



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**CERTIFICACIÓN Y MODELACIÓN DEL TRANSFORMADOR DE  
PODER MICROFORMER**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA**

**MANUEL IGNACIO GATICA DÍAZ**

**PROFESOR GUÍA**

**RODRIGO ERNESTO EDUARDO PALMA BEHNKE**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**

**PATRICIO ANDRÉS MENDOZA ARAYA**

**NELSON OMAR MORALES OSORIO**

**SANTIAGO, CHILE**

**ENERO, 2013**

## RESUMEN

El Microformer (MF) es un transformador de poder desarrollado por un grupo de estudiantes de postgrado de la Universidad de Wisconsin-Madison EEUU, entre ellos el académico joven de la U. de Chile Patricio Mendoza, como una alternativa de bajo costo para la transmisión de energía en sectores rurales. A partir de hornos microondas descompuestos se rescatan los equipos transformadores de razón de tensión 220/2200V y capacidad de 1kVA aproximadamente, modificándolos para adecuarlos al objetivo de distribución eléctrica. Para ello se extraen las barras magnéticas de los transformadores, disminuyendo la impedancia serie; se añaden espiras al enrollado primario, reduciendo la alta corriente de excitación; y se sumerge el equipo en aceite. En investigaciones previas se han estudiado los parámetros del circuito equivalente básico. Asimismo, se ha construido proyectos demostrativos del MF, los que se han aplicado en proyectos piloto en la materia.

En el presente trabajo de título se construyen seis prototipos de MF, los que se someten a las pruebas eléctricas y térmicas comprendidas en los estándares internacionales del IEEE con respecto a transformadores de poder inmersos en aceite. Los resultados son comparados con los requerimientos generales propuestos en la literatura y, adicionalmente, con los elementos que exige la normativa en Chile. Se discuten las limitaciones, ventajas y desventajas de las modificaciones realizadas a los transformadores seleccionados, en función del cumplimiento de la normativa internacional y nacional.

Asimismo, se desarrolla un método más preciso para determinar el número de espiras adicionales para el enrollado primario, considerando una razón de transformación objetivo. Se determinan además los parámetros del circuito equivalente eléctrico a partir de las pruebas realizadas, se implementa este circuito en el software Simulink y se simula una prueba de carga resistiva para comprobar el modelo. La precisión alcanzada es de un 2% en promedio. Por otra parte, se utiliza un modelo térmico de circuito equivalente tradicional para determinar la respuesta de temperatura del equipo. La determinación de parámetros se realiza a partir de pruebas de calentamiento y se simula una prueba adicional que considera escalones de corriente de alimentación, obteniéndose una precisión del 5,5% en promedio. Por último, considerando la relación resistencia-temperatura, se crea un modelo híbrido uniendo los circuitos eléctrico y térmico, el cual muestra una precisión promedio del 3,5%, en la prueba de escalones de corriente.

Se concluye que existen limitaciones del MF para satisfacer los estándares internacionales y la norma nacional, en particular respecto de su desempeño térmico. En respuesta a lo anterior, se proponen 3 escenarios: primero, reducir la corriente nominal del equipo tal que se cumpla con los límites térmicos establecidos; segundo, instalar un MF sólo si las condiciones de operación son menos exigentes que la prueba de calentamiento en cortocircuito e incluir un interruptor térmico; tercero, situar los MF sólo en zonas aisladas, sin acceso de personas garantizando su seguridad.

Como trabajo futuro se propone disminuir la temperatura alcanzada por el MF modificando el contenedor y encontrando el líquido más adecuado para su refrigeración. Adicionalmente, con el objetivo de minimizar las pérdidas, se plantea calcular un punto óptimo entre las vueltas añadidas al enrollado primario y la eficiencia asociada. Finalmente, valiéndose del estudio del MF en diferentes universidades, se sugiere la construcción de una base de datos de prueba centralizada, cuyo ingreso de resultados se realice por Internet, formando una biblioteca de fichas de diferentes transformadores.

*“Buscad primero el Reino de Dios y su justicia, y todas esas cosas se os darán por añadidura.”*  
Mateo 6, 33.

# Agradecimientos

A mis padres Manuel y Patricia por entregarme las mejores condiciones para desarrollar mi vida académica y familiar. Por su preocupación, su paciencia y su amor. A mi hermano Cristián por las alegrías de la vida y los encuentros que, a veces a su pesar, me han permitido conocer mi corazón.

A mi novia Natalia por su constante perseverancia en hallar la forma de ayudarme, en particular, en estos últimos meses de trabajo. Valoro cada silencio cuando mis frustraciones me llevaron a golpear la mesa. Gracias por las comidas llevadas a mi improvisado escritorio, por las sonrisas, por animarme a levantarme frente a todo desánimo. Espero con ansias nuestro matrimonio y el nacimiento de nuestro hijo o hija.

A mis amigos de la vida: Matías, Alejandra, Sebastián, Juan Pablo, Francisco, Rodrigo, Cristian y Simón. Gracias por cada ánimo, por cada compañía, por cada aventura y travesura.

A mis amigos del DIE: Carlos, Andrés y Matías. Bendito el día en que nos sentamos a conectar equipos en el laboratorio de redes, a partir de ese momento disfruté estudiar esta carrera.

A todos los sacerdotes que han tocado mi vida, en especial al P. Carlo Lira, gracias por incitarme a estudiar, a dejar mi pereza y acompañarme en mis alegrías y penas.

A mis hermanos de comunidad por acompañarme siempre en la oración, por enfrentarme con mi realidad y desearme la paz.

Gracias a Dios por permitirme ilustrarme hasta este punto, ayúdame a ser honesto y justo en toda actividad que desempeñe. Gracias por bendecirme con conocer a cada persona nombrada en los párrafos anteriores, gracias por la gratuidad y la misericordia que has tenido conmigo, en especial estos últimos años. Bendito seas Señor.

# Tabla de contenido

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Tablas.....</b>	<b>ix</b>
<b>Capítulo 1 Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación .....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.2.1 Objetivos Generales.....	1
1.2.2 Objetivos Específicos .....	2
1.3 Estructura .....	2
<b>Capítulo 2 Revisión Bibliográfica .....</b>	<b>3</b>
2.1 Transformador de poder .....	3
2.1.1 Introducción.....	3
2.1.2 El transformador de dos enrollados .....	4
2.1.3 Características constructivas del transformador .....	4
2.2 El Microformer.....	7
2.2.1 Introducción.....	7
2.2.2 El transformador de microondas.....	7
2.2.3 Caracterización y modificaciones del MOT .....	8
2.3 Modelo eléctrico del transformador monofásico. ....	9
2.3.1 Convención de sentidos .....	10
2.3.2 Flujo mutuo y flujo de fuga .....	10
2.3.3 Relaciones de tensiones y corrientes. ....	12
2.3.4 Diagrama fasorial .....	14
2.3.5 Circuito equivalente.....	15
2.3.6 Determinación de los parámetros del circuito equivalente.....	20
2.4 Modelo Térmico .....	24
2.4.1 Modelo de la temperatura del aceite superior.....	26
2.4.2 Modelo de la máxima temperatura del conductor .....	31
2.5 Estándares y normas.....	34
2.5.1 Introducción.....	34

2.5.2	Definiciones.....	34
2.5.3	Datos nominales .....	34
2.5.4	Procedimientos de ensayos a transformadores .....	40
2.5.5	Resultados y cálculos.....	56
2.5.6	Normativa chilena.....	59
<b>Capítulo 3 Implementación y resultados.....</b>		<b>61</b>
3.1	Construcción de prototipos.....	61
3.1.1	Caracterización de los transformadores de microondas .....	61
3.1.2	Modificación de los MOT .....	63
3.1.3	Contenedor de los MOT .....	67
3.2	Pruebas de los prototipos.....	67
3.2.1	Introducción.....	67
3.2.2	Medición de resistencias en frío .....	68
3.2.3	Prueba de razón de transformación .....	68
3.2.4	Pruebas de polaridad.....	69
3.2.5	Prueba de pérdidas de vacío y corriente de excitación .....	69
3.2.6	Prueba de pérdidas de carga y voltaje de impedancia .....	71
3.2.7	Pruebas de determinación de temperatura .....	72
3.2.8	Prueba con carga resistiva .....	74
3.3	Modelación del Microformer .....	75
3.3.1	Requerimientos del Modelo.....	75
3.3.2	Modelo eléctrico .....	75
3.3.3	Modelo térmico.....	79
3.3.4	Modelo híbrido eléctrico-térmico .....	83
<b>Capítulo 4 Análisis de resultados.....</b>		<b>86</b>
4.1	Construcción de los prototipos .....	86
4.1.1	Transformadores de microondas .....	86
4.1.2	Extracción de barras magnéticas y adición de espiras al enrollado.....	86
4.2	Análisis de resultados y comparación con normativas y estándares .....	88
4.2.1	Resistencias en frío.....	88
4.2.2	Razón de transformación .....	89
4.2.3	Polaridad.....	90
4.2.4	Prueba de pérdidas de vacío y corriente de excitación .....	90
4.2.5	Pérdidas de carga y voltaje de impedancia .....	91
4.2.6	Temperatura.....	93
4.2.7	Eficiencia y regulación .....	94

4.3	Modelación.....	94
4.3.1	Resultados modelo eléctrico.....	94
4.3.2	Resultados modelo térmico .....	95
4.3.3	Resultados modelo híbrido .....	96
<b>Capítulo 5</b>	<b>Conclusiones y trabajo futuro.....</b>	<b>97</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>.....</b>	<b>100</b>

# Lista de Figuras

Figura 1. Esquema básico del transformador de dos enrollados.....	4
Figura 2. Tipos de núcleos de transformadores. ....	5
Figura 3. Transformador de horno microondas MOT.....	7
Figura 4. Contenedor e inmersión en aceite.....	9
Figura 5. Convención de sentidos de tensiones y corrientes.....	10
Figura 6. Flujos producidos por circulación de corrientes $i_1$ e $i_2$ . ....	11
Figura 7. Diagrama fasorial ecuaciones (25-26).....	14
Figura 8. Circuito con parámetros serie del transformador.....	15
Figura 9. Introducción de efecto magnético.....	16
Figura 10. Diagrama fasorial final. ....	18
Figura 11. Circuito equivalente exacto del transformador.....	19
Figura 12. Circuito equivalente exacto referido al lado primario. ....	19
Figura 13. Circuito equivalente aproximado referido al lado primario. ....	20
Figura 14. Prueba de circuito abierto. ....	20
Figura 15. Prueba de cortocircuito. ....	21
Figura 16. Formas de onda $v(t)$ , $i(t)$ y $p(t)$ . ....	23
Figura 17. Potencia instantánea, activa y reactiva. ....	23
Figura 18. Circuito térmico de temperatura del aceite.....	26
Figura 19. Circuito térmico de la temperatura máxima del conductor. ....	31
Figura 20. Designación de terminales en transformador monofásico.....	37
Figura 21. Voltímetro dispuesto para medir diferencia entre tensiones.....	43
Figura 22. Polaridad según sentido de los enrollados. ....	44
Figura 23. Marcas de polaridad en el contenedor del transformador.....	44
Figura 24. Conexiones para prueba de vacío sin transformadores de medida. ....	45
Figura 25. Conexiones para prueba de vacío con transformadores de medida.....	45
Figura 26. Conexiones prueba de pérdidas de carga y voltaje de impedancia.....	48
Figura 27. Dimensiones del estanque según NSEG16.78 de SEC.....	60
Figura 28. Dimensiones del núcleo.....	61
Figura 29. Transformador T7.....	62
Figura 30. Transformador T6.....	62
Figura 31. Transformador T8.....	62
Figura 32. Transformador T11.....	62
Figura 33. Transformador T9.....	62

Figura 34. Transformador T10.....	62
Figura 35. Adición de espiras a enrollado primario.....	64
Figura 36. Disposición estimada de espiras en enrollados primarios de cada transformador.....	65
Figura 37. Prueba de pérdidas de vacío y corriente de excitación.....	70
Figura 38. Prueba de pérdidas de carga y voltaje de impedancia.....	71
Figura 39. Conexiones e instrumentos de prueba de carga.....	74
Figura 40. Modelo del circuito equivalente en Simulink.....	77
Figura 41. Resultados prueba de calentamiento, transformador T6.....	79
Figura 42. Circuito eléctrico análogo térmico en Simulink.....	81
Figura 43. Respuesta térmica modelada del transformador T6 frente a escalones de corriente.....	82
Figura 44. Circuito equivalente para prueba de calentamiento por cortocircuito.....	83
Figura 45. Circuitos térmicos para el modelo híbrido.....	84
Figura 46. Modelación test de temperatura T6.....	85
Figura 47. Variación de la impedancia serie.....	87

# Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros del MOT norteamericano, referidos al primario .....	8
Tabla 2. Parámetros del MOT norteamericano, referidos al primario, sin barras magnéticas.....	8
Tabla 3. Analogía térmica-eléctrica [7] .....	25
Tabla 4. Características térmicas del aceite de transformador .....	26
Tabla 5. Valores empíricos de las constantes $C$ y $n$ . .....	27
Tabla 6. Constante $n$ para el modelo térmico del aceite. ....	30
Tabla 7. Constante $n$ para el modelo de temperatura máxima de conductor. ....	33
Tabla 8. Potencias nominales estandarizadas.....	35
Tabla 9. Datos de placa recomendados por el estándar IEEE C57.12.00 [15].....	39
Tabla 10. Pruebas según tipo de transformador. ....	40
Tabla 11. Requerimientos para corrección de ángulo de desfase. ....	49
Tabla 12. Márgenes satisfactorios de pruebas según NSEG16.78 de SEC.....	59
Tabla 13. Dimensiones de transformadores. ....	61
Tabla 14. Datos nominales de los transformadores. ....	62
Tabla 15. Número de vueltas enrollado primario.....	66
Tabla 16. Número de vueltas adicionales y nueva razón de transformación. ....	67
Tabla 17. Número de espiras añadidas para cada transformador.....	67
Tabla 18. Resistencias en frío referenciadas a 85°C. ....	68
Tabla 19. Razón de transformación .....	69
Tabla 20. Pérdidas de vacío y corriente de excitación. Sin modificación.....	70
Tabla 21. Pérdidas de vacío y corriente de excitación. Sin barras magnéticas. ....	71
Tabla 22. Pérdidas de vacío y corriente de excitación. Espiras añadidas. ....	71
Tabla 23. Pérdidas de carga y voltaje de impedancia. Sin modificaciones.....	72
Tabla 24. Pérdidas de carga y voltaje de impedancia. Sin barras magnéticas. ....	72
Tabla 25. Pérdidas de carga y voltaje de impedancia. Espiras añadidas.....	72
Tabla 26. Resultados finales prueba térmica. Cortocircuito a 3,5A.....	73
Tabla 27. Resultados prueba con carga resistiva. ....	74
Tabla 28. Parámetros circuito equivalente, transformadores sin modificaciones. ....	76
Tabla 29. Parámetros circuito equivalente, transformadores sin barras magnéticas.....	76
Tabla 30. Parámetros circuito equivalente, transformadores con espiras añadidas. ....	76
Tabla 31. Resultados simulación de prueba con carga resistiva. Transformador T7.....	78
Tabla 32. Errores promedio de la modelación eléctrica por variable. Prueba de carga resistiva.	78
Tabla 33. Resultados aproximación exponencial.....	80

Tabla 34. Parámetros del circuito RC análogo térmico para temperatura de aceite superior. ....	80
Tabla 35. Resultados simulación modelo térmico independiente. ....	82
Tabla 36. Resultados de simulación del modelo híbrido. ....	85
Tabla 37. Eficiencia y corriente de excitación. ....	87
Tabla 38. Aumento de resistencia en frío. ....	88
Tabla 39. Error con respecto a razón objetivo. ....	89
Tabla 40. Corriente de excitación y pérdidas de vacío referidas a 20°C. ....	90
Tabla 41. Voltaje de impedancia y pérdidas de carga referidas a 85°C. ....	91
Tabla 42. Pérdidas totales. Transformadores sin modificación y sin barras magnéticas. ....	92
Tabla 43. Pérdidas totales. Transformadores con espiras añadidas. ....	92
Tabla 44. Aumentos de temperatura. ....	93
Tabla 45. Impedancia serie en porcentaje, potencia base 1150W. ....	95
Tabla 46. Satisfacción de restricciones, Microformer. ....	98

# Acrónimos

<i>MF</i>	<i>Microformer</i>
<i>MOT</i>	Siglas en Inglés de ‘ <i>Microwave Oven Transformer</i> ’ (Transformador de horno microondas)
<i>IEEE</i>	Siglas en Inglés de ‘ <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> ’ (Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos)
<i>TMC</i>	Siglas de ‘Temperatura Máxima de Conductor’, del inglés <i>Hot Spot Temperature</i>
<i>RMS</i>	Siglas en Inglés de ‘ <i>Root Mean Square</i> ’ (valor efectivo)
<i>DOE</i>	Siglas en Inglés de ‘ <i>Department of Energy</i> ’ (Departamento de energía)
<i>CFR</i>	Siglas en Inglés de ‘ <i>Code of Federal Regulations</i> ’ (Código de regulaciones federales)

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Motivación

Estudiantes de doctorado de la Universidad de Wisconsin-Madison, EEUU, han desarrollado a partir de 2010 un transformador de poder llamado Microformer, reutilizando equipos transformadores extraídos de hornos microondas en desuso. Luego de la extracción, se adapta el transformador para suministrar energía y se sumerge en aceite dentro de un contenedor metálico. Así, el Microformer es un transformador de poder de reducido costo y útil para transmitir energía eléctrica en poblados de bajo consumo [1]. El equipo de desarrollo del proyecto obtuvo como resultados: modelos básicos del transformador, proyectos demostrativos, y una publicación en la *IEEE Global Humanitarian Technology Conference*.

Para que el Microformer pueda ser incorporado formalmente en redes eléctricas, es necesario someterlo a las mismas pruebas y requerimientos que se exigen a los equipos convencionales.

Adicionalmente, para comprender mejor las capacidades, limitantes, condiciones de seguridad y modos de falla del Microformer, se requiere un modelo híbrido eléctrico y térmico que permita estudiar el desempeño del equipo.

Avanzar en estas mejoras es el aspecto central de la motivación de esta memoria de título.

### 1.2 Objetivos

#### 1.2.1 Objetivos Generales

A partir de los antecedentes presentados, para esta memoria de título se definen los siguientes objetivos generales:

- Conocer el grado de cumplimiento del Microformer de los estándares internacionales y nacionales aplicables a transformadores convencionales de poder y distribución inmersos en aceite.
- Disponer de un modelo eléctrico – térmico del Microformer orientado a generar una base de conocimiento que permita la simulación de distintas condiciones de operación y propuestas de mejora en su diseño.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos generales del trabajo, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Conocer el desempeño del Microformer al someterlo a los códigos de prueba establecidos en los estándares IEEE serie C.57 y la normativa chilena NSEG 16.E.n.78.
- Proponer un modelo del circuito eléctrico del MOT que considere las barras magnéticas, su extracción y a adición de espiras al enrollado primario.
- Proponer un apropiado modelo térmico al Microformer, orientado a satisfacer estándares internacionales.
- Alcanzar un modelo híbrido eléctrico – térmico para el Microformer (MOT y equipamiento de embalaje).

## **1.3 Estructura**

El presente documento se estructura en 5 capítulos. En el capítulo 2 se presenta la teoría del transformador de poder, el Microformer, el circuito eléctrico equivalente, el modelo térmico escogido, los estándares del IEEE pertinentes y la normativa nacional. En el capítulo 3 se desarrolla la construcción y modificación de los transformadores de microondas; se presentan las pruebas realizadas al Microformer y sus resultados; y se implementan los modelos eléctrico, térmico e híbrido. En el capítulo 4 se analizan los resultados obtenidos, se discuten las mejorías del transformador en las etapas de modificación y su grado de cumplimiento de los estándares. El capítulo 5 consiste en las conclusiones de esta investigación y los trabajos futuros recomendados por el autor.

# Capítulo 2

## Revisión Bibliográfica

### 2.1 Transformador de poder

#### 2.1.1 Introducción

El transformador de poder es una máquina eléctrica estática, cuya operación es estrictamente en corriente alterna, su finalidad es recibir energía a un cierto nivel de tensión para entregarla a un distinto nivel de tensión, con la menor cantidad de pérdidas.

En generación de energía eléctrica no se alcanza tensiones muy altas, debido a las grandes dimensiones que requeriría el aislamiento de los generadores, siendo actualmente este límite 25 kV. En cambio, la transmisión de grandes flujos de potencia es realizable sólo a tensiones elevadas, sobre 200 kV [2]. Por lo anterior, entre los generadores y los sistemas de transmisión es necesario instalar un transformador elevador de tensión. Asimismo, atendiendo a que, la tensión adecuada para distribuir energía es menor, se utiliza transformadores de bajada que disminuyen el nivel de tensión para alimentar finalmente los consumos industriales o domiciliarios.

El transformador de poder es una máquina muy segura y de alto rendimiento, sin importar la potencia transmitida. No obstante, el rango de frecuencia de operación de estos equipos es estrecho, pudiendo oscilar hasta un  $\pm 3\%$  de la frecuencia nominal [2].

## 2.1.2 El transformador de dos enrollados

La transformación del nivel de tensión se lleva a cabo enlazando dos, o más enrollados por un flujo magnético común, tal como se muestra en la Figura 1.

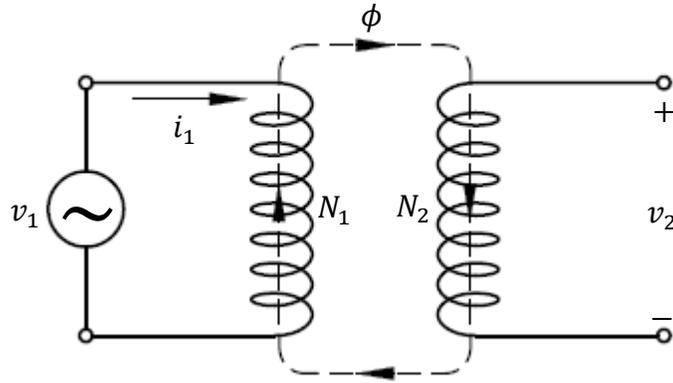


Figura 1. Esquema básico del transformador de dos enrollados.

Al conectar una fuente de tensión alterna ( $v_1$ ) al enrollado primario, circulará por este una corriente ( $i_1$ ), la cual a su vez genera un flujo magnético ( $\phi$ ) que depende de la tensión aplicada y el número de vueltas del enrollado primario ( $N_1$ ). La mayor parte del flujo magnético será enlazado por el enrollado secundario induciendo en este una tensión ( $v_2$ ) que dependerá del número de vueltas del enrollado secundario ( $N_2$ ).

Las relaciones de transformación de los niveles de tensión y corriente en un transformador ideal (sin pérdidas) están dadas por las ecuaciones (1-2), donde la razón entre los números de vueltas del enrollado primario y el enrollado secundario es llamada razón de transformación ( $a$ ) [3].

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (1)$$

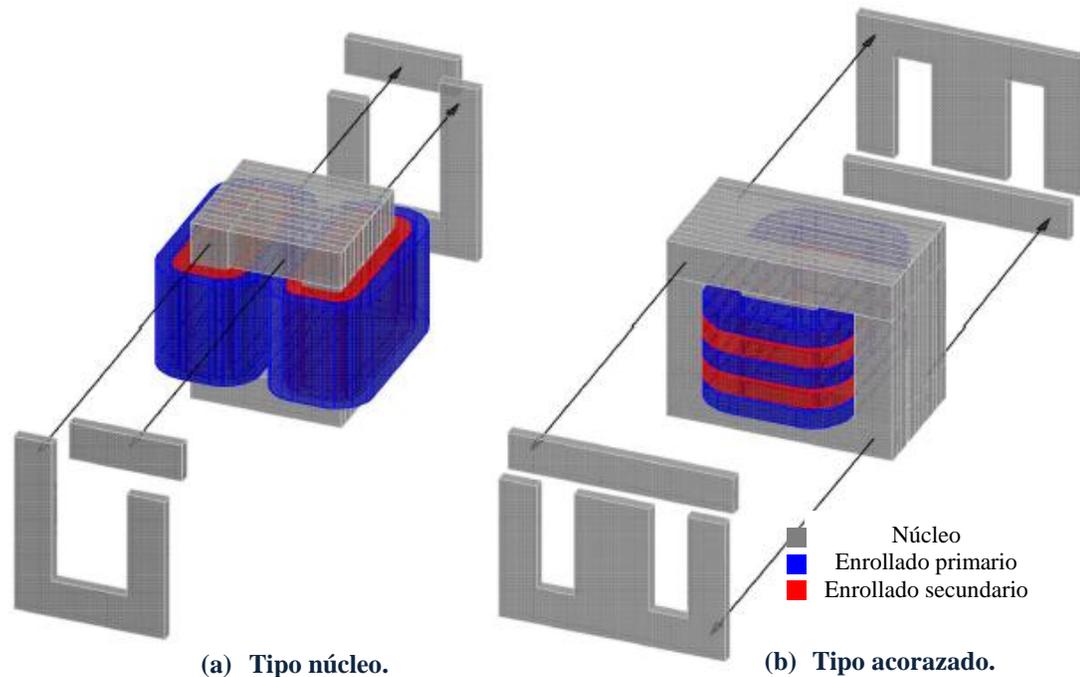
$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (2)$$

## 2.1.3 Características constructivas del transformador

### 2.1.3.1 Núcleo

El núcleo es el circuito magnético por el cual el flujo generado por el enrollado primario queda confinado a un recorrido específico, asegurando que el enrollado secundario enlace la mayor parte del flujo.

Los transformadores pueden clasificarse en dos tipos según la forma del núcleo empleado (Fig. 2). En el “tipo núcleo” (*core* en inglés) (Fig. 2.a) los enrollados se encuentran en torno a dos columnas de un circuito magnético rectangular; en el núcleo “tipo acorazado” (*shell* en inglés) (Fig. 2.b) los enrollados se encuentran en torno a la columna central de un núcleo de tres columnas.



**Figura 2. Tipos de núcleos de transformadores.**

El núcleo está comúnmente formado de láminas delgadas de algún material ferro-magnético, usualmente de hierro silicoso; económico, de pocas pérdidas y gran permeabilidad a densidades de flujo altas. Las láminas de hierro se alternan y aíslan eléctricamente a fin de reducir las pérdidas por corrientes de Foucault [3].

### **2.1.3.2 Bobinas**

Una gran parte del flujo magnético enlaza de forma común las bobinas o enrollados del transformador. No obstante, existen otros flujos; llamados flujos de fuga, que enlazan a cada enrollado de forma particular. En comparación al flujo total o al flujo común, los flujos de fuga son pequeños aunque no por ello poco importantes. La reducción de fugas de flujo se logra colocando los enrollados lo más cerca posible uno de otro, e incluso subdividiendo los enrollados en secciones. En el transformador tipo núcleo, cada enrollado se divide en dos secciones, dispuestas una en cada columna del núcleo formando bobinas concéntricas (Fig. 2.a). En el núcleo de tipo acorazado (Fig. 2.b) se puede encontrar bobinas dispuestas de forma concéntrica alrededor de la columna central, o bien las bobinas pueden disponerse una sobre otra en forma vertical y, opcionalmente, intercalando subdivisiones de bobinas primarias y secundarias [3].

### 2.1.3.3 Refrigeración

Los transformadores durante su operación sufren elevaciones de temperatura que es necesario controlar mediante algún método de refrigeración. Existen diversos métodos de refrigeración, entre ellos se encuentran transformadores refrigerados por medio de: aire, aceite, piraleno, silicona líquida, y también en medios secos con aislantes en estado sólido [3].

La refrigeración por aceite permite reducir las distancias de aislamiento debido a su rigidez dieléctrica, cuatro veces superior a la del aire. Adicionalmente, el aceite impregna los materiales del transformador y penetra en los huecos del barniz, mejorando la aislación del equipo. Es usual mejorar la rigidez dieléctrica del espacio mediante la utilización de aislaciones formadas por aceite y capas delgadas de papel.

El aceite y el transformador se encierran en un contenedor que protege los enrollados a la vez que permite la utilización de estos equipos a la intemperie.

El aceite mineral usado en transformadores es derivado del petróleo, de densidad  $0,88 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  [3] y no debe contener trozos de óxidos metálicos, los que reducirían sus propiedades dieléctricas.

Al aumentar la temperatura por sobre los  $100^\circ \text{C}$  el aceite se descompone y se forman residuos. Los residuos más pesados se sitúan en el fondo del contenedor mientras los livianos quedan suspendidos dificultando la circulación del aceite y en consecuencia disminuyendo la refrigeración. La formación de residuos es catalizada por el cobre desnudo, por cuanto es necesario barnizar o estañar todas las conexiones a los enrollados y, adicionalmente, filtrar periódicamente el aceite [3].

La circulación natural se produce cuando el aceite, en contacto con las bobinas y el núcleo, se calienta provocando un movimiento de convección favoreciendo la refrigeración. El aceite vuelve a enfriarse en contacto con las paredes del contenedor. Algunos contenedores tienen formas onduladas o poseen tubos que aumentan la superficie radiante. La circulación del aceite puede apagar las chispas que se produzcan en el transformador. En cambio, la circulación forzada se realiza mediante bombas o ventiladores, las cuales imponen una velocidad de circulación del flujo de aire o aceite.

El elevado calor específico del aceite permite sobrecargas prolongadas sin peligro. Así, estos transformadores son los más utilizados, pues presentan un funcionamiento seguro y no requieren vigilancia.

## 2.2 El Microformer

### 2.2.1 Introducción

El Microformer es un transformador monofásico de microondas adaptado por los estudiantes de doctorado Patricio Mendoza, Daniel Ludois, Jonathan Lee y el profesor Giri Venkataramanan de la Universidad de Wisconsin Madison para la distribución de energía eléctrica en poblados rurales, cuyo objetivo principal es presentar una solución de bajo costo que permita suministrar energía desde pequeños medios de generación a consumos domiciliarios de baja potencia [4].

### 2.2.2 El transformador de microondas

El transformador de horno microondas (*Microwave oven transformer; MOT*) está conformado por un núcleo de láminas de hierro de tipo acorazado, con tres enrollados dispuestos en la columna central uno sobre otro (Figura 3).

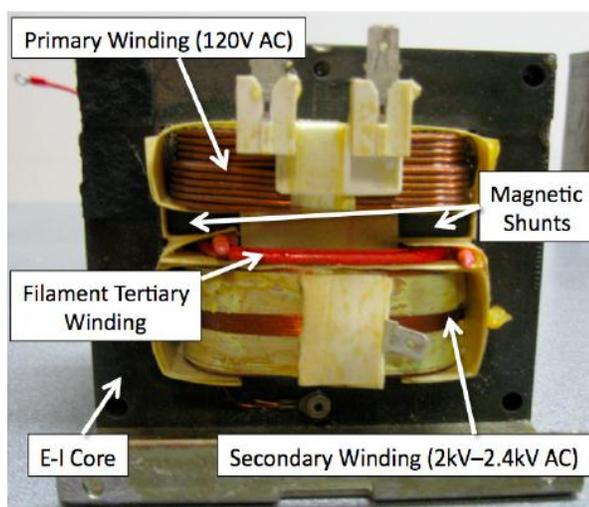


Figura 3. Transformador de horno microondas MOT.

El enrollado primario de baja tensión es de 110V-120V en Estados Unidos, el enrollado secundario de alta tensión en el rango de 2000V-2700V; este alimenta el magnetrón que produce las microondas; y cuenta también, con un tercer enrollado de 3V que alimenta algunas funciones electrónicas del horno microondas. La frecuencia eléctrica de diseño es de 60 Hz. En último lugar, la potencia nominal de los transformadores de microondas varía entre 500W-7,5kW de potencia [1].

Dentro de ambas ventanas del núcleo y entre el enrollado primario y secundario se encuentran unas barras magnéticas (Figura 3) que reducen la corriente de cortocircuito en caso de fallas, saturando el núcleo durante el evento debido al aumento de corriente que circula por los enrollados.

### 2.2.3 Caracterización y modificaciones del MOT

El transformador de microondas MOT se ha diseñado para ser económico; utilizando un mínimo de materias primas, con un régimen de operación intermitente y con un limitador de corriente de fallas en caso de un eventual cortocircuito. Cada una de estas características impacta la capacidad del MOT de ser un equipo apto para la distribución de energía [4].

#### 2.2.3.1 Circuito equivalente del MOT

El equipo del Microformer extrajo el tercer enrollado del MOT, y realizó pruebas a 13 transformadores para determinar los parámetros del circuito equivalente del transformador con y luego sin las barras magnéticas.

En la Tabla 1 se puede observar el valor promedio y la desviación estándar, en por unidad, de los parámetros de los transformadores estudiados por el equipo de la Universidad de Wisconsin. Es fácil deducir que la corriente de magnetización de los transformadores es aproximadamente un tercio de la corriente nominal. Similarmente, la regulación de tensión varía principalmente debido a la impedancia serie, en aproximadamente un 10% a plena carga, con factor de potencia unitario [4].

**Tabla 1. Parámetros del MOT norteamericano, referidos al primario**

	$r_1, r'_2$ [pu]	$x_1, x'_2$ [pu]	$R_m$ [pu]	$X_m$ [pu]
Valor promedio	0,03	0,21	25,8	3
Desviación estándar	0,003	0,084	6,23	1,34

La reactancia de magnetización  $X_m$  es baja para un transformador de distribución, lo que produce una alta corriente de magnetización y, por tanto, una baja eficiencia. Por otra parte, las reactancias de fuga  $x_1$  y  $x'_2$  son altas para un transformador de distribución y están directamente afectadas por las barras magnéticas.

Extrayendo las barras magnéticas y añadiendo vueltas al enrollado primario, aprovechando el espacio dejado en las ventanas del núcleo, el equipo obtiene los resultados expuestos en la tabla 2. En esta se puede observar una notable disminución de las reactancias serie de los transformadores estudiados; Mejorando las características de saturación, disminuyendo la corriente magnetizante y mejorando la eficiencia.

**Tabla 2. Parámetros del MOT norteamericano, referidos al primario, sin barras magnéticas**

	$r_1, r'_2$ [pu]	$x_1, x'_2$ [pu]	$R_m$ [pu]	$X_m$ [pu]
Valor promedio	0,031	0,066	23,0	2,56
Desviación estándar	0,004	0,018	6,21	1,12

#### 2.2.3.2 Adaptación del Microformer

El equipo del Microformer, persiguiendo el objetivo de bajo costo, soluciona el evidente calentamiento que sufriría el equipo en operación permanente y las dificultades de maniobras e

instalación del transformador, mediante un tarro de pintura lleno de aceite mineral (Figura 4.a.). Los bornes se hacen de PVC o de bornes de laboratorio reciclados (Figura 4.b.).



**Figura 4. Contenedor e inmersión en aceite.**

Finalmente el Microformer tiene un costo aproximado de 10 US\$ (2010), siendo por mucho una solución más económica que un transformador convencional y de características similares. Por ejemplo, un transformador de 5kVA de potencia nominal y 1kV de tensión de transmisión tiene un costo aproximado de 860 US\$ (2010) [1].

### **2.2.3.3 Beneficios del Microformer**

El Microformer es una alternativa muy económica a transformadores convencionales semejantes. Usando transformadores re-utilizados de microondas no sólo se aminora el costo de la solución, sino que se mitiga energía de manufactura y de emisiones por ciclo de vida. Además, permite una transmisión a tensiones más elevadas que lo usual a este nivel de potencia, reduciendo pérdidas de energía y mejorando el rendimiento del sistema.

El Microformer, al ser una alternativa económica; reduciría la utilización de madera, aceite u otros combustibles para iluminación casera o calefacción; en locaciones donde por motivos de costos no hay suministro eléctrico, esto aminora la contaminación de aire puertas adentro y emisiones de carbono. Asimismo, se incrementa el ingreso, la oferta de empleos, el nivel de alfabetización, y la actividad económica general a través de la electrificación [5].

## **2.3 Modelo eléctrico del transformador monofásico.**

El circuito equivalente del transformador permite simular su comportamiento eléctrico. Su deducción se encuentra en la literatura sin variación entre textos [2], [3], [6], [7]. A continuación se expone un desarrollo del modelo.

### 2.3.1 Convención de sentidos

En la Figura 5 se muestra el esquema de un transformador de dos enrollados, el número de vueltas de cada enrollado es  $N_1$  para el primario y  $N_2$  para el secundario. Se indica el sentido convencional de las corrientes  $i_1$  e  $i_2$  y de las tensiones instantáneas  $v_1$  y  $v_2$ .

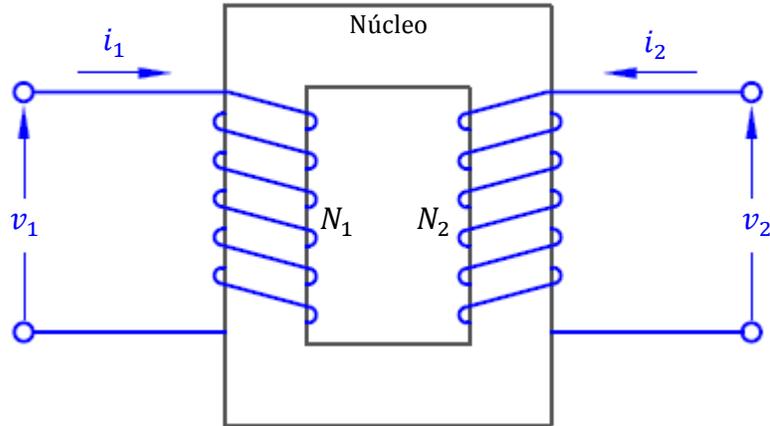


Figura 5. Convención de sentidos de tensiones y corrientes.

### 2.3.2 Flujo mutuo y flujo de fuga

Al hacer circular una corriente  $i_1$  por el enrollado primario, este quedará enlazado por un flujo magnético debido a la fuerza magneto-motriz  $N_1 i_1$ , flujo que será enlazado en su mayor parte por el enrollado secundario.

Se designa por  $\phi_{m1}$  a la parte del flujo magnético que es enlazado tanto por el enrollado primario como por el enrollado secundario (flujo mutuo producido por corriente  $i_1$ ), y por  $\phi_{f1}$  a la parte del flujo que sólo queda enlazada por el enrollado primario.

Adicionalmente se define  $\mathcal{R}_{m1}$  como la reluctancia del circuito magnético recorrida por el flujo  $\phi_{m1}$  y  $\mathcal{R}_{f1}$  como la reluctancia del circuito magnético recorrida por  $\phi_{f1}$ .

Así los flujos  $\phi_{m1}$  y  $\phi_{f1}$  estarán dados por las siguientes expresiones:

$$\phi_{m1} = \frac{N_1 i_1}{\mathcal{R}_{m1}} \quad (3)$$

$$\phi_{f1} = \frac{N_1 i_1}{\mathcal{R}_{f1}} \quad (4)$$

Análogamente, al circular una corriente  $i_2$  por el enrollado secundario, se tiene un flujo magnético que se enlaza en su mayor parte por ambos enrollados, otra parte del flujo sólo enlaza el enrollado secundario. Se designa por  $\phi_{m2}$  a la parte del flujo magnético que es enlazado tanto por el enrollado secundario como por el enrollado primario (flujo mutuo producido por corriente  $i_2$ ), y por  $\phi_{f2}$  a la parte del flujo que sólo queda enlazada por el enrollado secundario.

Se definen además las reluctancias  $\mathcal{R}_{m2}$  y  $\mathcal{R}_{f2}$  de los circuitos magnéticos recorridos por  $\phi_{m2}$  y  $\phi_{f2}$  respectivamente. Quedado estos flujos dados por las siguientes ecuaciones:

$$\phi_{m2} = \frac{N_2 i_2}{\mathcal{R}_{m2}} \quad (5)$$

$$\phi_{f2} = \frac{N_2 i_2}{\mathcal{R}_{f2}} \quad (6)$$

Puesto a que  $\phi_{m1}$  y  $\phi_{m2}$  enlazan ambos enrollados, el circuito magnético que recorren es el mismo, por tanto se puede deducir que existe una reluctancia para ambos flujos mutuos, esto es:

$$\mathcal{R}_m = \mathcal{R}_{m1} = \mathcal{R}_{m2} \quad (7)$$

Al circular simultáneamente las corrientes  $i_1$  e  $i_2$  por sus respectivos enrollados, se tiene (Figura 6) un flujo mutuo  $\phi_m$  común a ambos enrollados:

$$\phi_m = \phi_{m1} + \phi_{m2} = \frac{1}{\mathcal{R}_m} (N_1 i_1 + N_2 i_2) \quad (8)$$

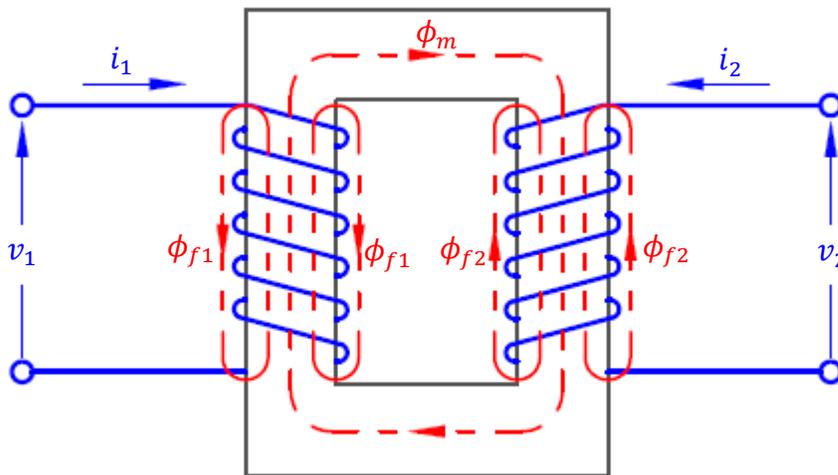


Figura 6. Flujos producidos por circulación de corrientes  $i_1$  e  $i_2$ .

El flujo magnético  $\phi_m$  se denomina “flujo mutuo o común” y circula por el material magnético del núcleo. Por otra parte,  $\phi_{f1}$  y  $\phi_{f2}$  reciben el nombre de “flujos de fuga”, debido a que no enlazan a ambos enrollados, por tanto no aportan al efecto transformador. Éstos últimos circulan casi en su totalidad fuera del material magnético, por lo que las reluctancias  $\mathcal{R}_{f1}$  y  $\mathcal{R}_{f2}$  son mucho mayores que  $\mathcal{R}_m$ . De lo anterior se puede considerar lineal la relación entre  $i_1 - \phi_{f1}$  y  $i_2 - \phi_{f2}$  aún para condiciones de operación con núcleo saturado.

Definiendo  $\phi_1$  y  $\phi_2$  como los flujos totales que enlazan respectivamente el enrollado primario y el secundario, se tiene:

$$\phi_1 = \phi_{f1} + \phi_{m1} + \phi_{m2} = \phi_{f1} + \phi_m \quad (9)$$

$$\phi_2 = \phi_{f2} + \phi_{m1} + \phi_{m2} = \phi_{f2} + \phi_m \quad (10)$$

Luego, los enlaces de flujo  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  de ambos enrollados son respectivamente:

$$\lambda_1 = N_1 \cdot (\phi_{f1} + \phi_m) \quad (11)$$

$$\lambda_2 = N_2 \cdot (\phi_{f2} + \phi_m) \quad (12)$$

### 2.3.3 Relaciones de tensiones y corrientes.

Siendo las tensiones instantáneas  $v_1$  y  $v_2$  en los bornes de cada enrollado y  $r_1$  y  $r_2$  las resistencias de los enrollados primario y secundario respectivamente, se pueden escribir las siguientes expresiones según las leyes de Kirchoff.

$$v_1 = i_1 \cdot r_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} \quad (13)$$

$$v_2 = i_2 \cdot r_2 + \frac{d\lambda_2}{dt} \quad (14)$$

Sustituyendo  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  de las ecuaciones (11-12), se tiene:

$$v_1 = i_1 \cdot r_1 + N_1 \cdot \frac{d\phi_{f1}}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} \quad (15)$$

$$v_2 = i_2 \cdot r_2 + N_2 \cdot \frac{d\phi_{f2}}{dt} + N_2 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} \quad (16)$$

Como  $\phi_{f1}$  y  $\phi_{f2}$  son consideradas funciones lineales de las corrientes  $i_1$  y  $i_2$ , se puede escribir:

$$v_1 = i_1 \cdot r_1 + \overbrace{N_1 \cdot \frac{d\phi_{f1}}{di_1}}^{L_{f1}} \cdot \frac{di_1}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} \quad (17)$$

$$v_2 = i_2 \cdot r_2 + \overbrace{N_2 \cdot \frac{d\phi_{f2}}{di_2}}^{L_{f2}} \cdot \frac{di_2}{dt} + N_2 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} \quad (18)$$

Los coeficientes  $N_1 \cdot \frac{d\phi_{f1}}{di_1}$  y  $N_2 \cdot \frac{d\phi_{f2}}{di_2}$  se les denomina por  $L_{f1}$  y  $L_{f2}$  llamados coeficientes de autoinducción de fuga. Luego, reescribiendo las ecuaciones (17-18):

$$v_1 = i_1 \cdot r_1 + L_{f1} \cdot \frac{di_1}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} \quad (19)$$

$$v_2 = i_2 \cdot r_2 + L_{f2} \cdot \frac{di_2}{dt} + N_2 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} \quad (20)$$

Las ecuaciones (19-20) se han determinado para valores instantáneos de tensiones y corrientes. Éstas pueden ser escritas para fasores siempre que las variables sean funciones sinusoidales periódicas en el tiempo.

Sean:

$$i_1(t) = \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot \text{sen}(\omega t + \theta_1) \quad (21)$$

$$i_2(t) = \sqrt{2} \cdot I_2 \cdot \text{sen}(\omega t + \theta_2) \quad (22)$$

Se puede definir los fasores:

$$\dot{I}_1 = I_1 \angle \theta_1 \quad (23)$$

$$\dot{I}_2 = I_2 \angle \theta_2 \quad (24)$$

Así las ecuaciones (19-20) se escriben en su forma fasorial como sigue:

$$\dot{V}_1 = \dot{I}_1 r_1 + j \overbrace{\omega L_{f1}}^{x_{f1}} \dot{I}_1 + j \omega N_1 \overbrace{\dot{\phi}_m}^{\dot{E}_1} \quad (25)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{I}_2 r_2 + j \overbrace{\omega L_{f2}}^{x_{f2}} \dot{I}_2 + j \omega N_2 \overbrace{\dot{\phi}_m}^{\dot{E}_2} \quad (26)$$

Se define como  $x_{f1}$  y  $x_{f2}$  a los coeficientes  $\omega L_{f1}$  y  $\omega L_{f2}$  respectivamente, llamadas reactancias de fuga de los enrollados primario y secundario.

El flujo mutuo en su forma de fador  $\dot{\phi}_m$  cumple la ecuación (8), reescrita:

$$\mathcal{R}_m \dot{\phi}_m = N_1 \cdot \dot{I}_1 + N_2 \cdot \dot{I}_2 \quad (27)$$

Por otra parte, los términos  $j\omega N_1 \dot{\phi}_m$  y  $j\omega N_2 \dot{\phi}_m$  son fuerzas electromotrices inducidas y se expresan por  $\dot{E}_1$  y  $\dot{E}_2$  para los enrollados primario y secundario respectivamente:

$$\dot{E}_1 = j\omega N_1 \dot{\phi}_m \quad (28)$$

$$\dot{E}_2 = j\omega N_2 \dot{\phi}_m \quad (29)$$

### 2.3.4 Diagrama fasorial

Dadas las corrientes  $\dot{I}_1$  y  $\dot{I}_2$  en el plano fasorial (Figura 7) se ubican las caídas de tensión de las ecuaciones (25-26), encontrando la magnitud y fase de  $\dot{V}_1$  y  $\dot{V}_2$ .

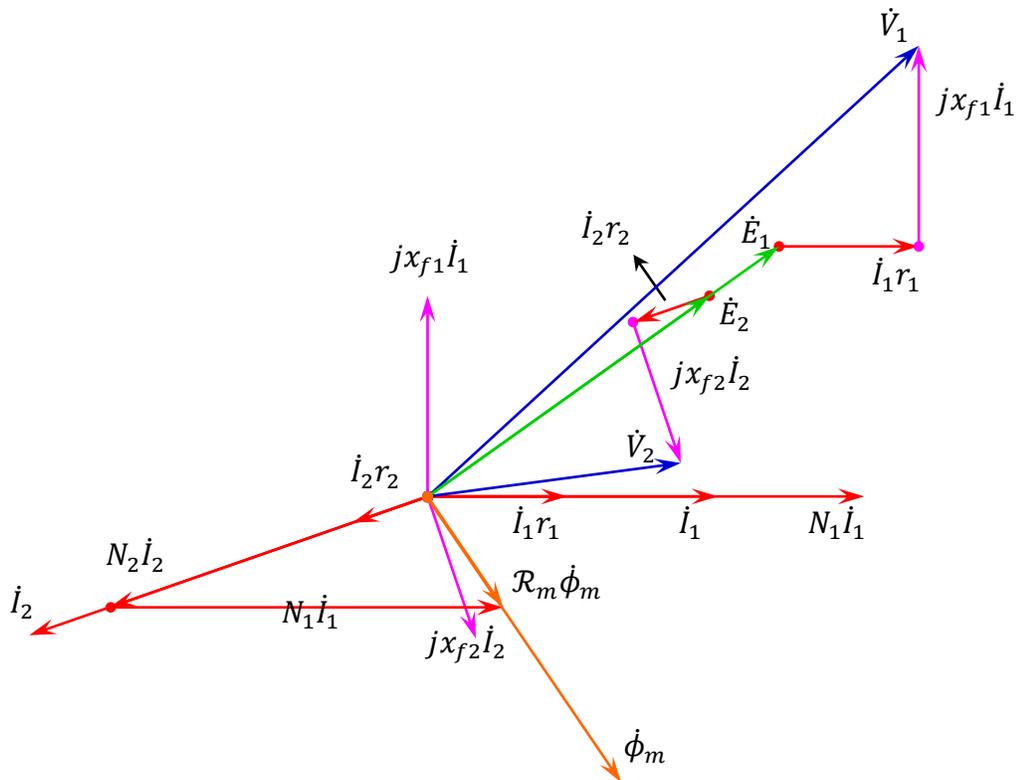


Figura 7. Diagrama fasorial ecuaciones (25-26).

En el diagrama fasorial de la Fig. 7 es necesario escalar para representar gráficamente las magnitudes de las corrientes y tensiones.

Las caídas de tensión de las resistencias  $\dot{I}_1 r_1$  y  $\dot{I}_2 r_2$  están en fase con las corrientes  $\dot{I}_1$  e  $\dot{I}_2$ , asimismo las fuerzas magneto-motrices  $N_1 \dot{I}_1$  y  $N_2 \dot{I}_2$ , cuya suma resulta igual a  $\mathcal{R}_m \dot{\phi}_m$ , en fase con el flujo común  $\dot{\phi}_m$ . Delante de las respectivas corrientes por  $90^\circ$  se sitúan los vectores  $jx_{f1} \dot{I}_1$  y  $jx_{f2} \dot{I}_2$ . A  $90^\circ$  en adelante al flujo  $\dot{\phi}_m$  se tienen en fase las tensiones inducidas  $\dot{E}_1$  y  $\dot{E}_2$ . Finalmente, se realiza las sumas vectoriales:

$$\dot{V}_1 = \dot{I}_1 r_1 + jx_{f1} \dot{I}_1 + \dot{E}_1 \quad (30)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{I}_2 r_2 + jx_{f2} \dot{I}_2 + \dot{E}_2 \quad (31)$$

### 2.3.5 Circuito equivalente

El circuito equivalente es el circuito eléctrico que representa el comportamiento electromagnético del transformador.

Las ecuaciones (30-31) permiten reconocer ya algunos elementos, como las resistencias  $r_1$  y  $r_2$  y las reactancias de fuga  $x_{f1}$  y  $x_{f2}$  de cada enrollado. Estas ecuaciones permiten proponer un circuito equivalente como se muestra en la Figura 8.

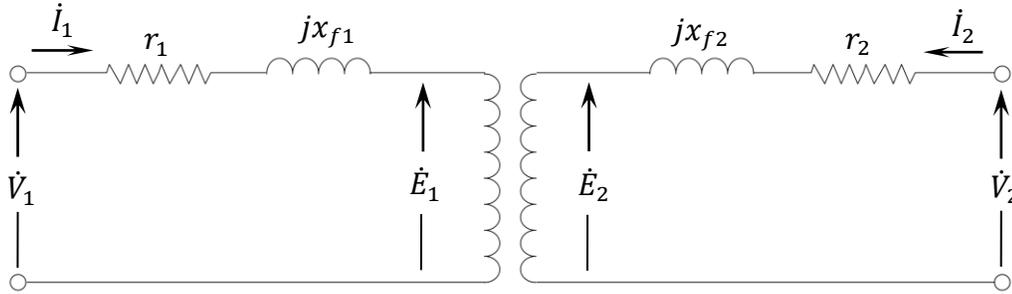


Figura 8. Circuito con parámetros serie del transformador.

Falta aún la relación magnética entre las fuerzas electro-motrices  $\dot{E}_1$  y  $\dot{E}_2$ . El efecto de este flujo puede expresarse por medio de una inductancia mutua del circuito 1 ( $L_{m1}$ ), definida como:

$$L_{m1} = \frac{N_1 \phi_{m1}}{i_1} = \frac{N_1}{i_1} \cdot \left( \frac{N_1 i_1}{\mathcal{R}_m} \right) = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_m} \quad (32)$$

Sustituyendo  $\mathcal{R}_m$  en (8):

$$\phi_m = \frac{L_{m1}}{N_1^2} \cdot (N_1 i_1 + N_2 i_2) = \frac{L_{m1}}{N_1} \cdot \left( i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2 \right) \quad (33)$$

Suponiendo inexistencia de saturación, la inductancia  $L_{m1}$  es constante y se cumple la siguiente expresión:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi_m}{dt} = L_{m1} \cdot \frac{d}{dt} \underbrace{\left( i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2 \right)}_{i_m} \quad (34)$$

Asimismo para:

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi_m}{dt} = L_{m2} \cdot \frac{d}{dt} \left( i_2 + \frac{N_1}{N_2} i_1 \right) \quad (35)$$

La fuerza electro-motriz  $e_1$  es igual a la que se produce en una inductancia  $L_{m1}$  al circular una corriente igual a  $i_m$ , que se denomina “corriente magnetizante”.

$$i_m = i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2 \quad (36)$$

El transformador ahora no cumple una relación magnética, sino solamente relaciona las magnitudes  $\dot{E}_1$  y  $\dot{E}_2$  como un transformador ideal (Figura 9).

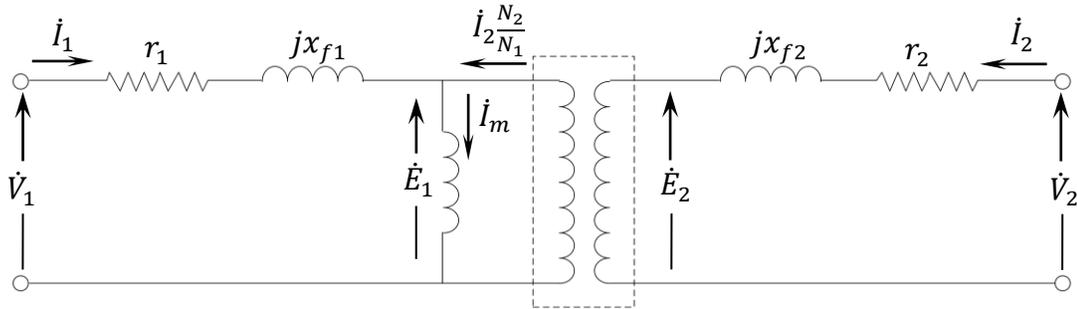


Figura 9. Introducción de efecto magnético.

A continuación se incluye el efecto de la saturación y pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault, hasta ahora desconsideradas del análisis.

Considerando un transformador con una tensión sinusoidal aplicada a su enrollado primario  $v_1$  y su enrollado secundario abierto.

La caída de tensión en la resistencia y reactancia de fuga del primario es muy pequeña, luego la fuerza electro-motriz inducida  $e_1$  es prácticamente igual a la tensión aplicada  $v_1$  y por tanto sinusoidal.

Asimismo, el flujo magnético mutuo  $\phi_m$  es sinusoidal y puede expresarse como:

$$\phi_m(t) = \phi_{m\acute{a}x} \cdot \sin(\omega t) \quad (37)$$

Luego la fuerza electro-motriz inducida y su magnitud son:

$$e_1(t) = N_1 \frac{d\phi_m(t)}{dt} = \omega N_1 \phi_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\omega t) \quad (38)$$

$$|\dot{E}_1| = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N_1 \cdot \frac{\phi_{m\acute{a}x}}{B_{m\acute{a}x} \cdot A} \quad (39)$$

Y como  $|\dot{E}_1|$  es praticamente igual a  $|\dot{V}_1|$ , se puede expresar:

$$\phi_{m\acute{a}x} = \frac{|\dot{V}_1|}{\frac{2\pi}{2} \cdot f \cdot N_1} \quad (40)$$

La ecuación (40) muestra que el flujo magnético queda determinado por la tensión aplicada, su frecuencia y el número de vueltas del enrollado.

Por otra parte, la corriente de excitación queda determinada por las características magnéticas del núcleo y debe ser tal que produzca una fuerza electro-motriz necesaria para provocar el flujo magnético requerido.

Debido a la no linealidad del fierro, la forma de onda de la corriente de excitación es diferente a la forma del flujo magnético.

La corriente de excitación está formada por una componente fundamental y armónicas impares. La componente fundamental se puede separar en dos, una en fase con  $e_{m1}$  y otra retrasada en  $90^\circ$ . La componente fundamental en fase con  $e_{m1}$  produce las pérdidas por histéresis y de corrientes de Foucault, llamándose componente de pérdidas. La componente restante recibe el nombre de corriente magnetizante, formada por la componente fundamental retrasa en  $90^\circ$  con respecto a  $e_{m1}$  más todas las armónicas, siendo la tercera armónica la más importante. En un transformador de poder, la tercera armónica es del orden de un 40% de la corriente de excitación [2].

No obstante lo anterior, los efectos de los armónicos de la corriente de excitación son despreciables frente a las corrientes sinusoidales que circulan por los elementos lineales del transformador. En efecto, la corriente de excitación de un transformador de poder típico es del orden del 5% de la corriente a plena carga [2].

Se puede representar como una “onda sinusoidal equivalente” tal que presente igual valor efectivo, frecuencia y genere la misma potencia media que la onda real.

Tomando en cuenta los efectos analizados, el diagrama fasorial de la Fig. 8 de la sección 2.3.4, es modificado como indica la Figura 10.



El modelo final recibe el nombre de “circuito equivalente exacto” (Fig. 10).

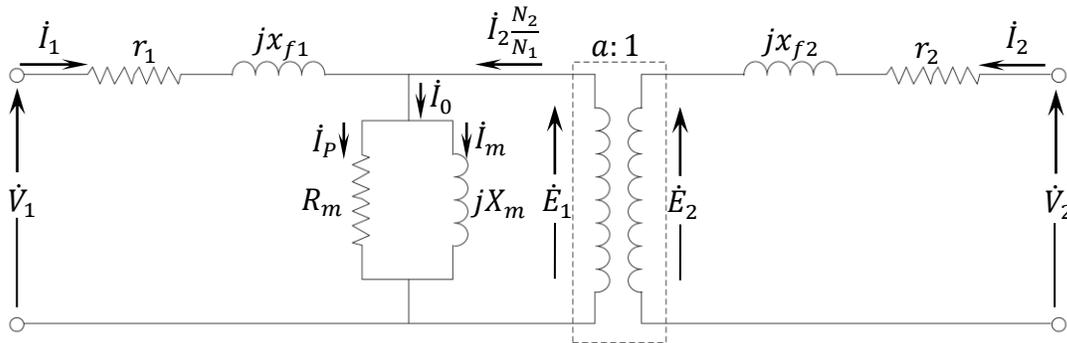


Figura 11. Circuito equivalente exacto del transformador.

Considerando la transformación ideal de los niveles de tensión  $\dot{E}_1$  y  $\dot{E}_2$  y las ecuaciones (1-2) se puede representar la resistencia  $r_2$  y la reactancia  $x_{f2}$  del enrollado secundario por una resistencia  $r'_2$  y una reactancia  $x'_{f2}$  en el lado primario del circuito equivalente, determinadas por:

$$r'_2 = r_2 \cdot a^2 \tag{42}$$

$$x'_2 = x_2 \cdot a^2 \tag{43}$$

Siendo  $a$  la razón de transformación se puede representar el circuito anterior referido al enrollado primario (Figura 12).

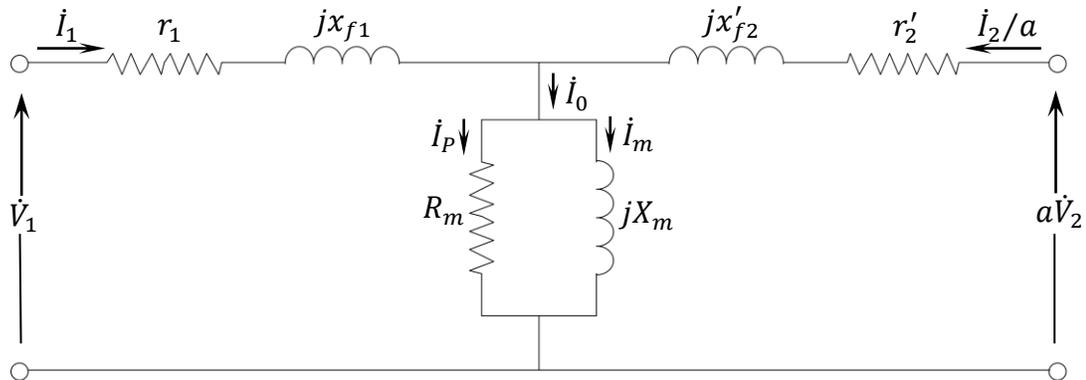


Figura 12. Circuito equivalente exacto referido al lado primario.

En general, la corriente de excitación  $I_0$  es muy baja en comparación a las corrientes de carga, luego, el error que surge de aproximar el circuito equivalente trasladando la rama de excitación a la entrada es despreciable. El resultado es el “circuito equivalente aproximado” (Figura 13).

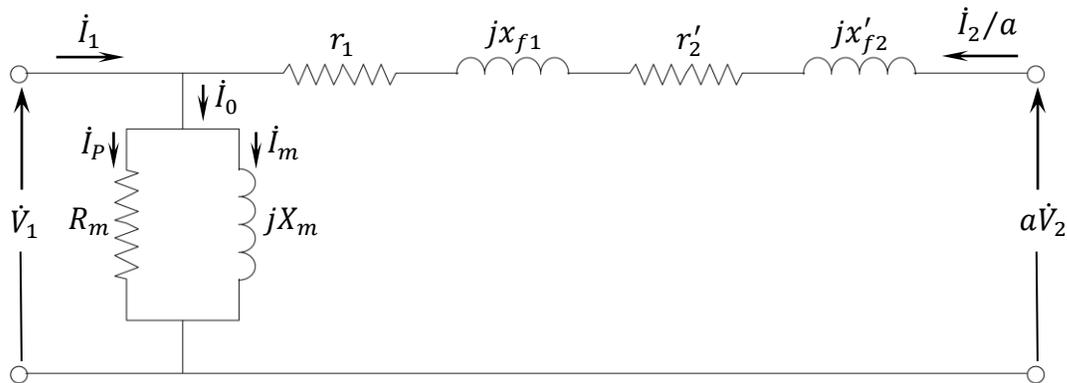


Figura 13. Circuito equivalente aproximado referido al lado primario.

### 2.3.6 Determinación de los parámetros del circuito equivalente

Los valores de los parámetros del circuito equivalente de la Figura 14 se pueden obtener experimentalmente mediante dos ensayos: la prueba de circuito abierto; y, la prueba de corto circuito [3], [6], [7].

#### 2.3.6.1 Prueba de circuito abierto

Se alimenta al enrollado de baja tensión con tensión sinusoidal nominal mientras que el enrollado de alta tensión se deja abierto. Se disponen equipos para medir: la tensión de alimentación; la corriente que fluye por el enrollado de baja tensión; y, la potencia que consume (Figura 14a).

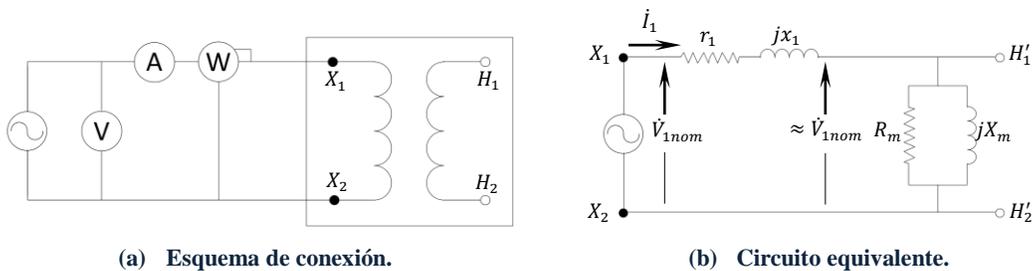


Figura 14. Prueba de circuito abierto.

Las magnitudes de la resistencia  $r_1$  y reactancia  $x_{f1}$  de la rama serie del enrollado de baja tensión son muy pequeñas en comparación a la impedancia de la rama de excitación: paralelo

entre  $R_m$  y  $jX_m$  (Figura 14b). Por tanto, la tensión en la rama de magnetización es prácticamente igual a la tensión nominal aplicada  $\dot{V}_{1nom}$ .

Siendo:  $V_{1nom}$  e  $I_1$  los valores efectivos: y,  $P$  la potencia activa, medidas por los instrumentos respectivos, se puede calcular las constantes de la rama de excitación por medio de las expresiones:

$$R_m = \frac{V_{1nom}^2}{P} \quad (44)$$

$$X_m = \frac{V_{1nom}^2}{\sqrt{V_{1nom}^2 \cdot I_1^2 - P^2}} \quad (45)$$

### 2.3.6.2 Prueba de cortocircuito

Se conecta los bornes del enrollado de baja tensión disponiendo el cortocircuito. Se alimenta el enrollado de alta tensión con voltaje reducido (2-12% del valor nominal), tal que circule corriente nominal por el enrollado [3]. Para esto se eleva la tensión desde cero al valor requerido con el equipo adecuado, por ejemplo: un autotransformador de razón variable. Se mide tensión, corriente y potencia de entrada al enrollado de alta tensión. En la Fig. 15 se muestra la configuración de instrumentos.

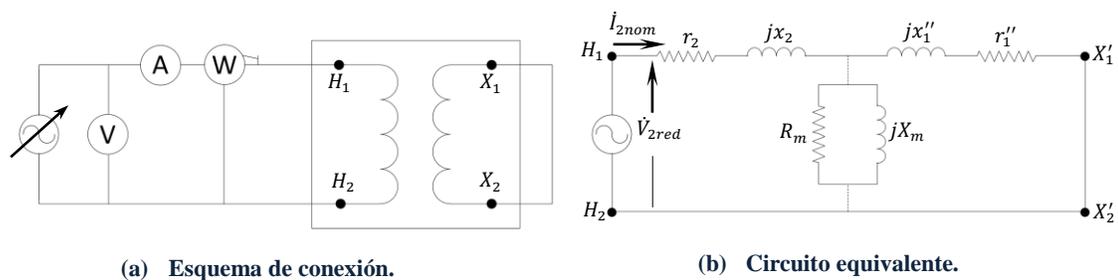


Figura 15. Prueba de cortocircuito.

La impedancia de la rama de magnetización es en magnitud mucho mayor que la impedancia serie de ambos enrollados. Una buena aproximación de los parámetros serie del transformador se logra despreciando la corriente de excitación, ya que casi toda la corriente circula por la rama serie del circuito equivalente. Así, se puede proceder con las ecuaciones (46-47). Esta aproximación podría ser inapropiada para el caso del Microformer, pues su corriente de excitación es comparable a la corriente de carga.

$$r_1'' + r_2 = \frac{P}{I_{2nom}^2} \quad (46)$$

$$x_1'' + x_2 = \frac{\sqrt{V_{2red}^2 \cdot I_{2nom}^2 - P^2}}{I_{2nom}^2} \quad (47)$$

Siendo:  $V_{2red}$  la tensión reducida efectiva de alimentación;  $I_{2nom}$  la corriente efectiva nominal; y,  $P$  la potencia activa.

Los valores resultantes de las ecuaciones (46-47) son la suma de las resistencias  $r_1''$ ,  $r_2$  y reactancias  $x_1''$ ,  $x_2$ , no existe una manera precisa de separar los parámetros de cada enrollado, aunque se utiliza la aproximación  $r_1'' = r_2$ , lo mismo para las reactancias. Notar que los parámetros  $r_1''$  y  $x_1''$  están referidos al lado de alta tensión.

### 2.3.6.3 2.3.6.3. Potencia en corriente alterna

Para rangos pequeños de potencia, a veces es más preciso utilizar un osciloscopio que registre las ondas instantáneas de tensión y corriente, toda vez que los vatímetros disponibles sean de un rango muy superior y, por tanto, tengan un alto error para bajas mediciones. Sin embargo, para calcular los parámetros del circuito equivalente es necesario conocer la potencia activa en cada una de las pruebas, esta se obtiene desde la tensión y corrientes instantáneas medidas por el osciloscopio y sus operaciones matemáticas.

Sean la tensión y corriente sinusoidales de la forma:

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I_{RMS} \cdot \cos(\omega t + \alpha) \quad (48)$$

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot V_{RMS} \cdot \cos(\omega t + \alpha + \varphi) \quad (49)$$

La potencia instantánea resulta:

$$p(t) = 2 \cdot V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \cos(\omega t + \alpha + \varphi) \cdot \cos(\omega t + \alpha) \quad (50)$$

En [8] luego de desarrollar la expresión (50), se obtiene:

$$p(t) = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot [\cos \varphi + \cos \varphi \cos(2\omega t + 2\alpha) - \sin \varphi \sin(2\omega t + 2\alpha)] \quad (51)$$

Teniéndose las formas de onda de la Figura 16:

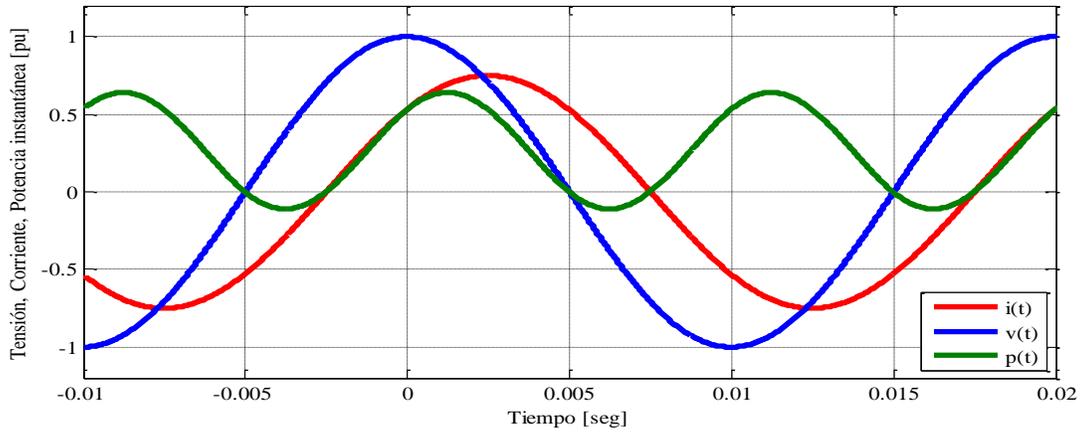


Figura 16. Formas de onda  $v(t)$ ,  $i(t)$  y  $p(t)$ .

La potencia instantánea  $p(t)$  se descompone en dos componentes sinusoidales (52-54): la potencia oscilante activa o útil  $p_{oa}(t)$ ; y la potencia oscilante ociosa o reactiva  $p_{oo}(t)$  [8]. La potencia oscilante activa tiene valor medio  $\overline{p_{oa}}$  distinto de cero e igual al valor medio de la potencia instantánea  $\bar{p}$  (55), mientras que la potencia oscilante ociosa tiene valor medio igual a cero (56). Esto se aprecia en la Figura 17.

$$p(t) = p_{oa}(t) + p_{oo}(t) \quad (52)$$

$$p_{oa}(t) = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \cos \varphi + V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \cos \varphi \cos(2\omega t + 2\alpha) \quad (53)$$

$$p_{oo}(t) = -V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \sin \varphi \sin(2\omega t + 2\alpha) \quad (54)$$

$$\bar{p} = \overline{p_{oa}} = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \cos \varphi = P \quad (55)$$

$$\overline{p_{oo}} = 0 \quad (56)$$

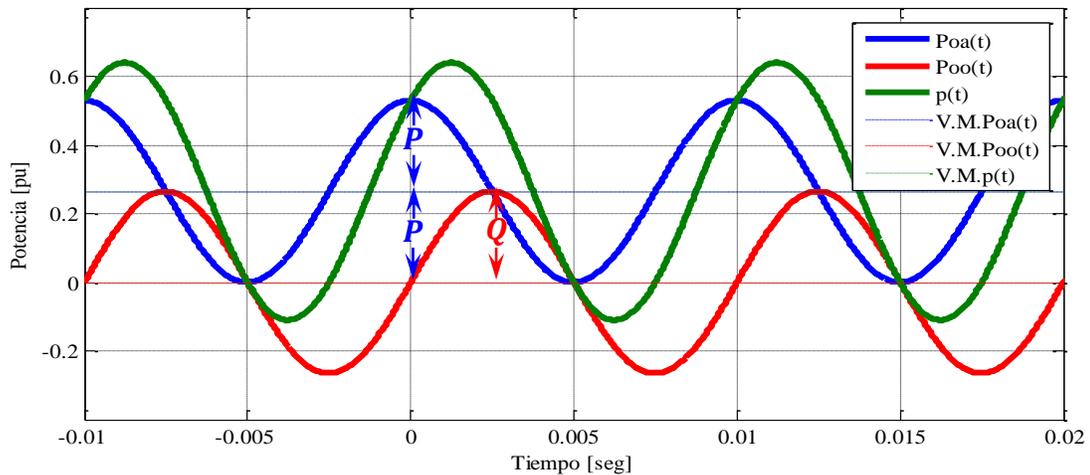


Figura 17. Potencia instantánea, activa y reactiva.

Finalmente, al conocer las formas de onda instantáneas de tensión y corriente se puede obtener la potencia activa a través de la ecuación (55), donde esta es igual al valor medio de la potencia instantánea (producto de la tensión y corriente). La magnitud de la potencia aparente es el producto de los valores efectivos de tensión y corriente. Y, la potencia reactiva puede resolverse del teorema de Pitágoras con la potencia activa como un cateto y la potencia aparente como hipotenusa, o bien, es la amplitud de la componente de potencia oscilatoria ociosa de la ecuación (54).

En transformadores usualmente la corriente de excitación posee componentes armónicas, las que se transfieren a la potencia instantánea. No obstante, al calcular el valor medio de la potencia instantánea las componentes armónicas no aportan a la potencia activa, pues son ortogonales a la corriente fundamental, luego el valor medio de la multiplicación de la tensión y corriente instantáneas es la potencia útil aún en presencia de armónicos.

## 2.4 Modelo Térmico

El diseño de un transformador se orienta a su comportamiento eléctrico y térmico, este último toma mucho valor al considerar la seguridad y vida útil de los materiales que componen el transformador, en particular los aislantes eléctricos y conductores.

Las pérdidas por efecto Joule son principalmente las responsables de la elevación de temperatura que experimenta un transformador, estas pérdidas se producen en los conductores de cobre y, en menor medida, en el núcleo debido a corrientes de Foucault. Por lo anterior, los modelos persiguen estimar primordialmente la temperatura máxima del conductor (TMC) (*hot-spot temperature*; en inglés) [9], [10].

Los modelos de circuitos equivalentes, consisten en circuitos eléctricos cuyas variables y parámetros eléctricos representan el fenómeno térmico que se produce en un transformador. Forma el circuito una fuente de corriente, que modela la disipación de calor de los enrollados y el núcleo, un condensador que simula las características del aceite y una resistencia eléctrica representa la unión aceite-aire. El modelo es definido en base a la temperatura objetivo, puede tratarse de la temperatura del aceite superior o la temperatura promedio. La ecuación diferencial resultante del circuito eléctrico se resuelve en el tiempo.

En general, en las publicaciones científicas de la IEEE [9], [10] y el estándar IEEE [11] se utiliza el mismo circuito eléctrico (Fig. 18-19), utilizando la analogía térmica-eléctrica de la Tabla 3. La resolución de la ecuación diferencial resultante modela la temperatura de forma exponencial. No obstante, los modelos desarrollados en [9]–[11] dependen de parámetros que se determinan a partir del alza nominal de temperatura del aceite sobre la temperatura ambiente. Por

lo tanto, no son suficientes para conocer la temperatura de un transformador desconocido y sin estos datos de placa.

**Tabla 3. Analogía térmica-eléctrica [7]**

Térmico		Eléctrico	
Flujo de calor	$q$	Corriente	$I$
Temperatura	$\theta$	Voltaje	$V$
Resistencia térmica	$R_{th}$	Resistencia eléctrica	$R_e$
Capacitancia térmica	$C_{th}$	Capacitancia eléctrica	$C_e$

El circuito eléctrico análogo térmico se basa en el modelo discreto de capacitancia (*lumped capacitance method*), el cual representa la capacidad de un objeto de almacenar calor por medio de una capacitancia térmica. Se asume que las características térmicas del material son constantes, independiente de los cambios de temperatura. A su vez, la resistencia térmica es la propiedad del material de resistir el flujo de calor [9]. Por lo tanto, se puede extender la analogía de las leyes eléctricas (57) a las correspondientes térmicas (58). Es interesante destacar que no hay análogo térmico a la inductancia eléctrica [10]:

$$v = R_e \cdot i \quad e \quad i = C_e \cdot \frac{dv}{dt} \quad (57)$$

$$\theta = R_{th} \cdot q \quad e \quad q = C_{th} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (58)$$

Un desarrollo presente en [9], [10] es considerar una resistencia térmica no lineal, la cual toma en cuenta los cambios de las características térmicas del aceite del transformador con respecto a cambios en la temperatura.

Las características del aceite de transformador dependen fuertemente de la temperatura, como se muestra en la Tabla 4 [12], donde se observa que la dependencia de la viscosidad del aceite con respecto a la temperatura es más pronunciada.

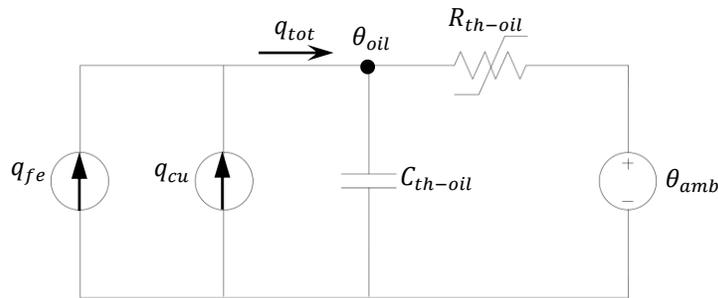
**Tabla 4. Características térmicas del aceite de transformador**

Temperatura $\theta$ [°C]	Densidad $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico $c_p$ [Ws/(kg °C)]	Conductividad térmica $k$ [W/m °C]	Coef. cúbico de expansión térmica $\beta$ [1/°C]	Viscosidad cinemática $\mu$ [m <sup>2</sup> /s]
-15	902	1700	0,1341	6,20E-04	450,0E-6
-5	896	1740	0,1333	6,40E-04	180,0E-6
5	890	1785	0,1326	6,70E-04	85,0E-6
15	884	1825	0,1318	6,90E-04	45,0E-6
25	879	1870	0,131	7,15E-04	27,0E-6
35	873	1910	0,1303	7,40E-04	17,0E-6
45	867	1950	0,1295	7,65E-04	11,5E-6
55	861	1995	0,1287	7,80E-04	8,2E-6
65	855	2040	0,128	7,90E-04	6,1E-6
75	849	2080	0,1272	7,95E-04	4,7E-6
85	844	2120	0,1264	8,00E-04	3,8E-6
100	835	2180	0,1253	8,00E-04	3,0E-6

La resistencia térmica no lineal se define para ambos modelos: el modelo de temperatura del aceite superior; y, el modelo de la temperatura máxima del conductor.

### 2.4.1 Modelo de la temperatura del aceite superior

El circuito térmico de este modelo se muestra en la Fig. 18, el cual está basado en la analogía térmica eléctrica [9], [10], [13].



**Figura 18. Circuito térmico de temperatura del aceite.**

Donde los parámetros y variables son los siguientes:

- $q_{tot}$  flujo de calor total de las pérdidas;
- $q_{cu}$  flujo de calor generado por las pérdidas de carga, en el conductor;
- $q_{fe}$  flujo de calor no generado por las pérdidas de carga;

- $C_{th-oil}$  capacitancia térmica del aceite;
- $\theta_{oil}$  temperatura del aceite;
- $R_{th-oil}$  resistencia térmica no lineal del aceite;
- $\theta_{amb}$  temperatura ambiente.

El flujo de calor generado por las pérdidas producidas y no producidas por las corrientes de carga son representadas por dos fuentes ideales de flujo de calor (corriente). La temperatura ambiente se representa por una fuente de temperatura (voltaje). La resistencia no lineal del aceite  $R_{th-oil}$ , de acuerdo con la teoría de transferencia de calor [13], queda determinada por la ecuación:

$$R_{th-oil} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (59)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor y  $A$  el área. La resistencia térmica no lineal es inversamente proporcional al coeficiente  $h$ , el cual depende de la temperatura, relación que se establece en las ecuaciones siguientes.

La convección natural del flujo de aceite puede ser descrita por la siguiente relación empírica [13]:

$$N_u = C \cdot [G_r \cdot P_r]^n \quad (60)$$

Donde  $C$  y  $n$  son constantes definidas en función del tipo de circulación del aceite: si es laminar; o, turbulento. Estos valores se encuentran en la Tabla 5 [13].

**Tabla 5. Valores empíricos de las constantes  $C$  y  $n$ .**

Tipo de circulación	$C$	$n$
Laminar	0,59	0,25
Turbulenta	0,10	0,33

El número de Nusselt  $N_u$ , el número de Prandtle  $P_r$  y el número de Grashof  $G_r$  son descritos por las siguientes ecuaciones respectivamente [13]:

$$N_u = \frac{h \cdot L}{k} \quad (61)$$

$$P_r = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad (62)$$

$$G_r = \frac{L^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (\Delta\theta_{oil})}{\mu^2} \quad (63)$$

Con:

- $L$       dimensión característica, largo, ancho o diámetro;
- $g$       constante gravitacional;
- $k$       conductividad térmica del aceite (Tabla 4);
- $\rho$       densidad del aceite (Tabla 4);
- $\beta$       coeficiente de expansión térmica (Tabla 4);
- $c_p$       calor específico del aceite (Tabla 4);
- $\mu$       viscosidad del aceite (Tabla 4);
- $\Delta\theta_{oil}$       gradiente de la temperatura del aceite superior;

Sustituyendo (61-63) en (60) se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{h \cdot L}{k} = C \cdot \left[ \left( \frac{c_p \cdot \mu}{k} \right) \cdot \left( \frac{L^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (\Delta\theta_{oil})}{\mu^2} \right) \right]^n \quad (64)$$

La variación de la viscosidad con respecto a la temperatura es mucho mayor que la variación de los otros parámetros del aceite (Tabla 3) [9], [12]. Por tanto, todos los parámetros del aceite excepto la viscosidad son reemplazados por constantes en (64). Así, el coeficiente de transferencia de calor  $h$  queda determinado por:

$$h = C_1 \cdot \left( \frac{\Delta\theta_{oil}}{\mu} \right)^n \quad (65)$$

Donde  $C_1$  se asume constante y su expresión es:

$$C_1 = C \cdot \left[ \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot k^{\left(\frac{1-n}{n}\right)} \cdot L^{\left(\frac{3n-1}{n}\right)} \cdot c_p \right]^{(n)} \quad (66)$$

Adicionalmente, la viscosidad considerada aún variable con respecto a la temperatura, queda dado por la siguiente ecuación [14]:

$$\mu = 0.0000013573 \cdot e^{\left[ \frac{2797.3}{\theta_{oil} + 273} \right]} \quad (67)$$

Donde la viscosidad es evaluada a la temperatura superior del aceite. El factor  $C_1$  y sus parámetros son graficados en función de la temperatura en [9] y se muestra que  $C_1$  es prácticamente constante a temperaturas normales de operación de transformadores típicos, especialmente sobre 40°C.

La ecuación diferencial para el circuito térmico de la Fig.18 es:

$$q_{fe} + q_{cu} = C_{th-oil} \cdot \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{(\theta_{oil} - \theta_{amb})}{R_{th-oil}} \quad (68)$$

Sustituyendo la ecuación de la resistencia térmica no lineal (59) en (68), se obtiene:

$$q_{fe} + q_{cu} = C_{th-oil} \cdot \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{(\theta_{oil} - \theta_{amb})}{\frac{1}{h \cdot A}} \quad (69)$$

Luego reemplazando el coeficiente de transferencia de calor  $h$  (65), la ecuación diferencial queda como:

$$(q_{fe} + q_{cu}) \cdot \left(\frac{\mu^n}{C_1 \cdot A}\right) = \left(\frac{\mu^n}{C_1 \cdot A}\right) \cdot C_{th-oil} \cdot \frac{d\theta_{oil}}{dt} + (\theta_{oil} - \theta_{amb})^{1+n} \quad (70)$$

Definiendo la viscosidad en la expresión (71) y las siguientes constantes (72-76), la ecuación (61) es desarrollada a su forma final (68).

- Viscosidad  $\mu$ :

$$\mu = \mu_{pu} \cdot \mu_{rated} \quad (71)$$

- La resistencia térmica no lineal nominal  $R_{th-oil,rated}$ :

$$R_{th-oil,rated} = \frac{1}{C_1 \cdot A} \cdot \left(\frac{\mu_{rated}}{\Delta\theta_{oil,rated}}\right)^n \quad (72)$$

- La temperatura nominal superior del aceite sobre la temperatura ambiente nominal  $\Delta\theta_{oil,rated}$ :

$$\Delta\theta_{oil,rated} = (q_{fe} + q_{cu})_{rated} \cdot R_{th-oil,rated} \quad (73)$$

- La constante de tiempo nominal del aceite  $\tau_{oil,rated}$ :

$$\tau_{oil,rated} = R_{th-oil,rated} \cdot C_{th-oil,rated} \quad (74)$$

- La razón  $R$  entre las pérdidas de carga  $q_{cu}$  (conductores) y las pérdidas no debidas a la carga  $q_{fe}$  (núcleo; corrientes parásitas y de Foucault):

$$R = \frac{q_{cu}}{q_{fe}} \quad (75)$$

- El factor de carga  $K$ :

$$K = \frac{I}{I_{rated}} \quad (76)$$

Donde  $I$  es la corriente de carga e  $I_{rated}$  es la corriente nominal.

Finalmente la ecuación (70) queda de la forma siguiente:

$$\frac{1 + R \cdot K^2}{1 + R} \cdot \mu_{pu}^n \cdot \Delta\theta_{oil,rated} = \mu_{pu}^n \cdot \tau_{oil,rated} \cdot \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{(\theta_{oil} - \theta_{amb})^{n+1}}{\Delta\theta_{oil,rated}^n} \quad (77)$$

El cálculo del modelo básico de temperatura del aceite superior queda dado por esta ecuación (68). Notar que, la viscosidad  $\mu_{pu}$  afecta tanto a la resistencia térmica como a la constante de tiempo del aceite superior.

Se asume que la circulación del aceite dentro del contenedor del transformador es laminar y el valor de la constante  $n$  para este caso particular de flujo es 0.25 (Tabla 5). No obstante, al energizar el transformador en frío o cuando la velocidad del aceite dentro del tanque del transformador es igual a cero, la constante  $n$  toma diferentes valores para distintos tipos de modos de refrigeración (Tabla 6) [9], [10], [13], [14].

**Tabla 6. Constante n para el modelo térmico del aceite.**

Tipo de circulación	$n$	
	ONAF/OFAF	ONAN
velocidad inicial de circulación de aceite = 0 (inicio frío)	0,5	0
velocidad inicial de circulación de aceite > 0 (transformador con carga)	0,25	

Para calcular la temperatura del aceite superior desde la ecuación diferencial (77), un método numérico debe ser usado, en [9] es usado el método Runge-Kutta y se utilizan las clasificaciones siguientes:

- Constantes:  $R, n, \tau_{oil,rated}, \Delta\theta_{oil,rated}$ ;
- Variables de entrada:  $K, \mu_{pu}, \theta_{amb}$ ;
- Variables de salida:  $\theta_{oil}$ ;
- Variable independiente:  $t$ .

En [9] se aplica el modelo de temperatura del aceite a tres transformadores de poder para regímenes de carga variables.

## 2.4.2 Modelo de la máxima temperatura del conductor

Similar a la teoría que se aplica en el modelo de la temperatura del aceite, el modelo de la temperatura máxima del conductor es también representado por un circuito térmico (Fig. 19). Donde los parámetros y variables son los siguientes:

- $q_{cu}$  flujo de calor generado por las pérdidas en el conductor;
- $C_{th-wnd}$  capacitancia térmica de enrollado (*winding*; en inglés);
- $\theta_{hs}$  temperatura máxima del conductor;
- $R_{th-hs-oil}$  resistencia térmica no lineal del enrollado;
- $\theta_{oil}$  temperatura del aceite.

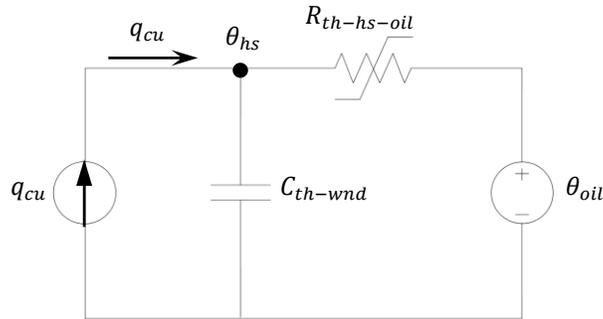


Figura 19. Circuito térmico de la temperatura máxima del conductor.

El flujo de calor generado por las pérdidas en los enrollados de cobre ( $q_{cu}$ ) es representado nuevamente como una fuente ideal. La resistencia térmica no lineal  $R_{th-hs-oil}$  queda definida, a través de la teoría térmica ya aplicada, como:

$$R_{th-hs-oil} = R_{th-wdg} + R_{th-insul} + R_{th-oil} \quad (78)$$

Donde [9]:

$$\begin{aligned} R_{th-oil} &\gg R_{th-wdg} \\ R_{th-oil} &\gg R_{th-insul} \end{aligned} \quad (79)$$

- $R_{th-wdg}$  resistencia térmica del enrollado;
- $R_{th-insul}$  resistencia térmica de la aislación;
- $R_{th-oil}$  resistencia térmica del aceite.

Así la ecuación final para la resistencia térmica no lineal de enrollado a aceite es:

$$R_{th-hs-oil} = R_{th-oil} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (80)$$

La ecuación que determina el coeficiente de transferencia de calor  $h$  es análoga a la expresión (65):

$$h = C_1 \cdot \left( \frac{\Delta\theta_{hs}}{\mu} \right)^n \quad (81)$$

Donde la viscosidad es nuevamente evaluada a la temperatura del aceite superior y  $\Delta\theta_{hs}$  es el gradiente de la temperatura máxima del conductor. La ecuación diferencial para el circuito térmico de la Figura 19 es:

$$q_{cu} = C_{th-wdg} \cdot \frac{d\theta_{hs}}{dt} + \frac{(\theta_{hs} - \theta_{oil})}{R_{th-hs-oil}} \quad (82)$$

Sustituyendo la ecuación de la resistencia térmica no lineal (80) en (82), y luego la expresión del coeficiente de transferencia térmica (81), se obtiene:

$$q_{cu} \left( \frac{\mu^n}{C_1 \cdot A} \right) = \left( \frac{\mu^n}{C_1 \cdot A} \right) C_{th-wdg} \cdot \frac{d\theta_{hs}}{dt} + (\theta_{hs} - \theta_{oil})^{n+1} \quad (83)$$

Se define la viscosidad en (71) y las siguientes constantes como:

- La resistencia térmica no lineal nominal de la temperatura máxima del conductor  $R_{th-hs-oil}$ :

$$R_{th-hs-oil} = \frac{1}{C_1 \cdot A} \cdot \left( \frac{\mu_{rated}}{\Delta\theta_{hs,rated}} \right) \quad (84)$$

- La diferencia nominal de temperatura máxima del conductor sobre la temperatura del aceite  $\Delta\theta_{hs,rated}$ :

$$\Delta\theta_{hs,rated} = q_{cu} \cdot R_{th-hs-oil,rated} = H \cdot g_r \quad (85)$$

Donde  $H$  es el factor de temperatura máxima del conductor y  $g_r$  es el promedio de la temperatura nominal del conductor sobre la temperatura del aceite.

- La constante de tiempo nominal del enrollado  $\tau_{wdg,rated}$ :

$$\tau_{wdg,rated} = R_{th-hs-oil,rated} \cdot C_{th-hs-oil,rated} \quad (86)$$

Por otro lado, las pérdidas de carga  $P_{cu,pu}$  dependen de la temperatura de la forma:

$$P_{cu,pu}(\theta_{hs}) = \underbrace{P_{cu-dc,pu} \cdot \frac{235 + \theta_{hs}}{235 + \theta_{hs,rated}}}_{P_{cu-dc,pu}(\theta_{hs})} + \underbrace{P_{cu-eddy,pu} \cdot \frac{235 + \theta_{hs,rated}}{235 + \theta_{hs}}}_{P_{cu-eddy,pu}(\theta_{hs})} \quad (87)$$

Donde  $P_{cu,dc,pu}(\theta_{hs})$  y  $P_{cu,eddy,pu}(\theta_{hs})$  son las pérdidas continuas (dc) y las pérdidas por corrientes de Foucault, respectivamente. Las pérdidas continuas varían directamente con la temperatura, mientras que las pérdidas de Foucault varían inversamente con la temperatura. Notar que el valor 235 °C corresponde a enrollados de cobre.

Finalmente la ecuación diferencial queda como:

$$\{K^2 \cdot P_{cu,pu}(\theta_{hs})\} \cdot \mu_{pu}^n \cdot \Delta\theta_{hs,rated} = \mu_{pu}^n \cdot \tau_{wdg,rated} \cdot \frac{d\theta_{hs}}{dt} + \frac{(\theta_{hs} - \theta_{oil})^{n+1}}{\Delta\theta_{hs,rated}^n} \quad (88)$$

La ecuación (88) toma en cuenta las variaciones de la resistencia térmica y la constante de tiempo del enrollado debido a la dependencia de la viscosidad respecto a la temperatura. La variación de las pérdidas con la temperatura también se incluye.

Similar al mismo supuesto hecho en el modelo térmico de la temperatura del aceite, se asume que el flujo de aceite dentro del tanque del transformador es laminar, el valor de la constante  $n$ , cuando la circulación de aceite se encuentra formada, es igual a 0,25. En el caso que se energice el transformador en frío, cuando la velocidad del aceite dentro del tanque del transformador es igual a cero, la constante  $n$  es igual a 2 para cualquier modo de refrigeración (Tabla 7. Constante  $n$  para el modelo de temperatura máxima de conductor.).

**Tabla 7. Constante n para el modelo de temperatura máxima de conductor.**

Tipo de circulación	n
	ONAF/OFAF/ONAN
velocidad inicial de circulación de aceite = 0 (inicio frío)	2
velocidad inicial de circulación de aceite > 0 (transformador con carga)	0,25

En [9] se utiliza el método Runge-Kutta para el cálculo de la temperatura desde la ecuación diferencial (88), donde los elementos de la ecuación son clasificados como:

- Constantes:  $n$ ,  $\tau_{wdg,rated}$ ,  $\Delta\theta_{hs,rated}$ ,  $P_{cu-dc,pu}$ ,  $P_{cu-eddy,pu}$ ;
- Variables de entrada:  $K$ ,  $\mu_{pu}$ ,  $\theta_{oil}$  (notar que  $\theta_{oil}$  es una variable de salida del modelo de la temperatura del aceite);
- Variables de salida:  $\theta_{hs}$ ;
- Variable independiente:  $t$ .

## 2.5 Estándares y normas

### 2.5.1 Introducción

En el estándar IEEE Std. C57.12.00 -2010 [15] se presentan los requerimientos generales para transformadores de poder, de distribución y de regulación inmersos en líquido. El documento recomienda acerca de la nominación de los transformadores, su construcción, características de cortocircuito, pruebas y cálculos, tolerancias, etc.

Los procedimientos de prueba y los instrumentos adecuados se describen en el estándar IEEE Std. C57.12.90 - 2010 [16]. Mientras que las definiciones utilizadas en [15], [16] se presentan en el estándar IEEE Std. C57.12.80 [17].

### 2.5.2 Definiciones

#### 2.5.2.1 *Transformadores de distribución aislados en líquido*

Transformador que transfiere energía eléctrica desde un circuito primario de distribución a un circuito secundario o circuito de servicio a consumidores [17].

#### 2.5.2.2 *Transformadores de poder aislados en líquido*

Transformador que transfiere energía eléctrica en cualquier punto del circuito entre el circuito primario de generación y de distribución. La polaridad debe ser sustractiva [17].

### 2.5.3 Datos nominales

#### 2.5.3.1 *Clase de enfriamiento*

La clase de enfriamiento del transformador debe identificarse, de acuerdo a [15] por un código de cuatro letras descrito a continuación. Estas designaciones son consistentes con la norma IEC 60076-2: 1993 [B12].

Primera letra: medio interno de enfriamiento en contacto con los enrollados:

- O: Aceite mineral o líquido sintético de aislación con punto de combustión  $\leq 300^{\circ}\text{C}$
- K: Líquido aislante con punto de combustión  $> 300^{\circ}\text{C}$
- L: Líquido aislante con punto de combustión no medible

Segunda letra: mecanismo de circulación interno:

- N: Convección de flujo natural a través del equipamiento de enfriamiento y los enrollados

- F: Circulación forzada a través del equipamiento de enfriamiento (i.e., bombas refrigerantes), flujo de convección natural en enrollados (también llamado flujo indirecto)
- D: Circulación forzada a través del equipamiento de enfriamiento, dirigida a al menos los enrollados principales

Tercera letra: medio externo de enfriamiento

- A: Aire
- W: Agua

Cuarta letra: mecanismo de circulación del medio de enfriamiento externo

- N: Convección natural
- F: Convección forzada [ventiladores (aire), bombas (agua)]

### 2.5.3.2 *Frecuencia*

A menos se especifique de otra forma, los transformadores deben ser designados para operar a una frecuencia de 60 Hz [15].

### 2.5.3.3 *Potencia nominal en kilo-volt-amperes*

La potencia nominal en kVA de un transformador debe ser aquella que este puede suministrar por un lapso específico de tiempo, a frecuencia y tensión secundaria nominales, sin exceder las limitaciones de alza de temperatura bajo las condiciones prescritas de prueba [15].

Las nominaciones de potencia preferidas para transformadores monofásicos y trifásicos se basan en un alza de temperatura de enrollado promedio por resistencia de 65°C, de acuerdo a [13, Sec. 5.11.1.1], y se listan en la Tabla 8 [13, Table 3].

**Tabla 8. Potencias nominales estandarizadas.**

Transformador Monofásico [kVA]	Transformador Trifásico [kVA]
5	15
10	30
15	45
25	75
37,5	112,5
50	150
75	225
100	300
167	500
250	750
333	1000

Transformador Monofásico [kVA]	Transformador Trifásico [kVA]
500	1500
—	2000
833	2500
1250	3750
1667	5000
2500	7500
3333	10 000
—	12 000
5000	15 000
6667	20 000
8333	25 000
10 000	30 000
12 500	37 500
16 667	50 000
20 000	60 000
25 000	75 000
33 333	100 000

#### 2.5.3.4 Tensiones nominales

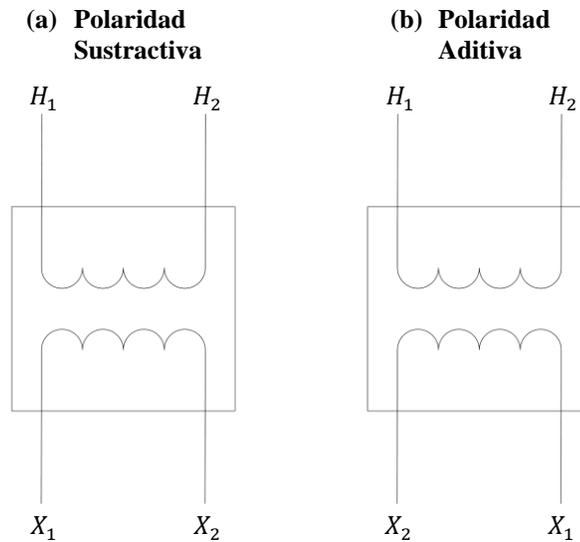
El sistema estándar de tensiones nominales y máximas se incluyen en la norma ANSI C84.1 y se listan en [13, Table 4, Table 5].

Las tensiones nominales deben ser tomadas sin carga y basadas en la razón de transformación.

#### 2.5.3.5 Polaridad, desplazamiento angular y denominación de terminales

Los transformadores monofásicos de 200 kVA o inferiores y con alta tensión nominal de 8660 V o inferior (tensión de enrollado) deben tener polaridad aditiva. Todos los otros transformadores monofásicos deben tener polaridad sustractiva [15] (Fig. 20).

La denominación de terminales debe realizarse de acuerdo al estándar IEEE Std. C57.12.70. [18], donde se indica que para un transformador monofásico de dos enrollados sus bornes de alta tensión deben ser designados por HV o H, y en baja tensión por LV o X (Fig. 20).



**Figura 20. Designación de terminales en transformador monofásico.**

Los terminales externos de cualquier enrollado deben ser numerados (1, 2, 3, etc.) el menor y mayor número marcan el enrollado completo, los números intermedios indican fracciones del enrollado (derivaciones). Todos los números deberán designarse tal que la diferencia de tensión entre un número menor y un número mayor presente el mismo signo en cualquier instante [18].

### **2.5.3.6 Impedancia**

La impedancia debe estar referida a una temperatura igual a la suma del alza promedio de temperatura, más 20°C.

### **2.5.3.7 Pérdidas totales**

Las pérdidas totales de un transformador son la suma de las pérdidas en vacío y las pérdidas de carga.

Las pérdidas de ventiladores de enfriamiento, bombas de aceite, y otros equipamientos no se incluyen en las pérdidas totales. Cuando se especifique, la pérdida de potencia producida por estos equipos debe ser aportada.

La temperatura estándar a la cual se calculan las pérdidas de carga de los transformadores de poder y distribución debe ser de 85°C, mientras que para las pérdidas sin carga deben ser 20°C.

### **2.5.3.8 Condiciones de temperatura y de carga**

El aumento de temperatura promedio de enrollado sobre la temperatura ambiente no debe exceder los 65°C en operación a potencia nominal, cuando es probado de acuerdo a [16]. Asimismo, el alza de temperatura máxima de enrollado sobre la temperatura ambiente no debe exceder 80°C cuando trabaja a potencia nominal. La temperatura máxima de enrollado sobre la temperatura ambiente debe ser determinada siguiendo las siguientes condiciones [15]:

- a) Medición directa durante el test térmico de acuerdo a [16]. Un número suficiente de sensores de lectura directa deben ser empleados en los puntos donde se espera la elevación máxima de temperatura, estos indicados por pruebas previas o por cálculos de transferencia de calor.
- b) Medición directa sobre un transformador exacto duplicado diseñado para el ítem a).
- c) Cálculos de temperaturas sobre cada enrollado activo y para todo conductor. El método de cálculo debe basarse en los principios fundamentales de transferencia de calor y verificados mediante pruebas en la producción del transformador o sobre prototipos de transformadores o enrollados.

La máxima temperatura de enrollado sobre la temperatura del ambiente debe ser incluida en el reporte de pruebas, con otros datos de temperatura. Una nota debe indicar qué método se usó para determinar el valor.

La temperatura del líquido aislante sobre la temperatura ambiente, medida cerca de la parte superior del contenedor del transformador, no debe exceder los 65°C.

Las condiciones en las cuales los límites de temperatura no deben ser sobrepasados se presentan cuando el transformador opera en una conexión tal que produce la temperatura máxima de enrollado sobre la temperatura ambiente y suministra

- a) Potencia nominal de salida y tensión secundaria nominal sin derivaciones (taps).
- b) Potencia nominal de salida y tensión secundaria nominal para una conexión donde se configura la derivación de la potencia nominal respectiva.
- c) A tensión secundaria nominal para una conexión tal que, la potencia saliente corresponda a la corriente de la derivación, cuando la conexión es a una potencia de derivación reducida.
- d) A una combinación específica de potencia de salida y específicos factores de potencia (para cada enrollado), para transformadores de múltiples enrollados.
- e) Potencia nominal de salida a V/Hz nominal.

La operación de un transformador bajo los límites de temperatura permiten un envejecimiento térmico aceptable, considerando para esto una vida útil mínima de 20,5 años (180.000 horas) como resultado de las pruebas del estándar [19]. Al operar a la temperatura máxima de conductor, a plena carga, como se define en esta sección. La esperanza de vida mínima de los aisladores está determinada por la ecuación (89) [15]:

$$LIFE = e^{\left[\frac{15.000}{T+273} - 27.064\right]} \quad (89)$$

Donde *LIFE* es la esperanza de vida en horas; *T* es la temperatura máxima de conductor en °C; y *e* es la base del logaritmo natural.

### 2.5.3.9 Información de placa

El fabricante debe fijar a cada transformador una placa de metal durable. A menos que se especifique lo contrario, debe estar hecha de un material resistente a la corrosión. Se debe presentar los datos nominales y otros adicionales descritos en la Tabla 9 (para transformadores de 500 kVA o inferior y un BIL menor que 150 kV). Las unidades reconocidas son el sistema métrico (SI) y el imperial (U.S.). Las unidades utilizadas deben quedar explícitas en la placa [15].

**Tabla 9. Datos de placa recomendados por el estándar IEEE C57.12.00 [15].**

<b>Español</b>	<b>Inglés</b>
Número serial <sup>a</sup>	Serial number <sup>a</sup>
Mes/año de fabricación	Month/year of manufacture
Clase de enfriamiento (ONAN, ONAF, etc.)	Class (ONAN, ONAF, etc.) <sup>b</sup>
Número de fases	Number of phases
Frecuencia	Frequency
Potencia aparente nominal (kVA) <sup>a</sup>	kVA rating <sup>a, b</sup>
Tensiones nominales <sup>a, b</sup>	Voltage ratings <sup>a, c</sup>
Tensiones de derivaciones	Tap voltages <sup>d</sup>
Alza de temperatura, °C	Temperature rise, °C
Polaridad (transformadores monofásicos)	Polarity (single-phase transformers)
Diagrama fasor (transformadores polifásicos)	Phasor diagram (polyphase transformers)
Impedancia en porcentaje	Percent impedance <sup>e</sup>
Masa (kg) o peso (lb) aproximado <sup>c</sup>	Approximate total mass in kg or weight in lb g
Diagrama de conexión <sup>d</sup>	Connection diagram i
Nombre y ubicación (país) del fabricante	Name and location (country) of manufacturer
Instrucciones de referencia de instalación y operación	Installation and operating instructions reference
La palabra 'Transformador' o 'Autotransformador'	The word transformer or autotransformer
Tipo de líquido aislante (preferencia de nombre genérico) <sup>e</sup>	Type of insulating liquid (generic name preferred) l
Material conductor (de cada enrollado)	Conductor material (of each winding)
Volumen de líquido	Liquid volume
Compatibilidad DOE <sup>f</sup>	DOE compliant m

<sup>a</sup> Las letras y números que escriben los kVA, número de serie, y tensiones nominales deben tener un tamaño mínimo de 4 mm (0,157 in) ya sean grabadas o estampadas. El tamaño de las otras letras y números es opcional.

<sup>b</sup> Las tensiones nominales de un transformador o autotransformador deben designarse separando la tensión de cada enrollado por un guión (-), o bien, presentarse listadas en tablas. Las tensiones nominales de enrollado deben ser escritas como se especifica en la Tabla 10.

<sup>c</sup> El peso puede ser omitido de los datos de placa, para transformadores monofásicos de hasta 37,5 kVA o polifásicos que no sobrepasen los 30 kVA. En este caso, se dispondrán datos suplementarios presentando el volumen requerido de líquido aislante y el peso aproximado del transformador.

<sup>d</sup> Todos los terminales de enrollados deben estar identificados en el diagrama de conexión. Una vista esquemática se debe incluir. Todos los bornes o conexiones deben ser pertinentemente designados para coincidir con su identificación en el esquema. En general, se dispone el lado de baja tensión abajo, mientras el de alta tensión arriba.

De ser utilizados, se debe identificar: transformadores de tensión, dispositivos de potencia, medidores de temperatura de enrollado, etc. Asimismo, cualquier dispositivo no lineal: condensadores, resistencias instalados en los devanados.

<sup>e</sup> La placa debe establecer: “No contiene nivel detectable de PCB (menos que 2 PPM) en el momento de la fabricación”.

<sup>f</sup> La placa de los transformadores que cumplan con 10 CFR parte 431 deben incluir la sentencia “cumplimiento DOE” (“*DOE compliant*”), cuando el transformador ha de ser usado en los Estados Unidos. Los transformadores que deben cumplir este código de regulación federal (CFR) se definen en 10 CFR 431.192.

## 2.5.4 Procedimientos de ensayos a transformadores

En la sección 8 de [15] se presentan las pruebas que se deben realizar en transformadores según su tipo, separando los ensayos en categorías (Tabla 10).

**Tabla 10. Pruebas según tipo de transformador.**

Pruebas	Tests	Transformador de distribución		Transformador de poder Clase I	
		Rutina	Diseño	Rutina	Diseño
<b>Desempeño</b>	<b>Performance</b>				
Medición de resistencia de todos los enrollados para la primera unidad de nuevo diseño	Resistance measurements of all windings of the first unit of a new design	*	*	*	
Prueba de razón de transformación a tensión nominal	Ratio test on the rated voltage connection	*		*	
Pruebas de relación de polaridad y fase a tensión nominal	Polarity and phase relation tests at rated voltage	*		*	
Pérdidas sin carga y corriente de excitación al 100% de la tensión nominal y a frecuencia nominal	No-load losses and excitation current at 100% of the rated voltage and at rated power frequency	*		*	
Pérdidas sin carga y corriente de excitación al 110% de la tensión nominal y a frecuencia nominal	No-load losses and excitation current at 110% of rated voltage and at rated power frequency			*	
Voltaje de impedancia y pérdida de carga a corriente y frecuencia nominales	Impedance voltage and load loss at rated current and rated frequency	*		*	
Aumento de temperatura	Temperature rise				
A mínimo y máximo valor de la primera unidad de un nuevo diseño	At minimum and maximum ratings of the first unit of a new design		*		*
Nivel de sonido audible	Audible sound level		*		*
<b>Dieléctricas</b>	<b>Dielectric</b>				
Prueba de impulso	Lightning impulse	*	*		*
Baja frecuencia	Low frequency	*		*	
<b>Mecánicas</b>	<b>Mechanical</b>				
Equipos de levantamiento y desplazamiento	Lifting and moving devices		*		*
Presión	Pressure		*		*
Fuga	Leak	*		*	

En la Tabla 10 se señalan las pruebas pertinentes a transformadores de distribución y de poder según [15]. La Tabla 10 no indica el orden en que las pruebas deben ser realizadas. La secuencia de pruebas está definida en [16].

Los procedimientos de realización de las pruebas puntuadas en la Tabla 10 se describen en el estándar [16], los cuales se presentan a continuación.

#### **2.5.4.1 Medición de resistencia en frío**

La medición de resistencia es fundamental para: la determinación de las pérdidas por efecto Joule; el cálculo de las temperaturas de enrollado al término de un test de temperatura; controlar el procedimiento de construcción; y como base para la evaluación de posibles daños en el transformador.

La medición de las resistencias en frío debe ser realizada cumpliendo las siguientes condiciones:

- La temperatura del líquido aislante debe ser estable. La temperatura es considerada estable si la temperatura del líquido superior no varía en más de 2°C en un período de 1 hora.
- Los enrollados han estado sumergidos en el líquido aislante sin excitación y sin corriente por un mínimo de 3 horas para un transformador sin bombas y por 1 hora para un transformador con bombas activas antes de la medición de resistencia.
- La temperatura del líquido aislante es estable, y la diferencia entre la temperatura de la parte superior del volumen de líquido y el fondo no excede los 5°C.

Un método preciso para determinar la resistencia en frío es el uso del método de puentes. Para resistencias mayores o iguales a 1  $\Omega$  se utiliza comúnmente un puente de Wheastone (o equivalente); para valores menores que 1  $\Omega$ , se emplea un puente Kelvin (o equivalente) [16].

La temperatura de los enrollados debe ser registrada como el promedio de varios termómetros o termocuplas insertas entre las bobinas, cuidando que sus puntos de medición estén lo más cerca posible de los conductores de los devanados. No se debe asumir que los enrollados se encuentran a la misma temperatura que el aire alrededor.

Las mediciones de resistencia en frío son normalmente referenciadas a una temperatura estándar  $T_s$  igual al aumento de temperatura nominal sobre la temperatura ambiente más 20 °C. Adicionalmente, es necesario convertir los registros de resistencia a la temperatura a la cual se realizó la medición de pérdidas de impedancia (prueba de circuito abierto). La conversión se efectúa mediante la ecuación (90).

$$R_s = R_m \cdot \frac{T_s + T_k}{T_m + T_k} \quad (90)$$

Donde:  $R_s$  es la resistencia a la temperatura deseada  $T_s$  ( $\Omega$ );  $R_m$  es la resistencia medida ( $\Omega$ );  $T_s$  es la temperatura deseada de referencia ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_m$  es la temperatura a la cual se realizó la medición ( $^{\circ}\text{C}$ ); y  $T_k$  es  $234,5$   $^{\circ}\text{C}$  (cobre) o  $225$   $^{\circ}\text{C}$  (aluminio).

#### **2.5.4.2 Prueba de razón de transformación**

La razón de transformación de un transformador es el cociente entre el número de vueltas del enrollado de alta tensión y el número de vueltas del enrollado de baja tensión.

Para un transformador monofásico sin derivaciones la prueba de razón de transformación debe ser realizada a tensión nominal o inferior y a una frecuencia eléctrica igual o superior a la nominal.

##### **a. Método del voltímetro**

Se utiliza dos voltímetros (con transformadores de tensión si es necesario): uno para leer la tensión del enrollado de alta tensión; y el otro, para el enrollado de baja tensión. Ambos multímetros deben leerse simultáneamente.

Se debe tomar un segundo conjunto de mediciones intercambiando los voltímetros, y se calcula el promedio de ambos registros de mediciones para compensar errores de precisión de los instrumentos. Las lecturas de ambos medidores deben ser aproximadamente las mismas, sino se debe utilizar un método apropiado de corrección.

La prueba debe efectuarse con no menos de cuatro tensiones en pasos de aproximadamente un 10%, el promedio resultante debe tomarse como el valor real de la razón de transformación; los varios valores no deben distar en más de un 1% de este promedio. De otra forma, el ensayo debe repetirse con otros voltímetros.

Cuando es necesario probar varios transformadores de razones de transformación equivalentes, el trabajo puede ser más veloz aplicando este método a una única unidad, para luego comparar esta con el resto de los transformadores de acuerdo al método de comparación expuesto en b.

##### **b. Método de comparación**

Un método conveniente de medición de la razón de transformación es por comparación con un transformador de razón conocida.

El transformador a probar es excitado en paralelo con un transformador de igual razón nominal, mientras los dos enrollados secundarios se conectan en paralelo con un voltímetro entre dos terminales de la misma polaridad (Fig. 21). El voltímetro indica la diferencia en la tensión.

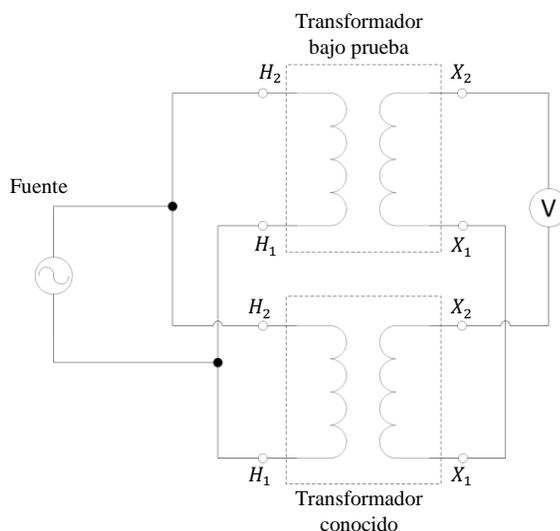


Figura 21. Voltímetro dispuesto para medir diferencia entre tensiones.

### 2.5.4.3 Prueba de polaridad y relación de fase

Las pruebas de polaridad y relación de fase son de interés principalmente por su importancia en la conexión paralelo o de bancos de dos o más transformadores. El ensayo de relación de fase se realiza para determinar el desplazamiento angular y la secuencia relativa de fases.

Uno de los métodos de prueba que es eficaz y sencillo de realizar es el de pulso inducido (*inductive kick*), donde se necesita una fuente de tensión continua y un voltímetro del mismo tipo. Los pasos son los siguientes:

1. Alimentando con corriente continua el enrollado de alta tensión, conectar un voltímetro de corriente directa apropiado en los terminales del bobinado de alta tensión en orden de obtener una pequeña deflexión del puntero.
2. Cambiar los dos puntos de medición del voltímetro a través del transformador directamente a los bornes adyacentes del enrollado de baja tensión. Nota: Por ejemplo, en la Fig. 22b, el cable del voltímetro conectado a  $H_1$  se transfiere a  $X_2$  como borne adyacente, asimismo con  $H_2$  y  $X_1$ .
3. Interrumpir la excitación de corriente directa, luego la tensión inducida en el enrollado de baja tensión (pulso inducido), causará una deflexión en el voltímetro.
4. Cuando la aguja del voltímetro blande hacia la dirección opuesta (negativa), la polaridad es sustractiva.
5. Cuando la aguja del voltímetro se mueve en la misma dirección anterior (positiva), la polaridad es aditiva.

La disposición de los enbobinados de un transformador para polaridad sustractiva y aditiva se muestra en la Fig. 22.

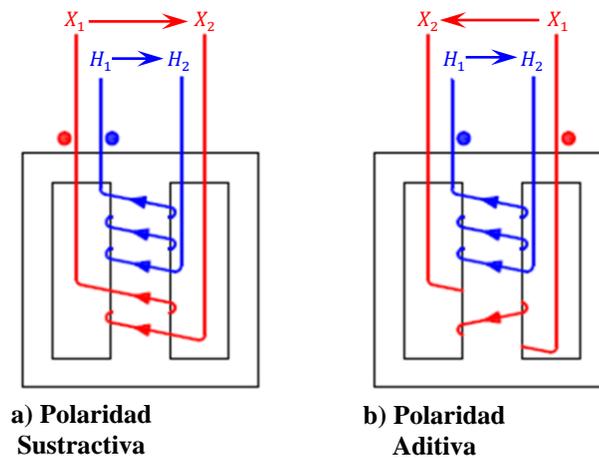


Figura 22. Polaridad según sentido de los enrollados.

Los conductores y marcas de polaridad en el exterior del contenedor del transformador se observan en la Fig. 23.

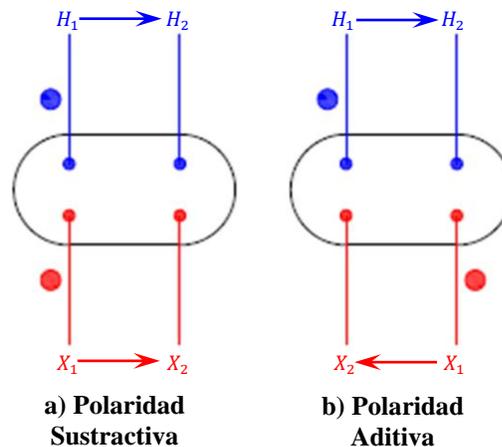


Figura 23. Marcas de polaridad en el contenedor del transformador.

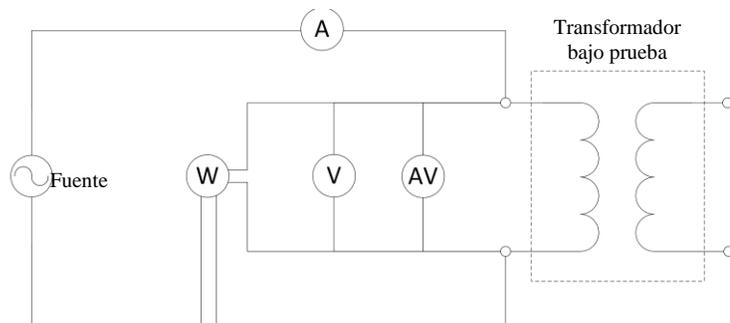
#### 2.5.4.4 Prueba de pérdidas en vacío y corriente de excitación.

Las pérdidas sin carga (*no-load losses*) son incidentes en la excitación del transformador e incluyen las pérdidas: en el núcleo, dieléctricas, en los enrollados debido a la corriente de excitación, y las pérdidas en conductores a causa de corrientes circulantes en enrollados paralelos. Estas pérdidas cambian con temperatura y la tensión de excitación, especialmente frente a diferentes formas de onda.

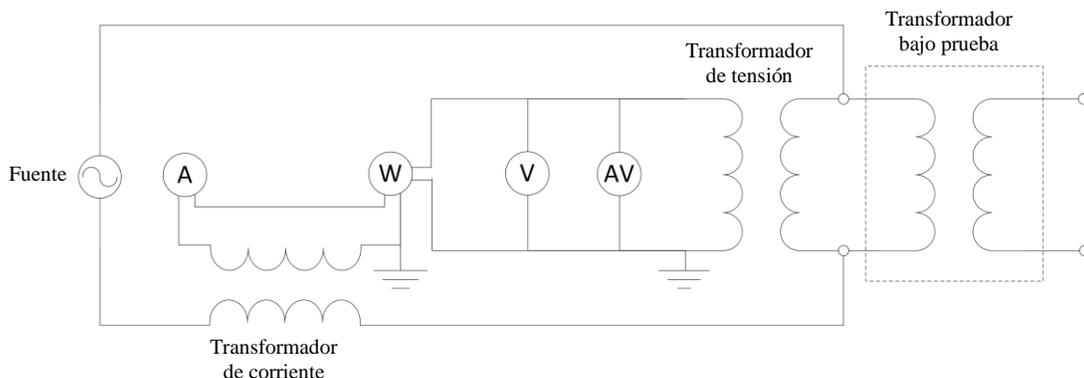
La corriente de excitación (*no-load current*) es aquella que fluye en cualquier enrollado usado para excitar el transformador cuando todos los demás enrollados están en circuito abierto. Es generalmente expresada en porcentaje de la corriente nominal del enrollado en el cual es medida.

El propósito de la prueba de pérdidas en vacío es medir las pérdidas sin carga a tensión de excitación y frecuencia específicas. La determinación de estas pérdidas se debe basar en una tensión sinusoidal, a menos que se puntualice otro tipo de excitación. Se recomienda el método del voltímetro de valor medio (*average-voltage voltmeter method*). Este método emplea dos voltímetros conectados en paralelo: el voltímetro  $V_a$  lee el valor medio de media onda, pero calibrado en el valor RMS; y el otro  $V_r$  es un voltímetro que mide el valor real RMS de la señal. Las lecturas de ambos instrumentos se utilizan para corregir las pérdidas de vacío en base a una señal sinusoidal, mediante la ecuación (91) [16].

Las conexiones e instrumentos necesarios para realizar la prueba se muestran en las Fig. 24 y Fig. 25, esta incluye transformadores de medida. De ser necesario, se debe corregir las pérdidas desconectando el transformador bajo prueba y registrando la lectura de potencia en el vatímetro, este valor representa las pérdidas del circuito de medición y todos sus instrumentos de medida, estas pérdidas deben ser sustraídas de las pérdidas de vacío que entregue la prueba.



**Figura 24. Conexiones para prueba de vacío sin transformadores de medida.**



**Figura 25. Conexiones para prueba de vacío con transformadores de medida.**

Mientras que cualquier enrollado, tanto el de baja como el de alta tensión puede ser energizado, es más conveniente realizar este test alimentando el bobinado de menor tensión nominal. La fuente de tensión debe tener un valor equivalente a la tensión nominal del transformador bajo prueba, ajustado de acuerdo al voltímetro de valor medio. La frecuencia eléctrica debe ser igual al valor nominal o estar dentro del rango de  $\pm 5\%$  de esta.

**a. Corrección de las pérdidas de excitación según forma de onda**

La componente de corrientes de Foucault de las pérdidas en vacío varía con el cuadrado de la tensión RMS de excitación y es independiente de la forma de onda del voltaje. Cuando la prueba se realiza a un valor específico leído en el voltímetro de valor medio, la lectura RMS puede diferir del anterior, luego, las pérdidas de excitación deben ser corregidas con base sinusoidal mediante la ecuación (91):

$$P_C(T_m) = \frac{P_m}{P_1 + k \cdot P_2} \quad k = \left( \frac{E_r}{E_a} \right)^2 \quad (91)$$

Donde:  $T_m$  es la temperatura promedio del aceite al momento de la prueba ( $^{\circ}\text{C}$ );  $P_C(T_m)$  son las pérdidas en vacío, corregidas en orden de una forma de onda sinusoidal, a temperatura  $T_m$ ;  $P_m$  son las pérdidas de vacío medidas a temperatura  $T_m$ ;  $P_1$  son las pérdidas por histéresis (pu);  $P_2$  son las pérdidas por corrientes de Foucault (pu);  $E_r$  es la tensión medida por el voltímetro de valor RMS real; y  $E_a$  es la tensión registrada desde el voltímetro de valor medio.

Los valores en por unidad de las pérdidas de histéresis y por corrientes de Foucault deben ser usados si se encuentran disponibles, sino se sugiere que las dos componentes de pérdidas se asuman iguales a 0.5 [pu].

La ecuación (91) es válida sólo para tensiones de prueba con distorsión moderada. Si la calidad de la forma de onda causa que la magnitud de la corrección sea superior a un 5% la señal de voltaje deberá ser mejorada para una determinación adecuada de las pérdidas de vacío y corrientes.

**b. Corrección de las pérdidas de excitación según temperatura**

Se debe establecer las pérdidas de vacío a una temperatura de referencia  $T_r$ , pues estas varían con la temperatura del núcleo. La temperatura estándar está especificada en [15] y es de  $20^{\circ}\text{C}$  para las pérdidas de excitación.

La fórmula de corrección de temperatura no es precisa para determinar las pérdidas de excitación durante la operación y en un rango amplio de temperaturas. No obstante, variaciones ordinarias de temperatura para la prueba de excitación no afectan significativamente las pérdidas en vacío y, por tanto, no es necesario realizar ninguna corrección siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- La temperatura promedio del aceite está dentro de un rango de  $\pm 10$  °C de la temperatura de referencia  $T_r$ .
- La diferencia entre la temperatura superior e inferior del volumen de aceite no excede los 5 °C.

De no cumplirse las condiciones anteriores, se corrigen las pérdidas de excitación mediante la ecuación (92) (empírica) [16]:

$$P_C(T_r) = P_C(T_m) \cdot \{1 + (T_m - T_r) \cdot K_T\} \quad (92)$$

Donde:  $P_C(T_r)$  son las pérdidas de excitación, corregidas a la temperatura de referencia  $T_r$ ;  $P_C(T_m)$  son las pérdidas de excitación, corregidas en forma de onda a temperatura  $T_m$ ;  $T_r$  es la temperatura estándar de referencia (20 °C); y  $K_T$  es un cociente empírico de variación de las pérdidas en por unidad por grados celsius. Si el valor de  $K_T$  no está disponible, se debe utilizar un valor de 0.00065 [pu/°C] [16].

La temperatura estándar de referencia para las pérdidas de vacío es de 20 °C, de acuerdo a la sección 5.9 de [15].

### ***c. Determinación de la corriente de excitación***

La corriente de excitación es la responsable de mantener el flujo magnético en el núcleo del transformador. Esta corriente se expresa generalmente en por unidad o en porcentaje de la corriente nominal de línea del enrollado en el cual es medida. La observación de la corriente de excitación se realiza simultáneamente a la prueba de pérdidas en vacío, registrándola mediante un amperímetro (Fig. 24).

#### ***2.5.4.5 Prueba de pérdidas de carga y voltaje de impedancia***

Las pérdidas de carga se generan transmisión de una potencia específica por parte de un transformador. Estas pérdidas incluyen el calor disipado  $I^2R$  en los enrollados debido a la corriente de carga y las pérdidas parásitas generadas por las corrientes e Foucault producidas por los flujos de fuga de los enrollados, composición del núcleo, paredes del contenedor y otras partes conductoras. Las pérdidas de carga son medidas montando un cortocircuito entre los bornes del enrollado de alta tensión o el de baja tensión, alimentando con el suficiente voltaje tal que fluya una corriente específica en los bobinados. Las pérdidas del transformador bajo estas condiciones equivalen a las pérdidas de carga del transformador a la temperatura de la prueba para esa corriente específica de carga.

El voltaje de impedancia del transformador es la tensión requerida para circular corriente nominal por uno o dos enrollados mientras el resto están cortocircuitados. El voltaje de impedancia se presenta generalmente en porcentaje o en por unidad de la tensión nominal del enrollado en el cual el voltaje aplicado es medido. La tensión de impedancia es medida durante la

prueba de pérdida de carga, midiendo la tensión reducida de alimentación. La tensión registrada es el voltaje de impedancia, y la potencia disipada son las pérdidas de carga a la temperatura del ensayo y corriente nominal. Estos valores deben ser corregidos a una temperatura de referencia [16].

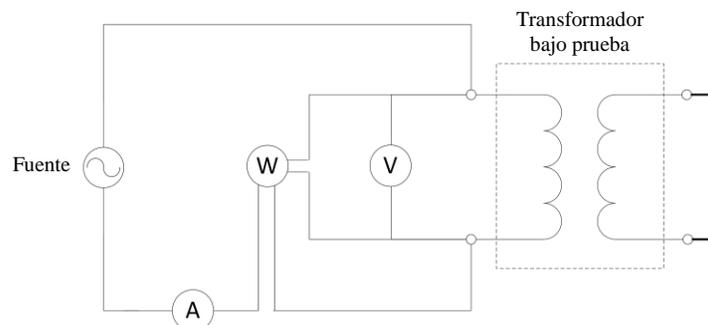
**a. Ensayos para medir las pérdidas de carga y la tensión de impedancia**

Independientemente del método seleccionado, se debe cumplir las siguientes condiciones para garantizar una adecuada medición de las pérdidas de carga y la tensión de impedancia:

- Para determinar la temperatura de los enrollados rigurosamente, se debe cumplir las siguientes condiciones:
  - i. La temperatura del líquido aislante es estable, y la diferencia entre la temperatura en la parte superior e inferior del aceite no excede los 5° C.
  - ii. La temperatura de los enrollados debe tomarse inmediatamente antes y después de la prueba de forma similar a 1.1.3.1. El promedio se considera la temperatura real.
  - iii. La diferencia entre la temperatura del enrollado antes y después de la prueba no excede los 5° C.
- El conductor usado para cortocircuitar el enrollado de baja tensión y alta corriente debe tener un área transversal igual o superior a la del conductor correspondiente al enrollado.
- La frecuencia eléctrica de la fuente debe estar en un rango de  $\pm 0.5\%$  del valor nominal.
- El valor máximo de corrección de las pérdidas de carga debido a error de medición de ángulo de desfase está limitado en  $\pm 5\%$  de las pérdidas medidas.

**b. Método del vatímetro – voltímetro – amperímetro**

Las conexiones necesarias para determinar las pérdidas de carga y el voltaje de impedancia de un transformador monofásico se muestran en la Fig. 26. Esta se aplica cuando no se necesitan transformadores de medida, de ser necesarios se debe usar la configuración descrita en la sección 9.3.1 de [16].



**Figura 26. Conexiones prueba de pérdidas de carga y voltaje de impedancia.**

**c. Corrección de las pérdidas de carga debido a errores en medición de ángulo de desfase**

Los errores en la medición de las pérdidas de carga se relacionan con razones de transformación imprecisas de los transformadores de medida o con la calibración de los instrumentos. Se debe realizar una corrección de las pérdidas debido a imprecisiones en el ángulo de desfase; en el circuito de medición de tensión; y en el circuito de medición de corriente. La corrección se realiza de acuerdo a la Tabla 11 y la ecuación (93).

$$P_C = P_m - V_m A_m \cdot (-\varphi W_d - \varphi V_d + \varphi C_d) \quad (93)$$

Donde:  $P_C$  es la potencia medida por el vatímetro, corregida por errores en ángulo de desfase (W);  $P_m$  es la medición de potencia (W);  $V_m$  es la lectura del voltímetro (V);  $A_m$  es la lectura del amperímetro (A);  $\varphi W_d$  es el error del vatímetro respecto de su medición de ángulo de desfase, cuando sea aplicable (rad);  $\varphi V_d$  es el error del transformador de tensión respecto del ángulo de desfase; y  $\varphi C_d$  es el error del transformador de corriente respecto del ángulo de desfase.

**Tabla 11. Requerimientos para corrección de ángulo de desfase.**

Factor de potencia aparente de las pérdidas de carga (PF=Pm/VmA <sub>m</sub> )	Comentarios
$PF \leq 0.03$	Aplica corrección de ángulo de desfase
$0.03 < PF \leq 0.10$	Aplica corrección de ángulo de desfase si $ \varphi W_d - \varphi V_d + \varphi C_d  > 290 \mu rad$ (1 min)
$PF > 0.10$	Aplica corrección de ángulo de desfase si $ \varphi W_d - \varphi V_d + \varphi C_d  > 870 \mu rad$ (3 min)

La ecuación (93) es válida mientras el factor de potencia sea inferior a 0.20 y el error de ángulo de desfase total del sistema sea menor a 20 minutos, en caso contrario se debe recurrir a las correcciones descritas en la sección 9.4.1. de [16].

**d. Corrección de las pérdidas de carga en función de la temperatura**

Las pérdidas  $I^2R$  y las parásitas varían con la temperatura. Las pérdidas en los conductores  $P_r(T_m)$  de un transformador son calculadas desde las mediciones de resistencia (referenciadas a la temperatura  $T_m$  correspondiente a la medición de pérdidas de carga y de voltaje de impedancia) y la corriente registrada en la medición de impedancia. Las pérdidas de carga  $P(T_m)$  menos las pérdidas  $I^2R$  equivalen a las pérdidas parásitas  $P_s(T_m)$  del transformador (94).

$$P_s(T_m) = P(T_m) - P_r(T_m) \quad (94)$$

Donde:  $P_s(T_m)$  son las pérdidas parásitas calculadas (W);  $P(T_m)$  son las pérdidas de carga corregidas de acuerdo a 1.1.3.5.c. por errores en el ángulo de desfase (W);  $P_r(T_m)$  son las pérdidas  $I^2R$ ; y  $T_m$  es la temperatura a la cual se realiza la medición (°C).

La componente  $I^2R$  de las pérdidas de carga aumenta frente a incrementos de temperatura. En cambio, las pérdidas parásitas disminuyen conforme aumenta la temperatura. Las ecuaciones

(95–96) permiten convertir ambas componentes a una temperatura de referencia  $T$  desde la temperatura de medición  $T_m$ :

$$P_r(T) = P_r(T_m) \cdot \left( \frac{T_k + T}{T_k + T_m} \right) \quad (95)$$

$$P_s(T) = P_s(T_m) \cdot \left( \frac{T_k + T_m}{T_k + T} \right) \quad (96)$$

Y luego, como se muestra en la ecuación (97):

$$P(T) = P_r(T) + P_s(T) \quad (97)$$

Donde:  $P(T)$  son las pérdidas de carga corregidas a la temperatura  $T$  (W);  $P_s(T)$  son las pérdidas parásitas a temperatura  $T$  (W);  $P_r(T)$  son las pérdidas  $I^2R$  a temperatura  $T$ ; y  $T_k$  es 234.5 °C (cobre) o 225 °C (aluminio). Nota: La temperatura 225 °C aplica para conductores de aluminio puro (EC). La constante  $T_k$  puede valer hasta 230 °C para aleaciones de aluminio. Cuando enrollados de cobre y aluminio coexisten en un mismo transformador, un valor de  $T_k$  igual a 229 °C debe utilizarse para calcular las pérdidas parásitas.

La temperatura estándar de referencia para las pérdidas de carga es de 85 °C, de acuerdo a la sección 5.9 de [15].

#### e. Voltaje de impedancia

El voltaje de impedancia y sus componentes resistiva y reactiva se calculan utilizando las ecuaciones (98-99).

$$E_r(T_m) = \frac{P(T_m)}{I} \quad E_x = \sqrt{E_z(T_m)^2 - E_r(T_m)^2} \quad E_r(T) = \frac{P(T)}{I} \quad (98)$$

$$E_z(T) = \sqrt{E_r(T)^2 + E_x^2} \quad (99)$$

Donde:  $E_r(T_m)$  es la caída de tensión de resistencia a temperatura  $T_m$  (V);  $E_r(T)$  es la caída de tensión resistiva corregida a la temperatura  $T$  (V);  $E_x$  es la caída de tensión de reactancia (V);  $E_z(T_m)$  es la tensión de impedancia a temperatura  $T_m$  (V);  $E_z(T)$  es la tensión de impedancia a temperatura  $T$  (V);  $P(T)$  son las pérdidas de carga corregidas a temperatura  $T$  (W);  $P(T_m)$  son las pérdidas de carga a la temperatura de medición (W); e  $I$  es la corriente del enrollado excitado (A).

#### 2.5.4.6 Pruebas de calentamiento

Una prueba de calentamiento (*temperatura-rise test*) se define como un ensayo para determinar el alza de temperatura del transformador sobre la temperatura ambiente, en uno o más de sus enrollados, medida en los terminales. El resultado para un par dado de terminales es el

‘valor promedio’ de la temperatura del circuito completo: no es la temperatura en ningún punto específico de un enrollado en particular. El término ‘alza de temperatura promedio’ se refiere al valor determinado por mediciones realizadas en un par dado de terminales; no se refiere al promedio aritmético de resultados determinados de diferentes pares de terminales del transformador.

Tanto [15] como [16] establecen condiciones para la aplicación de los límites de temperatura. Todas las pruebas de temperatura deben realizarse bajo condiciones normales (o equivalentes) de enfriamiento. Se resumen las condiciones a continuación para un transformador monofásico sin derivaciones:

- i. En caso de enfriamiento por aire, la temperatura del aire (ambiente) no debe exceder los 40 °C, y la temperatura promedio en un periodo de 24 horas debe ser inferior a 30 °C.
- ii. La temperatura en la zona superior del líquido aislante (en operación) debe ser superior a -20 °C.
- iii. Potencia de salida a tensión secundaria nominal.
- iv. Potencia nominal de salida a razón V/Hz nominal.
- v. Las pruebas de calentamiento se deben realizar en transformadores completamente ensamblados y llenos del apropiado nivel de líquido.
- vi. Las pruebas se efectúan en una sala tan libre de corrientes de aire como sea posible.
- vii. Cuando no sea posible o práctico probar el transformador completamente ensamblado, se debe realizar el ensayo con los componentes necesarios para garantizar condiciones normales de enfriamiento durante la prueba.

#### ***a. Método de la carga real***

El método de la carga real (*actual loading method*) es el más preciso, pero los requerimientos de energía son excesivos para transformadores grandes. Los transformadores con potencias de salida pequeñas pueden ser probados con cargas resistivas: reóstatos, banco de ampolletas, caja de agua, etc.

#### ***b. Método de carga simulada por cortocircuito***

El método de cortocircuito se realiza siguiendo los siguientes pasos:

- i. Luego de realizar la prueba de pérdidas de carga de acuerdo a la subsección 2.5.4.5, las pérdidas obtenidas en este ensayo deben referirse a una temperatura igual al alza de

temperatura promedio de enrollado nominal más 20 °C. Las pérdidas totales necesarias para esta prueba deben ser la suma de las pérdidas de carga más las pérdidas de vacío medidas de acuerdo a la subsección 2.5.4.4.

- ii. Para obtener las pérdidas totales, se cortocircuita en uno o más enrollados y se circula suficiente corriente, a frecuencia nominal, para producir las pérdidas totales requeridas según el paso i.
- iii. Determinar la el alza de temperatura del líquido como se describe en f.
- iv. Mantener la circulación de corriente nominal u otra requerida constante por 1 hora. Medir la temperatura de los líquidos, apagar inmediatamente la fuente de corriente, y medir las resistencias calientes según d.
- v. Repetir el flujo de corriente (paso iv) para mediciones de resistencias calientes en terminales adicionales si es necesario para cumplir con el criterio de tiempo de d.
- vi. Determinar el alza de temperatura promedio del enrollado de acuerdo a g.

#### ***c. Medición de resistencias en frío***

Las mediciones de resistencia en frío deben realizarse de acuerdo a 1.1.3.1. Se debe utilizar el mismo equipamiento tanto para medir las resistencias en frío como las resistencias calientes. Normalmente, la medición de resistencia en frío se realiza antes de conectar carga al transformador para la prueba de calentamiento. No obstante, realizada la prueba de calentamiento, se permite dejar enfriar el transformador a temperatura ambiente y luego realizar las mediciones de resistencia en frío (se debe cumplir las condiciones de 1.1.3.1).

#### ***d. Medición de resistencias calientes***

Cuando el transformador es desenergizado las mediciones de resistencia en caliente deben realizarse tan rápido como sea posible, permitiendo suficiente tiempo para que los efectos inductivos desaparezcan. Para minimizar estos efectos se recomienda usar la misma polaridad relativa al trasladar los conductores del instrumento de medición de un par de terminales a otro.

- i. El tiempo en el instante del apagado debe ser registrado para cada medida de resistencia.
- ii. Se debe realizar al menos una medición de resistencia en todos los pares de terminales antes de cumplir 4 minutos luego del apagado.
- iii. Se debe realizar al menos cuatro mediciones de resistencia en un par de terminales correspondientes a una fase de un enrollado.
- iv. Las mediciones de resistencias y tiempos deben ser tomados de acuerdo al ítem iii. en todos los enrollados.

- v. Los datos de resistencia-tiempo recopilados en el ítem iii. Deben ser corregidos al instante de apagado usando una curva de enfriado resistencia-tiempo determinada graficando los datos en un papel milimetrado o utilizando un programa de ajuste de curvas.
- vi. Los datos de resistencia-tiempo obtenidos en una fase de un enrollado deben ser utilizados para determinar la corrección al instante de apagado de las otras fases del mismo enrollado, teniendo la primera medición de cada una de las otras fases tomadas antes de 4 minutos luego del apagado.

***e. Mediciones de temperatura.***

Para transformadores refrigerados por aire, la temperatura ambiente debe ser tomada como la temperatura del aire circundante, debe ser superior a 10 °C e inferior a 40 °C. Para temperaturas dentro de este rango no se necesita ningún tipo de corrección.

La temperatura del aire circundante se determina por al menos 3 termocuplas o termómetros en contenedores uniformemente distribuidos alrededor del transformador. Deben ser ubicados a media altura del transformador y a 1 m o 2 m de distancia. Deben ser protegidos de corrientes e irradiaciones de calor del transformador u otras fuentes.

Cuando la constante térmica de tiempo del líquido del transformador  $\tau_{TO,R}$  (100–101) es de 2 horas o inferior, la constante de tiempo de los contenedores  $\tau_c$  debe estar en un rango de  $[0.5 \cdot \tau_{TO,R}; 1.5 \cdot \tau_{TO,R}]$ . Si la constante  $\tau_{TO,R}$  es superior a 2 horas, entonces  $\tau_c$  debe estar en un rango de  $[\tau_{TO,R} - 1h; \tau_{TO,R} + 1h]$ .

$$C = 0.1323 \cdot (W_{Tr} + W_{Ta}) + 0.5099 \cdot V_{Oil} \quad (100)$$

$$\tau_{TO,R} = \frac{C \cdot \Delta\theta_{TO,R}}{P_{T,R}} \quad (101)$$

Donde:  $C$  es la capacitancia térmica del transformador (Wh/°C);  $W_{Tr}$  es el peso del núcleo del transformador y los enrollados ensamblados (kg);  $W_{Ta}$  es el peso del tanque contenedor del transformador (kg);  $V_{Oil}$  es el volumen de aceite (litros);  $P_{T,R}$  son las pérdidas totales a corriente nominal (W);  $\Delta\theta_{TO,R}$  es el alza de temperatura sobre la temperatura ambiente del aceite superior a carga nominal (°C); y  $\tau_{TO,R}$  es la constante de tiempo para carga nominal con temperatura inicial de aceite superior de 0 °C (h).

La constante de tiempo  $C_c$  de un contenedor se considera como el tiempo necesario para que su temperatura cambie en 6,3 °C cuando la temperatura ambiente es cambiada abruptamente en 10 °C.

#### ***f. Determinación de alza de temperatura del líquido aislante***

El alza de temperatura es la diferencia entre la temperatura del líquido y la temperatura ambiente. La última alza de temperatura sobre la del ambiente  $\Delta\theta_w^{Max}$  debe ser establecida cuando la temperatura superior del aceite no varía en más de un 2.5% o 1 °C, cual sea más grande, durante un periodo de 3 horas.

Es permisible apresurar el tiempo requerido para la prueba utilizando sobrecargas iniciales, formas de enfriamiento restringido, etc.

La temperatura superior del aceite debe ser leída por una termocupla o un termómetro apropiado inmerso aproximadamente 50 mm por debajo de la superficie del líquido.

Para un transformador sin radiadores ni intercambiadores de calor, la temperatura del fondo del líquido debe ser registrada por medio de una termocupla unida a una varilla aislada y localizada dentro del tanque del transformador, de forma que la termocupla esté en la trayectoria del flujo de líquido al fondo del transformador. Peligro: realizar este método con precaución, este puede ser peligroso para enrollados de alta tensión.

La temperatura promedio del líquido es equivalente a la temperatura del líquido superior menos la mitad de la temperatura del líquido en movimiento al fondo de los sistemas de enfriamiento.

#### ***g. Determinación de la temperatura promedio de enrollado***

La temperatura promedio de enrollado corresponde a aquella que se determina desde las mediciones de resistencia caliente tras el apagado, mediante la ecuación (102):

$$\theta_w = \frac{R_h}{R_c} \cdot (\theta_k + \theta_{rc}) - \theta_k \quad (102)$$

El aumento de temperatura promedio de un par de terminales se calcula con la ecuación (103):

$$\Delta\theta_w = \Delta\theta_l + \theta_w - \theta_l \quad (103)$$

Donde:

- $\Delta\theta_w$  es el alza de temperatura promedio del enrollado (°C).
- $\Delta\theta_l = \theta_{l,TL} - \theta_a$  es el alza de temperatura promedio del líquido determinada desde la prueba de calentamiento (°C).
- $\theta_w$  es la temperatura promedio del enrollado correspondiente a la resistencia  $R_h$  (°C).

- $\theta_{l,TL}$  es la temperatura promedio del líquido al final de la prueba de calentamiento (°C).
- $\theta_l$  es la temperatura promedio del líquido al momento del apagado (°C).
- $\theta_a$  es la temperatura ambiente (°C).
- $\theta_{rc}$  es la temperatura de la medición de resistencia en frío  $R_c$  (°C).
- $R_c$  es la resistencia medida en frío ( $\Omega$ ).
- $R_h$  es la medición de resistencia caliente ( $\Omega$ ).
- $\theta_k$  es 234.5 °C para el cobre y de 225 °C para el aluminio (puede ser mayor, hasta de 230 °C para aleaciones de aluminio).

La alza promedio de los enrollados puede ser calculada usando tanto la alza de temperatura del líquido superior o el alza promedio del líquido. Cuando se inyecta una corriente diferente a la nominal, se debe utilizar el alza promedio del líquido.

- i. En el método de alza del líquido superior, el alza de temperatura promedio del enrollado es igual al alza del líquido superior, medida durante la prueba de calentamiento, más la cantidad: temperatura promedio del enrollado al instante del apagado menos la temperatura del líquido superior al momento del apagado.
- ii. En el método del alza promedio del líquido, le temperatura promedio del enrollado es el alza promedio del líquido, medida durante la prueba de calentamiento, más la cantidad: temperatura promedio del enrollado al momento del apagado menos la temperatura promedio del líquido al instante del apagado.

El alza de temperatura promedio de enrollado debe ser corregida para los valores reales de corrientes, pérdidas en la prueba, y altitud según 11.4. La temperatura final corregida debe ser reportada para cada enrollado.

#### ***h. Correcciones de las temperaturas por diferencias de corriente***

Frente a limitaciones de los equipos de medida, es permisible sostener una corriente inferior al valor nominal, pero no menor a un 85% de la corriente de placa del enrollado. Dado este caso, las diferencias observadas entre la temperatura promedio del enrollado al instante del apagado y la temperatura promedio del líquido al mismo momento se corrigen para obtener el alza de temperatura promedio de los enrollados a corriente nominal usando la ecuación (104):

$$\Delta\theta_{w,c} = \Delta\theta_{w,o} \left( \frac{I_{nom}}{I_{test}} \right)^{2m} \quad (104)$$

Donde:

- $\Delta\theta_{w,c}$  es la diferencia corregida de temperatura promedio de enrollado en el apagado y la temperatura promedio del líquido en el mismo instante (°C).
- $\Delta\theta_{w,o}$  es la diferencia observada de temperatura promedio de enrollado en el apagado y la temperatura promedio del líquido en el mismo instante (°C).
- $m$  es 0.8 para las clases ONAN, ONAF, OFAF, y OFWF; es 1.0 para clases ODAF y ODWF.

El alza promedio de temperatura de enrollado corregida es el alza promedio del líquido más  $\Delta\theta_{w,c}$ .

#### *i. Correcciones de la temperatura por diferencias de potencia*

Este método de corrección, ecuación (105), puede ser usado cuando la carga difiere en un 20% de la carga total requerida.

$$\Delta\theta_{l,c} = \Delta\theta_{l,o} \left[ \left( \frac{P_r}{P_T} \right)^n - 1 \right] \quad (105)$$

Donde:

- $\Delta\theta_{l,c}$  es el alza corregida de temperatura del líquido (°C).
- $\Delta\theta_{l,o}$  es el alza observada de temperatura del líquido (°C).
- $P_r$  son las pérdidas totales requeridas (W).
- $P_T$  son las pérdidas totales durante la prueba (W).
- $n$  es 0.8 para clase ONAN; 0.9 para ONAF, OFAF y OFWF; t 1.0 para ODAF y ODWF.

El alza corregida de temperatura de líquido es equivalente al alza de temperatura observada del líquido más  $\Delta\theta_{l,c}$ .

El alza de temperatura promedio de enrollado es equivalente al alza observada de temperatura promedio de enrollado más  $\Delta\theta_{l,c}$ .

### **2.5.5 Resultados y cálculos**

Obtenidos los resultados de las pruebas, es necesario realizar cálculos que permitan comparar correctamente los valores conseguidos con los requeridos por la norma. Además, se debe calcular la eficiencia y la regulación de tensión del equipo estudiado.

### 2.5.5.1 Temperaturas de referencia

La temperatura de referencia para la determinación de las pérdidas de carga  $T_r^L$ , la regulación de tensión y la eficiencia debe ser equivalente a la suma del alza promedio de temperatura de enrollado más 20 °C [16]. Por otra parte, la temperatura estándar de referencia para las pérdidas de vacío  $T_r^{NL}$  es de 20 °C, de acuerdo a la sección 5.9 de [15].

El alza promedio de temperatura de enrollado sobre la temperatura ambiente  $\Delta\theta_w$  no debe exceder los 65 °C [15] a potencia nominal cuando es probado de acuerdo a [16].

En resumen:

$$\begin{aligned} T_r^{NL} &= 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ T_r^L &= \Delta\theta_w^{Max} + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ \Delta\theta_w^{Max} &\leq 65 \text{ [}^\circ\text{C]} \end{aligned} \quad (106)$$

### 2.5.5.2 Pérdidas totales

Las pérdidas totales corresponden a la suma de las pérdidas de carga (*load losses*) y las pérdidas de vacío (*no-load losses*).

### 2.5.5.3 Eficiencia

La eficiencia de un transformador es la razón entre su potencia útil de salida y su potencia activa total de entrada como se muestra en la ecuación (107):

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_i - P_L}{P_i} = 1 - \frac{P_L}{P_i} = 1 - \frac{P_L}{P_o + P_L} \quad (107)$$

Donde:

- $\eta$  es la eficiencia
- $P_o$  es la potencia activa de salida
- $P_i$  es la potencia activa de entrada
- $P_L$  son las pérdidas.

### 2.5.5.4 Regulación de tensión

La regulación de tensión de un transformador a tensión constante (*voltage regulation of a constant voltage transformer*) está definida en [17] como el cambio en la tensión de salida (secundaria) que ocurre cuando la carga (a factor de potencia específico) es reducida de su valor nominal a cero, manteniendo la tensión constante en el primario. La regulación de tensión debe

expresarse en porcentaje (o en por unidad), con la tensión secundaria nominal a plena carga como base [16].

Las pérdidas de carga y el voltaje de impedancia usados para calcular la regulación de tensión determinados según 1.1.3.5. La fórmula exacta para calcular la regulación de tensión se muestra en las ecuaciones (108–109):

a) Cuando la carga está en retraso:

$$reg = \sqrt{(R + F_p)^2 + (X + q)^2} - 1 \quad (108)$$

b) Cuando la carga está en adelanto:

$$reg = \sqrt{(R + F_p)^2 + (X - q)^2} - 1 \quad (109)$$

Donde:

- $F_p$  es el factor de potencia.
- $q$  es  $\sqrt{1 - F_p^2}$ .
- $R$  es el factor resistivo del transformador en por unidad equivalente a las pérdidas de carga en kW divididas por la potencia aparente nominal en kVA.
- $X$  es la reactancia del transformador en por unidad equivalente a  $\sqrt{Z^2 - R^2}$ .
- $Z$  es la impedancia del transformador en por unidad igual a la impedancia en kVA dividida por la potencia aparente nominal en kVA.

## 2.5.6 Normativa chilena

La normativa chilena incorpora varios requerimientos y recomendaciones expuestas en los estándares internacionales revisados anteriormente. No obstante, se establece sólo para los niveles convencionales de tensión de transformadores de distribución en Chile.

La norma NSEG 16.E.n.78 [20] de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles constituye especificaciones de transformadores de distribución de 13,2kV. Se define las características siguientes:

- Potencia nominal transformadores monofásicos: 3 – 5 – 10 – 15 kVA
- Potencia nominal transformadores trifásicos: 15 – 30 – 45 – 75 – 150 – 300 kVA
- Frecuencia nominal: 50 Hz
- Tensiones nominales transformadores monofásicos: primario 13,2 ó 7,62 kV; secundario 231 V.
- Tensiones nominales transformadores trifásicos: primario 13,2 kV entre fases; secundario 400 V entre fases y 231 fase a neutro.

Con respecto a la elevación de temperatura, se impone los siguientes límites:

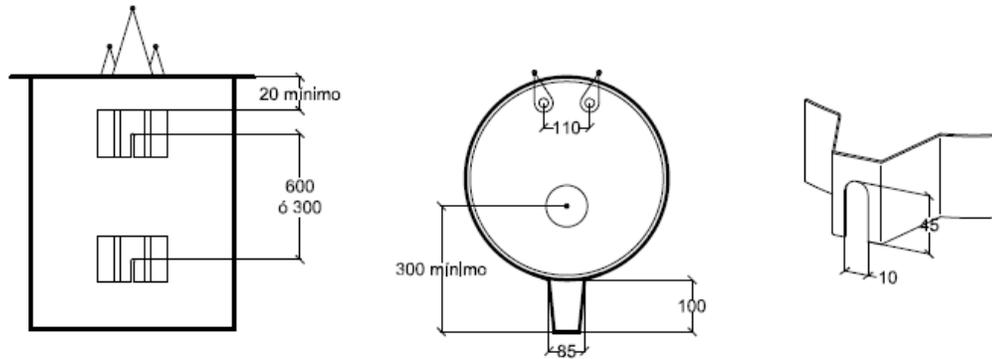
- Aumento de temperatura de cada enrollado medido por resistencia: 65°C
- Aumento de temperatura del punto más caliente: 80°C

La aceptación del grupo de transformadores contemplados en esta normativa está condicionada al resultado satisfactorio de las pruebas expuestas en la Tabla 2 de [20]. En la Tabla 12 se resumen algunas limitantes importantes.

**Tabla 12. Márgenes satisfactorios de pruebas según NSEG16.78 de SEC.**

Característica	Monofásicos 7620V			
	3 kVA	5 kVA	10 kVA	15 kVA
Pérdidas totales a 75°C [W]	140	180	300	400
Corriente máxima de excitación [%IN]	6,5	6,5	6	5,5
Impedancia a 15°C [%]	4	4	4	4
Resistencia de aislación a 20°C [ $\Omega$ ]	Entre enrollado secundario y masa 2500			
	Entre enrollado primario y masa 5000			
	Entre enrollado primario y secundario 5000			
Aumento de temperatura de cada enrollado medido por resistencia [°C]	65	65	65	65
Aumento de temperatura en punto más caliente [°C]	85	85	85	85

Respecto del estanque, se designa un contenedor cilíndrico hermético con tapa soldada o apernada. El material debe ser de planchas de acero de soldabilidad garantizada, según normas Inditecnor 31-117 ch y 31-120. Se definen las dimensiones del estaque expuestas en la Fig. 27:



**Figura 27. Dimensiones del estanque según NSEG16.78 de SEC.**

# Capítulo 3

## Implementación y resultados

### 3.1 Construcción de prototipos

Para el trabajo de investigación se construyen 6 Microformers, las modificaciones realizadas a los transformadores de microondas y la construcción de los prototipos se desarrolla a continuación.

#### 3.1.1 Caracterización de los transformadores de microondas

Inicialmente, se reúne un total de 12 transformadores de microondas. Se miden las dimensiones de los núcleos presentadas en la Tabla 13, se acuerdo a la designación de longitudes de la Fig. 28.

Tabla 13. Dimensiones de transformadores.

Transformador	C [mm]	B [mm]	A [mm]
T1	90,2	74,2	75,1
T2	96,1	69,1	80,0
T3	96,3	70,0	80,2
T4	96,2	70,5	80,3
T5	105,7	60,8	88,0
T6	105,4	61,6	87,9
T7	105,4	62,7	87,9
T8	105,3	63,2	87,5
T9	105,4	63,8	87,9
T10	105,4	64,8	87,6
T11	105,4	67,4	87,5
T12	105,5	68,2	87,7
Promedio	<b>105,4</b>	<b>64,1</b>	<b>87,7</b>
Desv. Estándar	<b>0,106</b>	<b>2,605</b>	<b>0,217</b>

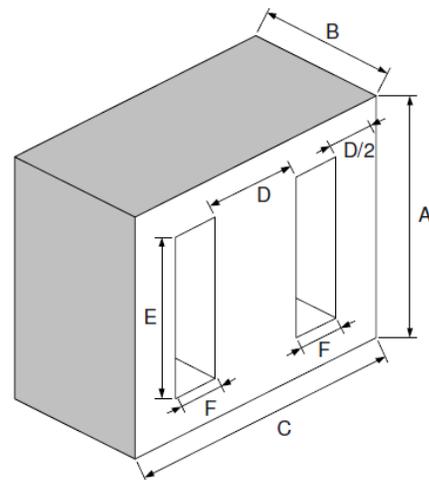


Figura 28. Dimensiones del núcleo.

Según las similitudes de tamaño, se dividen los transformadores en tres grupos, destacados en los colores de la Tabla 13. El promedio y la desviación estándar de la Tabla 13 corresponden

al último grupo. De este último conjunto se seleccionan 6 transformadores (Figs. 29 – 34) para construir los Microformers.



Figura 30. Transformador T6



Figura 29. Transformador T7



Figura 31. Transformador T8

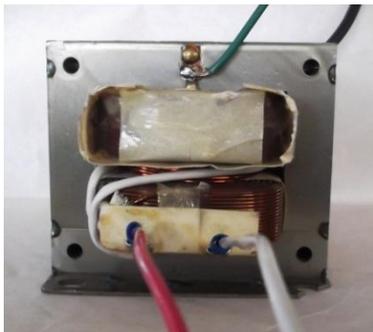


Figura 33. Transformador T9



Figura 34. Transformador T10

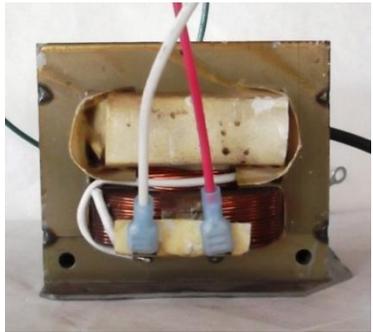


Figura 32. Transformador T11

La mayoría de los transformadores fueron adquiridos sin su horno microondas, debido a esto se desconocen algunos datos nominales importantes. Lo anterior, debido a que la potencia nominal está inscrita en la carcasa del microondas y no en la etiqueta pegada al núcleo del transformador, en la que se exhiben sólo el voltaje y la frecuencia eléctrica nominales. En la Tabla 14 se muestran los datos de fabricación conocidos para cada equipo.

**Tabla 14. Datos nominales de los transformadores.**

Transformador	Potencia [W]	Tensión [V]	Frecuencia [Hz]	Clase
T6	-	230	50	200
T7	1350	230	50	220
T8	-	230	50	200
T9	-	230	50	200
T10	1150	230	50	H
T11	-	220	50	200

La clase (Tabla 14), se refiere a la temperatura que soporta la aislación que es para casi todos 200°C (Clase 200 y H), excepto para el transformador T7, 220°C (clase 220).

## 3.1.2 Modificación de los MOT

De acuerdo al manual de construcción [21] se debe extraer las barras magnéticas y añadir espiras al enrollado primario a cada transformador. Estas modificaciones son necesarias pues permiten mejorar la respuesta electromagnética del MOT, como se muestra en la sección 2.2.

### 3.1.2.1 Extracción de las barras magnéticas

Las barras magnéticas del transformador de microondas se retiran con ayuda de una pieza apropiada para golpearlas y poco a poco lograr extraerlas a través de las ventanas del núcleo. Esto modifica el circuito magnético del equipo, disminuyendo los flujos de fuga y, por tanto, las reactancias que los modelan. Los parámetros del circuito equivalente antes y después de la variación del núcleo magnético se obtienen y muestran en la sección 3.3.

### 3.1.2.2 Adición de espiras al enrollado primario

La corriente de excitación de los transformadores de microondas es alta, alrededor de un 50% de la corriente nominal (ver Tabla 21, subsección 3.3.5), por tanto su eficiencia es muy reducida. La adición de espiras al enrollado primario tiene por objetivo reducir la densidad de flujo magnético del transformador (1) y también la corriente de excitación. Un objetivo secundario es el de igualar las razones de transformación, las cuales difieren entre los equipos reciclados, con el objeto de realizar interconexiones entre Microformers que tengan las mismas tensiones de primario y secundario. Esto último cobra valor cuando es necesario transmitir una potencia superior a la capacidad de una sola unidad.

En [21] se recomienda un rango de vueltas adicionales al enrollado primario. Sin embargo estos valores se relacionan con transformadores de microondas norteamericanos de razón 110V/~2000V que difieren de los chilenos de tensión primaria 220V. No obstante, tanto los dispositivos de 110V como los de 220V, presentan altas corrientes de excitación, las cuales se reducen añadiendo espiras al enrollado primario.

A continuación se desarrolla el cálculo del número de espiras añadidas a los enrollados primarios de los transformadores en estudio.

#### a. Ecuación de espiras adicionales

Se cuenta con un grupo de transformadores similares, como se muestra en la Fig. 35, pero con razones de transformación  $a_i$  diferentes. La tensión de alimentación  $V_1$  es única, pero inducirá una tensión en el secundario  $V_2^i$  particular para cada transformador.

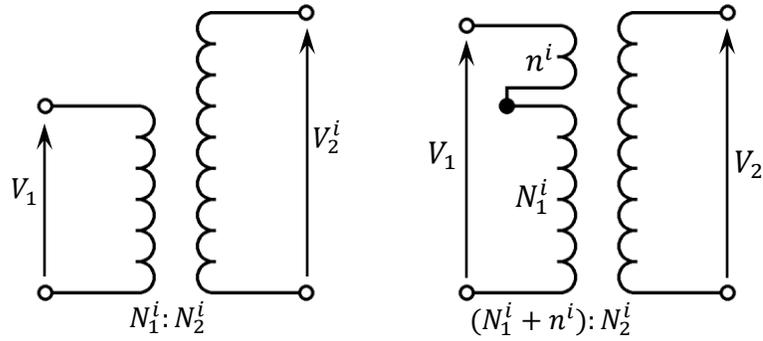


Figura 35. Adición de espiras a enrollado primario.

Añadiendo  $n^i$  espiras adicionales a las  $N_1^i$  vueltas del enrollado primario, como se muestra en la Fig. 2, se busca obtener una tensión secundaria  $V_2$  común para todos los transformadores, a fin de poder hacer interconexiones entre ellos. Notar que la razón de transformación resultante  $a$  también será única.

Para determinar el número de espiras  $n^i$  a añadir a cada transformador, se escriben las ecuaciones (110–111).

$$a_i = \frac{N_2^i}{N_1^i} = \frac{V_2^i}{V_1} \quad (110)$$

$$a = \frac{N_2^i}{N_1^i + n^i} = \frac{V_2}{V_1} \quad (111)$$

Despejando  $n_i$  de la ecuación (111) se obtiene:

$$n^i = \frac{N_2^i}{a} - N_1^i \quad (112)$$

De la ecuación (110) se puede expresar el número de vueltas del enrollado secundario de forma:

$$N_2^i = a_i N_1^i \quad (113)$$

Reemplazando la ecuación (113) en (112):

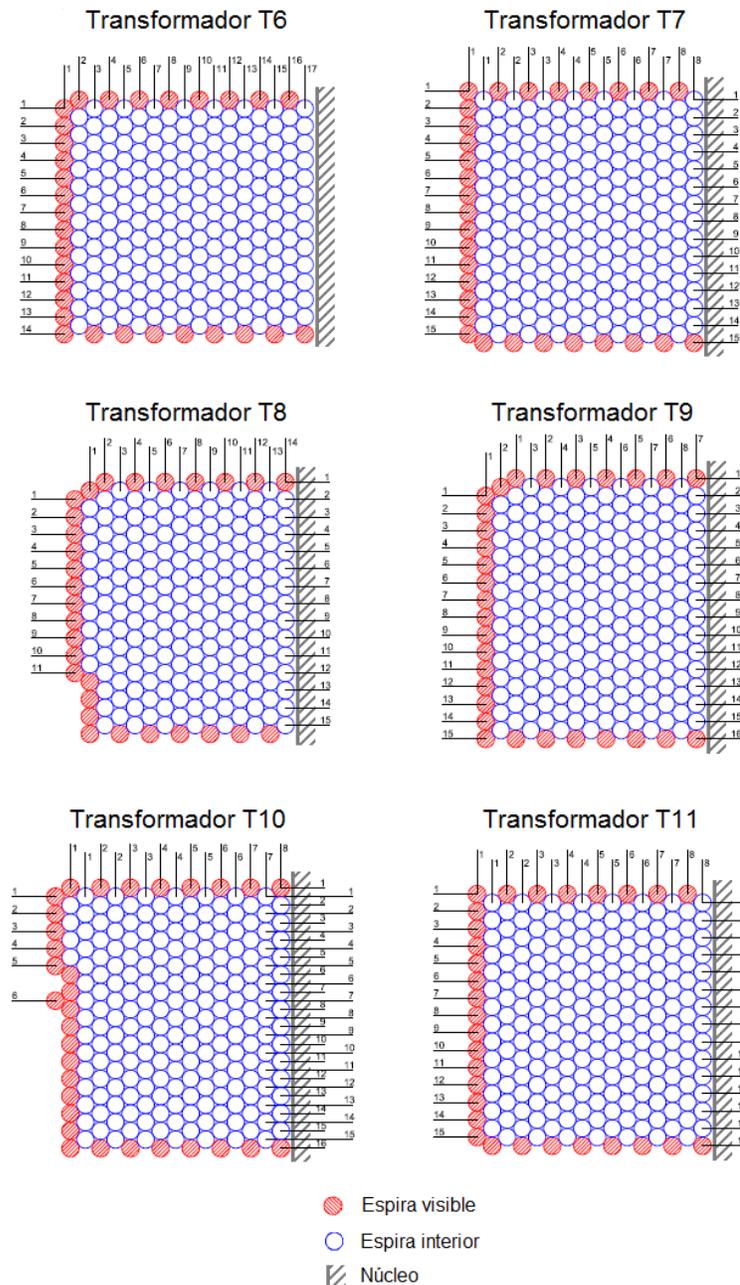
$$n^i = N_1^i \cdot \left( \frac{a_i}{a} - 1 \right) \quad (114)$$

Los números de vueltas  $N_1^i$  y  $N_2^i$  se obtienen contando las vueltas de cada enrollado, lo cual no es siempre sencillo ni preciso, sobretodo el conteo de espiras del bobinado secundario pues son numerosas y de un conductor muy fino. Luego, la ecuación (112) puede entregar un número

de vueltas adicionales impreciso. En cambio, la ecuación (114) depende de: el número de vueltas del enrollado primario  $N_1^i$  de cada transformador; la razón de transformación  $a_i$  obtenida por la prueba de razón de transformación; y de la nueva razón de transformación  $a$  que depende de la tensión de alimentación  $V_1$  y la tensión de secundario escogida  $V_2$ .

**b. Estimación de número de espiras en enrollado primario**

Es posible contar las espiras visibles por frente y por debajo del enrollado, y considerando que las bobinas están intercaladas (Fig. 36) se puede estimar el número de vueltas del bobinado.



**Figura 36. Disposición estimada de espiras en enrollados primarios de cada transformador.**

Otro método para estimar el número de espiras del enrollado primario consiste en enrollar un conductor en torno a la pierna central del núcleo (ocupando los espacios que han dejado las barras magnéticas en las ventanas), de tal manera de formar una bobina exploratoria de 10 vueltas. Luego, se energiza el enrollado primario con tensión nominal y se mide la tensión en la bobina exploratoria, utilizando la ecuación (1) se encuentra el número de vueltas del enrollado primario.

En la Tabla 15 se muestran los números de vueltas de enrollado primario contados con el primer método y calculados con el segundo.

**Tabla 15. Número de vueltas enrollado primario.**

<b>Transformador</b>	<b>Nbob</b>	<b>Vbob [V]</b>	<b>V1 [V]</b>	<b>N1 bobina</b>	<b>N1 contado</b>	<b>Diferencia</b>
T6	10	9,17	220,6	240,6	238	1%
T7	10	9,12	220,7	242,0	240	1%
T8	10	9,23	220	238,4	222	7%
T9	10	9,34	218,3	233,7	232	1%
T10	10	9,12	218,7	239,8	239	0%
T11	10	9,75	220,1	225,7	240	6%

Donde Nbob y Vbob son el número de espiras y la tensión medida en la bobina exploratoria, V1 es la tensión aplicada al enrollado primario.

Los números contados versus los calculados desde el ensayo de bobina exploratoria son muy similares, salvo para los transformadores T8 y T11. En este caso es mejor considerar el valor obtenido con la bobina exploratoria pues este método tiene menor margen de error que el de conteo, debido a que en este último algunas espiras superficiales pueden estar escondidas o en desorden, lo que lleva a un error al considerar un patrón geométrico como en la Fig. 36.

### *c. Cálculo de espiras adicionales*

Teniendo los números de vueltas de los enrollados primarios de cada transformador y su razón de transformación, determinada en 3.3. Se puede calcular el número de vueltas adicionales necesarias en el enrollado primario para igualar la razón de transformación de los equipos y disminuir su corriente de excitación.

En la Tabla 16 se muestran los resultados al escoger una tensión secundaria de 2kV al alimentar con 220V el enrollado primario, la razón de transformación es entonces 9,09. Al añadir el número de vueltas a cada transformador, se debe lograr aproximadamente esta razón.

**Tabla 16. Número de vueltas adicionales y nueva razón de transformación.**

Transformador	a	N1 cont.	N1 bob.	n(cont.)	n(bob)	a(cont.)	a(bob.)
T6	9,64	238	241	14	15	9,11	9,08
T7	10,71	240	242	43	43	9,08	9,09
T8	9,94	222	238	21	22	9,08	9,10
T9	9,86	232	234	20	20	9,08	9,09
T10	9,72	239	240	17	17	9,07	9,08
T11	9,78	240	226	18	17	9,10	9,10

Finalmente se agregan los números de espiras de la Tabla 17, las restricciones para agregar el total de vueltas calculado es, en su caso, el largo del conductor añadido para formar las espiras adicionales.

**Tabla 17. Número de espiras añadidas para cada transformador.**

Transformador	n(N1 cont.)	n(N1 bob.)	Número de vueltas añadidos	a
T6	14	15	15	9,08
T7	43	43	42	9,12
T8	21	22	21	9,14
T9	20	20	20	9,09
T10	17	17	17	9,08
T11	18	17	18	9,06

### 3.1.3 Contenedor de los MOT

Los MOT son contenidos por un tarro metálico común de pintura. Los bornes del contenedor se construyen con tuberías de PVC, tornillos, golillas y tuercas [21].

El transformador se adhiere al fondo del tarro contenedor, es cableado hasta sus bornes y se conecta tal que la polaridad externa del transformador sea aditiva de acuerdo 2.5.3.5 [15]. Además, siempre el borne único y de mayor tamaño es conectado al punto de mayor tensión del enrollado secundario. El punto de menor tensión del enrollado secundario, unido eléctricamente al núcleo, se conecta al perno de la tapa del contenedor, mientras que los terminales de baja tensión se conectan a dos bornes de igual tamaño. Los estanques se llenan de aceite para automóviles AMALIE 15W-40.

## 3.2 Pruebas de los prototipos

### 3.2.1 Introducción

Las pruebas realizadas a los Microformers son las requeridas de acuerdo a los estándares del IEEE citados en la sub sección 2.5.4.

Todas las pruebas eléctricas se efectúan a los transformadores cada vez que se realiza una modificación. Así, se dispone de mediciones para los equipos originales (sin modificaciones); con barras magnéticas extraídas; y, finalmente, con espiras añadidas al enrollado primario. Las pruebas térmicas se ejecutan luego de completar el ensamblado y la inmersión en aceite de los Microformers, respetando la condición de 2.5.4.6.

### 3.2.2 Medición de resistencias en frío

La medición de resistencias en frío se realiza con un puente de Wheastone de acuerdo a 2.5.4.1. Para cada medición se mide la temperatura del enrollado mediante una termocupla inserta entre el papel aislante y los conductores. Los resultados de cada transformador se muestran en la Tabla 18, para facilitar la comparación están referenciados a una misma temperatura de 85°C (temperatura de referencia de las pérdidas de carga).

**Tabla 18. Resistencias en frío referenciadas a 85°C.**

Transformador T#	Sin modificación		Sin barras magnéticas		Con espiras adicionales		
	Resistencia enrollado primario	Resistencia enrollado secundario	Resistencia enrollado primario	Resistencia enrollado secundario	Número espiras añadidas	Resistencia enrollado primario	Resistencia enrollado secundario
	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	-	[Ω]	[Ω]
T6	1,80	110,06	1,83	110,75	15	1,92	110,99
T7	2,42	215,67	2,42	216,58	42	2,77	216,79
T8			2,56	115,26	22	2,90	116,13
T9	2,15	133,89	2,17	132,85	20	2,36	133,03
T10	2,01	122,99	2,03	123,76	17	2,27	124,10
T11	2,41	129,06	2,27	124,90	18	2,65	124,53

### 3.2.3 Prueba de razón de transformación

La prueba de razón de transformación se realizó con un osciloscopio LeCroy WaveJet 334A, con una sonda de prueba Tektronix de 300V y una sonda de prueba de tensión Agilent de 4000 Vpk. No se realiza el intercambio de medidores de tensión para corregir errores, de acuerdo a 2.5.4.2, pues la sonda Tektronix no puede medir la tensión secundaria del equipo. No obstante, para asegurar la correcta medición se mide con ambas sondas en el enrollado primario y se constata que el error de medición es inferior al 0,1%. Por tanto, las mediciones aún sin intercambio son confiables. En la Tabla 19 se resumen los resultados obtenidos junto al promedio y desviación estándar de las razones determinadas.

**Tabla 19. Razón de transformación**

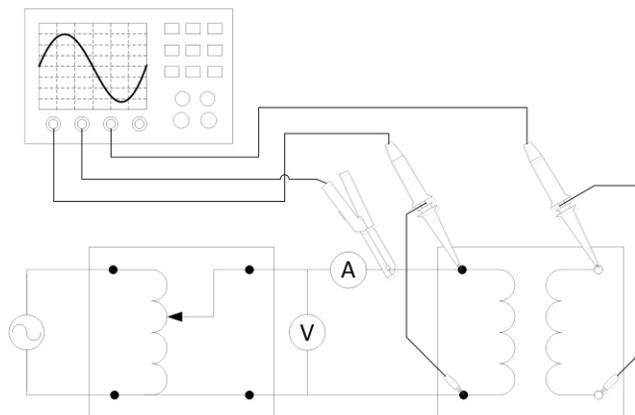
Transformador T#	Sin modificación	Sin barras magnéticas	Con espiras adicionales	
	Razón de transformación	Razón de transformación	Número espiras añadidas	Razón de transformación
T6	9,42	9,67	15	9,16
T7	10,36	10,67	42	9,07
T8		9,97	22	9,18
T9	9,60	9,87	20	9,08
T10	9,42	9,74	17	9,14
T11	9,61	9,81	18	9,13
Promedio	9,68	9,96		9,13
Coef. Variación	4,03%	3,71%		0,44%

### 3.2.4 Pruebas de polaridad

La prueba de polaridad se realizó con el método de pulso inducido (*inductive kick*) descrito en 2.5.4.3. La disposición de los terminales en el transformador de microondas no es como se exhibe en el estándar [16], pues un terminal del enrollado de alta tensión va conectado eléctricamente al núcleo, con el objetivo de conectarse a tierra. Se procura con la prueba de polaridad que al conectar los bornes del contenedor al transformador, la polaridad externa sea aditiva y que el punto eléctrico conectado al núcleo sea el de menor tensión y denominado por  $H_1$ .

### 3.2.5 Prueba de pérdidas de vacío y corriente de excitación

Las mediciones se realizan para cada transformador con un osciloscopio LeCroy WaveJet 334A, con una sonda de prueba Tektronix de 300V, sonda de prueba de tensión Agilent de 4000 Vpk y una sonda tenaza de corriente AEMC. La potencia activa se obtiene calculando el valor medio de la multiplicación de las señales de tensión y corriente instantáneas en el tiempo (ver 2.3.6.3), medidas con las puntas del osciloscopio. No se utilizan vatímetros, pues para el rango de potencia de los Microformers el método descrito es el más adecuado y preciso, considerando los instrumentos disponibles. Así el diagrama de conexiones de 2.5.4.4 se modifica como se muestra en la Fig. 36.



**Figura 37. Prueba de pérdidas de vacío y corriente de excitación.**

La alimentación se hace mediante un autotransformador (variac) monofásico, controlando la magnitud de la tensión aplicada. Se energiza siempre el lado de baja tensión del transformador.

El voltímetro y amperímetro (Fig. 37) son multímetros utilizados para comprobar la correcta medición del osciloscopio.

En el caso de las pruebas sin inmersión en aceite se registra la temperatura mediante una termocupla inserta entre el enrollado primario y el papel aislante. Luego de la inmersión, se mide la temperatura en la superficie del aceite y en el fondo del volumen de aceite, mediante dos termocuplas: una sumergida 2 cm bajo el nivel de aceite; y otra, sumergida hasta 2,5 cm sobre el fondo del contenedor.

En las Tablas 20 – 22 se muestran los resultados obtenidos, las pérdidas se encuentran referenciadas a una temperatura de 20°C para facilitar la comparación. La corriente nominal considerada para todos los transformadores es de 5 amperes.

**Tabla 20. Pérdidas de vacío y corriente de excitación. Sin modificación.**

Transformador T#	Sin modificación				
	Tensión medida	Corriente medida	Corriente de excitación	Pérdidas medidas	Pérdidas corregidas
	[V]	[A]	[%Inom]	[W]	[W]
T6	222,34	2,17	43,31	37,65	37,53
T7	220,78	2,13	42,58	50,63	50,51
T8					
T9	220,39	2,20	44,03	41,78	41,65
T10	220,40	1,55	30,95	33,92	33,80
T11	220,35	1,99	39,73	43,09	43,04

**Tabla 21. Pérdidas de vacío y corriente de excitación. Sin barras magnéticas.**

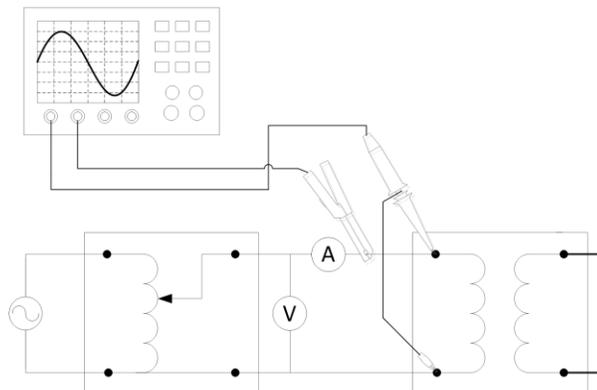
Transformador T#	Sin barras magnéticas				
	Tensión medida	Corriente medida	Corriente de excitación	Pérdidas medidas	Pérdidas corregidas
	[V]	[A]	[%Inom]	[W]	[W]
T6	219,56	2,78	55,50	45,22	45,22
T7	219,70	2,73	54,55	59,84	60,03
T8	219,76	2,52	50,40	45,37	45,38
T9	224,19	2,73	54,61	53,45	53,50
T10	220,26	1,99	39,80	39,90	39,90
T11	220,84	2,43	48,67	50,04	49,99

**Tabla 22. Pérdidas de vacío y corriente de excitación. Espiras añadidas.**

Transformador T#	Con espiras adicionales					
	Número de espiras	Tensión medida	Corriente medida	Corriente de excitación	Pérdidas medidas	Pérdidas corregidas
	-	[V]	[A]	[%Inom]	[W]	[W]
T6	15	219,8	1,62	32,4	33,9	34,1
T7	42	219,8	0,70	14,0	34,0	34,2
T8	22	220,3	1,07	21,4	29,5	29,7
T9	20	219,9	1,31	26,1	34,3	34,5
T10	17	219,4	1,02	20,4	30,4	30,6
T11	18	219,9	1,18	23,6	35,4	35,7

### 3.2.6 Prueba de pérdidas de carga y voltaje de impedancia

Este ensayo se realiza con la misma instrumentación que la prueba anterior, con excepción de la sonda de prueba de alto voltaje, pues en el enrollado de alta tensión se dispone el cortocircuito. El registro de la potencia activa y de la temperatura se efectúa análogamente a 3.3.5. El circuito experimental se muestra en la Fig. 38.

**Figura 38. Prueba de pérdidas de carga y voltaje de impedancia.**

En las Tablas 23 – 25 se muestran los resultados obtenidos, las pérdidas se encuentran referenciadas a una temperatura de 85°. El voltaje de impedancia se calcula en porcentaje con una tensión base de 220V.

**Tabla 23. Pérdidas de carga y voltaje de impedancia. Sin modificaciones.**

Transformador T#	Sin modificación					
	Tensión medida	Voltaje de impedancia	Voltaje de impedancia	Corriente medida	Pérdidas medidas	Pérdidas Corregidas
	[V]	[V]	[%]	[A]	[W]	[W]
T6	109,57	109,94	49,97	4,95	65,86	79,75
T7	97,86	98,75	44,89	4,96	96,14	116,29
T8						
T9	88,48	89,11	40,51	4,98	76,25	92,69
T10	91,38	91,95	41,79	4,95	73,12	88,82
T11	97,97	98,60	44,82	4,93	77,00	94,49

**Tabla 24. Pérdidas de carga y voltaje de impedancia. Sin barras magnéticas.**

Transformador T#	Sin barras magnéticas					
	Tensión medida	Voltaje de impedancia	Voltaje de impedancia	Corriente medida	Pérdidas medidas	Pérdidas Corregidas
	[V]	[V]	[%]	[A]	[W]	[W]
T6	32,04	32,98	14,99	5,08	66,85	77,74
T7	34,80	36,71	16,69	5,13	96,84	113,98
T8	32,67	33,84	15,38	5,08	94,36	83,00
T9	31,46	33,25	15,12	5,04	71,50	89,77
T10	34,15	35,34	16,06	5,14	74,76	88,17
T11	39,96	41,27	18,76	5,18	77,44	94,10

**Tabla 25. Pérdidas de carga y voltaje de impedancia. Espiras añadidas.**

Transformador T#	Con espiras adicionales						
	Número de espiras	Tensión medida	Voltaje de impedancia	Voltaje de impedancia	Corriente medida	Pérdidas medidas	Pérdidas Corregidas
	-	[V]	[V]	[%]	[A]	[W]	[W]
T6	15	27,22	28,05	12,75	3,88	41,78	49,31
T7	42	42,43	44,66	20,30	4,93	113,18	132,43
T8	22	36,96	38,40	17,45	4,98	92,02	105,69
T9	20	35,53	37,06	16,85	4,99	85,58	100,47
T10	17	40,05	41,35	18,80	5,34	92,00	107,25
T11	18	34,50	36,18	16,45	4,77	78,68	94,35

### 3.2.7 Pruebas de determinación de temperatura

Para realizar la prueba de acuerdo a 2.5.4.6 se utiliza el método de carga simulada por cortocircuito, conectando los bornes de alta tensión mediante un conductor adecuado. Mediante

un autotransformador de razón de transformación variable, se alimenta el enrollado primario con tensión reducida tal que la corriente que circula por él sea fija e igual a 3,5A. Se mide la resistencia con un puente de Wheastone cada una hora y se registra la temperatura superior e inferior del aceite, por medio de dos termocuplas: una ubicada 2 cm bajo el nivel de aceite y otra situada a 2,5 cm de distancia del fondo del tarro contenedor.

La corriente de 3,5A se escoge luego de realizar una prueba de calentamiento a tres transformadores (T6, T7 y T9) alimentados con corriente nominal de 5A. La prueba fue interrumpida a las dos horas para los transformadores T7 y T9, pues las temperaturas alcanzadas por el aceite promediaban 100°C, muy por encima de las temperaturas recomendadas por [15], [20]. Tras esta prueba no se logró medir nuevamente resistencia en los bornes del equipo T7.

Se considera el término de la prueba cuando la temperatura del aceite superior no varía en más de un 2,5% en un período de 3 horas. Esto ocurre alrededor de las 11 horas de prueba. Luego de cumplir la condición de término, las tres últimas mediciones de temperatura se promedian, los resultados obtenidos se exponen en la Tabla 26. Se agregan las pérdidas totales de cada transformador iguales a la suma de las pérdidas en vacío (referidas a 20°C) y de carga (referidas a 85°C). Se utilizó las pérdidas de carga obtenidas de la prueba de cortocircuito a corriente nominal de 5A. Los resultados de la tabla se ordenan de menor a mayor según la temperatura del aceite superior obtenida.

**Tabla 26. Resultados finales prueba térmica. Cortocircuito a 3,5A.**

Transformador T#	Volumen de aceite	Temperatura ambiente	Temperatura aceite superior	Temperatura aceite inferior	Temperatura promedio de enrollado	Pérdidas totales
	[L]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[W]
T6	2	24,0	78,2	89,2	140,1	116,33
T9	2	23,2	92,6	101,8	177,3	152,00
T10	1,5	22,9	96,3	88,0	174,7	137,76
T8	1,5	22,9	99,9	106,0	177,2	139,74
T11	1,5	23,2	100,4	105,5	173,8	137,52
T9	1,5	24,0	101,3	106,7	176,1	152,00
T7	1,5	-	-	-	-	166,53

Notar que la temperatura del aceite en la parte inferior del aceite para el transformador T10 es inferior a la temperatura del aceite superior. Se deduce que la termocupla no registró correctamente la temperatura producto de algún daño o mala ubicación.

### 3.2.8 Prueba con carga resistiva

Se realiza una prueba con carga resistiva con el objeto de obtener la eficiencia y regulación del transformador mediante mediciones y, posteriormente, comparar los resultados entregados por el modelo eléctrico frente a las mismas entradas.

La carga se compone de un banco de 8 resistencias de  $10\text{k}\Omega$ ,  $1\text{kV}$  y  $100\text{W}$ , se conectan de forma que la carga total del sistema sea de  $800\text{W}$  y soporte la tensión de  $2\text{kV}$ . Para esto se conecta pares de resistencias en serie, soportando así los  $2\text{kV}$  (cada resistencia se somete a  $1\text{kV}$ ) y luego se conectan los pares en paralelo. De esta forma se obtienen mediciones para  $0$ ,  $200$ ,  $400$ ,  $600$  y  $800$  watts de carga aproximadamente.

Los instrumentos utilizados son los mismos que en las pruebas de pérdidas en vacío y de carga (Fig. 39).

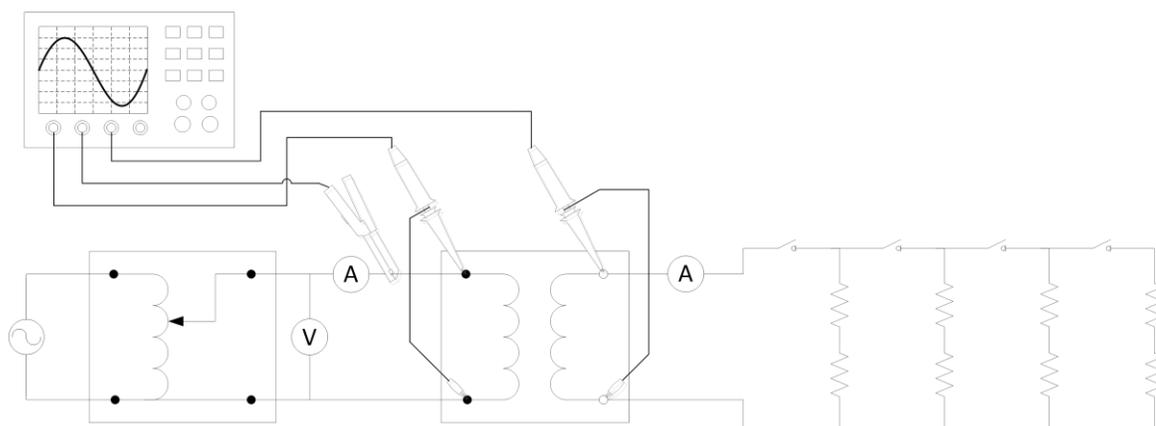


Figura 39. Conexiones e instrumentos de prueba de carga.

Los resultados se muestran en la Tabla 27, donde se calcula la regulación, y la eficiencia.

Tabla 27. Resultados prueba con carga resistiva.

Transformador T#	Sin carga		Plena carga resistiva							
	V1 [V]	V2 [V]	V1 [V]	I1 [A]	Pe [W]	V2 [V]	I2 [A]	Ps [W]	Reg. [%]	Ef. [%]
T06	221	2013	220,3	3,79	769,4	1909	0,383	731,2	<b>5,16</b>	<b>95</b>
T07	220,1	1999	220,1	3,51	747,1	1844	0,369	680,5	<b>8,42</b>	<b>91,1</b>
T08	219	2025	219,5	3,68	776,4	1888	0,382	721,1	<b>7,58</b>	<b>92,9</b>
T09	220,8	2001	220,5	3,7	769,6	1887	0,384	724,6	<b>5,86</b>	<b>94,2</b>
T10	220,2	2005	219,9	3,65	763,6	1893	0,378	715,6	<b>5,76</b>	<b>93,7</b>
T11	219,8	2004	219,1	3,67	766,9	1883	0,378	711,6	<b>6,11</b>	<b>92,8</b>
<b>Promedio</b>	<b>220,2</b>	<b>2008</b>	<b>219,9</b>	<b>3,67</b>	<b>765,5</b>	<b>1884</b>	<b>0,379</b>	<b>714,1</b>	<b>6,48</b>	<b>93,3</b>

## 3.3 Modelación del Microformer

### 3.3.1 Requerimientos del Modelo

Los estándares del IEEE [15], [16] utilizan el circuito equivalente del transformador para determinar la impedancia del equipo, refiriéndose a la impedancia de la rama serie del circuito equivalente expresada en por unidad o porcentaje (base propia), despreciando la rama de excitación. Esto es válido para transformadores de poder cuya corriente de excitación es despreciable con respecto a la corriente de carga. Sin embargo, en el caso del Microformer la corriente de excitación es una fracción importante de la corriente de carga, esto exige un modelo eléctrico que considere la influencia de la corriente de excitación. Debido a lo anterior, se utiliza el circuito equivalente exacto del transformador presentado en 2.3.5. Fig. 12.

En el estándar [15] se indica que la temperatura máxima del conductor debe ser determinada por mediciones directas, o bien, la temperatura se puede calcular por un método basado en los principios fundamentales de pérdidas y transferencia de calor y validado con pruebas en la producción de las unidades o prototipos.

En base a lo anterior, se establecen los siguientes requerimientos:

- El modelo eléctrico debe considerar la corriente de excitación.
- El modelo térmico debe estar basado en los principios fundamentales de transferencia de calor y validado por pruebas realizadas a prototipos.

### 3.3.2 Modelo eléctrico

#### 3.3.2.1 Determinación de parámetros

Realizadas las pruebas de razón de transformación, pérdidas de vacío y pérdidas de carga, se dispone de todos los datos para calcular los parámetros del circuito equivalente mediante las ecuaciones (44-47). Los valores de tensión RMS, corriente RMS y potencia activa, utilizados para obtener los parámetros son los calculados a través del osciloscopio, el cual captura las señales de voltaje y corriente instantáneas. De esta forma se obtienen los resultados de las Tablas 28 – 30:

**Tabla 28. Parámetros circuito equivalente, transformadores sin modificaciones.**

<b>Transformadores sin modificación</b>				
<b>T#</b>	<b><math>R_m</math></b>	<b><math>X_m</math></b>	<b><math>r_1 + r'_2</math></b>	<b><math>x_1 + x'_2</math></b>
T6	1313,1	103,0	2,69	21,97
T7	962,8	104,3	3,90	19,33
T8	-	-	-	-
T9	1162,5	100,5	3,08	17,52
T10	1432,0	143,2	2,98	18,20
T11	1126,9	111,5	3,16	19,60
Promedio	1199,5	112,5	3,2	19,3
CV	15,0%	15,7%	14,3%	8,8%

**Tabla 29. Parámetros circuito equivalente, transformadores sin barras magnéticas.**

<b>Transformadores sin barras magnéticas</b>				
<b>T#</b>	<b><math>R_m</math></b>	<b><math>X_m</math></b>	<b><math>r_1 + r'_2</math></b>	<b><math>x_1 + x'_2</math></b>
T6	1066,0	79,3	2,59	5,75
T7	806,6	80,9	3,68	5,70
T8	1064,5	87,5	3,22	5,57
T9	949,4	78,1	3,10	5,48
T10	1216,0	111,1	2,83	6,01
T11	974,6	91,1	2,89	7,16
Promedio	1012,9	88,0	3,0	5,9
CV	13,6%	14,1%	12,4%	10,5%

**Tabla 30. Parámetros circuito equivalente, transformadores con espiras añadidas.**

<b>Transformadores con espiras añadidas</b>				
<b>T#</b>	<b><math>R_m</math></b>	<b><math>X_m</math></b>	<b><math>r_1 + r'_2</math></b>	<b><math>x_1 + x'_2</math></b>
T6	1429,8	137,8	2,78	6,44
T7	1428,7	321,8	4,65	7,23
T8	1657,6	208,1	3,71	6,42
T9	1419,2	170,3	3,44	6,24
T10	1587,9	217,6	3,22	6,77
T11	1371,1	188,2	3,45	6,35
Promedio	1482,4	207,3	3,5	6,6
CV	7,6%	30,3%	17,7%	5,6%

### 3.3.2.2 Aplicación del modelo

El circuito equivalente se implementa en Simulink (Fig. 40) y se simula la prueba de carga de 3.3.8. Las entradas, los parámetros y las variables del modelo se detallan a continuación:

Entradas:

- Tensión de alimentación: sinusoidal de  $220V_{RMS}$  y 50Hz
- Magnitud de la carga resistiva:  $20k\Omega$ ,  $10k\Omega$ ,  $6.66k\Omega$ ,  $5k\Omega$

Variables:

- Corriente de enrollado primario
- Corriente de enrollado secundario
- Corriente de excitación
- Tensión de enrollado secundario (tensión de carga)

Parámetros:

- Resistencias de enrollados  $r_1$  y  $r_2'$  (se suponen iguales)
- Reactancias  $x_1$  y  $x_2'$  (se suponen iguales)
- Resistencia  $R_m$  y reactancia  $X_m$  de magnetización
- Razón de transformación  $a$

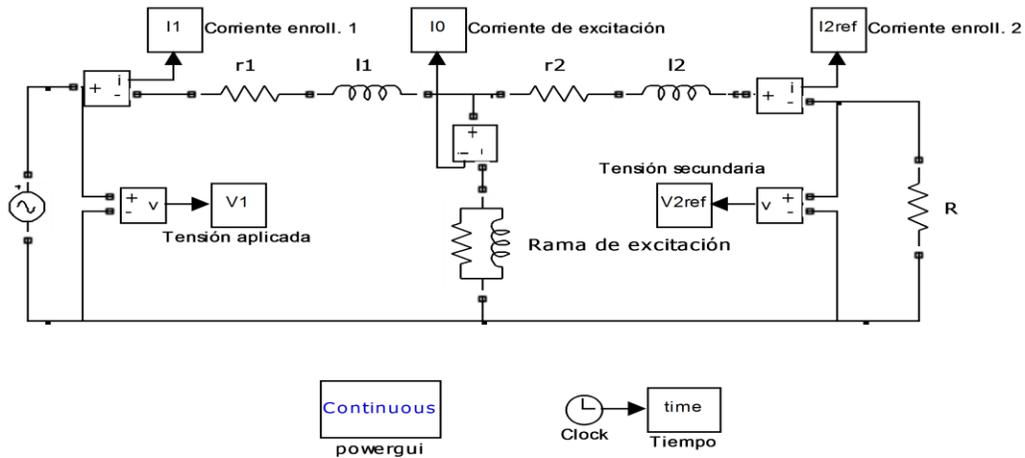


Figura 40. Modelo del circuito equivalente en Simulink.

En la Fig. 40 en lugar de las reactancias  $x_1$  y  $x_2'$ , obtenidas en la sub sección anterior, se tiene sus inductancias  $l_1$  y  $l_2$ , se relacionan de acuerdo a la ecuación (115) suponiendo corriente de carga sinusoidal.

$$l_1 = \frac{x_1}{2\pi f} \quad l_2 = \frac{x_2'}{2\pi f} \quad (115)$$

Donde  $f$  es la frecuencia eléctrica de la tensión de alimentación.

La tensión aplicada es siempre una senoide de  $220V_{RMS}$  y con una frecuencia de 50Hz. La carga se varía en cada arranque de la simulación, comenzando desde el circuito abierto y luego  $20k\Omega$  (200W),  $10k\Omega$  (400),  $6.66k\Omega$  (600W) y  $5k\Omega$  (800W). Los resultados de la simulación se muestran para el transformador T7 en la Tabla 31.

**Tabla 31. Resultados simulación de prueba con carga resistiva. Transformador T7.**

<b>Transformador T7</b>					
<b>Medición</b>	<b>Sin carga</b>	<b>#1</b>	<b>#2</b>	<b>#3</b>	<b>#5</b>
Tensión enroll. primario [V]	220,14	220,45	221,28	221,15	220,15
Corriente enroll. primario [A]	0,694	1,207	1,977	2,754	3,514
Potencia de entrada [W]	33,8	221,0	407,4	582,8	747,1
Tensión enroll. secundario [A]	1999	1963	1929	1893	1844
Corriente enroll. secundario [A]	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4
Potencia de salida [W]	0,0	192,3	370,3	532,0	680,5
<b>Modelación</b>					
Tensión enroll. primario [V]	220,00	220,00	220,00	220,00	220,00
Corriente enroll. primario [A]	0,692	1,231	1,995	2,775	3,538
Corriente de excitación [A]	0,692	0,685	0,679	0,672	0,665
Potencia de entrada [W]	34,1	224,1	406,4	580,6	746,5
Tensión enroll. secundario [A]	1968	1931	1893	1856	1819
Corriente enroll. secundario [A]	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4
Potencia de salida [W]	0,0	186,4	358,5	516,7	661,7
<b>Errores</b>					
Tensión enroll. primario [%]	-0,06%	-0,21%	-0,58%	-0,52%	-0,07%
Corriente enroll. primario [%]	0,37%	-1,98%	-0,92%	-0,79%	-0,67%
Potencia de entrada [%]	-0,89%	-1,40%	0,25%	0,38%	0,08%
Tensión enroll. secundario [%]	1,56%	1,62%	1,83%	1,97%	1,37%
Corriente enroll. secundario [%]	-	1,49%	1,38%	0,92%	1,41%
Potencia de salida [%]	-	3,08%	3,19%	2,88%	2,77%

En la Tabla 32 se expone los promedios de error de cálculo de cada una de las variables, para las mismas pruebas de carga del transformador T7. Los resultados para el resto de los transformadores se presentan en las planillas anexas.

**Tabla 32. Errores promedio de la modelación eléctrica por variable. Prueba de carga resistiva.**

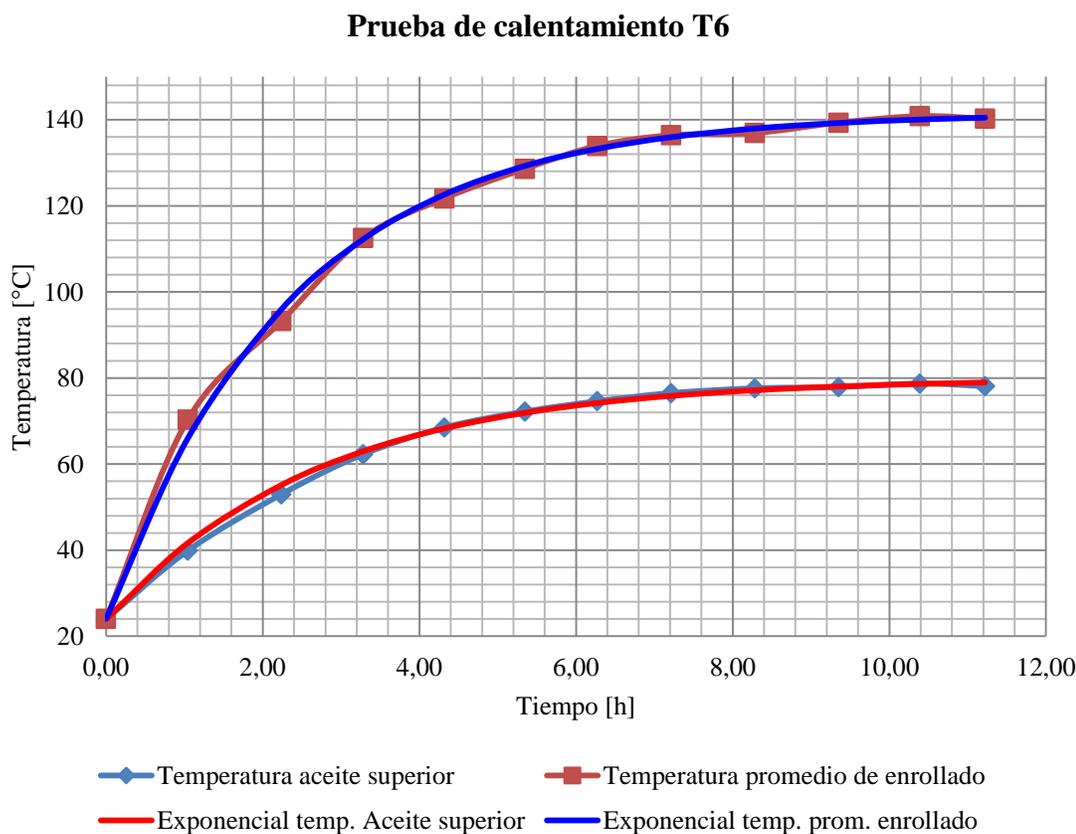
<b>Transformador T#</b>	<b>Error Tensión primario</b>	<b>Error Corriente primario</b>	<b>Error Potencia primario</b>	<b>Error Tensión secundario</b>	<b>Error Corriente secundario</b>	<b>Error Potencia secundario</b>	<b>Error Eficiencia</b>
<b>T6</b>	0,4%	3,7%	0,7%	1,2%	1,8%	3,0%	3,5%
<b>T7</b>	0,3%	0,9%	0,6%	1,7%	1,3%	3,0%	3,1%
<b>T8</b>	0,4%	1,7%	1,7%	2,1%	3,4%	5,4%	4,1%
<b>T9</b>	0,2%	4,5%	1,0%	1,3%	2,8%	4,0%	4,9%
<b>T10</b>	0,1%	2,1%	0,5%	1,7%	1,7%	3,4%	3,7%
<b>T11</b>	0,4%	3,7%	0,7%	1,2%	1,8%	3,0%	3,5%
<b>Promedio</b>	<b>0,3%</b>	<b>2,7%</b>	<b>0,9%</b>	<b>1,5%</b>	<b>2,2%</b>	<b>3,6%</b>	<b>3,8%</b>

### 3.3.3 Modelo térmico

De la prueba de calentamiento se obtiene curvas en el tiempo para la temperatura del aceite superior y del enrollado (promedio). Por medio del complemento SOLVER de Excel se ajusta una curva exponencial de la forma (116), buscando los parámetros  $Rq$  y  $\tau$  óptimos tal que el error cuadrático total sea mínimo entre las mediciones y el resultado de la función de temperatura (116):

$$\begin{aligned} & \text{mín} \left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^N (\theta_{mi} - \theta(t_i))^2} \right\} \\ & \text{con} \quad \theta(t_i) = Rq \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \theta_0 \\ & \text{s.a} \quad Rq > 0 \wedge \tau = RC > 0 \end{aligned} \tag{116}$$

Como ejemplo se muestra a continuación las curvas obtenidas para el transformador T6 en la Fig. 41, sus parámetros y error cuadrático total tras la minimización se expresan en la Tabla 33, junto a los demás transformadores.



**Figura 41. Resultados prueba de calentamiento, transformador T6.**

Tabla 33. Resultados aproximación exponencial.

Transformador T#	Volumen aceite	Temperatura aceite superior				Temperatura promedio de enrollado			
		$Rq$	$\tau$	$\theta_0$	Error	$Rq$	$\tau$	$\theta_0$	Error
		[L]	[°C]	[s]	[°C]	[%]	[°C]	[s]	[°C]
T6	2,0	55,89	2,75	24,00	6%	117,39	2,36	24,10	5%
T7	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-
T8	1,5	81,38	2,93	21,40	5%	160,91	2,69	21,65	14%
T9	1,5	79,27	2,47	23,60	7%	158,76	2,41	23,85	35%
T9	2,0	71,58	2,74	23,50	3%	157,50	2,40	23,15	14%
T10	1,5	77,46	2,76	21,10	6%	154,24	2,18	21,15	24%
T11	1,5	80,19	2,89	23,50	4%	158,79	3,25	23,35	18%
<b>Promedio</b>		<b>74,29</b>	<b>2,76</b>	<b>22,85</b>	<b>5%</b>	<b>151,27</b>	<b>2,55</b>	<b>22,88</b>	<b>18%</b>
<b>Coef. Var.</b>		<b>13,0%</b>	<b>5,9%</b>			<b>11,1%</b>	<b>15,0%</b>		

El término  $Rq$  es la multiplicación de la resistencia térmica ( $R$ ) del medio conductor del flujo de calor y las pérdidas ( $q$ ): totales en caso del calentamiento del aceite; y sólo de carga (cobre) en caso de calentamiento del enrollado.

### 3.3.3.1 Cálculo de parámetros RC para la temperatura superior del aceite

Con los resultados de las pruebas de vacío y de carga y las ecuaciones de referencia de temperatura, es posible determinar las pérdidas totales  $q$  referidas a la temperatura de régimen permanente de cada transformador (Tabla 34). Con esto se determina el valor de la resistencia térmica  $R$  y luego, el valor de la capacitancia térmica  $C$  para cada Microformer.

Tabla 34. Parámetros del circuito RC análogo térmico para temperatura de aceite superior.

Transformador T#	Vol. de aceite	$Rq$	$\tau$	Temp. final aceite	Temp. final enrollados	$q_{Fe}$	$q_{Cu}$	$q_T$	$R$	$C$
<b>T6</b>	2,0	55,89	2,75	78,2	140,1	32,7	47,1	79,8	<b>0,700</b>	<b>3,922</b>
<b>T9</b>	2,0	71,58	2,74	92,6	177,3	32,8	63,0	95,8	<b>0,747</b>	<b>3,669</b>
<b>T7</b>	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>T8</b>	1,5	81,38	2,93	99,9	177,2	28,1	67,0	95,1	<b>0,855</b>	<b>3,424</b>
<b>T9</b>	1,5	79,27	2,47	101,3	176,1	32,6	62,9	95,5	<b>0,830</b>	<b>2,974</b>
<b>T10</b>	1,5	77,46	2,76	96,3	174,7	29,0	59,9	88,9	<b>0,871</b>	<b>3,172</b>
<b>T11</b>	1,5	80,19	2,89	100,4	173,8	33,7	61,5	95,3	<b>0,842</b>	<b>3,436</b>
<b>Promedio</b>									<b>0,808</b>	<b>3,433</b>
<b>Coef. Var.</b>									<b>8,4%</b>	<b>9,9%</b>
<b>Promedio 2L</b>									<b>0,724</b>	<b>3,796</b>
<b>Coef. Var. 2L</b>									<b>4,5%</b>	<b>4,7%</b>
<b>Promedio 1,5L</b>									<b>0,850</b>	<b>3,251</b>
<b>Coef. Var. 1,5L</b>									<b>2,1%</b>	<b>6,8%</b>

En la Tabla 34, se corrigen las pérdidas de carga mediante la ecuación (117) para una corriente de 3,5A ( $I_2$ ), a partir de las pérdidas determinadas para una corriente de 5A ( $I_1$ ). Luego, las pérdidas de vacío se refieren a la temperatura del aceite, mientras que las de carga a la temperatura promedio de enrollado.

$$P_2 = \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 \cdot P_1 \quad (117)$$

### 3.3.3.2 Aplicación del modelo térmico

Los parámetros anteriores fueron determinados para un régimen constante de corriente, en varias publicaciones se considera una resistencia térmica variable con tal de considerar los cambios que sufre la viscosidad del aceite en función de la temperatura, lo cual influye en la respuesta térmica del equipo. La prueba de aplicación se realiza sobre el transformador T6 el cual recibe un escalón de corriente de 5A, luego se disminuye a 4A y finalmente a 3,5A. Con los parámetros RC determinados para este equipo y la conversión de pérdidas de carga en función de la corriente (117) se modela la respuesta térmica del equipo en el tiempo.

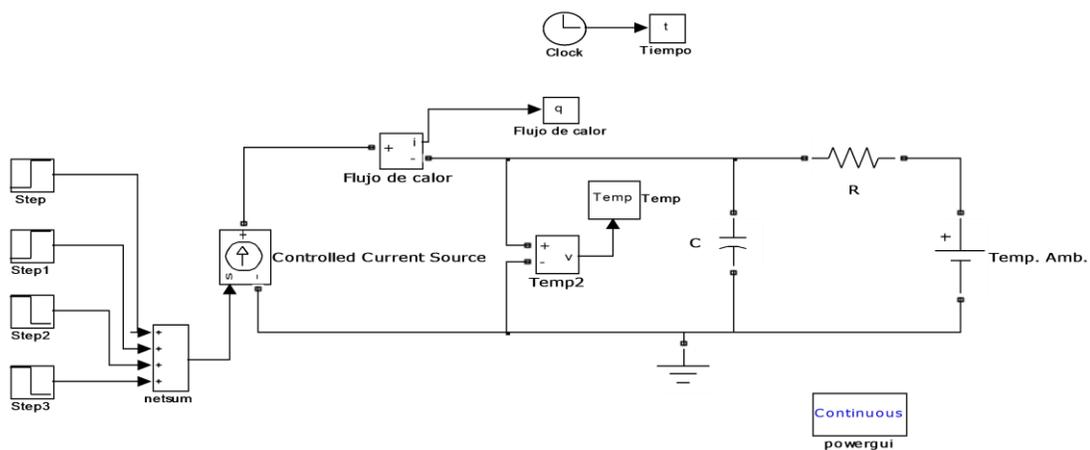


Figura 42. Circuito eléctrico análogo térmico en Simulink.

En la Fig. 42 se puede observar el circuito eléctrico implementado en Simulink, configurado con los parámetros determinados para el transformador T6. En la Fig. 43 se compara los resultados obtenidos de la simulación con los medidos en pruebas de laboratorio.

### Modelación temperatura aceite superior

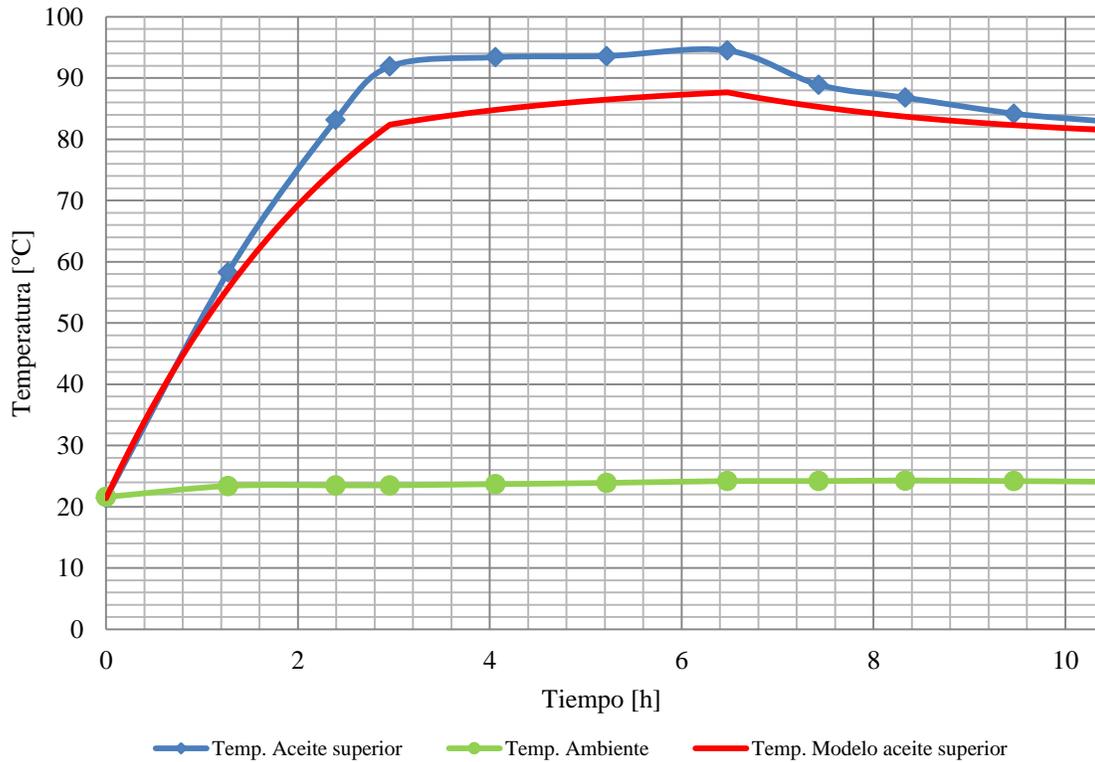


Figura 43. Respuesta térmica modelada del transformador T6 frente a escalones de corriente.

En la Tabla 35 se muestra las mediciones de temperatura del aceite superior, los valores entregados por la simulación y el error asociado. Finalmente el error promedio es de un 5,46%.

Tabla 35. Resultados simulación modelo térmico independiente.

Tiempo	Temperatura medida	Temperatura estimada	Diferencia de temperatura	Error
[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]
0,00	21,4	21,4	0,0	0,0%
1,27	58,3	55,7	2,6	4,5%
2,39	83,2	75,2	8,0	9,6%
2,96	91,9	82,4	9,5	10,3%
4,06	93,4	84,8	8,6	9,2%
5,22	93,6	86,5	7,1	7,6%
6,48	94,5	87,7	6,8	7,2%
7,43	88,9	85,3	3,6	4,0%
8,33	86,8	83,7	3,1	3,6%
9,46	84,2	82,3	1,9	2,2%
10,36	83,0	81,6	1,4	1,7%
<b>Promedio</b>			<b>4,8</b>	<b>5,46%</b>

### 3.3.4 Modelo híbrido eléctrico-térmico

Existe una relación entre las variables eléctricas y térmicas: conforme aumenta la temperatura en los enrollados, se incrementa el valor de su resistencia; luego se elevan las pérdidas de carga, responsables del aumento de temperatura del aceite y de los enrollados. Esta relación no se modela al considerar independientes los modelos en 3.3.1 y 3.3.2.

Al incluir estas relaciones se debe añadir una resistencia variable al circuito eléctrico equivalente. El valor de la resistencia se calcula en un módulo que recibe como entradas: la resistencia medida en frío; la temperatura de medición; y la temperatura del cobre, esta última es una salida del modelo térmico. La salida del bloque es la magnitud de la resistencia en función de la temperatura según (91).

Además, se crea un módulo que calcula las pérdidas totales y las pérdidas de carga en el tiempo. Las entradas del bloque son: las corrientes de ambos enrollados (referidas al primario) y la resistencia en función de la temperatura del enrollado. La resistencia del primario y la resistencia del secundario referida se consideran iguales. Con estos dos bloques se interconectan los modelos eléctrico y térmico.

La simulación es exigente para el ordenador, por lo que se modelan las ecuaciones fasoriales del modelo eléctrico del transformador con el objetivo de trabajar con números complejos en vez de señales sinusoidales. Notar que, al hacer esta simplificación el régimen transitorio del transformador es desconsiderando en la determinación de las temperaturas de operación.

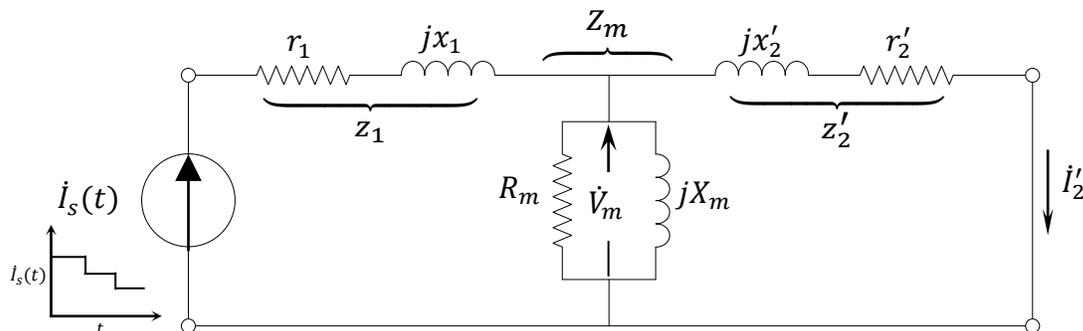


Figura 44. Circuito equivalente para prueba de calentamiento por cortocircuito.

Para simular la prueba de cortocircuito se alimenta el circuito equivalente eléctrico con una fuente de corriente alterna con conectada al enrollado primario y se construye de tres escalones de corriente RMS en el tiempo (Fig. 44): primero se alimenta con 5A, luego 4A y finalmente 3,5A. La carga eléctrica es un cortocircuito. De esta forma las ecuaciones modeladas en Simulink son (117-119):

$$\dot{V}_S = \dot{I}_S \cdot z_1 + \dot{V}_m \quad (118)$$

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_S \cdot \frac{Z_m}{z'_2 + Z_m} \quad (119)$$

$$\dot{V}_m = (\dot{I}_S - \dot{I}_2) \cdot Z_m \quad (120)$$

$$z_1 = r_1 + jx_1 \quad z'_2 = r'_2 + jx'_2 \quad Z_m = \left( \frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m} \right)^{-1} \quad (121)$$

Donde:  $\dot{I}_S$  es la corriente de alimentación;  $\dot{V}_S$  es la tensión de alimentación;  $\dot{I}'_2$  es la corriente secundaria referida al primario;  $\dot{V}_m$  es la tensión en la rama de excitación;  $Z_m$  es la impedancia de la rama de excitación;  $z_1$  y  $z'_2$  son las impedancias de los enrollados referidas al primario.

Con las relaciones anteriores se construye un sistema en Simulink cuyas entradas son: la corriente de alimentación  $\dot{I}_S$ ; y los parámetros del circuito equivalente  $r_1$ ,  $r'_2$ ,  $x_1$ ,  $x'_2$ ,  $R_m$  y  $X_m$ . Las variables de salida son:  $\dot{V}_S$ ,  $\dot{I}'_2$  y  $\dot{V}_m$ .

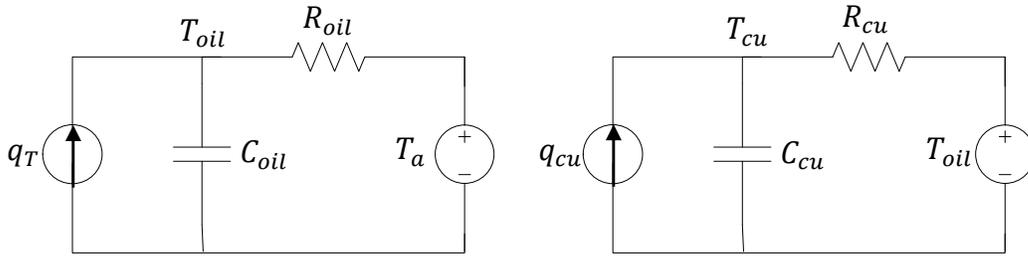


Figura 45. Circuitos térmicos para el modelo híbrido.

La parte térmica del modelo se compone de dos circuitos RC (Fig. 45) como; el primero entrega la temperatura del aceite superior  $T_{oil}$ , y el segundo la temperatura promedio de los conductores de cobre  $T_{cu}$  (usada para calcular la resistencia eléctrica variable).

Implementando los bloques en Simulink se realiza una simulación de la prueba realizada al transformador T6. Los parámetros utilizados son los respectivos al equipo T6, presentados en las Tablas 30, 34 y 35. Los resultados se muestran en la Fig. 46 y se comparan con los resultados medidos y los obtenidos con el modelo térmico independiente en 3.4.2.

### Modelación Test de temperatura T6

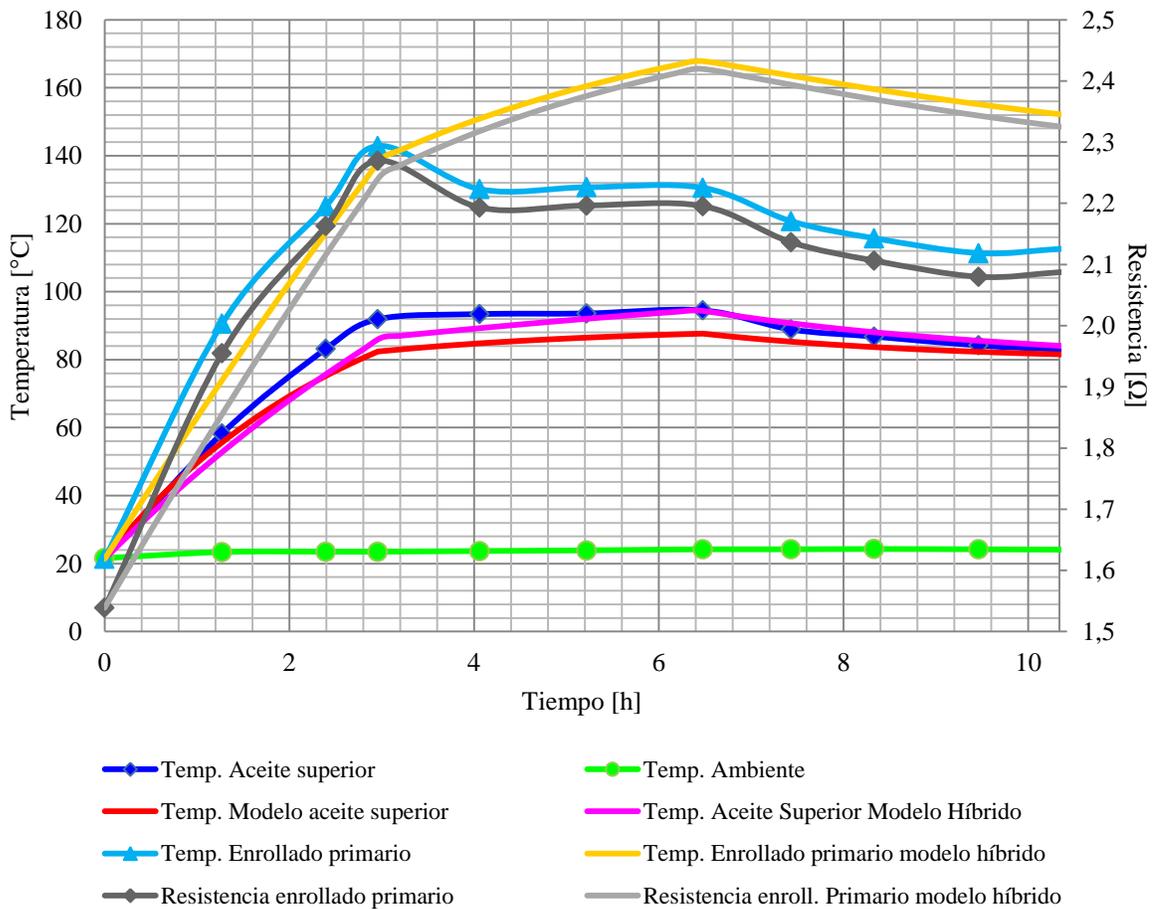


Figura 46. Modelación test de temperatura T6.

En la Tabla 36 se muestra las mediciones de temperatura del aceite superior, los valores entregados por la simulación y el error asociado. Finalmente el error promedio es de un 3,45%.

Tabla 36. Resultados de simulación del modelo híbrido.

Tiempo	Temperatura medida	Temperatura estimada	Diferencia de temperatura	Error
[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]
0,00	21,4	21,4	0,0	0,0%
1,27	58,3	52,8	5,5	9,5%
2,39	83,2	75,7	7,5	9,0%
2,96	91,9	85,8	6,1	6,7%
4,06	93,4	89,3	4,1	4,4%
5,22	93,6	92,0	1,6	1,7%
6,48	94,5	94,3	0,2	0,3%
7,43	88,9	90,7	1,8	2,1%
8,33	86,8	88,1	1,3	1,5%
9,46	84,2	85,6	1,4	1,6%
10,36	83,0	84,1	1,1	1,3%
<b>Promedio</b>			<b>2,8</b>	<b>3,45%</b>

# Capítulo 4

## Análisis de resultados

### 4.1 Construcción de los prototipos

#### 4.1.1 Transformadores de microondas

Del total de los 12 MOT recopilados se observa poca variación en las dimensiones de los transformadores de microondas chilenos, a diferencia del grupo de 13 transformadores norteamericanos reunidos por el equipo Microformer donde estos varían bastante en tamaño y potencia. No obstante, a pesar de escoger 6 transformadores similares en tamaño sus respuestas eléctricas y térmicas difieren. Estas diferencias alertan la importancia de estudiar uno a uno los transformadores de microondas, al menos de forma básica, debido a que el desarrollador de Microformers usualmente desconoce las condiciones de operación previas de cada MOT.

#### 4.1.2 Extracción de barras magnéticas y adición de espiras al enrollado

El objetivo de extraer las barras magnéticas es disminuir la magnitud de las reactancias de fuga, mientras que con la adición de espiras al enrollado primario, se busca disminuir la corriente de excitación del transformador.

En la Fig. 47 se puede observar el cambio que sufre la impedancia de la rama serie del circuito equivalente del transformador. Se observa que al extraer las barras magnéticas la reactancia disminuye considerablemente. Mientras que, al añadir vueltas al enrollado de baja tensión, la resistencia serie aumenta normalmente frente a la adición de cobre al bobinado.

### Cambio en impedancia serie

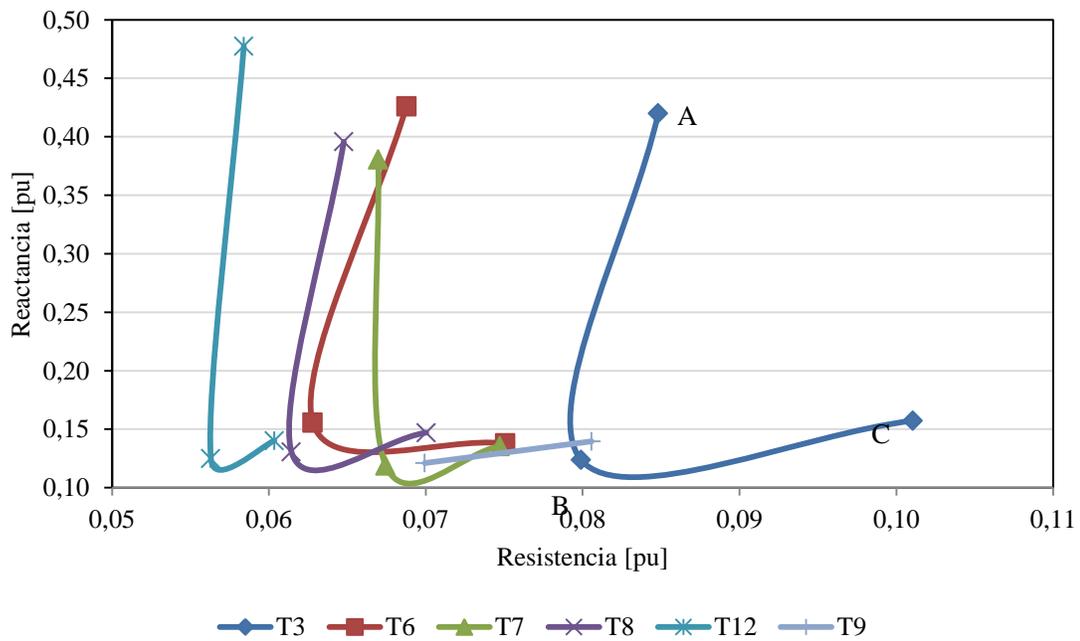


Figura 47. Variación de la impedancia serie. A: Sin modificación. B: Sin barras magnéticas. C: Espiras añadidas.

Al disminuir la magnitud de la reactancia de fuga la caída de tensión en la rama serie es inferior en presencia de un mismo flujo de corriente, esto produce una mejor regulación, siempre que la corriente de excitación no varíe. Esto último no sucede y la corriente de excitación aumenta al extraer las barras *magnéticas* (ver Tablas 20-21).

La adición de espiras al enrollado primario permite disminuir la corriente de excitación (ver Tabla 22), mejorando así la eficiencia del equipo. El aumento de la resistencia es natural al agregar conductor, aumentando las pérdidas Joule. Sin embargo, el efecto que tiene el aumento de pérdidas de carga en la eficiencia es mínimo considerando el resultado en la disminución de la corriente de excitación.

Tabla 37. Eficiencia y corriente de excitación.

Transformador T#	Sin modificaciones		Sin barras magnéticas		Con vueltas añadidas	
	Eficiencia	Corriente de excitación	Eficiencia	Corriente de excitación	Eficiencia	Corriente de excitación
	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]
T6	89,5%	1,746	89,6%	2,608	90,7%	1,512
T7	85,7%	1,759	85,9%	2,588	86,7%	0,651
T8	-	-	88,4%	2,359	89,1%	1,000
T9	88,5%	1,870	87,9%	2,641	89,2%	1,221
T10	89,6%	1,329	89,9%	1,869	90,1%	0,961
T11	88,1%	1,657	88,7%	2,253	89,1%	1,109

En la Tabla 37 se muestra la eficiencia y la corriente de excitación de los transformadores tras cada modificación, los valores se determinan a través del modelo eléctrico conectando una carga resistiva nominal (tensión y corriente nominales en enrollado primario). Se comprueba que la eficiencia siempre aumenta al agregar espiras al enrollado primario aun cuando la resistencia de enrollado primario se incremente.

## 4.2 Análisis de resultados y comparación con normativas y estándares

### 4.2.1 Resistencias en frío

Se observa en la Tabla 18 subsección 3.2.2 que al extraer las barras magnéticas las resistencias no varían considerablemente, las pequeñas variaciones se atribuyen a errores del instrumento de medición. La respuesta es natural pues no se ha modificado ningún enrollado.

La adición de espiras modifica la resistencia del enrollado primario, se muestra en la Tabla 38 (columna 7) el aumento en porcentaje de la resistencia en medida frío del enrollado primario. En cambio, la resistencia del enrollado secundario presenta variaciones despreciables, pues no se ha modificado.

**Tabla 38. Aumento de resistencia en frío.**

Transformador T#	Sin barras magnéticas		Con espiras adicionales		Variación		
	Resistencia enrollado primario	Resistencia enrollado secundario	Número espiras añadidas	Resistencia enrollado primario	Resistencia enrollado secundario	Resistencia enrollado primario	Resistencia enrollado secundario
	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	-	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[%]	[%]
T6	1,83	110,75	15	1,92	110,99	5,23%	0,22%
T7	2,42	216,58	42	2,77	216,79	14,08%	0,10%
T8	2,56	115,26	22	2,90	116,13	13,14%	0,75%
T9	2,17	132,85	20	2,36	133,03	8,69%	0,13%
T10	2,03	123,76	17	2,27	124,10	11,83%	0,28%
T11	2,27	124,90	18	2,65	124,53	16,71%	-0,29%
Promedio						11,61%	0,20%

## 4.2.2 Razón de transformación

En la Tabla 19 de la subsección 3.2.3 se muestran los promedios de las mediciones de razón de transformación para cada transformador y en cada etapa de prueba. La razón de transformación debería permanecer invariable al extraer las barras magnéticas, pues no se ha variado la razón de vueltas, aun así se presenta una pequeña variación. Las mediciones realizadas no deben distar en más de un 1% del promedio de las mediciones de razón de transformación, de acuerdo a 2.5.4.2. En el caso de los transformadores sin modificación y sin barras magnéticas esto no se logra, pues el transformador de microondas está diseñado para operar con núcleo saturado, esto es por motivos económicos ya que permite disminuir las dimensiones de diseño. Las variaciones en la razón al extraer las barras magnéticas se atribuyen a estos errores.

Por otra parte, al añadir espiras al enrollado primario se busca igualar las razones de transformación y estandarizar las tensiones secundarias de los equipos. La tensión secundario escogida de 2kV frente a una alimentación en primario de 220V, resulta en una razón de 9,09. En la Tabla 37 se muestra el error con respecto objetivo.

**Tabla 39. Error con respecto a razón objetivo.**

<b>Transformador T#</b>	<b>Razón de transformación</b>	<b>Error c/r a razón objetivo</b>
T6	9,16	-0,79%
T7	9,07	0,19%
T8	9,18	-0,98%
T9	9,08	0,09%
T10	9,14	-0,54%
T11	9,13	-0,43%
Promedio	9,13	-0,41%
Desv. Estándar	0,04	
<b>Razón objetivo</b>	<b>9,091</b>	

En la Tabla 39 se constata que los errores con respecto a la razón de transformación buscada son inferiores al 1%. Antes de la adición de espiras la desviación estándar era de un 4% aproximadamente (Tabla 19), la cual se reduce a un 0,4%.

Con estos resultados la tensión secundaria de cada transformador es aproximadamente igual entre equipos al aplicar una misma tensión de entrada, lo que anula el riesgo de corrientes peligrosas para los dispositivos al realizar interconexiones entre Microformers.

El tener razones de transformación muy cercanas entre transformadores facilita la conexión de unidades en paralelo. Esto es atractivo cuando se quiere conectar consumos o equipos cuyo requerimiento de potencia es mayor a la de un solo Microformer.

### 4.2.3 Polaridad

La polaridad de los transformadores no es siempre la misma, pues varía entre diferentes MOT. Para cada conexión del transformador con sus respectivos bornes en la tapa del contenedor se realizó una rápida prueba de polaridad con fuente continua (*inductive kick*) repitiendo la operación con el transformador sellado en los bornes externos comprobando que la polaridad sea aditiva. Esta manipulación es de vital importancia porque existe el riesgo de interconectar transformadores con polaridad equivocada poniendo en peligro el equipo y especialmente al instalador.

### 4.2.4 Prueba de pérdidas de vacío y corriente de excitación

La corriente de excitación del Microformer es una fracción importante de la corriente de carga del transformador, esto se puede observar en la Tabla 40, donde los transformadores sin modificaciones promedian una corriente de excitación igual a un 40,1% de la corriente nominal.

**Tabla 40. Corriente de excitación y pérdidas de vacío referidas a 20°C.**

Transformador T#	Sin modificación		Sin barras magnéticas		N. de espiras añadidas	Con espiras adicionales	
	Corriente de excitación	Pérdidas corregidas	Corriente de excitación	Pérdidas corregidas		Corriente de excitación	Pérdidas corregidas
	[%Inom]	[W]	[%Inom]	[W]		[%Inom]	[W]
T6	43,3	37,5	55,5	45,2	15	32,4	34,0
T7	42,6	50,5	54,5	60,0	42	14,0	34,1
T8			50,4	45,4	22	21,4	29,6
T9	44,0	41,6	54,6	53,5	20	26,1	34,4
T10	30,9	33,8	39,8	39,9	17	20,4	30,5
T11	39,7	43,0	48,7	50,0	18	23,6	35,6
<b>Promedio</b>	<b>40,1</b>	<b>41,3</b>	<b>50,6</b>	<b>49,0</b>		<b>23,0</b>	<b>33,0</b>

La extracción de las barras magnéticas se hace para disminuir la impedancia serie del transformador, no tiene por objeto beneficiar las variables de esta prueba. En efecto, la corriente de excitación aumenta (Tabla 40).

Al añadir espiras al enrollado primario se aumenta el número  $N_1$  de la ecuación (39), disminuyendo el flujo máximo  $B_{máx}$  y obteniendo una menor exigencia de corriente de excitación.

La adición de espiras reduce el promedio de las corrientes de excitación de un 40,1% de la corriente nominal (5A), a un 23% para el conjunto de transformadores, disminuyendo la corriente de excitación a aproximadamente la mitad del valor promedio original.

Adicionalmente, al disminuir la corriente de excitación las pérdidas en el núcleo disminuyen en, aproximadamente, un 20% con respecto a los valores originales.

La corriente de excitación se puede disminuir aún más añadiendo más espiras a los enrollados primarios siempre que quede espacio en la ventana dejada por la extracción de las barras magnéticas. Sin embargo, al aumentar demasiado la resistencia del bobinado de baja tensión se incrementan las pérdidas de carga y la temperatura de operación se eleva perjudicando la seguridad del dispositivo.

De acuerdo a la norma chilena (Tabla 12) la corriente de excitación de un transformador monofásico de 3kVA tiene un límite máximo de un 6,5%. Los transformadores recopilados son de una potencia de 1kVA aproximadamente, para el ciclo de trabajo de un horno microondas. Si se considera el mismo límite, ninguno de los transformadores cumple esta restricción.

#### 4.2.5 Pérdidas de carga y voltaje de impedancia

En la Tabla 41 se resumen los resultados de tensión de impedancia en porcentaje de la tensión nominal (220V) y las pérdidas de carga corregidas a la temperatura de referencia (85°C).

**Tabla 41. Voltaje de impedancia y pérdidas de carga referidas a 85°C.**

Transformador T#	Sin modificación		Sin barras magnéticas		Con espiras adicionales		
	Voltaje de impedancia	Pérdidas Corregidas	Voltaje de impedancia	Pérdidas Corregidas	Número de espiras	Voltaje de impedancia	Pérdidas Corregidas
	[%]	[W]	[%]	[W]	-	[%]	[W]
T6	49,97	79,75	14,99	77,74	15	12,75	49,31
T7	44,89	116,29	16,69	113,98	42	20,30	132,43
T8			15,38	83,00	22	17,45	105,69
T9	40,51	92,69	15,12	89,77	20	16,85	100,47
T10	41,79	88,82	16,06	88,17	17	18,80	107,25
T11	44,82	94,49	18,76	94,10	18	16,45	94,35
Promedio	44,40	94,41	16,17	91,13		17,10	98,25

Las barras magnéticas ofrecen un camino magnético para los flujos de fuga, por tanto es necesaria una tensión en cortocircuito alta para lograr la corriente nominal. En efecto, en la Tabla 41, el valor promedio para el voltaje de impedancia es un 44,4% de la tensión nominal. En 2.3.6.2 se revisa que esta tensión debe ser inferior al 12%.

Al extraer las barras magnéticas, el voltaje de impedancia disminuye considerablemente a un 16%, lo cual no varía en demasía al añadir espiras a los enrollados primarios. No obstante, las pérdidas de carga aumentan al añadir conductor al bobinado de baja tensión. En efecto, se analiza anteriormente el aumento en la resistencia del enrollado, lo que afecta negativamente la respuesta térmica del transformador.

Por último, realizadas las pruebas de pérdidas de vacío y de carga, se puede obtener las pérdidas totales de cada transformador. En las Tablas 42 – 43 se presentan las pérdidas totales para cada modificación.

**Tabla 42. Pérdidas totales. Transformadores sin modificación y sin barras magnéticas.**

Transformador T#	Sin modificación				Sin barras magnéticas			
	Pérdidas de vacío	Pérdidas de carga	Pérdidas Totales	Pérdidas Totales	Pérdidas de vacío	Pérdidas de carga	Pérdidas Totales	Pérdidas Totales
	[W]	[W]	[W]	[%]	[W]	[W]	[W]	[%]
T6	37,5	79,75	117,28	11%	45,2	77,74	122,96	11%
T7	50,5	116,29	166,8	15%	60	113,98	174,01	16%
T8					45,4	83	128,38	12%
T9	41,6	92,69	134,34	12%	53,5	89,77	143,27	13%
T10	33,8	88,82	122,62	11%	39,9	88,17	128,08	12%
T11	43	94,49	137,52	13%	50	94,1	144,1	13%
<b>Promedio</b>	41,3	94,41	<b>135,71</b>	<b>12%</b>	49	91,13	<b>140,13</b>	<b>13%</b>

**Tabla 43. Pérdidas totales. Transformadores con espiras añadidas.**

T#	Con espiras adicionales				
	N. de espiras añadidas	Pérdidas de vacío	Pérdidas de carga	Pérdidas Totales	Pérdidas Totales
	-	[W]	[W]	[W]	[%]
T6	15	34	49,31	83,27	8%
T7	42	34,1	132,43	166,53	15%
T8	22	29,6	105,69	135,29	12%
T9	20	34,4	100,47	134,85	12%
T10	17	30,5	107,25	137,76	13%
T11	18	35,6	94,35	129,92	12%
<b>Promedio</b>		33	98,25	<b>131,27</b>	<b>12%</b>

Se puede observar que luego de las modificaciones las pérdidas totales no varían considerablemente, pues experimenta un aumento al extraer las barras magnéticas y luego una disminución al añadir vueltas al enrollado primario.

La norma chilena citada en 2.5.7 impone límites para las pérdidas totales, las cuales son de 140W para transformadores monofásicos de 3kVA y 7620V. Estos y los demás valores de la Tabla 12, hacen suponer que el límite para un transformador de 1kVA y 2000V, como el Microformer, sería inferior a 140W. No obstante, con excepción del transformador T7 todos los transformadores satisfacen el límite de 140W, el cual se considera para una temperatura de 75°C, mientras que en las Tablas 42 – 43 las pérdidas de vacío se refieren a 20°C y las de carga a 85°C.

## 4.2.6 Temperatura

Debido a que el MOT es un equipo diseñado para operar en períodos de tiempo del orden de los minutos, se espera del MOT un aumento de temperatura por sobre los valores de transformadores de poder convencionales. Por esta razón, es importante estudiar la respuesta térmica del Microformer.

Las variables examinadas son la temperatura del aceite superior, del aceite inferior y la temperatura promedio del enrollado primario. La diferencia entre las temperaturas mencionadas y la temperatura ambiente se muestra para cada transformador en la Tabla 44.

**Tabla 44. Aumentos de temperatura.**

Transformador T#	Volumen de aceite	$\Delta$ Temperatura aceite superior	$\Delta$ Temperatura aceite inferior	$\Delta$ Temperatura promedio de enrollado	Pérdidas totales
	[L]	[°C]	[°C]	[°C]	[W]
T6	2	54,3	65,2	116,2	116,33
T9	2	69,4	78,5	154,1	152,00
T10	1,5	73,4	65,1	151,8	137,76
T8	1,5	77,0	83,1	154,3	139,74
T11	1,5	77,1	82,3	150,6	137,52
T9	1,5	77,3	82,7	152,2	152,00
T7	1,5	-	-	-	166,53
<b>Promedio</b>		<b>71,4</b>	<b>76,2</b>	<b>146,5</b>	<b>143,1</b>

Los transformadores con menor alza de temperatura de aceite fueron los llenos con dos litros de aceite.

Para T9 se realiza la prueba con ambos volúmenes de aceite. La temperatura del aceite superior medida disminuye en 13°C al pasar de 1,5L a 2,0L, aunque esto puede ser debido a que la termocupla está más lejos del transformador en el último caso. La termocupla ubicada a la misma distancia del transformador en ambos casos es la del fondo del volumen de líquido, esta mide una mejoría 4,2°C. En cambio, la temperatura promedio del enrollado primario permanece aproximadamente constante. De lo anterior, se concluye que el aumento de 1,5 a 2L de aceite no aporta a un enfriamiento valioso de la temperatura de enrollado.

La norma chilena citada en 2.5.7 define como límite 65°C al aumento de temperatura promedio del enrollado medido por resistencia. El Microformer no satisface este límite en estas condiciones, aún al alimentarse con 3,5A (70% de la corriente nominal). No obstante, el diseño del transformador es tal que soportaría hasta 200°C (clase 200 ó clase H), por tanto el aumento promedio de temperatura de 146,5°C satisface el límite de placa, aún para un ciclo de trabajo de 3,5A por un período de 11 horas.

En 2.5.3.3 se establece que la potencia nominal de un transformador debe ser aquella que este puede suministrar por un lapso específico de tiempo, a frecuencia y tensión secundaria nominales, sin exceder las limitaciones de alza de temperatura. Esta condición impone una restricción sobre la corriente nominal del Microformer, la cual se debe disminuir hasta un valor que produzca una respuesta térmica dentro de los límites establecidos.

Utilizando el modelo híbrido (3.3.4) se prueba diferentes corrientes de enrollado primario y se encuentra que, para el transformador T6, la corriente nominal debe ser disminuida de 5A a 2,93A. La potencia del equipo T6 sería entonces de 645VA, en vez de 1,1kVA.

Para refrigerar mejor el Microformer, a fin de lograr una temperatura inferior de operación, se debe considerar un aceite de densidad muy baja, de manera que el líquido fluya dentro del contenedor disipando el calor en sus caras. El aceite utilizado es un tipo 15W-40, viscosidades más bajas serían 10W o 5W.

Por otra parte, los transformadores convencionales utilizan radiadores para ampliar la superficie de disipación y ofrecer un camino para el flujo de aceite. Una forma de disminuir la temperatura, es modificando o cambiando el contenedor del Microformer, con el objeto de ampliar la superficie en contacto con el aire y obtener una mayor transferencia de calor al medio externo.

#### **4.2.7 Eficiencia y regulación**

Los resultados de la prueba con carga resistiva expuestos en la Tabla 27 entregan un promedio de eficiencia igual a 93,3% y de regulación 6,5%, a 3,67A de corriente en enrollado primario. Las normas y estándares citados en el capítulo 2 no establecen límites directos sobre la eficiencia y la regulación. No obstante, están implícitos en las restricciones de impedancia del transformador, el nivel de corriente de excitación y las pérdidas totales.

### **4.3 Modelación**

#### **4.3.1 Resultados modelo eléctrico**

Los errores del modelo eléctrico son inferiores al 6% en el caso de la potencia de salida, la cual reúne los errores de la corriente y tensión secundarias. El porcentaje de error en promedio es un 2%.

El modelo del circuito equivalente es preciso pues abarca casi todos los fenómenos electromagnéticos que ocurren en el equipo transformador. Sin embargo, los errores podrían mejorar al encontrar una mejor manera de separar las resistencias y reactancias  $r_1$ ,  $r_2'$ ,  $x_1$  y  $x_2'$ , las cuales se suponen equivalentes.

Por otra parte, para expresar la impedancia en por unidad del transformador se escoge una de las potencias conocidas (1150W) de los transformadores. Luego, la impedancia base es de  $46\Omega$ . En la Tabla 45 se muestran las impedancias de cada transformador.

**Tabla 45. Impedancia serie en porcentaje, potencia base 1150W.**

<b>Transformador T#</b>	<b>Impedancia serie [%]</b>
T6	15,25%
T7	18,69%
T8	16,12%
T9	15,48%
T10	16,29%
T11	15,71%
<b>Promedio</b>	<b>16,26%</b>

El valor máximo de impedancia impuesto por la norma chilena es de un 4%, los Microformers no alcanzan satisfacer la impedancia requerida. No obstante, la impedancia se logra disminuir de un promedio de 42,6% (transformadores sin modificación) a un 16,26% al término de las modificaciones.

### 4.3.2 Resultados modelo térmico

De los resultados obtenidos en la aproximación por una función exponencial se verifica que es el circuito RC análogo térmico es adecuado para predecir matemáticamente el comportamiento de la temperatura en el aceite y en los enrollados. No obstante, la respuesta del modelo térmico, con los parámetros determinados, no se ajusta con precisión a los cambios de temperatura de la prueba de escalones de corriente, en particular para las corrientes desiguales a 3,5A. El error promedio en esta prueba es de 5,46%. La dependencia del modelo térmico con respecto al eléctrico explica por qué se obtiene una respuesta imprecisa al considerar el modelo térmico independiente.

Los estándares nombrados en el capítulo 2 establecen como alternativa para la determinación de las temperaturas de aceite y de enrollado (promedio y máxima) la utilización de un modelo térmico adecuado. Sin embargo, se considera en el modelo propuesto [11] conocido el aumento nominal de temperaturas de aceite y enrollado, lo mismo en [9], [10]. De lo anterior, surge la necesidad de realizar pruebas de calentamiento toda vez que se desconozcan las temperaturas nominales del transformador.

### **4.3.3 Resultados modelo híbrido**

El modelo híbrido responde con un error igual a 3,45% en la prueba de calentamiento por cortocircuito con escalones de corriente. La precisión del modelo eléctrico permite simular de forma sencilla el cortocircuito y la simplificación fasorial no constituye una fuente de propagación de error hacia el modelo completo, debido a que la constante de tiempo del modelo eléctrico, del orden de los milisegundos, es mucho menor que las constantes de tiempo de los modelos térmicos, del orden de las centenas de segundos.

De los resultados obtenidos, se concluye que la variación de la resistencia eléctrica con la temperatura y, como consecuencia, el cambio en las pérdidas no es despreciable en la operación del Microformer. Debido a que, producto de sus altas temperaturas de operación, las variaciones de la resistencia y las pérdidas con respecto a la temperatura son mayores que en transformadores convencionales. De lo anterior, es importante registrar los cambios de temperatura del Microformer en operación, ya sea midiendo las temperaturas directamente, o bien, determinarlas a partir del modelo híbrido utilizando un registro en el tiempo de la tensión o corriente de alimentación.

# Capítulo 5

## Conclusiones y trabajo futuro

Las modificaciones que se efectúan en la construcción del Microformer se traducen en mejoras electromagnéticas importantes entre el transformador original del horno microondas hasta completar su embalaje. No obstante, esta adaptación presenta los siguientes compromisos:

- El añadir espiras al enrollado primario disminuye positivamente la corriente de excitación, pero compromete la tensión del lado secundario disminuyéndola al modificar la razón de transformación. La disminución de la corriente de excitación propone una mejor regulación y eficiencia. Sin embargo, una tensión inferior puede significar una corriente mayor en el enrollado secundario para alimentar un mismo consumo, luego el propósito de reducir las pérdidas de transmisión de energía puede verse dificultado.
- El aumento en la resistencia del enrollado primario repercute en un aumento de las pérdidas de carga y en la impedancia serie del transformador. La consiguiente alza de temperatura puede ser perjudicial para la seguridad del equipo y mermar su vida útil. Existe un compromiso entre la disminución de la corriente de excitación por adición de espiras al bobinado de baja tensión y el aumento de temperatura del dispositivo.

La variación de la reactancia serie del transformador, al extraer las barras magnéticas queda determinada por las pruebas de cortocircuito o de pérdidas de carga. En efecto, se comprueba que los valores de reactancia disminuyen de 0,42 a 0,13 pu. La relación es considerada en el desarrollo del modelo del circuito equivalente donde las reactancias serie representan los flujos de fuga, que encuentran un camino magnético en las barras magnéticas para no enlazar ambas bobinas y no aportan al efecto transformador.

Por otra parte, los modelos térmicos revisados requieren como parámetro las temperaturas nominales del transformador. En el caso de no conocerse deben realizarse pruebas de calentamiento para determinarlas. Asimismo, los parámetros del modelo térmico utilizado se determinan a través de pruebas de calentamiento.

El modelo híbrido, con una precisión promedio del 3,45% en la prueba de escalones de corriente, resulta satisfactorio para obtener las temperaturas durante la prueba de escalones de

corriente, no así el modelo térmico independiente, con un error promedio del 5,46%, pues no considera la relación térmico-eléctrica entre la resistencia y la temperatura. Lo más destacable del modelo es que requiere como entradas la corriente o tensión de alimentación, la carga y la temperatura ambiente, más fácil de obtener que alguna de las temperaturas interiores del transformador.

Los estándares IEEE serie C57 y la normativa chilena citada, establecen restricciones que se deben cumplir en transformadores de poder y distribución, las que se resumen en la Tabla 46, junto a su nivel de cumplimiento por parte del Microformer.

**Tabla 46. Satisfacción de restricciones, Microformer.**

Documento	Restricción	Nivel de cumplimiento
IEEE Std. C57.	Frecuencia eléctrica de 60 Hz	No aplica en Chile
	Pruebas de medición de resistencias en frío, razón de transformación, polaridad, pérdida de carga y vacío, determinación de temperatura.	Se cumplen
	Aumento de temperatura promedio de enrollado medida por resistencia < 65°C	No se cumple. Menor aumento de temperatura alcanzada 116°C, por T6 en cortocircuito a 3,5A
	Polaridad aditiva	Se cumple la polaridad externa en la construcción del embalaje
NSEG16.78 de SEC [20] para transformadores monofásicos de distribución de 3kVA	Corriente máxima de excitación 6,5% de corriente nominal	No se cumple. Menor corriente de excitación 14%, T7. Promedio 23%.
	Impedancia a 15°C: 4% en base propia	No se cumple por ningún transformador. Impedancia promedio 15%.
	Pérdidas totales < 140W.	Cumplen todos los equipos, menos el transformador T7
	Aumento de temperatura de enrollado medido por resistencia: 65°C	No se cumple. Menor temperatura 114°C, T6. Promedio 146,5°C

Las pruebas eléctricas de los estándares IEEE serie C57 pueden realizarse casi en su totalidad en los transformadores de microondas, salvo en el caso de la prueba de razón de transformación donde antes de añadir vueltas al enrollado primario la saturación no permite cumplir los límites de error impuestos. Sin embargo, al añadir espiras al primer enrollado se puede cumplir la restricción.

Las pruebas térmicas realizadas al transformador entregan temperaturas fuera de los límites impuestos por la norma chilena y recomendados por los estándares internacionales del IEEE. Sin embargo, se mantienen debajo del límite de temperatura de diseño de sus aislaciones.

En resumen, el transformador presenta mejoras importantes desde su extracción del horno microondas. Sin embargo, el incumplimiento de los requerimientos y normativas expuestas, en particular los límites de temperatura, revelan riesgos de seguridad para el equipo y especialmente para las personas presentes en una eventual falla del dispositivo. En respuesta a lo anterior se proponen los siguientes tres escenarios:

1. Reducir la corriente nominal del Microformer: el nuevo valor de la corriente debe ser tal que las temperaturas resultantes de la prueba de calentamiento estén dentro de los límites establecidos por el estándar internacional y la norma chilena.
2. Estudiar las condiciones de operación a las que se someterá un Microformer antes de la instalación. Luego, conectar el transformador sólo si estas condiciones son menos exigentes que la prueba de calentamiento. Es más, utilizando el modelo híbrido es posible determinar las temperaturas que alcanzaría el equipo bajo un régimen de carga determinado. De esta forma, es posible asegurar límites térmicos para el equipo de acuerdo a condiciones de operación particulares. Adicionalmente, se recomienda implementar un interruptor térmico que saque de operación al dispositivo cuando alcance temperaturas fuera de los límites establecidos.
3. Situar los Microformers sólo en zonas aisladas, donde no puedan acceder personas que puedan sufrir daños ante una falla del equipo.

Como trabajo futuro se propone la disminución de la temperatura de operación del equipo modificando o cambiando el contenedor, junto con la búsqueda de un aceite de bajo costo y de baja viscosidad. Con respecto a la adición de espiras al enrollado primario, se plantea encontrar un punto óptimo entre las vueltas añadidas y la eficiencia asociada, lo cual depende de las variaciones de: la tensión secundaria, la resistencia de enrollado primario y la corriente de excitación. Por otra parte, considerando el concepto de “fuente abierta” (*open source*) del Microformer y su expansión en diferentes universidades, se sugiere la construcción de una base de datos de pruebas centralizada, cuyo ingreso de resultados se realice por Internet y, de esta forma, poder contar con una biblioteca de fichas de transformadores de diferentes fabricantes, tiempos de uso, tamaños, potencias nominales, etc. Lo anterior permitiría establecer comparaciones y relaciones que posibilitarían una mejor y más rápida evaluación de un nuevo transformador de microondas.

# Bibliografía

- [1] D. Ludois, P. Mendoza, y J. Lee, «The Microformer, Low Cost Electrification in Developing Nations using Post-Consumer Resources», 2011.
- [2] W. Brokering C., R. Palma B., y L. Vargas D., *Ñom lufke (rayo domado) o los sistemas eléctricos de potencia*, 1ª ed. Pearson Prentice Hall, 2008.
- [3] *Transformadores, Publicación C/4*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica: , 1996.
- [4] D. Ludois, J. Lee, P. Mendoza, y G. Venkataramanan, «IEEE Global Humanitarian Technology Conference», *Reuse of Post-consumer E-waste for Low Cost Micropower Distribution*, 2011.
- [5] Fulkerson, W., Levine, M.D., Stinton, J.E., Gadgil, A., «Sustainable, efficient electricity service for one billion people». *Energy for Sustainable Development*, 2005.
- [6] S. J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, 3ª Edición. Mc Graw Hill, 2000.
- [7] A. E. Fitzgerald, C. J. Kingsley, y S. D. Umans, *Electric Machinery*, 6th Edition. Mc Graw Hill, 2003.
- [8] L. Silva Bijit, *Redes eléctricas*. Pearson Prentice Hall.
- [9] D. Susa, M. Lehtonen, y H. Nordman, «IEEE Transactions on Power Delivery», *Dynamic Thermal Modelling of Power Trnsformer*, vol. 20, NO 1, 2005.
- [10] G. Swift, T. S. Molinski, y W. Lehn, «IEEE Transactions on Power Delivery», *A Fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling - Part I: Theory and Equivalent Circuit*, vol. 16 NO. 2, p. 2001.
- [11] Transformer Committee, «IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators». IEEE Power & Energy Society, 2011.
- [12] K. Karsai, D. Kerényi, y L. Kiss, *Large Power Transformers*. New York: Elseiver: , 1987.
- [13] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, y A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th Edition. John Wiley & Sons, 2010.
- [14] L. W. Pierce, «IEEE Transactions on Power Delivery», *An investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding*, vol. 7, no. 3, 1992.
- [15] Transformer Committee, «IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers». IEEE Power & Energy Society, 2010.
- [16] Transformer Committee, «IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers». IEEE Power & Energy Society, 2010.
- [17] Transformer Committee, «IEEE Standard Terminology for Power and Distribution Transformers». IEEE Power & Energy Society, 2010.
- [18] Transformer Committee, «IEEE Standard for Standard Terminal Markings and Connections for Distribution and Power Transformers». IEEE Power & Energy Society, 2011.
- [19] Transformer Committee, «IEEE Standard Test Procedure for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Liquid-Immersed Distribution and Power Transformers». IEEE Power & Energy Society, 2011.
- [20] Ministerio de economía, «NSEG 16.E.n.78. Electricidad. Especificaciones de transformadores de distribución 13,2 kV». .

[21] «Make Your Microformer | The Microformer». [Online]. Available: <http://www.microformer.org/make-your-microformer/>. [Accessed: 21-nov-2012].