que la recirculación del aceite en los radiadores para disipar el calor es más eficiente. Adicionalmente, la compleja construcción de los transformadores tipo seco para asegurar la ausencia de burbujas que conducirán a descargas parciales, los hacen más costosos que los transformadores inmersos en aceite. Estos factores restringen en cierto grado el crecimiento en la aplicación del transformador tipo seco.

Además, es probable que el desarrollo de los transformadores de estado sólido como sustitución de los transformadores de distribución limite aún más su utilización a largo

plazo. Sin embargo, es posible que el crecimiento y reemplazo de las redes eléctricas con redes inteligentes aumenten la demanda de transformadores de tipo seco en el corto plazo. Por ejemplo, la incorporación de nuevas tecnologías y necesidades como las estaciones de carga de baterías para vehículos tiene el potencial de ofrecer nuevas oportunidades en el mercado de transformadores de tipo seco.

5.2 Determinación de las variables de esfuerzo y cuantificadores de degradación

Igual que en los ensayos de los transformadores inmersos en aceite y transformadores de media frecuencia, la variable de esfuerzo que se debe aplicar en los ensayos de envejecimiento es la temperatura. Debido a que las manifestaciones de energía dentro del transformador ya sean por pérdidas, fallas internas o aumento de la temperatura externa; ocasionan la descomposición del sistema de aislamiento.

En transformadores tipo seco, también fue necesario desarrollar pruebas de sondeo del envejecimiento con el fin de identificar los modos de fallas, establecer los niveles de esfuerzo térmico de los ensayos e identificar los cuantificadores de degradación.

5.2.1 Identificación de los modos de falla

Similar al procedimiento de sondeo de envejecimiento de los transformadores de media frecuencia, se realizaron pruebas de sondeo de envejecimiento acelerado sobre 3 transformadores tipo seco. Posterior a los ensayos de sondeo, se realizaron pruebas eléctricas e inspecciones forenses con el fin de valorar el estado del transformador e identificar los modos de falla tanto en los devanados como en el núcleo. Al inspeccionar los transformadores posteriores a los ensayos de sondeo, los modos de falla identificados fueron por corto circuito y circuito abierto en los devanados del transformador, esto fue verificado por pruebas eléctricas e inspecciones forenses. La pérdida de aislamiento en los devanados o ruptura de los conductores ocasiona a una la falla total del transformador, contrario a lo identificado en los transformadores de media frecuencia donde la degradación es progresiva con el proceso de envejecimiento. Respecto al núcleo, no se identificaron cambios en los parámetros magnéticos que afectan el desempeño del transformador.

Los modos de falla por temperatura solo se presentan en el devanado del transformador. La pérdida del aislamiento de los conductores ocasiona cortocircuitos entre espiras del devanado, también se puede presentar ruptura de los conductores debido al esfuerzo térmico. Por lo tanto, las pruebas eléctricas que establecerán la condición de operación del transformador son: pruebas de circuito abierto, pruebas de cortocircuito y relación de transformación. En este tipo de transformador no se identifican variables de cuantificación que permitan establecer la degradación progresiva del aislamiento con el esfuerzo térmico. Dado que, el cambio de estado entre aislamiento adecuado y defectuoso es súbito.

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de envejecimiento en transformadores tipo seco.

5.3 Ensayos de envejecimiento acelerado en transformadores tipo seco

Los ensayos de envejecimiento acelerado en transformadores tipo seco fueron desarrollados en el laboratorio de investigación de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

A continuación, se enumeran los objetivos que se desean alcanzar en los ensayos experimentales.

5.3.1 Objetivos de los ensayos de envejecimiento

- Crear las condiciones necesarias para la aplicación del esfuerzo térmico en los escenarios planificados en condiciones controladas.
- Elevar la temperatura de punto caliente de los transformadores para generar degradación acelerada de los componentes del aislamiento.
- Registrar las mediciones de las variables de esfuerzo aplicado, cuantificadores de degradación y factores de control.

A continuación, se presenta el desarrollo del envejecimiento de los transformadores tipo seco.

5.3.2 Cámara de envejecimiento

Para el envejecimiento de los transformadores tipo seco se utilizó la misma cámara de envejecimiento de los transformadores de media frecuencia. Similar al proceso de envejecimiento de los transformadores de media frecuencia, en los transformadores tipo seco se aumentó la temperatura de punto caliente de los devanados con la temperatura de la cámara y al someter el transformador a condiciones de sobrecarga por medio de un banco de resistencias. Para tener el control de la temperatura, se instaló un termopar entre los devanados para medir la temperatura del punto caliente durante los ensayos de envejecimiento.

5.3.3 Desarrollo de los ensayos de envejecimiento acelerado

Se seleccionó una muestra de 9 transformadores tipo seco de 24 VA con relación de transformación de 120/12 V adquiridos en el comercio. Los esfuerzos térmicos seleccionados para los ensayos de envejecimiento son de 130 °C, 150 °C y 170 °C medidos en el punto caliente de los devanados.

En cada nivel de esfuerzo se sometieron tres transformadores hasta llevarlos a la falla total. Los tiempos de vida de cada uno de los transformadores fueron registrados para el posterior desarrollo del modelo térmico. Las Tablas 5-2, 5-3, y 5-4 muestran los tiempos de vida útil registrados para cada nivel de esfuerzo.

Tabla 5-2: Mediciones de los ensayos de envejecimiento a 130 °C

Temperatura [°C]	Transformador Nro	vida útil	Probabilidad acumulada, P_i [%]
130	1	17	38.235
130	2	20	67.647
130	3	23	97.058

Tabla 5-3: Mediciones de los ensayos de envejecimiento a 150 °C

Temperatura [°C]	Transformador Nro	Vida útil	Probabilidad acumulada, P_i [%]
150	1	9	38.235
150	2	10	67.647
150	3	13	97.058

Tabla 5-4: Mediciones de los ensayos de envejecimiento a 170 °C

Temperatura [°C]	Transformador Nro	Vida útil, Li	Probabilidad acumulada, P_i
170	1	2	0.38235
170	2	2	0.67647
170	3	3	0.97058

5.3.4 Conclusiones de los ensayos:

- Se desarrollaron los ensayos de envejecimiento cumpliendo los criterios de replicación y control con los registros de los datos para realizar el modelo de degradación del transformador.
- Se identificó claramente los modos de falla de los transformadores con la interpretación e identificación de los estimadores para evaluar el estado de los transformadores.

5.4 Análisis de datos e interpretación de resultados

Con el registro de las variables de esfuerzo térmico y cuantificadores de la degradación, se procede al realizar el análisis estadístico de los datos para calcular la vida media de cada nivel de temperatura y posteriormente realizar el modelo cinético-químico.

5.4.1 Estudio estadístico

La estimación de la probabilidad acumulada de fallas se obtiene por medio de la ponderación de Rank [90]. Para cada nivel de temperatura, los tiempos de vida útil deben seguir una función de probabilidad donde los datos se distribuyen alrededor del valor medio, y que en el estudio corresponde a la vida media.

La función de probabilidad logarítmica normal presenta el mejor ajuste de los datos experimentales según el factor de correlación. Los parámetros de la distribución de probabilidad logarítmica normal, μ y σ , son calculados por el método de ajuste de mínimos cuadrados [87][90]. La Tabla 5-5 resume los cálculos del método de ajuste de los datos experimentales de los 3 transformadores envejecidos a 130 °C a la función de distribución logarítmica normal.

Tabla 5-5: Ajuste a la lognormal por mínimos cuadrados para 130 °C

$X = \ln(L_i)$	$Y = F(P_i)^{-1}$	X^2	Y^2	XY
2.99573227	-0.29930691	8.974411855	0.089584627	-0.896643371
3.17805383	0.457851931	10.10002615	0.209628391	1.455078083
3.33220451	1.88950996	11.1035869	3.57024789	6.296233612
Sumas:		30.1780249	3.869460908	6.854668324

$$m = \frac{N \sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum(X^2) - (\sum X)^2} = 6.4342139 \tag{5.1}$$

$$b = \frac{\sum Y - b(\sum X)}{N} = -19.70517407 \tag{5.2}$$

$$\hat{\mu} = -\frac{a}{b} = 3.06256122 \tag{5.3}$$

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{b} = 0.155419141 \tag{5.4}$$

Y la función de densidad de probabilidad de la degradación a 130 °C es:

$$f(t) = \frac{1}{x(0.155419141)\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\ln(t) - 3.062561223)^2}{2(0.155419141)^2} \right]} \tag{5.5}$$

Por lo tanto, la vida media y la desviación estándar son iguales a:

$$E[X] = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2} \right)} = 21.6420629 \tag{5.6}$$

$$Var(X) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{(2\mu + \sigma^2)} = 3.384005384 \tag{5.7}$$

La Tabla 5-6 muestra los cálculos del ajuste de mínimos cuadrados de los datos experimentales de los ensayos a 150 °C a la función de distribución logarítmica normal.

Tabla 5-6: Ajuste a la lognormal por mínimos cuadrados para 150 °C

$X = \ln(L_i)$	$Y = F(P_i)^{-1}$	X^2	Y^2	XY
2.197224577	-0.29930691	4.827795843	0.089584627	-0.6576445
2.302585093	0.457851931	5.30189811	0.209628391	1.054243031
2.564949357	1.88950996	6.578965206	3.57024789	4.846497359
Sumas:		16.70865916	3.869460908	5.24309589

$$m = \frac{N \sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum(X^2) - (\sum X)^2} = 5.85744665 \quad (5.8)$$

$$b = \frac{\sum Y - b(\sum X)}{N} = -13.11113137 \quad (5.9)$$

$$\hat{\mu} = -\frac{a}{b} = 2.238369747 \quad (5.10)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{b} = 0.170722852 \quad (5.11)$$

Y la función de densidad de probabilidad de la degradación a 150 °C es:

$$f(t) = \frac{1}{x(0.170722852)\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\ln(t)-2.23836974)}{2(0.170722852)^2}\right]} \quad (5.12)$$

La vida media y la desviación estándar para el ensayo a 150 °C son iguales a:

$$E[X] = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} = 9.51569835 \quad (5.13)$$

$$Var(X) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{(2\mu + \sigma^2)} = 1.63645674 \quad (5.14)$$

La Tabla 5-7 muestra los cálculos del método de mínimos cuadrados de los datos experimentales de a °C a la función de distribución logarítmica normal.

Tabla 5-7: Ajuste a la lognormal por mínimos cuadrados para 170 °C

$X = \ln(L_i)$	$Y = F(P_i)^{-1}$	X^2	Y^2	XY
0	-0.29930691	0	0.089584627	0
0	0.457851931	0	0.209628391	0
0.336472237	1.88950996	0.113213566	3.57024789	0.635767642
Sumas:		0.113213566	3.869460908	0.635767642

$$m = \frac{N \sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum(X^2) - (\sum X)^2} = 5.38004998 \quad (5.15)$$

$$b = \frac{\sum Y - b(\sum X)}{N} = 0.07927251 \quad (5.16)$$

$$\hat{\mu} = -\frac{a}{b} = -0.01473453 \quad (5.17)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{b} = 0.185871879 \quad (5.18)$$

Y la función de densidad de probabilidad de la degradación a 150 °C es:

$$f(t) = \frac{1}{x(0.185871879)\sqrt{2\pi}} e^{\left[\frac{-(\ln(t)+0.01473453)}{2(0.185871879)^2} \right]} \quad (5.19)$$

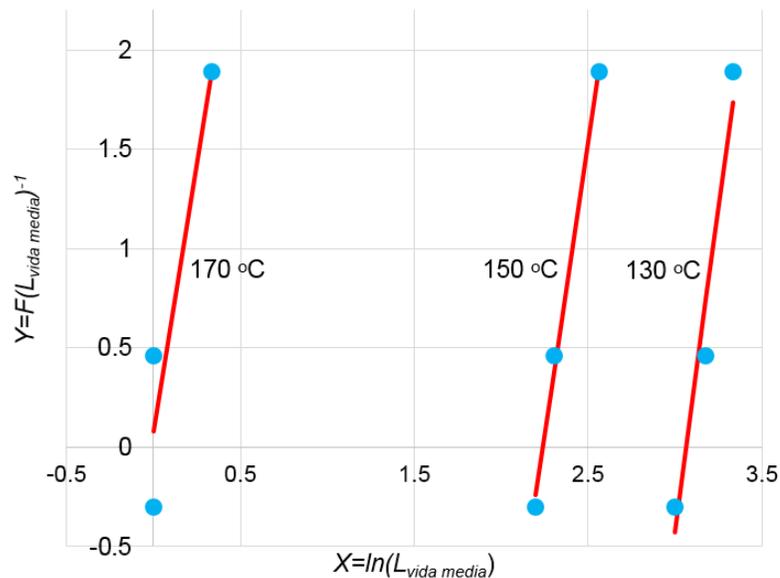
Por lo tanto, la vida media y la desviación estándar son iguales a:

$$E[X] = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} = 1.002542875 \quad (5.20)$$

$$Var(X) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{(2\mu + \sigma^2)} = 0.187965647 \quad (5.21)$$

Los parámetros de forma de las distribuciones de probabilidad de los tres niveles de esfuerzo térmico son razonablemente cercanos uno del otro; y por lo tanto, se puede concluir que las fallas experimentadas en los ensayos de envejecimiento estuvieron gobernadas por el mismo mecanismo de falla [87][88][89]. La Figura 5-1 compara los modelos de ajuste linealizados de las distribuciones logarítmicas normales contra los datos experimentales. En la Figura 5-1 se observa que las representaciones de las ecuaciones lineales de los niveles de esfuerzo son aproximadamente paralelas confirmando que solo hubo un modo de falla en los ensayos de envejecimiento [87][88][89].

Figura 5-1: Gráficas de ajuste probabilística para los niveles de esfuerzo



A partir de los modelos estadísticos de cada nivel de esfuerzo se procede a determinar el modelo térmico del transformador.

5.4.2 Modelo cinético-químico del transformador tipo seco

Con los valores estimados de vida media de cada nivel de esfuerzo, se procede a calcular los parámetros de la ecuación de Arrhenius [87]. Al aplicar logaritmo natural a la ecuación de Arrhenius se tiene la ecuación linealizada para implementar el método de mínimos cuadrados, es decir:

$$\ln(L) = \ln(A) + \frac{E_a}{R} \frac{1}{\theta_H} \quad (5.22)$$

Donde:

$$X = \frac{1}{(273.15 + \theta_H)} \quad (5.23)$$

$$Y = \ln(L) \quad (5.24)$$

La Tabla 5-8 muestra los valores de temperatura y vida media para la aplicación del método de mínimos cuadrados.

Tabla 5-8: Ajuste a la ecuación de Arrhenius por mínimos cuadrados

Temp (°C)	Vida media (horas)	X	Y	X ²	Y ²	XY
130	21.642062	0.0024804	3.0746387	6.1527E-06	9.4534036	0.0076265
150	9.5156983	0.0023632	2.2529428	5.5848E-06	5.0757516	0.0053242
170	1.0025428	0.0022565	0.0025396	5.0921E-06	6.449E-06	5.7309E-06
Sumas		0.00710026	5.3301213	1.6829E-05	14.529161	0.01295648

Los parámetros de ajuste de la ecuación lineal son:

$$m = \frac{N \sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum(X^2) - (\sum X)^2} = 13610.54806 \quad (5.25)$$

$$b = \frac{\sum Y - m(\sum X)}{N} = -30.436133 \quad (5.26)$$

Despejando los parámetros de la Ecuación (5-22) y reemplazando los valores calculados se obtiene los estimadores de la ecuación de Arrhenius:

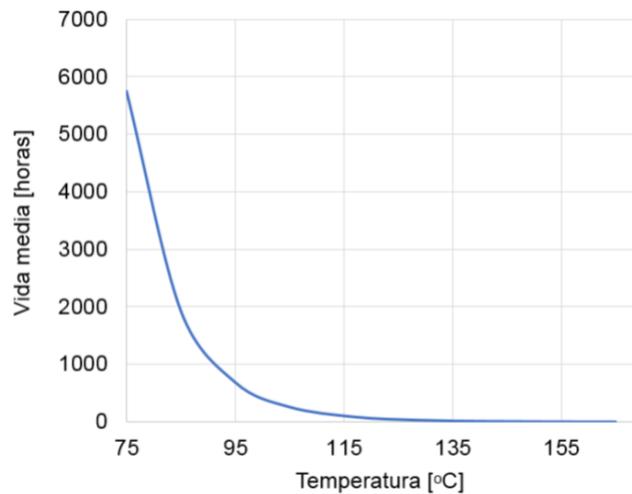
$$E_a = mR = 113158096.6 \tag{5.27}$$

$$A = e^b = 6.05 * 10^{-14} \tag{5.28}$$

Por lo tanto, el modelo de degradación térmica del transformador tipo seco, está dado por la ecuación:

$$L = 6.05 * 10^{-14} e^{\left(\frac{113158096.6}{8.314(273.15+\Theta_H)}\right)} \tag{5.29}$$

Figura 5-2: Modelo de Arrhenius para el transformador tipo seco



El factor de aceleración de envejecimiento F_{AE} que se define como la relación entre la condición operación normal y condiciones de operación sujeto a esfuerzo [87][88], es igual a:

$$F_{AE} = \frac{(L)_{Operación}}{(L)_{Esfuerzo}} \tag{5.30}$$

Donde:

$L_{(Operación)}$: Vida en condiciones de operación

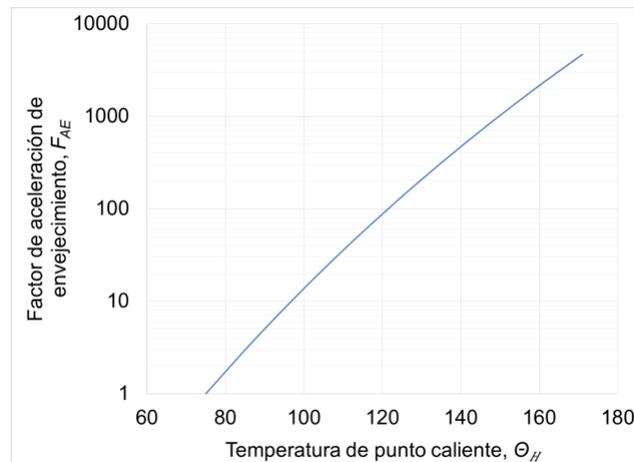
$L_{(Esfuerzo)}$: Vida en un nivel de esfuerzo

Tomando como temperatura de diseño 75 °C para los transformadores tipo seco, y reemplazado los valores en la Ecuación (5-30) el factor de acelerado del envejecimiento es igual a:

$$F_{AE} = e^{\left(\frac{113158096.6}{2894.51} - \frac{113158096.6}{8.314(273.15 + \theta_H)}\right)} \quad (5.31)$$

La Figura 5-3 muestra la gráfica del factor de aceleración versus la temperatura.

Figura 5-3: Factor de aceleración versus temperatura



La temperatura nominal del punto caliente de diseño es del alrededor de los 75 °C, a partir de esta temperatura inicia el proceso de degradación del aislamiento, y se puede observar de la Figura 5-3 que un aumento de 6.5 °C duplicará el factor de aceleración del envejecimiento.

5.4.3 Método de diagnóstico

En el caso de los transformadores tipo seco, el diagnóstico está limitado a la verificación de la viabilidad de operación. Las pruebas eléctricas utilizadas en la sección 5.2.1 para valorar el estado del transformador, de corto circuito, circuito abierto y relación de transformación; indican la disponibilidad de que el transformador pueda operar. Sin

embargo, la cuantificación de nivel de degradación del aislamiento por efecto térmico no es posible en este tipo de transformadores.

5.5 Síntesis

En este capítulo se desarrolla el modelo térmico de degradación del transformador tipo seco a partir de ensayos experimentales. Para este propósito, se llevaron a cabo ensayos de envejecimiento por esfuerzo térmico sobre una muestra de 12 unidades. La muestra de pruebas está conformada por transformadores de 24VA adquiridos en el comercio.

El modo de falla identificado en el transformador se presenta por pérdida del aislamiento de los conductores de los devanados, lo que conlleva a cortocircuitos con la consecuente falla total del transformador. De los ensayos de envejecimiento no se identificaron deformaciones o alteraciones en los parámetros magnéticos del núcleo del transformador.

La degradación del sistema de aislamiento de los transformadores tipo seco es mucho más rápida que el envejecimiento de los transformadores de media frecuencia, el factor acelerado de envejecimiento se duplica cada 6.5 °C.

Capítulo VI

6. Esquema comparativo de evaluación de degradación de los sistemas de aislamiento

Como parte de la metodología de aplicación desarrollada en la tesis, se consideró realizar un análisis comparativo de los modelos de degradación y de diagnóstico de los distintos transformadores, esto con el objeto de contar con un panorama más general sobre la física de degradación de los transformadores. La comparación representa el criterio de interpretación valorativa de los hallazgos teóricos y empíricos.

6.1 Introducción

El punto de partida en el desarrollo de los modelos de degradación de los transformadores fueron los fundamentos de la cinética-química de las reacciones. El cálculo de las energías de activación, energía de Gibbs y energía de activación experimental, permitió registrar los avances de las reacciones de descomposición de la materia. De esta forma, se construyeron modelos térmicos que permiten predecir el nivel de degradación del transformador en función de la temperatura.

6.2 Modelos de degradación

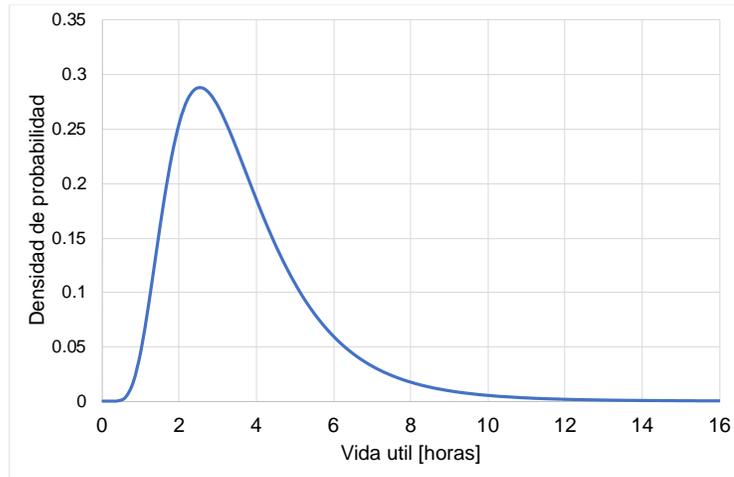
Como se presenta en los capítulos anteriores, la correlación entre la energía de activación y los productos de la descomposición comprenden una temperatura de equilibrio de la reacción, debido a que cada gas o materia requiere de una energía de activación específica para romper los enlaces químicos y así iniciar la reacción química.

En el capítulo 2, se estableció la diferencia entre la energía libre Gibbs de activación y la energía de activación experimental utilizada en la ecuación de Arrhenius. La energía libre de Gibbs de activación es dependiente de la entalpía y de la entropía, ($\Delta G^\ddagger = \Delta H^\ddagger - T\Delta S^\ddagger$), mientras que la energía experimental de activación es dependiente solamente de la entalpía, ($E_a = \Delta H^\ddagger + RT$). Por lo tanto, la energía experimental de activación es una barrera de energía aproximada de la reacción. Se debe aclarar que, el valor exacto de la energía de una reacción debe considerar tanto el cambio de entalpía como el cambio de entropía. Se debe tomar en consideración que algunas reacciones son principalmente impulsadas por la entalpía, mientras que otras reacciones son fundamentalmente dominadas por la entropía, en el mismo orden de ideas, se encuentran las reacciones que dependen tanto de la entropía como de la entalpía [48][50].

En muchos procesos de química orgánica, las reacciones son evaluadas considerando solamente los valores de entalpía [50]. Esto es relativamente correcto en los casos donde las reacciones involucran pequeños cambios de la entropía; en consecuencia, los cambios de entalpía serán cercanos a los cambios de la energía libre de Gibbs. Como se referenció en el estado del arte, se han desarrollado métodos de diagnóstico de transformadores a partir del cálculo de los cambios de entalpía utilizando el análisis de gases; no obstante, estos métodos no han presentado mayor relevancia en aplicaciones industriales. En entornos experimentales, las reacciones de descomposición son evaluadas por medio del cálculo de los cambios de entalpía, la cual se define como el flujo de energía de activación consumida en el curso de una reacción química [58][60]. La medición de la entropía no es considerada en la mayoría de los procesos industriales y de investigación debido a que es un procedimiento bastante complejo.

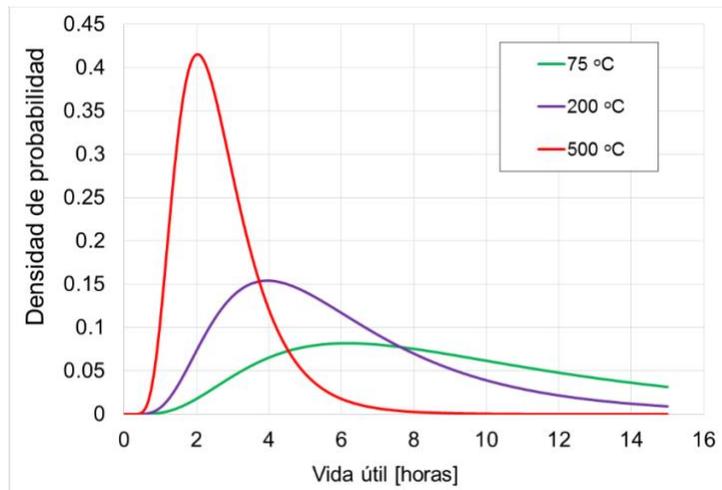
Se debe considerar que los modelos desarrollados en la tesis se formularon a partir de la formulación de modelos de distribuciones de probabilidad. A continuación, se presentan las funciones de densidad de probabilidad que fueron bases en el desarrollo de los modelos. La Figura 6-1 muestra la función de distribución de probabilidad de la vida útil del transformador obtenida a partir de las mediciones de los ensayos de envejecimiento acelerado.

Figura 6-1: Función de probabilidad del transformador inmerso en aceite



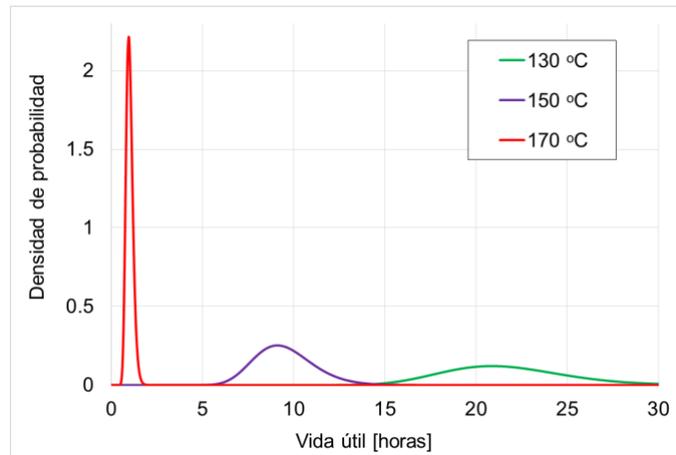
En el caso de los ensayos experimentales, las funciones de probabilidad de las reacciones se obtienen a partir de las mediciones en el laboratorio. La Figura 6-2 muestra las funciones de densidad de probabilidad para cada nivel de temperatura del transformador de media frecuencia.

Figura 6-2: Función de probabilidad del transformador de media frecuencia



De forma similar, la Figura 6-3 muestra las funciones de probabilidad de cada temperatura de los ensayos del transformador tipo seco.

Figura 6-3: Funciones de probabilidad del transformador tipo seco



En los tres casos, todas las distribuciones de probabilidad tienen sesgos hacia la derecha, esto coincide con los postulados de la teoría de colisiones [63][64]. Esto se debe a que en el avance de la reacción disminuye la cantidad del reactivo; por consiguiente, se reduce la frecuencia de las colisiones entre las moléculas alargando el tiempo de descomposición de la reacción.

6.3 Modos de falla

De los ensayos en laboratorio se confirmó que, en todos los tipos de transformadores, el modo de falla se manifiesta por la degradación del aislamiento ocasionando la falla parcial o total del transformador. En el caso de los transformadores inmersos en aceite, se pudieron identificar entre fallas térmicas que corresponden a la circulación de corrientes por la estructura no activa, y fallas eléctricas que implican arcos eléctricos que pueden ser de alta o baja energía, Figura 6-4.

Figura 6-4: Fallas en transformadores inmersos en aceite

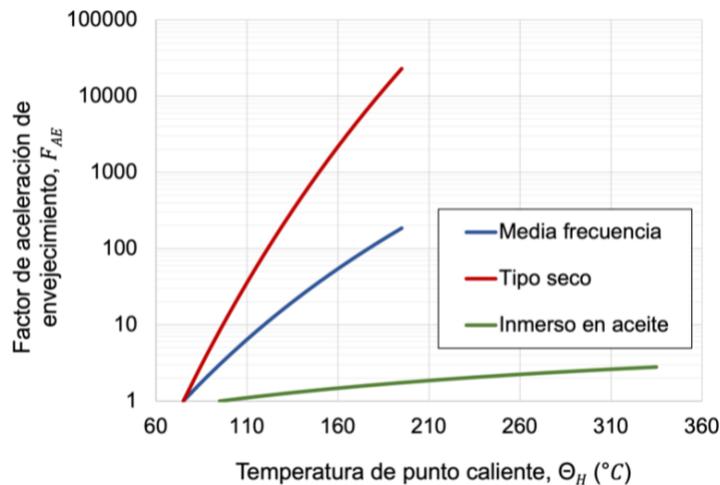


Por el contrario, en los transformadores de aislamiento seco, de media frecuencia y tipo seco, se identificaron fallas concernientes a la circulación de corrientes. Específicamente, en los transformadores de media frecuencia, los esfuerzos térmicos ocasionan la extinción del aislamiento entre los hilos del cable Litz acrecentando las pérdidas por efecto de proximidad de forma progresiva con el aumento de temperatura.

Consecuentemente, la eficiencia del transformador disminuye hasta alcanzar un estado inservible. Esto permitió realizar seguimiento del avance de degradación para cada nivel de esfuerzo térmico y calcular el estadístico de la vida media. También se identificó un modo de falla en el núcleo del transformador; sin embargo, este se presenta a temperaturas mucho más altas que la temperatura de falla de los devanados. Por lo tanto, el modo de falla del núcleo no fue considerado en la elaboración del modelo de degradación. Por el contrario, la pérdida de aislamiento en los transformadores tipo seco conlleva a cortocircuitos en los devanados conduciendo a la falla total del transformador.

La Figura 6-5 compara los factores de aceleración de envejecimiento de los tres transformadores. Como se muestra, la degradación del sistema de aislamiento de los transformadores tipo seco es mucho más rápido que el envejecimiento de los transformadores de media frecuencia, el factor acelerado de envejecimiento se duplica cada 6.5 °C. Por el contrario, la velocidad de envejecimiento de los transformadores de media frecuencia es más lenta, el factor de aceleración se duplica cada 12.3 °C.

Figura 6-5: Comparación de los factores de envejecimiento



La Figura 6-5 también muestra el factor de aceleración de envejecimiento del aceite aislante, donde se observa que es mucho más lento que el de los transformadores de aislamiento seco. Sin duda, el sistema de disipación de calor de los transformadores con aceite es mucho más eficiente que en los transformadores de aislamiento seco.

6.4 Métodos de diagnóstico

El modelo de degradación del transformador inmerso en aceite se formuló a partir de las leyes físicas que gobiernan la materia, moléculas, átomos, enlaces químicos, etc; así como, los fundamentos de la transformación de la materia. El modelo proporcionó un nuevo e innovador método de diagnóstico, el cual presenta la correlación visual entre las proporciones relativas de los tres principales gases: CH_4 , C_2H_4 y C_2H_2 ; y la temperatura de falla. Los resultados obtenidos de la validación experimental del método de diagnóstico ratifican su efectividad; asimismo, también mostró coincidencia con el conocimiento empírico de analistas y administradores de sistemas de potencia, e igualmente con los métodos de diagnósticos clásicos.

Todas las variables de entrada utilizadas en el método del Triángulo Térmico se pueden medir en línea, lo cual permite integrarlo en las nuevas tecnologías y desarrollos de monitoreo en línea. En los programas de gestión de transformadores, debe tenerse en cuenta que, en algunos casos, las fallas se desarrollan en unos pocos días, y a veces, en horas. Sin duda, la gestión de transformadores en línea es mucho más conveniente ya que le permite al propietario del transformador investigar, programar un plan de mantenimiento y corregir el problema de manera oportuna en lugar de reaccionar ante una falla catastrófica que resulte en una mayor pérdida económica. El monitoreo de transformadores en línea proporciona una mayor frecuencia de muestreo y análisis; por lo tanto, las alertas tempranas estarán disponibles para el control y la gestión del transformador. El modelo desarrollado puede ser utilizado por empresas e ingenieros para obtener una evaluación rápida y fiable del estado actual del transformador y proponer la gestión correcta en función del estado del transformador.

El desarrollo del modelo de degradación del transformador de media frecuencia permitió ahondar en la operación física del transformador. Asimismo, en identificar los elementos que reaccionan más rápidamente a los esfuerzos térmicos y los efectos sobre la operación

del transformador. A partir de estos resultados, se estableció el método de diagnóstico que permite calcular el nivel de degradación del transformador, los parámetros que deben ser medidos y la identificación de los efectos sobre el transformador. El diagnóstico del transformador de media frecuencia se debe llevar a cabo por medio de pruebas eléctricas, específicamente, por pruebas de cortocircuito y circuito abierto. Estas pruebas permiten establecer los parámetros característicos tanto del devanado como del núcleo del transformador. Sin embargo, el elemento que establece la vida útil del transformador es la pérdida de aislamiento de los hilos del cable Litz. Por lo tanto, la prueba fundamental para valorar el estado del transformador es la prueba de cortocircuito, la cual permite establecer específicamente el cambio de resistencia de los devanados debido a la degradación del aislamiento.

En el caso de los transformadores tipo seco, el esfuerzo térmico conlleva a la falla total de forma súbita debido a corto circuitos en los devanados. En este tipo de transformador no es posible valorar la degradación del aislamiento.

6.5 Síntesis

Como parte de la metodología de aplicación desarrollada en la tesis, se realiza un análisis comparativo de los modelos térmicos de degradación de los distintos transformadores, esto con el objeto de contar con un panorama más general sobre la física de degradación de los transformadores.

Se expusieron las bases teóricas sobre cuales se sustentaron cada uno de los modelos de degradación y las diferencias de aplicación a cada sistema. Asimismo, se mencionaron las diferencias entre los métodos de diagnósticos de cada transformador derivados del estudio y análisis de los transformadores.

Capítulo VII

7. Conclusiones y futuras investigaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones del desarrollo de la tesis, se proponen futuras investigaciones y se enumeran los artículos que han sido puestos a consideración de la comunidad académica.

7.1 Conclusiones generales

Metodologías de envejecimiento acelerado:

- Se diseña e implementa las metodologías para llevar a cabo los ensayos de envejecimiento acelerado de transformadores inmersos en aceite y transformadores de aislamiento seco de forma exitosa. En razón de que, los ensayos se desarrollaron cumpliendo los criterios de replicación, aleatoriedad, uniformidad y control presentados en la sección 1.6.2.
- Se identifican los modos de falla a causa de los esfuerzos térmicos; así mismo, se reconoce los estimadores más convenientes para cuantificar el nivel de degradación de los sistemas de los transformadores.
- Se identifica el elemento que se degrada más rápidamente en los transformadores de media frecuencia; y este es, el aislamiento entre los hilos del cable Litz de los devanados. La degradación del aislamiento de los hilos del Litz conlleva al aumento de

pérdidas en los devanados por efecto de proximidad como se evidencia en la Figura 4-3.

Métodos de diagnóstico de la degradación térmica de los sistemas de aislamiento:

- En el desarrollo de la tesis se demuestra claramente que es posible cuantificar la severidad de la falla a partir de la energía de activación de las reacciones. Estos resultados generaron nuevos conocimientos valiosos que son aplicados en el desarrollo de métodos de diagnósticos de transformadores.
- A partir de la formulación del modelo de degradación del transformador inmerso en aceite, se desarrolló el método de diagnóstico que presenta una correlación visual entre las concentraciones relativas de los gases CH_4 , C_2H_4 y C_2H_2 , y la temperatura de falla; nombrado método del Triángulo Térmico. El modelo desarrollado fue validado con mediciones experimentales; asimismo, también mostró coincidencia con el conocimiento empírico de analistas y administradores de sistemas de potencia, igualmente con los métodos de diagnósticos clásicos, como se demostró en la sección 3.7.
- El método del Triángulo Térmico proporciona un enfoque cuantitativo de la severidad de falla desde una perspectiva gráfica proporcionando una mejor herramienta en la vigilancia y control en la evolución de la falla. Todas las variables de entrada del método se pueden medir en línea, lo que permite identificar oportunamente los niveles de alarma para una adecuada toma de decisiones, y así implementar un programa de mantenimiento predictivo eficiente que pueda extender la vida operativa del transformador minimizando la posibilidad de eventos catastróficos y enormes sobrecostos.
- La identificación del modo de falla en transformadores de media frecuencia y los efectos sobre su desempeño debido al esfuerzo térmico, permiten plantear el método de diagnóstico para valorar el nivel de degradación del transformador. El diagnóstico se debe realizar por medio de pruebas eléctricas, concretamente, por prueba de corto

circuito. Su fundamento se basa en determinar el cambio de resistencia eléctrica de los devanados debido a la pérdida de aislamiento en los hilos del cable Litz.

Esquema comparativo de la evolución de la degradación de los aislamientos:

- La degradación del sistema de aislamiento de los transformadores tipo seco es mucho más rápido que el envejecimiento de los transformadores de alta frecuencia, el factor acelerado de envejecimiento se duplica cada 6.5 °C, Por el contrario, la velocidad de envejecimiento de los transformadores de media frecuencia es mucho lento, el factor de aceleración de envejecimiento se duplica cada 12.3 °C, como se demostró en la Figura 6-7.

7.2 Futuras investigaciones

Con base en los conocimientos y experiencia adquirida durante la investigación, se propone las siguientes sugerencias para futuros trabajos de investigación:

- Sería conveniente continuar la investigación con el modelado de degradación del aislamiento de papel de los devanados en transformadores inmersos en aceite.
- También se recomienda desarrollar los métodos de diagnóstico implantados sobre los triángulos 4 y 5 del Duval. Estos triángulos son complementos del triángulo 1, y proporcionan información adicional sobre el tipo de falla, presencia de gases de baja temperatura por operación normal (Stray Gassing) y fallas en el aislamiento de papel.
- Desarrollar el modelo de degradación del transformador de media frecuencia con devanados en folio.
- Adicionar al modelo de degradación del transformador de media frecuencia otros factores que disminuyen la confiabilidad del transformador.

7.3 Discusiones académicas

Publicaciones en revistas indexadas:

- Cano-Plata, E. A., Jimenez-Lozano, G., Soto-Marín, O. J., Ustariz-Farfán, A. J., Wilches, J. A. O., Arcila, M. C. C., & Estrada, J. H. (2016). Hybrid simulation of power quality assessment: An application for power ground grid in arc furnace systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(3), 2648-2653.
- Cano-Plata, E. A., Soto-Marin, O. J., & Ustariz-Farfan, A. J. (2017). Life Assessment of Electric Arc Furnace Transformers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), 4125-4135.
- Cano-Plata, E. A., Soto-Marín, O. J., Jiménez-Lozano, G., & Estrada-Estrada, J. H. (2015). Power grounding optimization. *American Journal of Computational Mathematics*, 5(03), 243.

Memorias en eventos:

- Soto-Marín, O. J., Cano-Plata, E. A., Balda, J. C., & Ustariz-Farfán, A. J. (2019). Comparative Analysis of Oil-Filled Transformer and Solid-State Transformer for Electric Arc Furnace. In *2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1-6). IEEE.
- Cano-Plata, E. A., Soto-Marín, O. J., & Ustariz-Farfán, A. J. (2016, October). Validation and reception of electric arc furnace transformers. In *2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1-6). IEEE.
- Cano-Plata, E. A., Jimenez-Lozano, G., Soto-Marín, O. J., Ustariz-Farfán, A. J., Wilches, J. A. O., Arcila, M. C. C., & Estrada, J. H. (2016). Hybrid simulation of power quality assessment: An application for power ground grid in arc furnace systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(3), 2648-2653.

Referencias bibliográficas

- [1]. Huang, A. Q. (2016). Medium-voltage solid-state transformer: Technology for a smarter and resilient grid. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 10(3), 29-42.
- [2]. Huber, J. E., & Kolar, J. W. (2016). Solid-state transformers: On the origins and evolution of key concepts. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 10(3), 19-28.
- [3]. Bignucolo, F., Bertoluzzo, M., & Fontana, C. (2015, October). Applications of the solid-state transformer concept in the electrical power system. In *2015 AEIT International Annual Conference (AEIT)* (pp. 1-6). IEEE.
- [4]. Hannan, M. A., Ker, P. J., Lipu, M. S. H., Choi, Z. H., Rahman, M. S. A., Muttaqi, K. M., & Blaabjerg, F. (2020). State of the art of solid-state transformers: Advanced topologies, implementation issues, recent progress and improvements. *Ieee Access*, 8, 19113-19132.
- [5]. Shamshuddin, M. A., Rojas, F., Cardenas, R., Pereda, J., Diaz, M., & Kennel, R. (2020). Solid state transformers: Concepts, classification, and control. *Energies*, 13(9), 2319.
- [6]. Franklin, A. C., & Franklin, D. P. (2016). *The J & P transformer book: a practical technology of the power transformer*. Elsevier.
- [7]. Tang, W. H., & Wu, Q. H. (2011). Condition monitoring and assessment of power transformers using computational intelligence. Springer Science & Business Media.
- [8]. A. Abu-Siada, Power Transformer Condition Monitoring and Diagnosis, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2018.
- [9]. Vahidi, B., & Teymouri, A. (2019). *Quality confirmation tests for power transformer insulation systems*. Springer International Publishing.
- [10]. Chakravorti, S., Dey, D., & Chatterjee, B. (2013). Recent trends in the condition monitoring of transformers. *Power Systems Springer-Verlag: London, UK*.
- [11]. Saha, T. K., & Purkait, P. (Eds.). (2017). *Transformer ageing: monitoring and estimation techniques*. John Wiley & Sons.
- [12]. Reclamation, B. (2005). Transformers: Basics, maintenance and diagnostics. *US Department of the Interior Bureau of Reclamation. Denver, Colorado, USA*
- [13]. Smith J.M., Van Ness, H.C., Abbott, M.M., (2001). Introduction to chemical engineering thermodynamics, McGraw-Hill Education

- [14]. Dahm, K. D., & Visco, D. P. (2014). *Fundamentals of Chemical Engineering Thermodynamics*. Cengage Learning.
- [15]. Koretsky, M. D. (2012). *Engineering and chemical thermodynamics*. John Wiley & Sons.
- [16]. Halstead, W. D. (1973). A thermodynamic assessment of the formation of gaseous hydrocarbons in faulty transformers. *Journal of the Institute of Petroleum*, 59(569), 239-41.
- [17]. Transformers Committee. (2008). Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers; IEEE Std C57. 104. *IEEE: New York, NY, USA*.
- [18]. International Electrotechnical Commission. (1999). Mineral oil-impregnated electrical equipment in service—guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis. *International Standard IEC, 60599*.
- [19]. Shirai, M., Shimoji, S., & Ishii, T. (1977). Thermodynamic study on the thermal decomposition of insulating oil. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (4), 272-280.
- [20]. Dornenburg, E., & Strittmatter, W. (1974). Monitoring oil-cooled transformers by gas-analysis. *Brown Boveri Review*, 61(5), 238-247.
- [21]. Rogers, R. R. (1978). IEEE and IEC codes to interpret incipient faults in transformers, using gas in oil analysis. *IEEE transactions on electrical insulation*, (5), 349-354.
- [22]. Sun, H. C., Huang, Y. C., & Huang, C. M. (2012). A review of dissolved gas analysis in power transformers. *Energy Procedia*, 14, 1220-1225.
- [23]. Faiz, J., & Soleimani, M. (2017). Dissolved gas analysis evaluation in electric power transformers using conventional methods a review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(2), 1239-1248.
- [24]. Duval, M. (1989). Dissolved gas analysis: It can save your transformer. *IEEE electrical insulation magazine*, 5(6), 22-27.
- [25]. Duval, M. (2008). The Duval triangle for load tap changers, non-mineral oils and low temperature faults in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 24(6), 22-29.
- [26]. Duval, M. (2002). A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers. *IEEE electrical Insulation magazine*, 18(3), 8-17.
- [27]. Duval, M., & DePabla, A. (2001). Interpretation of gas-in-oil analysis using new IEC publication 60599 and IEC TC 10 databases. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 17(2), 31-41.
- [28]. Duval, M., Hoehlein, I., Scatiggio, F., Cyr, M., Grisaru, M., Frotscher, R., ... & Westlin, L. (2010). DGA in Non-Mineral Oils and Load Tap Changers and Improved DGA Diagnosis Criteria. *CIGRE brochure*, 443.
- [29]. Lowe, R. I. (1985). Artificial intelligence techniques applied to transformer oil dissolved gas analysis. In *Proceedings of the 1985 International Conference of Doble Clients. Boston, Massachusetts*.

- [30]. Dukarm, J. J. (1993). Transformer oil diagnosis using fuzzy logic and neural networks. In *Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering* (pp. 329-332). IEEE.
- [31]. Mohammad, G., Sahar, S. S., & Mohammad, A. V. (2011). Artificial neural networks applied to DGA for fault diagnosis in oil-filled power transformers. *Journal of Electrical and Electronics Engineering Research*, 3(1), 1-10.
- [32]. Patekar, K. D., & Chaudhry, B. (2019, November). DGA analysis of transformer using Artificial neural network to improve reliability in Power Transformers. In *2019 IEEE 4th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)* (pp. 1-5). IEEE.
- [33]. Flores, W. C., Mombello, E. E., Jardini, J. A., Rattá, G., & Corvo, A. M. (2011). Expert system for the assessment of power transformer insulation condition based on type-2 fuzzy logic systems. *Expert Systems with Applications*, 38(7), 8119-8127.
- [34]. Khan, S. A., Equbal, M. D., & Islam, T. (2015). A comprehensive comparative study of DGA based transformer fault diagnosis using fuzzy logic and ANFIS models. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(1), 590-596.
- [35]. Bakar, N. A., & Abu-Siada, A. (2016). Fuzzy logic approach for transformer remnant life prediction and asset management decision. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(5), 3199-3208.
- [36]. Hossam-Eldin, A. A., Refaey, M., & Ramadan, H. (2017, December). New approach to power transformer asset management and life assessment using fuzzy logic techniques. In *2017 Nineteenth International Middle East power Systems Conference (MEPCON)* (pp. 901-908). IEEE.
- [37]. Arshad, M., Islam, S. M., & Khaliq, A. (2014). Fuzzy logic approach in power transformers management and decision making. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21(5), 2343-2354.
- [38]. Malik, H., & Mishra, S. (2016). Application of gene expression programming (GEP) in power transformers fault diagnosis using DGA. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(6), 4556-4565.
- [39]. Li, J., Zhang, Q., Wang, K., Wang, J., Zhou, T., & Zhang, Y. (2016). Optimal dissolved gas ratios selected by genetic algorithm for power transformer fault diagnosis based on support vector machine. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(2), 1198-1206.
- [40]. Zhang, Y., Li, X., Zheng, H., Yao, H., Liu, J., Zhang, C., ... & Jiao, J. (2019). A fault diagnosis model of power transformers based on dissolved gas analysis features selection and improved krill herd algorithm optimized support vector machine. *IEEE Access*, 7, 102803-102811.
- [41]. Shintemirov, A., Tang, W., & Wu, Q. H. (2008). Power transformer fault classification based on dissolved gas analysis by implementing bootstrap and genetic programming. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 39(1), 69-79

- [42]. Duval, M., & Lamarre, L. (2014). The duval pentagon-a new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 30(6), 9-12.
- [43]. Marques, A., de Moura, N. K., Dias, Y. A., de Jesus Ribeiro, C., Rocha, A. S., da Cunha Brito, L., ... & dos Santos, J. A. L. (2017). Method for the evaluation and classification of power transformer insulating oil based on physicochemical analyses. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 33(1), 39-49.
- [44]. Zeinoddini-Meymand, H., & Vahidi, B. (2016). Health index calculation for power transformers using technical and economical parameters. *IET Science, Measurement & Technology*, 10(7), 823-830.
- [45]. Jakob, F., Noble, P., & Dukarm, J. J. (2011). A thermodynamic approach to evaluation of the severity of transformer faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(2), 554-559.
- [46]. Mharakurwa, E. T., Nyakoe, G. N., & Akumu, A. O. (2019). Power transformer fault severity estimation based on dissolved gas analysis and energy of fault formation technique. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2019.
- [47]. Cruz, V. G., Costa, A. L., & Paredes, M. L. (2015). Development and evaluation of a new DGA diagnostic method based on thermodynamics fundamentals. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(2), 888-894.
- [48]. Dukarm, J., & Jakob, F. (2016, May). Thermodynamic estimation of transformer fault severity. In *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)* (pp. 1-1). IEEE.
- [49]. Ghoneim, S. S. (2018). Intelligent prediction of transformer faults and severities based on dissolved gas analysis integrated with thermodynamics theory. *IET Science, Measurement & Technology*, 12(3), 388-394.
- [50]. Cruz, V. G. M., Costa, A. L., & Paredes, M. L. (2015). Simulation of thermal decomposition of mineral insulating oil. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32(3), 781-794.
- [51]. Marques, A.P., Moura, N.K., Dias, Y.A., Ribeiro, C.D., Rocha, A.S., Brito, L.D., Azevedo, C.H., & Santos, J.A. (2017). Method for the evaluation and classification of power transformer insulating oil based on physicochemical analyses. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 33, 39-49.
- [52]. McMurray, W. (1970). *U.S. Patent No. 3,517,300*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office
- [53]. Brooks, J. L. (1980). *Solid State Transformer Concept Development*. CIVIL ENGINEERING LAB (NAVY) PORT HUENEME CA.
- [54]. Reischl, P. (1995). Proof of the principle of the solid-state transformer and the AC/AC switch mode regulator. *Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA*.
- [55]. Kang, M., Enjeti, P. N., & Pitel, I. J. (1999). Analysis and design of electronic transformers for electric power distribution system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 14(6), 1133-1141.

- [56]. Pena-Alzola, R., Gohil, G., Mathe, L., Liserre, M., & Blaabjerg, F. (2013, September). Review of modular power converters solutions for smart transformer in distribution system. In *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition* (pp. 380-387). IEEE.
- [57]. Kolar, J. W., & Ortiz, G. (2014, May). Solid-state-transformers: Key components of future traction and smart grid systems. In *Proceedings of the International Power Electronics Conference-ECCE Asia (IPEC 2014)* (pp. 18-21). IEEE.
- [58]. Zhao, C., Dujic, D., Mester, A., Steinke, J. K., Weiss, M., Lewdeni-Schmid, S., ... & Stefanutti, P. (2013). Power electronic traction transformer—Medium voltage prototype. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(7), 3257-3268.
- [59]. Raju, R. N., Zhang, R. S., Stevanovic, L. D., Slotnick, J. N., Steigerwald, R. L., & Garces, L. J. (2014). *U.S. Patent No. 8,644,037*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [60]. Grider, D., Das, M., Agarwal, A., Palmour, J., Leslie, S., Ostop, J., ... & Hefner, A. (2011, April). 10 kV/120 A SiC DMOSFET half H-bridge power modules for 1 MVA solid state power substation. In *2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium* (pp. 131-134). IEEE.
- [61]. Tabatabaian, M., Rajput, R. K. (2018). *Advanced Thermodynamics: Fundamentals, Mathematics and Applications*, Mercury Learning and information.
- [62]. Cengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoğlu, M. (2011). *Thermodynamics: an engineering approach*. New York: McGraw-hill.
- [63]. Atkins, P., & De Paula, J. (2011). *Physical chemistry for the life sciences*. Oxford University Press, USA.
- [64]. Mortimer, R. G. (2000). *Physical chemistry*. Academic Press.
- [65]. Bruice, P. Y. (2017). *Organic chemistry*. Pearson.
- [66]. Poonnoy, N., Suwanasri, C., & Suwanasri, T. (2020). Fuzzy logic approach to dissolved gas analysis for power transformer failure index and fault identification. *Energies*, 14(1), 36.
- [67]. Ispirli, M. M., Adali, H., Kalenderli, Ö., Celik, M. Z., & Oral, B. (2021). Application and Comparative Analysis of Fuzzy Inference System for Transformer Fault Diagnosis with Dissolved Gases in Oil. In *2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)* (pp. 187-190).
- [68]. Thango, B. A., Nnachi, A. F., Jordaan, J. A., Akumu, A. O., & Abe, B. T. (2021). A Diagnostic Study of Dissolved Gases in Transformers based on Fuzzy Logic Approach. In *2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica* (pp. 1-5). IEEE.
- [69]. Wang, X., Guo, F., & Xu, W. (2020, June). DGA fuzzy logic diagnostic method based on subordinating function. In *2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)* (pp. 1381-1384).
- [70]. Taha, I. B., Ibrahim, S., & Mansour, D. E. A. (2021). Power transformer fault diagnosis based on DGA using a convolutional neural network with noise in measurements. *IEEE Access*, 9, (pp. 111162-111170).

- [71]. Wang, W., Zhang, R., Li, Y., Lv, G., Luo, Z., & Xu, H. (2022, February). Fault Diagnosis for Power Transformer Based on Uniform Distribution of Grasshopper Optimization Algorithm Combined with Neural Network. In *2022 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA)* (pp. 225-230). IEEE.
- [72]. Poonnoy, N., Suwanasri, C., & Suwanasri, T. (2022, March). Neural Network Approach to Dissolved Gas Analysis for Fault Analysis in Power Transformers. In *2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON)* (pp. 1-4). IEEE.
- [73]. Chen, W., Zai, H., He, H., Zhang, K., Xi, R., & Fu, F. (2021, October). Research on Fault Diagnosis Method of Power Transformer Based on Graph Neural Network. In *2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)* (pp. 4289-4294). IEEE.
- [74]. Zhang, Y., Wang, Y., Fan, X., Zhang, W., Zhuo, R., Hao, J., & Shi, Z. (2020). An integrated model for transformer fault diagnosis to improve sample classification near decision boundary of support vector machine. *Energies*, *13*(24), 6678.
- [75]. Li, J., Li, G., Hai, C., & Guo, M. (2021). Transformer Fault Diagnosis Based on Multi-Class AdaBoost Algorithm. *IEEE Access*, *10*, 1522-1532
- [76]. Li, X., Li, Y., Xu, Y., Li, R., & Zhang, G. (2022, March). Fault Diagnostics of Oil-immersed Power Transformer via SMOTE and GWO-SVM. In *2022 4th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES)* (pp. 935-939).
- [77]. Ghoneim, S. S., Mahmoud, K., Lehtonen, M., & Darwish, M. M. (2021). Enhancing diagnostic accuracy of transformer faults using teaching-learning-based optimization. *Ieee Access*, *9*, 30817-30832
- [78]. Nelson, W. B. (2009). Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analysis. John Wiley & Sons.
- [79]. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007). *Numerical recipes 3rd edition: The art of scientific computing*. Cambridge university press.
- [80]. Ben-Israel, A. (1966). A Newton-Raphson method for the solution of systems of equations. *Journal of Mathematical analysis and applications*, *15*(2), 243-252.
- [81]. Church, J. O., Hauptert, T. J., & Jakob, F. (1987). Analyze incipient faults with dissolved gas Nomograph. *Electrical world*, *201*(10), 40-44.
- [82]. Pahlavanpour, B., & Pablo, A. D. (2010). Insulating Oil Reclamation and Dechlorination. CIGRE. Cigre, CIGRE. *WG D1*, *1*.
- [83]. IEEE. (2013). IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors. *Proceedings of the IEEE Std C57. 152-2013*, 1-121.
- [84]. IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, IEEE Standard C57.12.00, 2015.
- [85]. IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus- Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors, IEEE Standard 62, 2005.

- [86]. IEEE Std 62-1995. (1995). IEEE guide for diagnostic field testing of electric power apparatus-part 1: oil filled power transformers, regulators, and reactors.
- [87]. IEEE Guide for the Statistical Analysis of Thermal Life Test Data, in ANSI/IEEE Std 101-1987(R2010) (Revision of IEEE Std 101-1972) , vol., no., pp.1-34, 31 Dec. 1988, doi: 10.1109/IEEESTD.1988.7473795.
- [88]. Meeker, W. Q., Escobar, L. A., & Pascual, F. G. (2022). Statistical methods for reliability data. John Wiley & Sons.
- [89]. Dhillon, B. S. (2007). Applied reliability and quality: fundamentals, methods and procedures. Springer Science & Business Media
- [90]. Manzini, R., Regattieri, A., Pham, H., & Ferrari, E. (2010). *Maintenance for industrial systems*. London: Springer.
- [91]. Hoyland, A., & Rausand, M. (2009). *System reliability theory: models and statistical methods*. John Wiley & Sons.
- [92]. Elsayed, A., (2021) Reliability Engineering-Wiley (2021), John Wiley & Sons
- [93]. Modarres, M., Amiri, M., & Jackson, C. (2017). Probabilistic physics of failure approach to reliability: modeling, accelerated testing, prognosis and reliability assessment. John Wiley & Sons.
- [94]. Mendoza, H, Bautista, G. (2002). Diseño Experimental. Universidad Nacional de Colombia, <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000352/>. Licencia: Creative Commons BY-NC-ND.
- [95]. Dean, R. B., & Dixon, W. J. (1951). Simplified statistics for small numbers of observations. *Analytical chemistry*, 23(4), 636-638.
- [96]. <https://www.labe.unal.edu.co/>
- [97]. Grisaru, M. (2020). A century of dissolved gas analysis-part III. *Transformers Magazine*, 7(1), 50-58.
- [98]. Wang, M. V. A. J., Vandermaar, A. J., & Srivastava, K. D. (2002). Review of condition assessment of power transformers in service. *IEEE Electrical insulation magazine*, 18(6), 12-25.
- [99]. Hagman, W. H., Kirtley Jr, J. L., Lesieutre, B. C., Boyd, M. J., Warren, E. P., Chou, H. P., & Tabors, R. D. (1996). Model-based Monitoring of Transformers. Massachusetts Institute of Technology, Laboratory for Electromagnetic and Electronic Systems.
- [100]. IEEE Power & Energy Society. (2012). Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators.
- [101]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Icosane>
- [102]. IEEE Recommended IEEE Recommended Practice for Performing Temperature Rise Tests on Oil-Immersed Power Transformers at Loads Beyond Nameplate Ratings, IEEE Standard C57.119.
- [103]. Ben-gang, W., Chen-zhao, F., Hong-lei, L., Ke-jun, L., & Yong-liang, L. (2016, May). The improved thermal-circuit model for hot-spot temperature calculation of oil-immersed power transformers. In *2016 IEEE Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference* (pp. 809-813).

- [104]. Dodson, B., & Schwab, H. (2006). Accelerated testing. SAE International.
- [105]. McPherson, J. W. (2018). *Reliability physics and engineering: time-to-failure modeling*. Springer.
- [106]. Modarres, M., Kaminskiy, M. P., & Krivtsov, V. (2009). *Reliability engineering and risk analysis: a practical guide*. CRC press.
- [107]. ReliaSoft, C. (2014). Accelerated life testing reference. Tucson, AZ: ReliaSoft Publishing.
- [108]. LuValle, M. J., Lefevre, B. G., & Kannan, S. (2004). *Design and analysis of accelerated tests for mission critical reliability*. Chapman and Hall/CRC.
- [109]. Du, L., Wang, Y., Wang, W., & Chen, X. (2018). Studies on a Thermal Fault Simulation Device and the Pyrolysis Process of Insulating Oil. *Energies*, 11(12), 3392.
- [110]. Chen, G., & Pham, T. T. (2000). Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems. CRC press.
- [111]. Sivanandam, S. N., Sumathi, S., & Deepa, S. N. (2007). *Introduction to fuzzy logic using MATLAB* (Vol. 1). Berlin: Springer.
- [112]. Hurley, W. G., & Wölfle, W. H. (2013). *Transformers and inductors for power electronics: theory, design and applications*. John Wiley & Sons.
- [113]. McLyman, C. W. T. (2004). Transformer and inductor design handbook. CRC press.
- [114]. Valchev, V. C., & Van den Bossche, A. (2018). *Inductors and transformers for power electronics*. CRC press.
- [115]. METGLAS® 2605-SA1 core datasheet, National Energy Technology Laboratory, 2018
- [116]. Sullivan, C. R., & Zhang, R. Y. (2014, March). Simplified design method for Litz wire. In *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014* (pp. 2667-2674). IEEE.
- [117]. Metglas, High frequency distributed gap inductor core, Technical bulletin
- [118]. <https://www.mkmagnetics.com>
- [119]. <https://metglas.com/>

Apéndice A

Método de Newton-Raphson para sistemas multivariados [79][80]

Sea $f: R^n \rightarrow R^n$ un sistema de ecuaciones no lineales. Se requiere resolver el sistema de ecuaciones tal que $f(x) = 0$, donde $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in R^n$ representa al vector de incógnitas. Asumiendo que $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)^T \in R^n$ es la solución del sistema de ecuaciones, y si $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T$ es dos veces diferenciable. Entonces, aplicado el desarrollo de Taylor para funciones de varias variables de f en torno a una aproximación de la raíz, $x^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})^T$ se tiene que:

$$0 = f(\alpha) = f(x^{(k)}) + Df(x^{(k)})(\alpha - x^{(k)}) + o(\|\alpha - x^{(k)}\|^2) \quad (\text{A.1})$$

Siendo $Df(x^{(k)})$ la matriz Jacobiana de f en $x^{(k)}$:

$$Df(x^{(k)}) := \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x^{(k)}) & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(x^{(k)}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}(x^{(k)}) & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}(x^{(k)}) \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

De la ecuación 2.49 cuando $\|\alpha - x^{(k)}\|$ es pequeño, el término $o(\|\alpha - x^{(k)}\|^2)$ es aún más pequeño y puede despreciarse, es decir.

$$0 \approx f(x^{(k)}) + Df(x^{(k)})(\alpha - x^{(k)}) \quad (\text{A.3})$$

Si $Df(x^{(k)})$ es una matriz que tiene inversa, es posible despejar α de la ecuación para tener una aproximación de la solución:

$$\alpha \approx x^{(k)} - Df(x^{(k)})^{-1}f(x^{(k)}) \quad (\text{A.4})$$

El método de Newton-Raphson consiste en, dada la aproximación de la solución x^k , tomar como nueva aproximación $x^{(k+1)}$ el valor de la expresión anterior:

$$x^{(k+1)} := x^{(k)} - Df(x^{(k)})^{-1}f(x^{(k)}), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{A.5})$$

Apéndice B

Diseño de transformadores de media frecuencia

Esta sección presenta el procedimiento para diseñar transformadores de media frecuencia utilizados en los ensayos de envejecimiento siguiendo los criterios de construcción y materiales actualmente utilizados en la industria [112][113].

B.1 Diseño y construcción de los transformadores de media frecuencia

Se diseñaron y construyeron 8 unidades idénticas según los parámetros de diseño mostrados en la tabla B-1.

Tabla B-1: Parámetros eléctricos de diseño

Parámetro	Símbolo	Valor
Tensión RMS del primario	V_p	60 V
Tensión RMS del secundario	V_s	60 V
Corriente RMS del secundario	I_s	9 A
Frecuencia	f	5 kHz
Temperatura	T	75 °C
Densidad de flujo	B	0.4 T
Eficiencia	η	0.96
Pérdidas en el cobre	P_{cu}	1.8 W
Pérdidas en el núcleo	P_{Fe}	4.5 W
Potencial nominal	$P_{nominal}$	540 W

El objetivo general del diseño del transformador es maximizar la eficiencia mientras se minimiza el peso y el volumen del transformador sujeto a las restricciones del aumento de temperatura y de inductancia. A continuación se describen los principales elementos estructurales a considerar en el diseño del transformador.

B.2 Consideraciones del núcleo magnético

La Tabla B-2 resume las características de los principales materiales utilizados en la construcción de transformadores en el rango de varios a decenas de kilohercios; a saber, ferrita, nanocristalino y amorfos. Los núcleos de ferrita son utilizados en aplicaciones con frecuencias en el rango de decenas a cientos de kilohercios con muy bajas pérdidas, sin embargo, la densidad de flujo de saturación es muy baja, menor al 0.4 T, adicionalmente son núcleos frágiles. Los núcleos nanocristalinos tienen una densidad de saturación más alta (1.2 T) con pérdidas extremadamente bajas, su desventaja radica en que tienen un alto costo. Sin embargo, los núcleos amorfos tienen la densidad de saturación más alta, 1.56 T, sus pérdidas en el rango de kilohercios son aceptables y son de bajo costo, convirtiéndolo en el de mayor aplicación en la industria.

Tabla B-2: Principales propiedades de los materiales magnéticos.

Materiales	Ferrita	Nanocristalinos	Amorfos
Modelo	Epcos N87	Viroperm 500F	Metglass 2605
Permeabilidad, μ_i	2 200	15 000	10 000 – 150 000
B_{sat}	0.49	1.2	1.56
ρ , $\mu\Omega\text{m}$	10×10^6	1.15	1.3
Temperatura Curie, T_c °C	210	600	399
K_C	16.9	2.3	1.36
α	1.25	1.32	1.51
β	2.35	2.1	1.74

La operación de transformadores a más altas frecuencias conduce a mayores pérdidas y aumento de temperatura, por lo que la selección del material magnético con alta densidad de flujo de saturación, bajas pérdidas y alta temperatura de operación es fundamental para lograr una alta eficiencia.

Tomando en cuenta que el objetivo es evaluar los transformadores actualmente utilizados en la industria, se seleccionó el núcleo de materiales amorfos para construir los transformadores de la muestra. El núcleo laminado se fabrica con cinta amorfa 2605-SA1 que está compuesta principalmente de hierro con pequeños porcentajes de silicio y boro [118], Figura B-1. La Tabla B-3 muestra las dimensiones del núcleo de referencia 2605SA1-AMCC 6.3 utilizado para construir los transformadores de la muestra.

Figura B-1: Núcleo de aleaciones amorfas

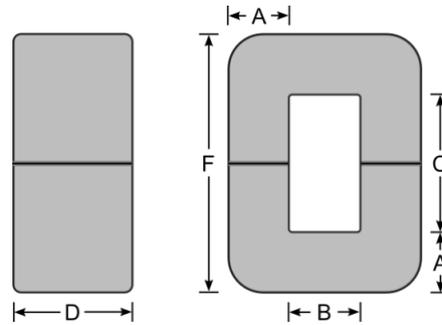


Tabla B-3: Dimensiones del núcleo

Descripción	Símbolo	Medida final
Ancho del núcleo ¹	A	10 mm
Altura de núcleo ¹	B	11 mm
Profundidad del núcleo ¹	C	33 mm
Espesor ¹	D	20 mm
Ancho de la ventana ¹	E	31 mm
Altura de la ventana ¹	F	53 mm
Longitud media del camino magnético	l _m	13.1 cm
Área de devanado de ventana del núcleo	W _a	3.6 cm ²
Producto de área de ventana del devanado	A _p	5.8 cm ⁴
Masa	m	150 kg

¹ La Figura B-2 representa las dimensiones en el núcleo

Figura B-2: Dimensiones del núcleo 2605SA1-AMCC 6.3



La Tabla B-4 presenta los valores de las propiedades físicas del núcleo de aleaciones amorfas de referencia 2605SA1 [115][118].

Tabla B-4: Propiedades físicas

Descripción	Valor
Espesor de laminación	0.25 μm
Densidad	7.18 g/cm^3
Temperatura de cristalización	505 $^{\circ}\text{C}$
Temperatura de curie	392 $^{\circ}\text{C}$
Temperatura de servicio continuo	150 $^{\circ}\text{C}$
Saturación de magnetostricción	27 ppm
Resistividad eléctrica	137 $\mu\Omega\text{cm}$
Densidad de flujo de saturación, B_{Sat}	1.56 T
Química	$\text{Fe}_{80}\text{Si}_9\text{B}_{11}$ at%

actualmente utilizados en la industria [112][113].

B.1 Consideraciones de los devanados

La resistencia de los conductores utilizados en devanados de los transformadores genera pérdidas en forma de calor de la forma I^2R , donde I es la corriente en el conductor. Estas pérdidas son conocidas como pérdidas en el cobre, P_{Cu} . A más altas frecuencias, las pérdidas en los devanados son incrementadas por el efecto pelicular [112][113], donde la corriente tiende a acumularse hacia la superficie del conductor, debido al campo magnético de la corriente alterna que fluye a través del conductor [112]. Por consiguiente, el área

efectiva de flujo de corriente disminuye aumentando la resistencia del conductor. Otro factor que debe ser considerado en el diseño de los devanados es el efecto proximidad, donde el campo magnético de las corrientes interfiere con los campos de los conductores cercanos aumentando aún más la resistencia [112].

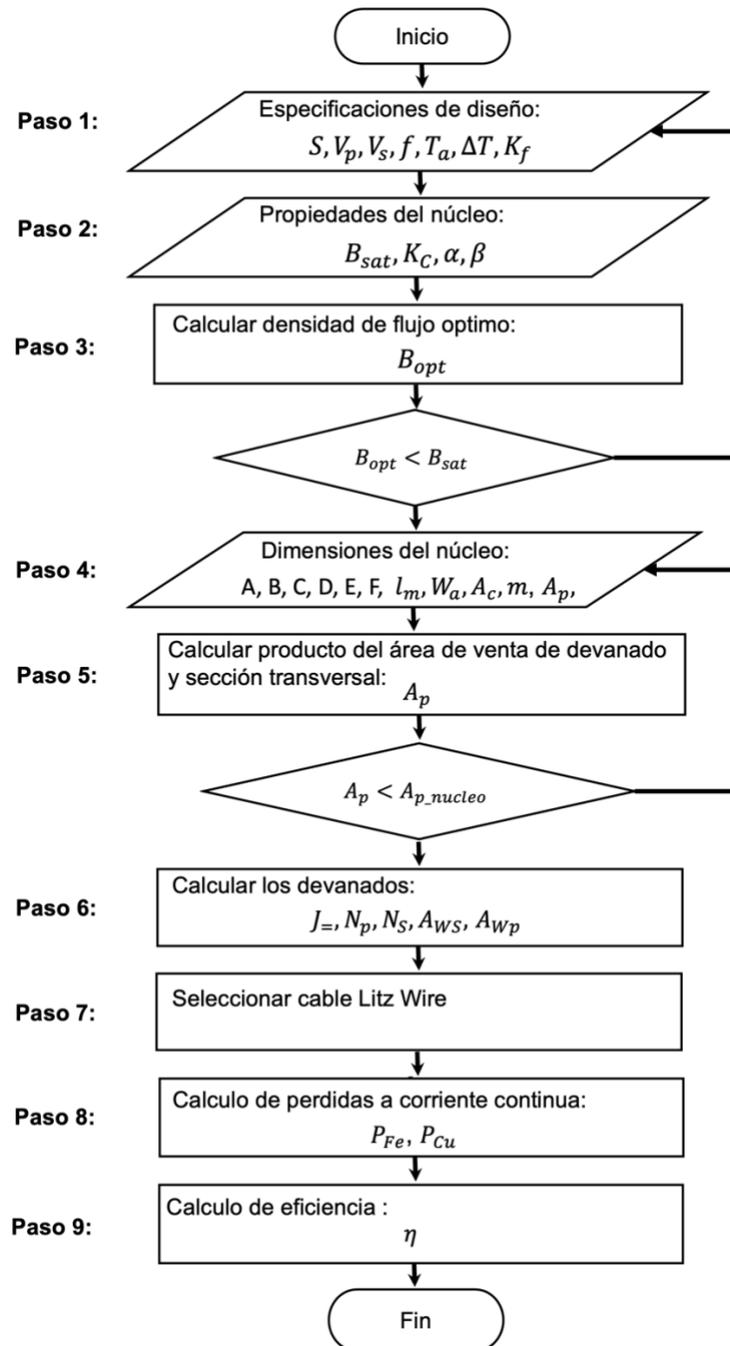
Las limitaciones del efecto pelicular y de proximidad pueden ser eliminadas utilizando hilos conductores trenzados y aislados. El uso de muchos hilos de menor calibre en paralelo incrementa el área de la superficie conductora y con ello se reduce la influencia del efecto pelicular [112][116]. Cada hilo conductor se transpone a lo largo del cable, de modo que cada hilo ocupa las posiciones de los demás hilos en la sección transversal del cable. La transposición asegura que cada hilo tenga la misma inductancia a lo largo del cable minimizando la influencia del efecto de proximidad, aproximando a la unidad la relación entre la resistencia a la corriente alterna y la resistencia a la corriente continua. Los cables conocidos comercialmente como cable Litz consideran los dos efectos expuestos para la construcción de devanados en diferentes calibres y rangos de frecuencias [115]. Según los parámetros de diseño de los transformadores de muestra, Tabla 4-1, el cable Litz que debe ser usado en los devanados es 5x12/30 que es equivalente a un cable 12AWG, y con frecuencia de operación entre 1 y 10 kHz.

B.4 Procedimiento de diseño de transformadores [112]

El principal objetivo que persigue el adecuado diseño del transformador es maximizar la eficiencia mientras se minimiza el peso o volumen condicionado a las restricciones de aumento de temperatura y maximizando la inductancia de magnetización. En este propósito el esquema de la Figura B-3 presenta el procedimiento de diseño del transformador.

Paso 1: Especificaciones de diseño

La tabla B-1 especifica los parámetros de diseño los cuales establece las condiciones de operación del equipo.

Figura B-3: Diagrama de flujo del procedimiento de diseño**Paso 2: propiedades del núcleo**

Las constantes de la ecuación de Steinmetz K_C , α , β que caracteriza las pérdidas en el núcleo y el flujo de saturación B_{sat} , son obtenidos de las hojas de datos del fabricante [90][91], y son mostrados en la Tabla B-2.

Paso 3: Cálculo de la densidad de flujo óptimo

La densidad de flujo óptimo para los parámetros de diseño se calcula usando la Ecuación (B.1) tomada de [87]. La ecuación fue derivada al formular las condiciones cuando las pérdidas en el cobre y en el núcleo son mínimas e iguales.

$$B_{opt} = \frac{(h_c k_a \Delta T)^{\frac{2}{3}}}{\sqrt[3]{4}(\rho_w k_w k_u)^{\frac{1}{12}}(k_c K_C f)^{\frac{7}{12}}} \left(\frac{K_v f k_s f k_u}{\sum VA} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (B.1)$$

Siendo,

$h_c = 10W/m^2$ es coeficiente natural de transferencia de calor por convección.

$k_a = 40$, $k_c = 5.6$ y $k_w = 10$ son constantes adimensionales típicas para núcleos amorfos

$k_s f = 0.97$ es el factor de apilamiento del núcleo

$K_v = 4.44$ es el factor de forma de onda (4.44 para ondas sinusoidales).

$\rho_w = 1.72 \times 10^{-8} \mu\Omega/cm$ es la resistividad del conductor de cobre.

$K_u = 0.4$ es el factor de utilización de la ventana del núcleo.

$\sum VA = 1091.02 VA$ es la potencia nominal total: $\sum VA = P_{in} + P_{out} * \eta$

Reemplazando los valores, se obtiene la densidad de flujo óptimo $B_{opt} = 0.54 T$, que es menor al $B_{sat} = 1.56 T$ para el material seleccionado. Dado que se cumple con la restricción de no saturar el núcleo magnético se procede a calcular las dimensiones del núcleo.

Paso 4: Dimensiones del núcleo:

La Figura 4-2 muestra la disposición de los núcleos de materiales amorfos de forma C seleccionados para la construcción de los transformadores. La estructura tipo acorazado con devanado concéntrico es seleccionada para tener mejor control de la inductancia de magnetización.

El núcleo se fabrica con láminas de materiales amorfos 2605-SA1 a base de hierro. METGLAS Inc [91] suministra la lámina amorfa 2605-SA1 y la empresa MK Magnetics fabrica el núcleo [90]. La lámina amorfa 2605-SA1 está compuesta principalmente de

hierro, con pequeños porcentajes de boro y silicio. La Tabla B-5 presenta las dimensiones del núcleo.

Tabla B-5: Dimensiones del núcleo seleccionado

Descripción	Símbolo	Medida final
Ancho del núcleo	A	10 mm
Altura de núcleo	B	11 mm
Profundidad del núcleo	C	33 mm
Espesor	D	20 mm
Ancho de la ventana	E	31 mm
Altura de la ventana	F	53 mm
Longitud media del camino magnético	lm	13.1 cm
Área de devanado de ventana del núcleo	Wa	3.6 cm ²
Producto de área de ventana del devanado	Ap	5.8 cm ⁴
Masa	m	150 kg

Paso 5: Cálculo especificaciones del núcleo

El producto de área mínimo necesario que debe tener el núcleo para cumplir con las especificaciones se calcula por medio de la ecuación:

$$A_p = \left(\frac{\sqrt{2} \Sigma VA}{K_v f B_{opt} k_f K_t \sqrt{k_U \Delta T}} \right)^{8/7} \quad (B.2)$$

Donde $K_t = 48224.28$, es calculada por medio de la expresión:

$$K_t = \sqrt{\frac{h_c k_a}{\rho_w k_w}} \quad (B.3)$$

Además,

$A_c = 24,96 \text{ cm}^2$ es área de la sección transversal del núcleo magnético seleccionado y se puede encontrar en la hoja de datos.

$W_a = 1.6 \text{ cm}^2$ es el área de la ventana del núcleo, y se puede calcular usando:

$$W_a = C * B * shell_Factor \quad (B.4)$$

Donde $shellFactor = 2$ ya que se usaron dos núcleos de forma C en el diseño.

$l_c = 13.1 \text{ cm}$ es la longitud media alrededor del camino magnético, se puede encontrar en la hoja de datos del fabricante. Por lo tanto, $A_p = 6.80312 \times 10^{-8}$. Dado que A_p es menor que el A_{p_nucleo} , se procede a calcular las especificaciones del devanado.

Paso 6: Cálculos de los devanados:

La densidad de corriente es calculada por medio de la ecuación:

$$J_0 = \sqrt{\frac{h_C k_a}{\rho_w k_w}} \sqrt{\frac{\Delta T}{2 k_u}} \frac{1}{\sqrt[8]{A_p}} \quad (\text{B.5})$$

Reemplazando los valores, $J_0 = 3151306.067 \text{ A/m}^2$. La ecuación considera los efectos de las pérdidas en los devanados, pérdidas en el núcleo y aumento de temperatura. El número de vueltas de los devanados son los siguientes:

$$N_p = \frac{V_{rms}}{K_v f B_{max} A_C} = 16.66 \quad (\text{B.6})$$

Dado que el transformador tiene una relación de transformación 1:1; $N_p = N_S = 17$. El área de conducción de corriente se obtiene de la relación de la corriente de operación y la densidad de corriente:

$$A_w = \frac{I_p}{J_0} \quad (\text{B.7})$$

Reemplazando, $A_w = 2.86 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

Paso 7: Selección del cable Litz

La profundidad superficial del efecto pelicular para 5 kHz es de:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} = 0.941 \text{ mm} \quad (\text{B.8})$$

Donde $\mu = 1.256 \times 10^{-6}$ y $\sigma = 58139534.88$. Por lo tanto, el área máxima permitida que elimina el efecto pelicular para 5 KHz es de 2.786 mm^2 . Los hilos del cable Litz de calibre 30 AWG tienen área de $A_{w_Litz} = 5.067 \times 10^{-8} \text{ m}^2$. Por consiguiente, el número de hilos mínimos que debe tener el cable Litz es de 54 hilos según la ecuación:

$$N_{ro \text{ hilos}} = \frac{A_w}{A_{w_Litz}} = 56.36 \text{ hilos} \quad (\text{B.9})$$

El cable Litz seleccionado para los devanados es el 5x13/30 AWG el cual tiene 65 hilos. La inductancia de magnetización real se puede calcular utilizando la siguiente expresión:

$$L_m^* = \frac{V_{rms}}{2\pi f(I_{rms} * k_f)} = 212 \mu H \quad (B.10)$$

Paso 8: Cálculo de la pérdidas

Las pérdidas en el núcleo son calculadas utilizando la ecuación empírica de Steinmetz:

$$P_{Fe} = V_C K_C f^\alpha B_{max}^\beta \quad (B.11)$$

Donde

$V_C = 4.192 \times 10^{-5} m^3$, es el volumen del núcleo y se calcula por medio de: $V_C = L_C A_C$

Reemplazando los valores, las pérdidas en el núcleo son iguales a: $P_{Fe} = 8.07 W$

Las pérdidas en los devanados

El valor de resistencia debido al aumento de temperatura se calcula por medio de la ecuación:

$$\rho_w = \rho_{20} [1 + \alpha_{20} (\Delta T + T_a - 20^\circ C)] \quad (B.12)$$

Donde

$\rho_{20} = 0.254 m\Omega$, Resistividad específica a 20 °C

$\alpha_{20} = 0.00393$, Coeficiente de temperatura de resistividad a 20 °C

$\Delta T = 60^\circ C$, es el aumento de temperatura esperado

$T_a = 25^\circ C$, es la temperatura ambiente

Reemplazado, la resistividad del cable a 60 °C es de $\rho_w = 3.19 \times 10^{-4}$. Por lo tanto, las pérdidas en los devanados son iguales a:

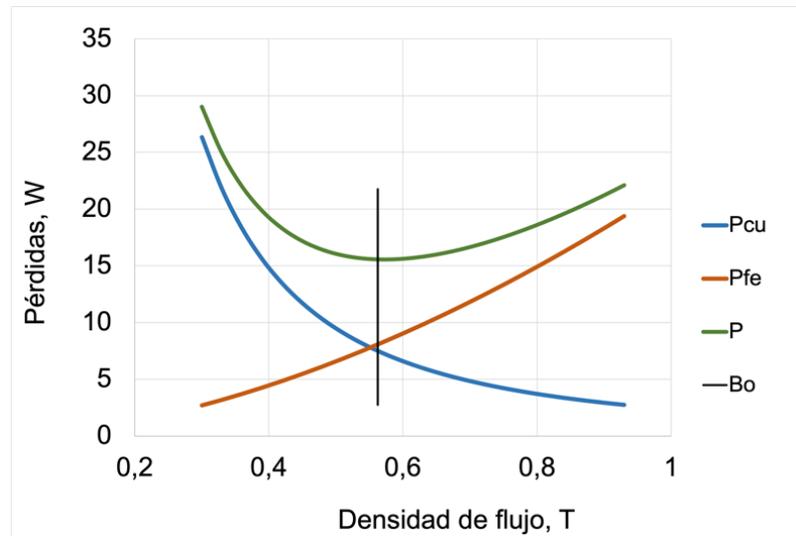
$$P_{Cu} = MLT N_p (Nro hilos) \rho_w I_{rms}^2 \quad (B.13)$$

Siendo, las pérdidas totales iguales a:

$$P_{perdidas} = P_{Cu_primario} + P_{Cu_secundario} + P_{Fe} = 13.81 W \quad (B.14)$$

La curva de diseño de los transformadores para establecer la densidad de flujo óptimo dada por el criterio de minimización de las pérdidas se muestra en la Figura B-4.

Figura B-4: Densidad de flujo óptimo



Siendo la densidad de flujo óptimo igual a $B_0 = 0.54 T$. Las pérdidas en los devanados y pérdidas en el núcleo son los principales parámetros de caracterización del transformador, y son utilizados como los principales criterios de diseño.

Paso 9: Cálculo de eficiencia

Finalmente, la eficiencia del transformador es igual a:

$$\eta = \frac{P_{Total}}{P_{Total} + P_{perdidas}} = 0.97 \quad (B.15)$$