

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO  
INDUSTRIAL, PARA APLICACIONES ACADÉMICAS EN EL LABORATORIO  
DE ELECTRICIDAD INDUSTRIAL, DEL SENA POPAYÁN.**

**DILIA IRENE CADENA IBARRA**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
PROGRAMA DE INGENIERIA FÍSICA  
POPAYÁN  
2017**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO  
INDUSTRIAL, PARA APLICACIONES ACADÉMICAS EN EL LABORATORIO  
DE ELECTRICIDAD INDUSTRIAL, DEL SENA POPAYÁN.**

**DILIA IRENE CADENA IBARRA**

**TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PASANTÍA COMO REQUISITO  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA FÍSICA**

**DIRECTOR  
DR. CARLOS ALBERTO RINCÓN LÓPEZ  
PROFESOR TITULAR DEL DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
PROGRAMA DE INGENIERIA FÍSICA  
POPAYÁN  
2017**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Director

---

PhD. Carlos Alberto Rincón López

Jurado 1

---

Ingeniero Eléctrico Carlos Martínez

Jurado 2

---

Ingeniero Físico Eduardo Cañola

Fecha de sustentación: Popayán, 19 de Mayo de 2017.

*El presente trabajo está dedicado a Dios,  
por permitirme llegar hasta este momento y alcanzar esta meta en mi vida,  
por darme cada día su aliento de vida y disfrutar de todas sus grandezas.*

*A mis maravillosos padres Luisa y Artemio,  
por su paciencia, comprensión, apoyo incondicional en mi carrera,  
por su confianza en mí y por todo el amor que día a día he recibido de ellos.*

*A mis queridos hermanos Yanet y Henry,  
quienes fueron mis más fieles colaboradores en todo momento  
para alcanzar mis sueños y lograr mi profesión.*

*A mis compañeros y amigos,  
quienes siempre estuvieron conmigo motivándome en mis decisiones,  
por compartir su conocimiento, alegrías y tristezas.*

*“No hay secretos para el éxito. Este se alcanza preparándose,*

*Trabajando arduamente y aprendiendo del fracaso”*

*Colin Powell*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la prestigiosa Universidad del Cauca por brindarme la oportunidad de estudiar en sus instalaciones y brindarme, lo que estuviera a su alcance para culminar mi formación profesional.

A mi Asesor Javier Vidal, Ingeniero Eléctrico del SENA Popayán, por orientarme en mi pasantía y sugerirme técnicas que me ayudaron a cumplir con mi objetivo en mi práctica.

A los Jurados, el Ingeniero Eléctrico Carlos E. Martínez y el Ingeniero Físico Eduardo Cañola, por su disponibilidad y sugerencias en las correcciones de mi trabajo de grado modalidad de pasantía.

Expreso mi gratitud al SENA Popayán por permitirme realizar mi pasantía en sus instalaciones y su cooperación al facilitarme el conocimiento, espacio y los equipos necesarios en su laboratorio de Electricidad Industrial que fueron de vital importancia para llevar a cabo esta práctica.

Al Ingeniero Mauricio Cano, gerente de la empresa Transformadores SUNTEC de Medellín, por su confiabilidad en él envié de los materiales necesarios para la realización del proyecto.

Un reconocimiento especial al Ingeniero Martin Eduardo por facilitarme su espacio de trabajo para poder realizar los ensayos necesarios y de esta forma evaluar el funcionamiento del equipo.

A mi director el profesor Carlos Alberto Rincón por la oportunidad y confianza que depósito en mí y por ayudarme a mejorar mis habilidades en investigación, para desempeñarme como una excelente profesional.

A los profesores de Ingeniería Física y otros departamentos de la Universidad del Cauca, que durante toda mi carrera no solo me enseñaron sus conocimientos sino la parte humana y me brindaron su amistad.

A los estudiantes del SENA, Martín, Alejandro, Emidio y Wilmer que me brindaron su colaboración en la parte de construcción del proyecto y a mis compañeros y amigos por su apoyo y motivación en mi carrera por su colaboración y su compañía.

## CONTENIDO

	<b>PÁG.</b>
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>15</b>
<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>3</b>
<b>1. GENERALIDADES DE LOS TRANSFORMADORES .....</b>	<b>5</b>
1.1 Evolución .....	5
1.2 Definición .....	8
1.3 Clasificación.....	9
1.4 Componentes .....	10
1.4.1 Circuito eléctrico.....	10
1.4.2 Circuito magnético.....	11
1.4.3 Aislamientos.....	14
1.4.4 Placa de características .....	15
<b>2. FÍSICA DE LOS TRANSFORMADORES.....</b>	<b>17</b>
2.1 Leyes físicas de funcionamiento.....	17
2.2 Transformador ideal.....	20
2.2.1 Relación entre voltajes y corrientes.....	20
2.2.2 Convención de puntos para las fases .....	22

2.2.3	Impedancia.....	23
2.2.4	Acople de impedancias .....	24
2.2.5	Curva de histéresis.....	25
2.2.6	Diagrama fasorial .....	26
2.3	Transformador real .....	26
2.3.1	Relación entre voltajes y corrientes.....	27
2.3.2	Relación de corriente y convención de puntos.....	33
2.3.3	Circuito equivalente.....	34
2.3.4	Histéresis magnética .....	37
2.3.5	Diagrama fasorial .....	38
2.4	Problemas en los transformadores .....	39
2.4.1	Pérdidas .....	39
2.4.2	Refrigeración.....	42
2.4.3	Fugas magnéticas.....	43
2.4.4	Corrientes de excitación.....	44
<b>3.</b>	<b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR MONOFASICO</b>	
	<b>TIPO COLUMNA .....</b>	<b>45</b>
3.1	Metodología del diseño tipo columna .....	45
3.2	Cálculos empleando el diseño tipo columna.....	47
3.2.1	Calculo de la potencia de los devanados.....	47
3.2.2	Cálculo del número de espiras de los devanados.....	48
3.2.3	Cálculo del calibre del alambre de los devanados .....	49
3.3	Materiales utilizados .....	51



3.4	Construcción.....	52
3.4.1	Diseño de los devanados .....	52
3.4.2	Diseño del núcleo.....	55
3.4.3	Conexiones en el tablero.....	57
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA PARA LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>59</b>
4.1	Pruebas eléctricas .....	59
4.1.1	Prueba No.1: Resistencia de aislamientos.....	59
4.1.2	Prueba No. 2: Resistencia en los devanados.....	61
4.1.3	Prueba No. 3: Relación de transformación.....	63
4.1.4	Prueba No. 4: Verificación de polaridad y medición de polaridad aditiva y sustractiva .....	64
4.1.5	Prueba No. 5: Ensayo de vacío.....	66
4.1.6	Prueba No. 6: Ensayo de corto circuito .....	68
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y ANALISIS .....</b>	<b>71</b>
5.1	Equipos utilizados en las pruebas eléctricas .....	71
5.2	<i>Resultados de los ensayos eléctricos realizados.....</i>	<i>72</i>
5.2.1	Prueba No. 1: Resistencia de aislamientos.....	72
5.2.2	Prueba No. 2: Resistencia en los devanados.....	74
5.2.3	Prueba No. 3: Relación de transformación.....	75
5.2.4	Prueba No. 4: Verificación de polaridad y medición de polaridad aditiva y sustractiva .....	78
5.2.5	Prueba No. 5: Prueba de vacío .....	80
5.2.6	Prueba No. 6: Prueba de corto circuito .....	81

5.3	<i>Análisis de resultados</i> .....	83
5.4	Resultados de los cálculos de parámetros del transformador y su circuito equivalente. ....	89
5.5	Resultados de eficiencia y rendimiento.....	93
5.6	Simulación en Femm .....	94
<b>CONCLUSIONES</b> .....		<b>102</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....		<b>104</b>
<b>ANEXOS</b> .....		<b>107</b>
	ANEXO 1A. PLANOS DEL NUCLEO DEL TRANSFORMADOR .....	107
	ANEXO 1B. PLANOS DEL TABLERO Y LA BASE DEL TRANSFORMADOR .....	108
	ANEXO 2. TABLA DE CALIBRES DEL ALAMBRE DE COBRE .....	110
	ANEXO 3A. PRESUPUESTO DEL TRANSFORMADOR .....	111
	ANEXO 3B. ANALISIS DE PRESUPUESTO.....	112
	ANEXO 4A. CURVA DE MAGNETIZACIÓN DE LA PLACA DE ACERO AL SILICIO.....	113
	ANEXO 4B. CURVA MAGNETICA DE LA PLACA DE ACERO AL SILICIO EN EL PROGRAMA FEMM.....	115
	ANEXO 5. PLACA DE CARACTERISTICAS PARA EL TRANSFORMADOR MONOFASICO .....	116
	ANEXO 6. RECOMENDACIONES .....	118

## LISTA DE FIGURAS

PÁG.

Figura 1. Funcionamiento de la Bobina de Ruhmkorff [7] .....	6
Figura 2. Generador secundario de Gaulard y Gibbs[6] .....	7
Figura 3. Primer transformador de Ottó, Bláthy, Miksa Déri y Zipernowsky[7].....	7
Figura 4. Primer transformador de alimentación CA monofásico, de Stanley[7].....	8
Figura 5. Transformador real con carga conectado al secundario [15].....	9
Figura 6. Clasificación de los transformadores[1] .....	9
Figura 7. Arrollamientos alrededor del núcleo eléctrico de un transformador[9] ....	10
Figura 8. Arrollamientos simétricos, concéntricos y alternados [15] .....	11
Figura 9. a) Láminas a tope, b) láminas solapadas [15] .....	13
Figura 10. Núcleos: a) tipo columna, b) tipo acorazado [2].....	14
Figura 11. Placa de características de un transformador Monofásico[12] .....	16
Figura 12. a) Formulación general de la ley de ampere. b) Ejemplo específico de la ley de ampere de una bobina sobre un núcleo[14] .....	18
Figura 13. Determinación de la dirección del campo magnético por medio de la regla de la mano derecha[14] .....	18
Figura 14. Dibujo de un transformador ideal [12].....	21
Figura 15. Circuito transformador ideal con carga en el secundario[15].....	21
Figura 16. Circuito ideal en fase[16] .....	22
Figura 17. Circuito ideal en desfase[16].....	22
Figura 18. Impedancia equivalente de entrada y de salida[16].....	23
Figura 19. Circuito Thévenin[17].....	24
Figura 20. Transformador ideal acoplado con circuito Thévenin[17].....	24
Figura 21. Curva de magnetización de un transformador ideal[15].....	25
Figura 22. Diagrama fasorial de un transformador ideal[9] .....	26
Figura 23. Transformador real sin carga en el secundario [15].....	27
Figura 24. Circuito transformador real sin carga[15].....	27
Figura 25. Flujo mutuo y disperso en el núcleo del transformador real[15].....	28

Figura 26. a) Curva de magnetización del núcleo del transformador, b) Corriente de magnetización causada por el flujo en el núcleo[17].....	32
Figura 27. Corriente de pérdidas en el núcleo[17] .....	33
Figura 28. Corriente de excitación total[17] .....	33
Figura 29. Modelo del transformador referido a su circuito primario[17] .....	36
Figura 30. Modelo del transformador referido a su circuito secundario[17] .....	36
Figura 31. Circuito referido al lado primario [19] .....	36
Figura 32. Circuito referido al secundario [19] .....	36
Figura 33. Sin rama de excitación referido al primario[17].....	37
Figura 34. Sin rama de excitación referido al secundario[17] .....	37
Figura 35. Ciclo de histéresis del transformador real [21].....	38
Figura 36. Diagrama fasorial de un transformador real[9].....	38
Figura 37. Placas de acero al silicio y alambre de cobre [Empresa Transformadores SUNTEC de Medellín] .....	52
Figura 38. Molde aislante de los devanados.....	53
Figura 39. Maqueta para la construcción de los devanados.....	53
Figura 40. Bobinado primario.....	54
Figura 41. Bobinado secundario .....	54
Figura 42. Devanados.....	55
Figura 43. Devanados con material aislante .....	55
Figura 44. Cizalla eléctrica.....	56
Figura 45. Corte de las placas del núcleo magnético .....	56
Figura 46. Apilamiento de las placas de acero al silicio.....	56
Figura 47. Ajuste del núcleo magnético del transformador monofásico.....	56
Figura 48. Bases del núcleo magnético .....	57
Figura 49. Conexiones de las terminales del bobinado primario y secundarios ..	57
Figura 50. Transformador monofásico terminado, vista frontal y vista lateral. ....	58
Figura 51. Grafica tiempo resistencia[22] .....	61
Figura 52. Polarización con primario a tierra [22].....	61
Figura 53. Polarización con secundario a tierra [22] .....	61
Figura 54. Polarización primario a secundario[22] .....	61
Figura 55. Circuito para medir la resistencia de los devanados por el método de la caída de tensión[23]......	62
Figura 56. Circuito para medir la relación de transformación con el método de división patrón[25].....	63
Figura 57. Polaridad sustractiva[27].....	65
Figura 58. Polaridad aditiva[27] .....	65

Figura 59. Circuito polaridad aditiva [27].....	66
Figura 60. Conexión para la prueba de vacío del transformador[17] .....	67
Figura 61. Conexión para la prueba de corto circuito del transformador[17] .....	69
Figura 62. Resistencia de aislamientos en configuración A/T - A/B - B/T .....	72
Figura 63. Graficas resistencias de aislamiento A/T - A/B - B/T .....	73
Figura 64. Ensayo de resistencia en los devanados y equipo utilizado Micrómetro OM20 .....	74
Figura 65. Grafica de voltaje secundarios Vs resistencia .....	75
Figura 66. Ensayo relación de transformación.....	76
Figura 67. Medida de voltaje de entrada y salida y equipos utilizados Variac, Multímetro digital.....	77
Figura 68. Voltaje de entrada y voltaje de salida .....	77
Figura 69. Ensayo de polaridad aditiva y sustractiva, equipos utilizados Variac y multímetro digital.....	78
Figura 70. Polaridad aditiva .....	79
Figura 71. Polaridad sustractiva.....	80
Figura 72. Prueba de vacío.....	81
Figura 73. Montaje prueba de corto circuito y los resultados en el analizador de red.....	82
Figura 74. Circuitos equivalentes de cada transformador .....	92
Figura 75. Casos de flujo magnético, simulación en Femm.....	97
Figura 76. Resultados de fuerzas en cada caso .....	98
Figura 77. Caso 2: Condición de corto circuito, temperatura 0 segundos.....	99
Figura 78. Caso 2: Temperatura 60 segundos.....	100
Figura 79. Caso 5: temperatura en t=0seg .....	101
Figura 80. Caso 5: temperatura t= 60s .....	101

## LISTA DE TABLAS

PÁG.

Tabla 1. Corrientes y calibres según la tabla del anexo 2.....	50
Tabla 2. Materiales utilizados.....	51
Tabla 3. Estado de la aislación eléctrica IRAM - 2325[22].....	61
Tabla 4. Resultados de la prueba resistencia de aislamientos .....	73
Tabla 5. Resultado ensayo de resistencia en los devanados secundario .....	75
Tabla 6. Resultados del ensayo “Relación de transformación” .....	76
Tabla 7. Polaridad aditiva .....	79
Tabla 8. Resultados de ensayo polaridad de transformadores.....	80
Tabla 9. Datos de prueba de vacío .....	81
Tabla 10. Resultados ensayo de corto circuito .....	82
Tabla 11. Corrientes nominales en el devanado primario y en los secundarios ....	83
Tabla 12. Pérdidas totales y pérdidas por efecto Joule .....	83
Tabla 13. Resultados prueba de vacío y de corto circuito .....	89
Tabla 14. Resultados de $R_{eq}$ y $X_{eq}$ para cada uno de los devanados secundarios .	91
Tabla 15. Resultados de $R_{NP}$ y $X_{MS}$ para cada uno de los devanados secundarios	92
Tabla 16. Resultados de eficiencia y rendimiento.....	93
Tabla 17. Corrientes para el caso 1 .....	94
Tabla 18. Corrientes para el caso 2 .....	95
Tabla 19. Corrientes para el caso 3.....	95
Tabla 20. Corrientes para el caso 4 .....	95
Tabla 21. Fuerzas Axiales y Radiales para cada caso .....	99
Tabla 22. Caso 5: Perdidas en el cobre en cada devanado por efecto Joule .....	100

## GLOSARIO

**Devanado:** Vueltas de alambre conductor que tiene una bobina.

**Chapa magnética:** Es un acero especial fabricado para poseer determinadas propiedades magnéticas, el conjunto de chapas conforman el núcleo.

**Columnas:** Donde se colocan los devanados

**Culatas:** Son las partes que realizan la unión entre las columnas

**Ventanas del núcleo:** Espacios por los cuales pasan los devanados

**Juntas:** Uniones de las columnas con las culatas

**Flujo electromagnético:** Representado por la letra griega  $\Phi$ , la unidad de medida es el weber ( $Wb$ ), es una medida de la cantidad magnética que fluye por una superficie.

**Variac:** Transformador con varios devanados reductores conectados a un interruptor rotativo, con el fin de reducir el voltaje AC desde el devanado primario.

**Pinza de corriente:** Tipo especial de amperímetro que permite obviar el inconveniente de tener que abrir el circuito en el que se quiere medir la corriente para colocar un amperímetro clásico.

**Micrómetro OM20:** Equipo de “altas prestaciones” y de uso intuitivo, el micrómetro controla con precisión de resolución de  $0,1 \mu\Omega$ , la calidad de las conexiones gracias a la medida de baja resistencia.

**Multímetro digital:** Es un instrumento eléctrico portátil para medir directamente magnitudes eléctricas activas, como corrientes y potenciales (tensiones), o pasivas, como resistencias, capacidades y otras.

**Megger:** Es un generador de corriente continua de tipo magneto-eléctrico, movido electrónicamente, que suministra la corriente para llevar a cabo la medición, y el

mecanismo del instrumento por medio del cual se mide el valor de la resistencia que se busca.

**TTR (Transformador de relación de vueltas):** Mide la relación entre el número de espiras del secundario y del primario en transformadores de potencia, instrumentación y distribución en subestaciones o fábricas.

**Analizador de red:** Completa herramienta trifásica de medida y diagnóstico, mide prácticamente todos los parámetros del sistema eléctrico: tensión, corriente, frecuencia, potencia, consumo eléctrico (energía), desequilibrios y flicker (parpadeos), armónicos e interarmónicos.

**Factor de potencia (FP):** Relación entre la potencia activa,  $P$ , y la potencia aparente,  $S$ . Da una medida de la capacidad de una carga de absorber potencia activa. Por esta razón,  $FP = 1$  en cargas puramente resistivas; y en elementos inductivos y capacitivos ideales sin resistencia  $FP = 0$ .





## RESUMEN

En este trabajo de grado en modalidad de pasantía, realizado en el laboratorio de electricidad industrial del Sena-Popayán, se diseñó y construyó un transformador monofásico tipo columna para fines pedagógicos. El transformador consta de un embobinado primario y seis embobinados secundarios, contruidos con alambre de cobre, calibres apropiados y un número de vueltas que producen la ventaja de ser un elevador, igualador y reductor de voltaje en un mismo dispositivo eléctrico. Se definió una potencia de entrada del primario de 3.0 KV y la potencia total de los devanados secundarios de 2.6 KV. Se estableció en el primario un voltaje nominal de 220 V, y voltajes nominales de 380, 220, 120, 48, 24 y 12 V para los devanados secundarios. Para minimizar las perdidas magnéticas, el núcleo se construyó con placas de acero al silicio con espesores de 0.27 mm y con cortes de acuerdo al tipo de núcleo cerrado.

Las resistencias de aislamiento obtenidas por pruebas de aislamiento crecen significativamente con el tiempo, mostrando índices de polarización entre 1.5 y 3.29, observándose así una buena condición de aislamiento. Las resistencias en los embobinados fueron muy bajos del orden de los mili ohmios y crecen ligeramente para embobinados de alto voltaje. Las pruebas realizadas para obtener las relaciones de transformación arrojaron porcentajes de error por debajo de 4.5 %, y muestran una relación lineal entre el voltaje de salida y el voltaje de entrada, significando un buen comportamiento eléctrico para el transformador. El transformador alimentado por el primario con un voltaje de 236 V, en la prueba de vacío, registró una pérdida magnética de 13 W, este valor está muy por debajo de la potencia máxima de trabajo de este embobinado. Con el ensayo de corto

circuito y el de vacío se pudo encontrar los parámetros del transformador y sus circuitos equivalentes una eficiencia de 82,9% a 93% fue encontrada para los diferentes embobinados.

Usando un programa de simulación FEEM se logró determinar las densidades de flujo magnético para las condiciones de vacío y de cortocircuito, los cuales arrojaron un valor entre de 0,85 Teslas y 1,732 Teslas respectivamente.

Una base de acero y un panel fueron construidos con la información de los voltajes en el primario y en los secundarios para facilitar a los usuarios conocer las características de funcionamiento del transformador antes de usarse. Este transformador será usado como una herramienta pedagógica en el laboratorio de electricidad industrial del Sena en Popayán.

## INTRODUCCION

El transformador es una herramienta muy importante en la vida diaria ya que son los equipos encargados de transferir y distribuir la energía eléctrica proveniente de fuentes productoras de energía hasta llegar a nuestros hogares, existen muchos tipos de transformadores y tienen una gran variedad de aplicaciones como por ejemplo: en sistemas de transmisión de energía, sistemas de potencia, en sistemas eléctricos domésticos, en industrias, sistemas de soldadura eléctrica, en audiofrecuencia, en telecomunicaciones. Los transformadores han tenido una vertiginosa evolución e importancia tecnológica que ha sido indispensable incluir su estudio en ciertos programas académicos universitarios y tecnológicos.

El funcionamiento del transformador se basa en la ley de inducción de Faraday descubierta por el en el año 1831, la cual enuncio así: “La fuerza electromotriz inducida en una espira es igual a menos la rapidez de cambio del flujo magnético con respecto al tiempo”. Esta ley permitió desarrollar el dispositivo magnético de Faraday hasta lo que hoy se conoce como el transformador. Este permite básicamente elevar o disminuir un voltaje a través de dos bobinas o embobinados a través de un núcleo magnético. Su valor tecnológico ha permitido desarrollar aplicaciones como las que se mencionaron inicialmente en esta introducción.

En este trabajo en modalidad de pasantía se diseñó, construyo, y simulo un transformador monofásico para aplicaciones pedagógicas en el laboratorio de Electricidad Industrial del SENA Popayán, para que los estudiantes realicen sus prácticas relacionadas con su funcionamiento y conozcan el proceso de diseño y construcción de este.

El transformador se diseñó utilizando un modelo tipo columna con laminado a solape para la construcción del núcleo y devanados concéntricos paralelos debidamente aislados, con un devanado primario y seis secundarios los cuales realizan la función de ser elevador, de interconexión y reductor de voltaje. Posteriormente se le realizaron las pruebas eléctricas pertinente para verificar su correcto funcionamiento y posibles fallas que se presenten; con estos ensayos se adquirieron lo datos necesarios para establecer sus parámetros que estuvieron representados en su circuito magnético, también se construyó una placa de características donde se incluyeron los datos necesarios para su adecuada utilización, con este trabajo se verifico la ventaja de construir un transformador monofásico que adquirirlo en el mercado a un costo más elevado.

Este documento está dividido en cinco capítulos, así: generalidades del transformador; diseño y construcción del transformador; metodología para los ensayos experimentales, donde se exponen las diferentes pruebas eléctricas a los que se sometió el transformador; los resultados, análisis y las conclusiones. Se ha incorporado al documento unos anexos de los planos y costos ejecutados en este trabajo. Por último algunas recomendaciones.

# 1. GENERALIDADES DE LOS TRANSFORMADORES

El transformador hace parte de los sistemas eléctricos actuales, es importante saber su funcionamiento dentro de la ciencia, especialmente en las áreas de física, electricidad y electrónica, además, es relevante conocer la historia del transformador, los fenómenos que lo rigen y sus aplicaciones en el sector eléctrico abordados más adelante.

## 1.1 Evolución

Inicialmente, la evolución del transformador comienza con el descubrimiento del fenómeno de inducción electromagnética de Michael Faraday en 1831. Tras este hallazgo surgen inventos como la bobina de Ruhmkorff (1850), capaz de generar tensiones de decenas de voltios a partir de una tensión continua, o la creación del primer dispositivo de núcleo de hierro de Lucían Gaulard y John Dixon Gibbs (1882), que años más tarde desembocan en la creación del primer transformador ZBD de corriente alterna de los ingenieros húngaros Zipernowsky, Bláthy y Deri, construido en 1885 para uso comercial por William Stanley (Westinghouse)[1].

El descubrimiento de Faraday marcó un hito decisivo en el progreso no solo de la ciencia sino de la sociedad y revela algo nuevo sobre los campos eléctricos y magnéticos[2]. La ley de inducción de Faraday establece que: “La fuerza electromotriz inducida (f.e.m),  $\epsilon$ , en una espira cerrada o abierta viene dada por la derivada, cambiada de signo, del flujo magnético a través de la espira con respecto al tiempo”[3]. Tras el descubrimiento de esta ley, surgen inventos como la bobina de Ruhmkorff (1850), capaz de generar tensiones de decenas de voltios a

partir de una tensión continúa. Inicialmente, la bobina de Ruhmkorff, se empleó para obtener chispas eléctricas de notable longitud sin recurrir a las antiguas máquinas electrostáticas.

Esas descargas eléctricas pulsadas fueron de interés en electroterapia y en física, para estudiar espectros de emisión a través de descargas en gases enrarecidos.

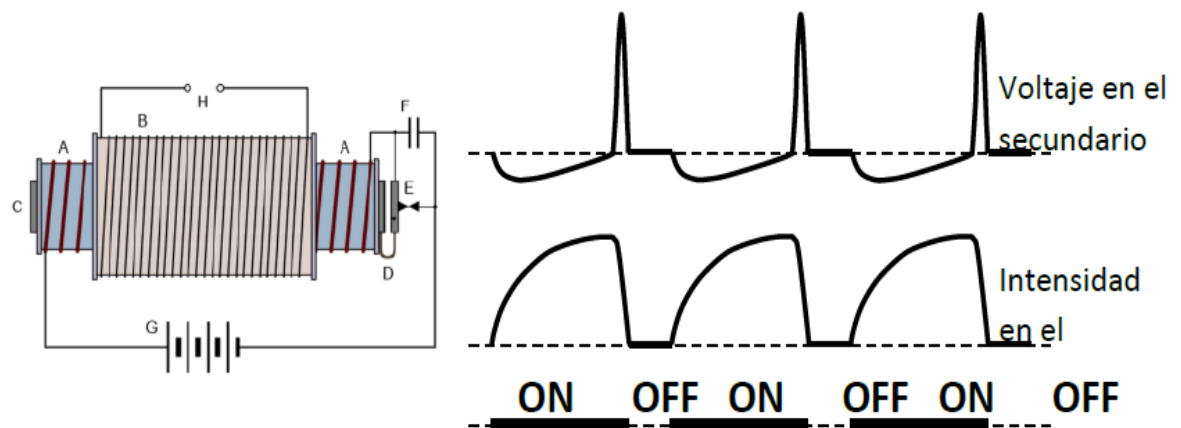


Figura 1. Funcionamiento de la Bobina de Ruhmkorff [7]

Su funcionamiento es exactamente el mismo que el de un transformador elevador, o como la bobina de encendido de un motor de explosión. Como se muestra en la figura 1, sobre un núcleo de chapa magnética C, se dispone un primario con varias espiras de hilo grueso A y un secundario también con varias espiras de hilo muy fino B. El primario se alimentaba con una corriente eléctrica pulsada, controlada por un interruptor E, de forma que, en los bornes H del devanado secundario, se obtiene un elevado voltaje proporcional a la derivada temporal de la corriente del primario y a la relación de espiras entre secundario y primario[4].

Con este descubrimiento, también se dio paso a la creación del primer dispositivo de núcleo de hierro de Lucían Gaulard y Jhon Dixon Gibbs (1882) mostrado en la figura 2, los dos comienzan sus desarrollos de generadores secundarios, que hoy evolucionaron a transformadores. En 1884, Gaulard construyó una red de

transporte de 80 km de longitud, en la que utilizaba sus generadores secundarios para optimizar el rendimiento de esta. Sin embargo, el primario de este transformador se colocaba en serie, por ello, tenía grandes defectos.

Después, estos inventos desembocan en la creación del primer modelo de transformador monofásico, de corriente alterna, mostrado en la figura 3. Los autores Ganz, Deri, Blathi y Zypernowski, lo mejoraron, proponiendo una conexión en paralelo, a una tensión constante para el primario, este es el diseño actual[5].



Figura 2. Generador secundario de Gaulard y Gibbs[6]



Figura 3. Primer transformador de Ottó, Bláthy, Miksa Déri y Zipernowsky[7]

Posteriormente, la patente se construyó en 1885 para uso comercial por William Stanley, que consiguió modificar la idea original de circuito magnético abierto y conexión en serie, por otro con circuito magnético cerrado y conexión en paralelo. Por ello, en Estados Unidos se considera a Stanley como el inventor del transformador su patente se expone en la figura 4.





Figura 4. Primer transformador de alimentación CA monofásico, de Stanley[7]

Luego, Stanley elaboro una red de 1.200 m. de longitud que, partiendo de una tensión de 500 V, se elevaba a 3.000 V con ayuda de transformadores, y que al final de la línea se volvía a reducir a 500 V para el consumo final. Así mismo, en compañía con Cummings C. Chesney y John F. Kelly, se inventó un sistema de distribución de corriente alterna conocido por las siglas SKC[8], que es el sistema de corriente eléctrica utilizada en los transformadores actuales.

## 1.2 Definición

El transformador es una máquina de corriente alterna, que permite variar algunas de las funciones como el voltaje y la corriente, manteniendo la frecuencia y la potencia en un solo nivel. El transformador, está construido bajo criterios tradicionales de diseño, opera con una frecuencia nominal de funcionamiento de los 50 a 60 Hz, es utilizado en el suministro eléctrico, la industria y el hogar, [1]. Su importancia es que gracias a ellos es posible la distribución de la energía eléctrica a grandes distancias, su constitución se muestra en la figura 5.

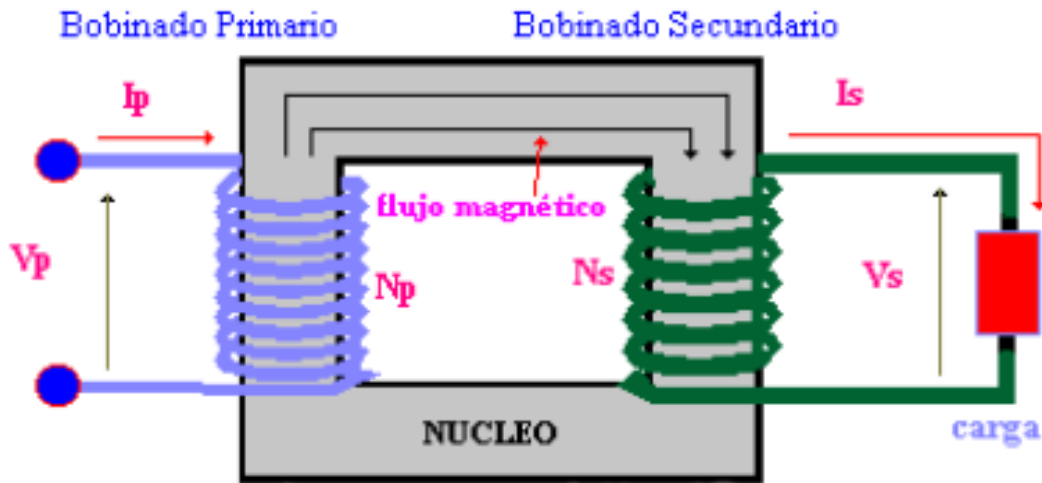


Figura 5. Transformador real con carga conectado al secundario [15]

### 1.3 Clasificación

El transformador se clasifica según su función, el número de fases que posea, el ambiente al que este expuesto, el refrigerante utilizado y la refrigeración a la que sometan sus bobinados y tipo de núcleo, se dividen de la siguiente manera:

#### TRANSFORMADORES

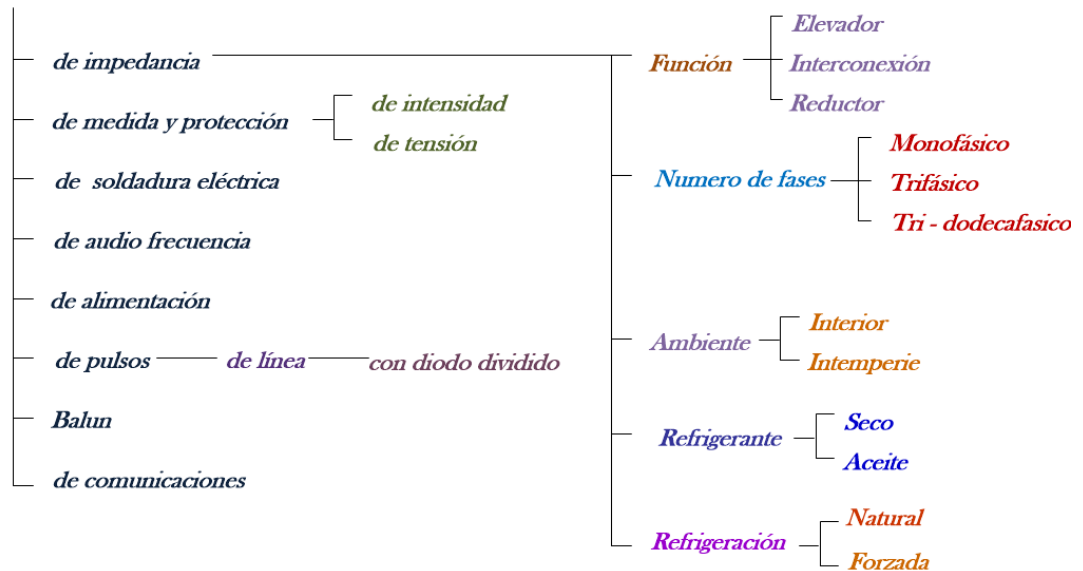


Figura 6. Clasificación de los transformadores[1]

## 1.4 Componentes

Estos dependen de cómo se enrollen sus bobinas, o del tamaño y forma en que este constituido su núcleo, de tal forma que se compone así:

### 1.4.1 Circuito eléctrico

Contiene a los devanados primario y secundario, el primero está compuesto por una bobina de hilo de cobre o aluminio, este se enrolla en un carrete de plástico o cartón rodeando al núcleo magnético, que va conectado a la fuente o red eléctrica, independientemente del número de espiras que posea y la tensión que maneje.

Por el contrario, el segundo está constituido por una bobina de hilo esmaltado enrollado a través del núcleo magnético, este se conecta a la carga para utilizar el nuevo nivel de tensión obtenido ya sea mayor o menor, cabe resaltar que el diámetro es diferente al hilo del devanado primario. Ver figura 7.

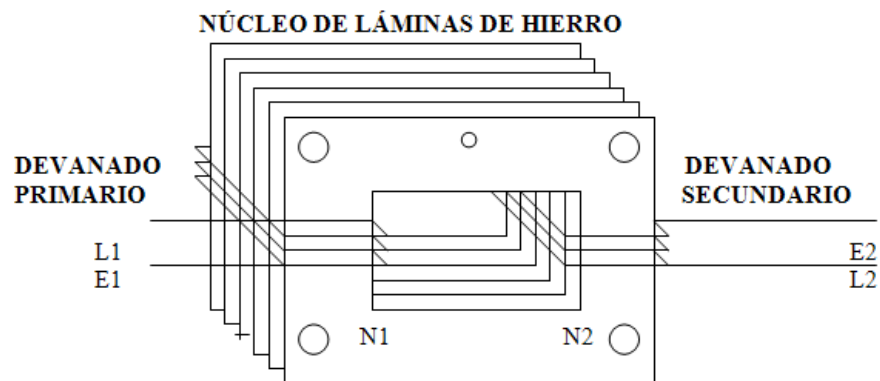


Figura 7. Arrollamientos alrededor del núcleo eléctrico de un transformador[9]

Las clases de devanados o arrollamientos de un transformador se muestran en la figura 8, estos son:

- *Devanados concéntricos.* Es una disposición simple, el devanado primario y el secundario están montados en distintas figuras del circuito magnético del transformador.
- *Devanados alternados.* En estos se han enrollado la mitad de las espiras del devanado primario, en la columna de la izquierda y la otra mitad en la columna de la derecha de forma análoga, se ha hecho lo mismo con el devanado secundario.
- *Devanados acorazados.* Aquí ambos arrollamientos están dispuestos en una columna que es la central, en este caso debe cumplirse que la sección de dicha columna sea el doble de los extremos, para que no haya pérdida de flujo magnético. El flujo que se establece en la columna central es  $\phi$ , mientras que el flujo en cada uno de los extremos es  $\phi/2$ .

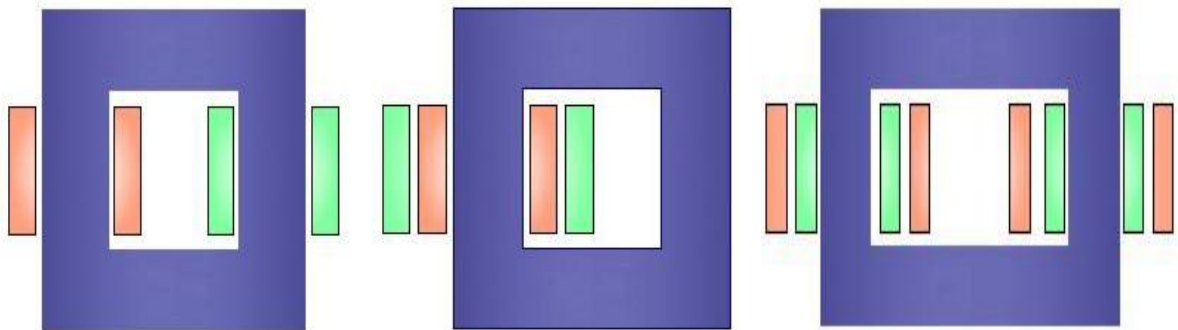


Figura 8. Arrollamientos simétricos, concéntricos y alternados [15]

### 1.4.2 Circuito magnético

Compuesto por las chapas magnéticas que forman las *columnas*, donde se colocan los devanados, y las *culatas*, las partes que realizan la unión entre las

columnas. Los espacios entre las columnas y las culatas, por los cuales pasan los devanados, son las *ventanas del núcleo*. Se debe tener en cuenta, que la posición relativa entre el núcleo y los devanados, definen la clasificación de los núcleos del transformador ya sean de tipo *acorazado* o tipo *columna* el cual puede adoptar diversas formas dependiendo del tipo de transformador. Para minimizar las pérdidas en el hierro por las corrientes parasitas de Foucault, la sección conductora del flujo magnético se divide en pequeñas partes o láminas y estas se intercalan entre lámina y lámina con un papel de barniz aislante[10].

Las chapas magnéticas se suelen montar a tope (o plana) o solapadas (entrelazadas), como se muestra en la figura 9, en la construcción a tope (Figura 9 a) las columnas y las culatas se montan separadamente y luego se unen con piezas de sujeción, en la construcción al solape todo el núcleo magnético se construye de una vez, de tal forma que como indica en la figura 9 b, se van ensamblando las chapas con un desfase de posición entre chapas sucesivas pares o impares. El montaje de uniones al solape, es más complicado que el de uniones a tope porque permite aumentar la estabilidad mecánica del conjunto de chapas, en cualquiera de los dos casos, existe una zona al lado de la junta en la que el flujo no sigue la dirección de laminación y esto origina, en las chapas un calentamiento local debido al aumento de pérdidas en el hierro; para evitar esto, las uniones, bien sea a tope o a solape, no se realizan a  $90^\circ$  sino a  $45^\circ$ , esto evita la dispersión del flujo magnético y los cambios bruscos de dirección [11].

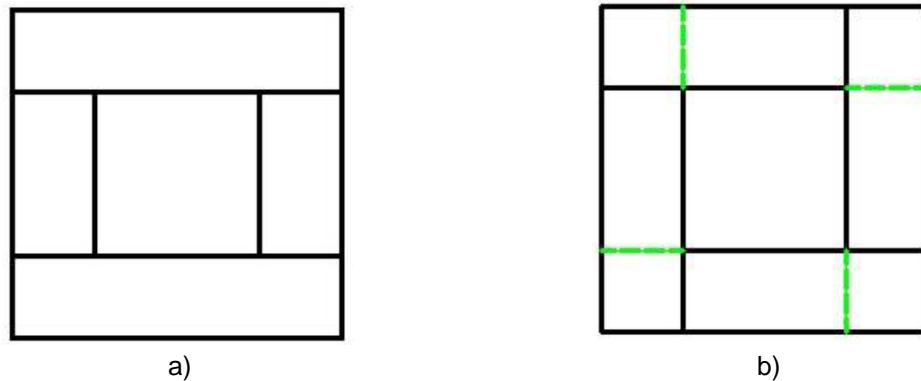


Figura 9. a) Láminas a tope, b) láminas solapadas [15]

Las chapas utilizadas con más frecuencia son las de acero aleado con silicio (Si), del orden de 3% a 5%, dicha aportación de silicio tiene las finalidades de reducir la pérdida por histéresis, de aumentar la resistividad del acero, disminuir las pérdidas por corrientes parasitas y estabilizar la chapa, de tal forma, que evita el envejecimiento con el tiempo y la acción continua de calor. Se debe tener en cuenta que las pérdidas por histéresis y por corrientes parasitas suelen darse en voltios por kilogramo de material y el espesor de las chapas debe ser de aproximadamente, 0,27 – 0,75 mm.

Actualmente, se emplea la chapa magnética de grano orientado y la mayoría de transformadores que se fabrican son a base de capa laminada en caliente [10].

Existen típicamente dos clases de núcleos, que forman las chapas de un transformador:

- *Núcleo tipo columnas.* Los devanados abrazan casi por completo el núcleo magnético (Figura 10a).
- *Núcleo tipo Acorazado.* Los devanados de baja y alta tensión están en su mayor parte abrazados por el núcleo magnético(Figura 10b)[12].

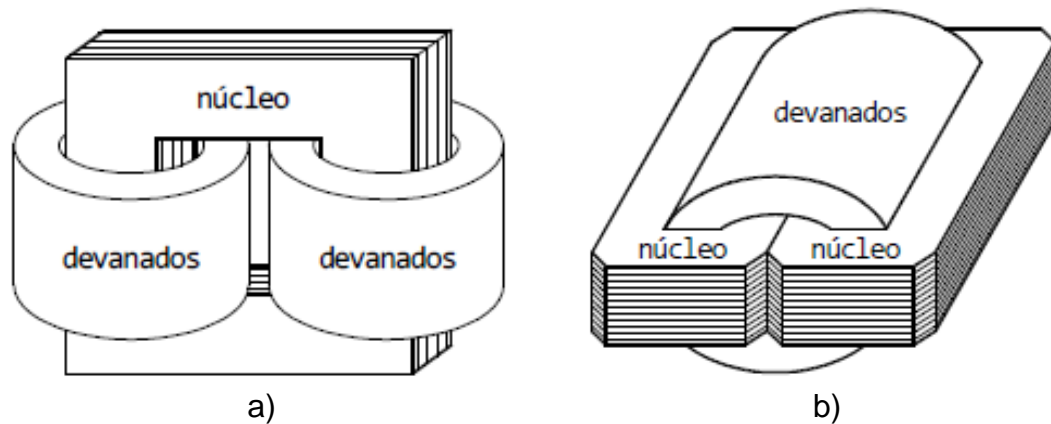


Figura 10. Núcleos: a) tipo columna, b) tipo acorazado [2]

### 1.4.3 Aislamientos

Uno de los factores más importantes para el correcto funcionamiento de los transformadores y específicamente los de distribución es el aislamiento, este es un medio dieléctrico que posee la capacidad de soportar los esfuerzos mecánicos y térmicos que generan las altas temperaturas y resistir la presencia de humedad y otras partículas nocivas. Su función es que permite establecer una separación tanto física como eléctrica, en los devanados del transformador, en sí mismo y tierra [10].

*Clases de aislamientos:*

- Aislamiento clase A. Diseñado para soportar incrementos de hasta 55 °C.
- Aislamiento clase B. Soportan incrementos en las bobinas de hasta 80 °C.
- Aislamiento clase F. Soportan incrementos en las bobinas de hasta 115 °C.
- Aislamiento clase H. Soportan incrementos de temperatura de hasta 150 °C, si la temperatura ambiente es de 40 °C. Sin embargo, soporta “puntos calientes” de 220 °C[1].

### *Tipos de aislamientos:*

#### ○ *Aislantes sólidos:*

- Papel presspan
- Papel diamantado Thermopx
- Collares de cartón prensado
- Cartón prensado
- Partes de cartón prensado laminado
- Papel manila y corrugado
- Cartón prensado de alta densidad
- Hilos y cintas de algodón

Las causas del envejecimiento de los aislantes sólidos son: la humedad, la temperatura y el contenido de oxígeno asimilado por el aceite. Además, estos materiales cumplen con las siguientes funciones: prevenir las acumulaciones excesivas de calor, la resistencia a esfuerzos mecánicos y térmicos, soportar las altas tensiones en servicio normal y los esfuerzos dieléctricos. En este proyecto los aislamientos sólidos que se utilizaron en los devanados fueron el papel aislante tipo presspan, cartón prensado y los conductores de cobre impregnados en barniz.

#### ○ *Aislantes líquidos:*

- Aceite mineral.
- R- temp y silicona[12].

### **1.4.4 Placa de características**

La placa de características de un transformador es una cartulina metálica serigrafiada en material metálico anticorrosivo y situado en un lugar visible brindando las características del transformador[12], incluye los datos de potencia asignada, frecuencia e impedancia equivalentes, caída de tensión relativa del circuito. Si el transformador tiene tomas variadoras de tensión, se incluyen las tensiones de las diferentes derivaciones, se debe especificar el esquema de



conexiones internas, el tipo de transformador, clase de refrigeración, nombre del fabricante, serie, código, impedancia de cortocircuito para efectos de protección y en algunos casos referencias sobre las instrucciones de funcionamiento[11]. En la norma NTC 618, se establecen los requisitos que deben cumplir esta placa de características[13].



Figura 11. Placa de características de un transformador Monofásico[12]

## 2. FÍSICA DE LOS TRANSFORMADORES

El transformador eléctrico puede comportarse de dos formas: como un modelo ideal, que no posee pérdidas y como un modelo real que si posee pérdidas en el núcleo y en sus devanados, a continuación se habla de las características de cada uno de ellos.

### 2.1 Leyes físicas de funcionamiento

Los dos principios que describen el funcionamiento del transformador basado en teoría de los campos electromagnéticos, son:

Un conductor que porta una corriente, ya sea constante o variable, produce un campo magnético a su alrededor (Ley de Ampere).

Un campo magnético variable en el tiempo induce un voltaje en una bobina de alambre si pasa a través de ella (Ley de Faraday).

La *ley de Ampere* es la ley básica que describe la producción de un campo magnético por medio de una corriente:

$$\oint Hdl = \sum i$$

Donde:

$H$  es la Intensidad del campo magnético,  $dl$  es el elemento diferencial a lo largo de la trayectoria de integración y  $\sum i$  es la sumatoria de todas las contribuciones de corriente, en la figura 12 se muestra un ejemplo de su trayectoria de integración y de su funcionamiento en una bobina.

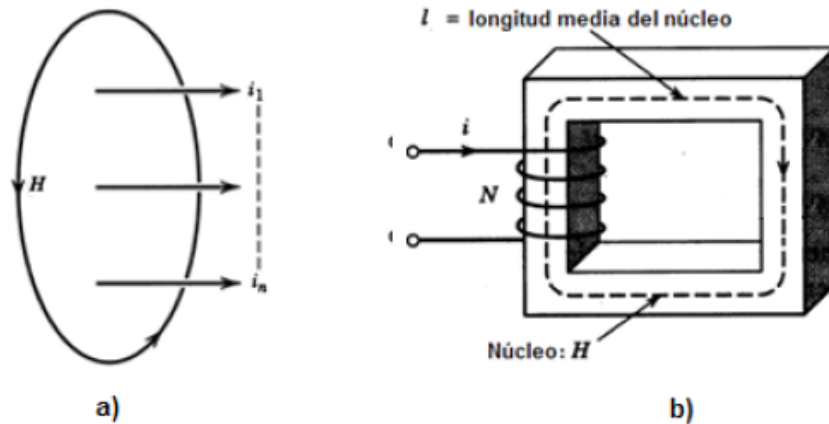


Figura 12. a) Formulación general de la ley de ampere. b) Ejemplo específico de la ley de ampere de una bobina sobre un núcleo[14]

Es importante notar que la dirección de campo  $H$  producida por una corriente en un conductor está definida por la regla de la mano derecha, la cual nos dice que si las curvaturas de los dedos apuntan en la dirección del flujo de corriente del conductor o bobina, el dedo pulgar apuntará en la dirección del campo magnético como se observa en la figura 13.

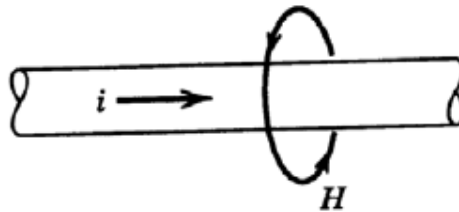


Figura 13. Determinación de la dirección del campo magnético por medio de la regla de la mano derecha[14]

Otro aspecto a considerar es la *ley de Faraday*, ya que es la base de funcionamiento del transformador y establece que, si el flujo atraviesa una espira de alambre conductor, se inducirá en esta un voltaje directamente proporcional al cambio de flujo respecto al tiempo, lo cual se expresa mediante la ecuación:

$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

El signo menos que aparece en la ecuación, tiene en cuenta el sentido de la fuerza electromotriz inducida (f.e.m) que se nombra en la ley de Lenz, la cual establece que la dirección de voltaje inducido en la bobina es mayor si los extremos estuvieran en cortocircuito la cual establece que la dirección del voltaje inducido en la bobina

es mayor si los extremos estuvieran en cortocircuito, por lo tanto se produciría en ella una corriente que generaría un flujo opuesto al cambio del flujo inicial. De esta forma, el voltaje inducido se opone al cambio que lo causa.

Si se refiere a una bobina compuesta por  $N$  espiras, la Ecuación de Faraday la reescribiríamos como:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Los términos son:

$e$  es el voltaje inducido en la bobina,  $N$  es el número de vueltas de alambre en la bobina,  $\phi$  es el flujo magnético que atraviesa una de las espiras

Al utilizar la ecuación anterior en la práctica, se observa una dificultad mayor puesto que esta ecuación establece que la misma cantidad de flujo que circula en una espira, circula en las demás. Pero si la dispersión del flujo es significativa o si se requiere su máxima exactitud, se necesitará una expresión diferente.

Por lo tanto, la magnitud del voltaje en la  $i$ -ésima espira de la bobina está dada por la siguiente expresión:

$$e = -\frac{d\phi_i}{dt}$$

Para  $N$  espiras en la bobina, el voltaje total será:

$$\begin{aligned}
 e &= \sum_{i=1}^N e_i \\
 e &= \sum_{i=1}^N \frac{d\phi_i}{dt} \\
 e &= \frac{d}{dt} \left( \sum_{i=1}^N \phi_i \right)
 \end{aligned} \tag{2}$$

El término entre paréntesis de la ecuación 2, se denomina flujo concatenado o flujo ligado ( $\lambda$ ) de la bobina, por tal razón, la ley de Faraday puede reescribirse así:

$$e = \frac{d\lambda}{dt}$$

Donde  $\lambda$  es el flujo ligado total, en las bobinas así:

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \phi_i \tag{3}$$

## 2.2 Transformador ideal

Es un dispositivo que posee un devanado de entrada y uno o varios de salida, sin generar pérdidas eléctricas tanto de potencia como de flujo magnético, lo cual implica que la potencia de entrada es igual a la de salida.

### 2.2.1 Relación entre voltajes y corrientes

En la figura 14, se observa el transformador ideal su relación de voltaje y corriente tanto de entrada como de salida, este posee  $N_p$  vueltas de alambre en su lado primario y  $N_s$  vueltas en su lado secundario y  $Z_L$  es la carga conectada al secundario.

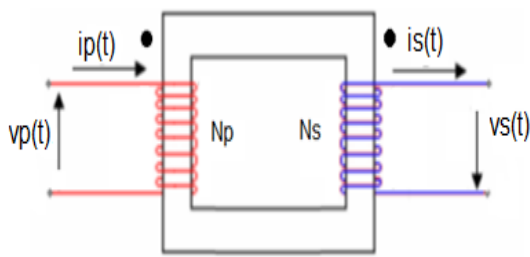


Figura 14. Dibujo de un transformador ideal [12]

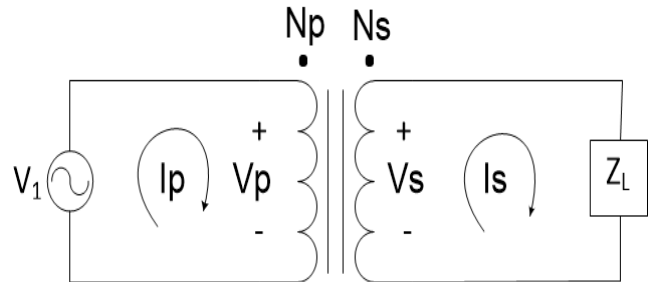


Figura 15. Circuito transformador ideal con carga en el secundario[15]

Para encontrar la relación de transformación entre las magnitudes de voltaje y corriente entre el lado primario con el secundario, se calculan las siguientes ecuaciones y se tomara la figura 15.

Dado que el acople magnético del circuito primario y secundario es perfecto, los flujos por cada bobina son iguales así:

$$\phi_p(t) = \phi_s(t)$$

Al derivar cada expresión con respecto al tiempo se obtiene:

$$\frac{d\phi_p(t)}{dt} = \frac{d\phi_s(t)}{dt}$$

Aplicando la ley de Faraday, resulta:

$$\frac{v_p(t)}{N_p} = \frac{v_s(t)}{N_s}$$

De la anterior ecuación se encuentra la relación de transformación  $\alpha$ :

$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = \alpha$$

Ahora se calcula la relación de transformación de las corrientes, recordado que no hay pérdidas de potencia se puede igualar las potencias:

$$p_p(t) = p_s(t)$$

Por lo que se obtiene la relación de transformación de corrientes:

$$\frac{i_p(t)}{i_s(t)} = \frac{v_s(t)}{v_p(t)} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{1}{a} \quad (4)$$

### 2.2.2 Convención de puntos para las fases

De acuerdo a la forma en que estén enrolladas las dos bobinas sobre el núcleo, el voltaje en el secundario puede estar invertido o no respecto al primario, esto está representado por unos puntos ubicados al lado de cada bobina, si los puntos coinciden los voltajes primario y secundario están en fase y se representa con la siguiente ecuación  $\theta_{vs} = \theta_{vp}$  como se muestra en la figura 16; de no ser así si los voltajes no coinciden indica que la posición de los puntos están en desfase con una diferencia de  $180^\circ$  resultado la siguiente ecuación  $\theta_{vs} = \theta_{vp} + 180^\circ$ , así como se muestra en la figura 17; para el caso de voltajes en forma fasorial se tiene que  $\vec{V}_p = V_p \angle \theta_{vp}$  y  $\vec{V}_s = V_s \angle \theta_{vs}$  dando la relación de magnitudes entre ambos casos así:

$$V_s = V_p \frac{N_s}{N_p}$$

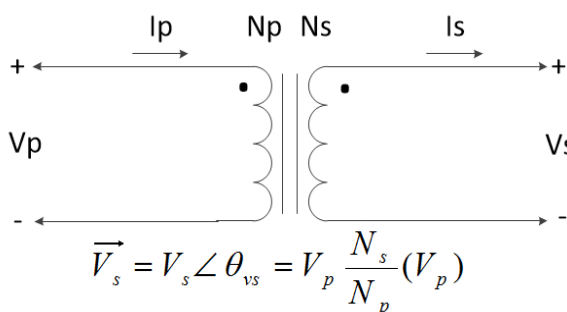


Figura 16. Circuito ideal en fase[16]

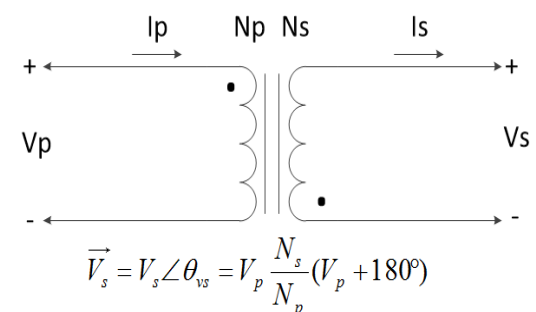


Figura 17. Circuito ideal en desfase[16]

### 2.2.3 Impedancia

La impedancia vista por la fuente en el circuito primario  $Z_p$  y la vista en el circuito secundario  $Z_s$  se calcula respecto a la figura 18, así:

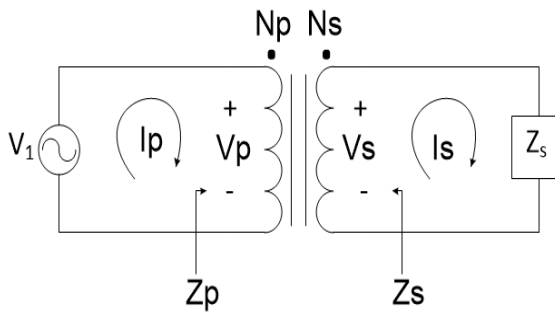


Figura 18. Impedancia equivalente de entrada y de salida[16]

$$Z_p = \frac{\vec{V}_p}{\vec{I}_p}$$

$$Z_s = \frac{\vec{V}_s}{\vec{I}_s}$$

Reemplazando las relaciones de V respecto a la I por las impedancias se obtiene:

$$\frac{\vec{I}_p}{\vec{I}_s} = \frac{\left(\frac{\vec{V}_p}{Z_p}\right)}{\left(\frac{\vec{V}_s}{Z_s}\right)} = \frac{\vec{V}_p}{\vec{V}_s} \frac{Z_s}{Z_p} = \frac{N_p}{N_s} \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$\frac{N_p}{N_s} \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{N_s}{N_p}$$

De donde:

$$Z_p = Z_s \left( \frac{N_p}{N_s} \right)^2 \quad (5)$$



La ecuación anterior describe que la impedancia en la fuente del lado primario corresponde a la impedancia del lado secundario, el que contiene la carga, multiplicada por el cuadrado de la relación de vueltas de las bobinas.

### 2.2.4 Acople de impedancias

La figura 19 representa el teorema de máxima transferencia de potencia en circuitos resistivos; para que exista máxima transferencia de potencia del circuito, a la izquierda de los puntos  $AB$  hacia la carga  $R_c$ , la resistencia de Thévenin  $R_{th}$  debe ser igual a la carga  $R_{th} = R_c$ ; esta igualdad siempre se debe cumplir.

Para lograr la máxima transferencia de potencia entre los dos circuitos se puede poner en medio un transformador ideal que haga que la impedancia de la carga del equivalente Thévenin sea igual a la resistencia Thévenin  $R_{th}$  tal como se muestra en la figura 20.

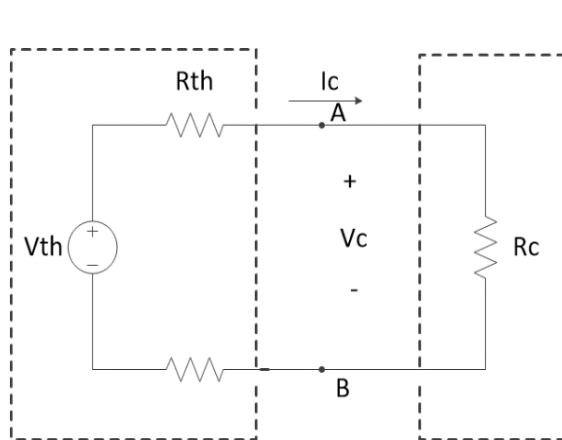


Figura 19. Circuito Thévenin[17]

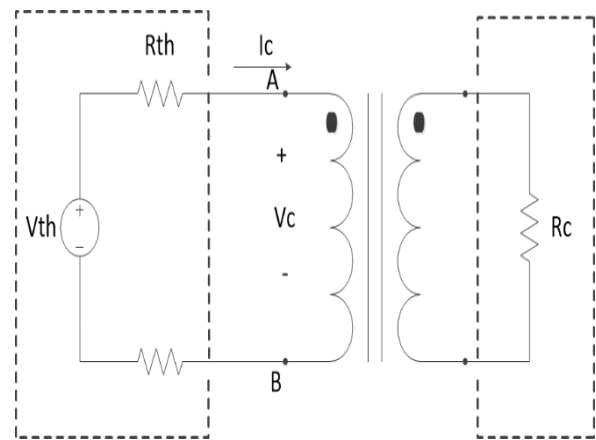


Figura 20. Transformador ideal acoplado con circuito Thévenin[17]

$$R_{th} = R_{in} = R_c \left( \frac{N_p}{N_s} \right)^2$$

Despejando la relación de vueltas se tiene:

$$\frac{N_p}{N_s} = \sqrt{\frac{R_{th}}{R_c}} \quad (6)$$

A pesar de obtener la máxima transferencia de potencia existen pérdidas de voltaje en la carga, debido a que el circuito contiene un transformador que se ve afectado al igual que la corriente, por la relación de vueltas[16].

### 2.2.5 Curva de histéresis

En un transformador ideal la histéresis debe cumplir lo siguiente:

- El núcleo no debe contener histéresis ni corrientes parasitas.
- La resistencia del transformador debe ser cero.
- El flujo disperso en el núcleo debe ser cero, esto implica que todo el flujo en el núcleo pasa por ambos devanados sin dispersarse en el aire.
- La curva de magnetización debe tener la forma de la figura 21[15].

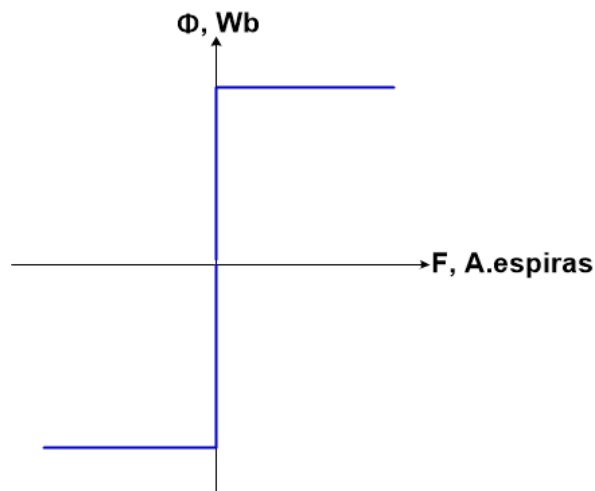


Figura 21. Curva de magnetización de un transformador ideal[15]

### 2.2.6 Diagrama fasorial

La figura 22, muestra el diagrama fasorial para el transformador ideal sin carga, en el análisis de este diagrama se encuentran las siguientes relaciones:

- Se trazan las tensiones  $E_p$  y  $E_s$  que están en fase, inducidas por el  $\phi_{max}$  y originando la  $I_m$ .
- La magnitud de  $-E_p$  es igual a  $V_p$ , negativo, por la ley de Lenz.
- La corriente de pérdidas  $I_{h+e}$  está en fase con  $V_p$ .
- Con la composición vectorial de ambas corrientes  $I_{h+e}$  y  $I_m$  se traza  $I_{po}$ [9].

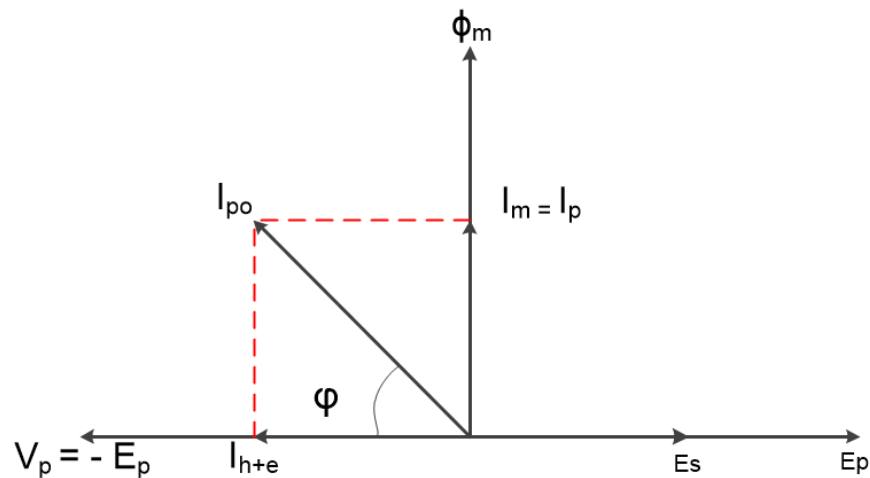


Figura 22. Diagrama fasorial de un transformador ideal[9]

### 2.3 Transformador real

El funcionamiento del transformador real (figura 23) es diferente al transformador ideal, ya que son planteados sobre casos reales, estos poseen pérdidas en el cobre y en el hierro, como se planteará al final del capítulo.

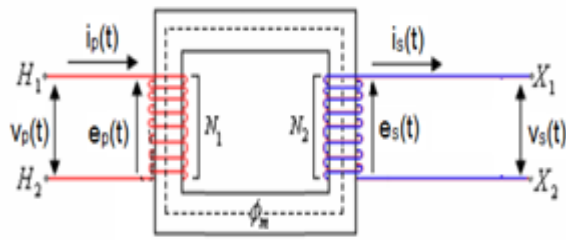


Figura 23. Transformador real sin carga en el secundario [15]

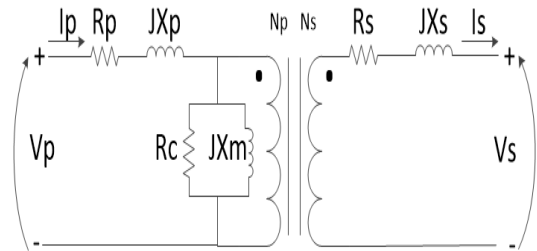


Figura 24. Circuito transformador real sin carga[15]

El acople magnético del circuito primario y secundario no es exacto (figura 24), porque los flujos que pasan por cada bobina son distintos, es por ello que se planteó en la sección 2.1, que si el flujo ligado total es  $\lambda = \sum_{i=1}^N \phi_i$ , este pasará en todas las vueltas de la bobina; así para  $N$  vueltas, el flujo promedio por vuelta será:

$$\bar{\phi} = \frac{\lambda}{N}$$

Aplicando la ley de Faraday, se tiene:  $e = N \frac{d\bar{\phi}}{dt}$

### 2.3.1 Relación entre voltajes y corrientes

#### ❖ Relación de voltaje

Si el voltaje de la fuente de la figura 25, es  $v_p(t)$  entonces ese voltaje se aplicará directamente a través de las espiras de la bobina primaria, cuando la ecuación 1 se resuelve para obtener el flujo promedio, se obtiene:

$$\bar{\phi}_p = \frac{1}{N_p} \int v_p(t) dt \quad (7)$$

Para calcular la dispersión de flujo en el aire se parte de la bobina primaria; por consecuencia el efecto de la bobina secundaria dependerá del flujo que llegue a esta, ya que no todo este flujo se concentra en las dos bobinas (figura 25).

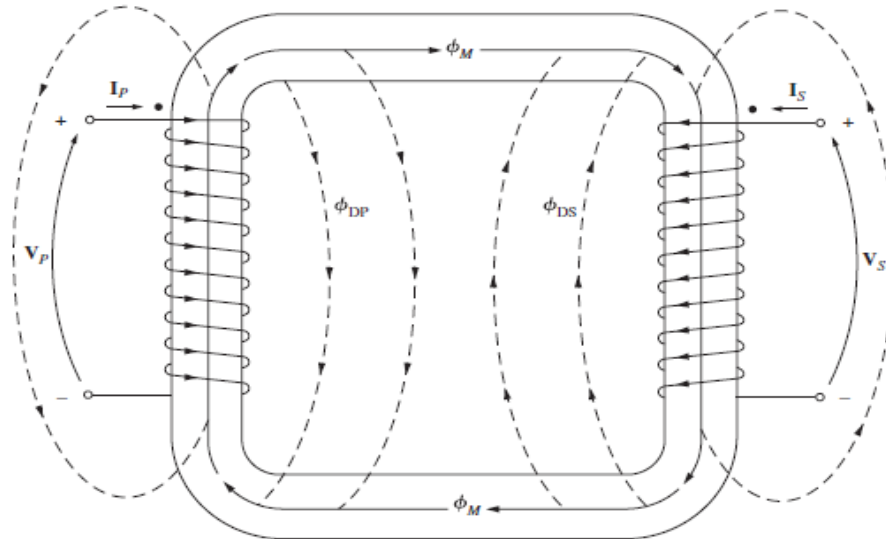


Figura 25. Flujo mutuo y disperso en el núcleo del transformador real[15]

La porción del flujo que pasa a través de una de las bobinas se llama flujo disperso, que al pasar por la bobina primaria se divide en dos componentes: uno mutuo que permanece en el núcleo que une ambos devanados y otro disperso mínimo que pasa por medio del devanado primario, regresa por el aire y no cruza por el secundario:

$$\overline{\phi_P} = \phi_M + \phi_{DP}$$

Los términos respectivamente son:  $\phi_P$  es el flujo promedio primario total,  $\phi_{DP}$  es el flujo disperso en el devanado primario y  $\phi_M$  es la componente del flujo que une las bobinas primarias y secundarias.

Lo mismo sucede en el devanado secundario así:

$$\overline{\phi_S} = \phi_M + \phi_{DS}$$

Los términos son:  $\phi_s$  es el flujo promedio secundario total,  $\phi_{DS}$  es el flujo disperso en el devanado secundario y  $\phi_M$  es el componente del flujo que une las bobinas primarias y secundarias.

Con la división del flujo primario promedio en sus componentes mutuo y disperso, la ley de Faraday del circuito primario y secundario se expresa así:

$$v_P(t) = N_P \frac{d\overline{\phi_M}}{dt}$$

$$v_P(t) = N_P \frac{d\phi_M}{dt} + N_P \frac{d\phi_{DS}}{dt}$$

Reemplazando el primer y segundo por  $e_p(t)$ ,  $e_{Dp}(t)$ , Se obtiene:

Para el circuito primario:

$$v_p(t) = e_p(t) + e_{Dp}(t) \quad (8)$$

Para el circuito secundario:

$$v_s(t) = e_s(t) + e_{Ds}(t) \quad (9)$$

Si se toma el voltaje debido al flujo mutuo se tiene:

En el primario:

$$e_p(t) = N_P \frac{d\phi_M}{dt}$$

En el secundario:

$$e_s(t) = N_S \frac{d\phi_M}{dt}$$

Igualando las dos relaciones anteriores se tiene:

$$\frac{e_p(t)}{N_P} = \frac{d\phi_M}{dt} = \frac{e_s(t)}{N_S}$$

Despejando los voltajes se obtiene la relación de transformación:

$$\frac{e_P(t)}{e_S(t)} = \frac{N_P}{N_S} = a$$

Esta ecuación significa que la razón entre el voltaje primario y secundario causado por el flujo mutuo es igual a la relación de vueltas del transformador. Para un transformador real bien diseñado el flujo  $\phi_M \gg \phi_{DP}$  y  $\phi_M \gg \phi_{DS}$ , entonces la relación del voltaje total en el primario y en el secundario es aproximadamente:

$$\frac{v_P(t)}{v_S(t)} \cong \frac{N_P}{N_S} = a$$

Por lo tanto, entre más pequeños son los flujos dispersos más se aproxima la relación de transformación del voltaje total al transformador ideal.

#### ❖ **Relación de corriente de magnetización**

Cuando una fuente variable de potencia de CA se conecta a un transformador, como se muestra en la figura 24, fluye una corriente en su circuito primario, aun cuando su secundario este en circuito abierto. Esta corriente de vacío es la necesaria para producir un flujo en el núcleo ferromagnético real, la cual consta de dos componentes:

- \* La de magnetización  $i_m$ , que es la corriente necesaria para producir el flujo en el núcleo del transformador.
- \* La de pérdidas en el núcleo  $i_{h+e}$ , que es la corriente necesaria para compensar las pérdidas por histéresis y corrientes parasitas.

En la figura 26, se observa la curva de magnetización del núcleo del transformador ideal, si se conoce el flujo en el núcleo entonces la magnitud de la corriente se obtiene directamente, así partiendo de la ecuación 7 del flujo promedio:

$$\bar{\phi}_p = \frac{1}{N_p} \int v_p(t) dt$$

Si el voltaje primario está dado por  $v_p(t) = V_M \cos \omega t$ , entonces el flujo resultante de la ecuación anterior es:

$$\bar{\phi}_p = \frac{1}{N_p} \int V_M \cos \omega t dt$$

$$\bar{\phi}_p = \frac{V_M}{\omega N_p} \text{sen} \omega t \quad \text{Wb}$$

Para encontrar los valores de la corriente requerida al momento de producir un flujo, se toma la figura 26a la cual se compara con el flujo en el núcleo en otros momentos permitiendo obtener la corriente de magnetización, (Figura 26b) esta debe cumplir:

- \* No ser de tipo sinusoidal y generar respuestas de frecuencias altas debidas a la saturación magnética.
- \* Con un flujo pico que alcance el punto de saturación ya que un pequeño incremento en este, requiere un gran aumento en la corriente de magnetización pico.
- \* Con que la corriente de magnetización atrase  $90^\circ$  el voltaje aplicado al núcleo.
- \* Las frecuencias altas pueden ser mayores en comparación con su componente fundamental.



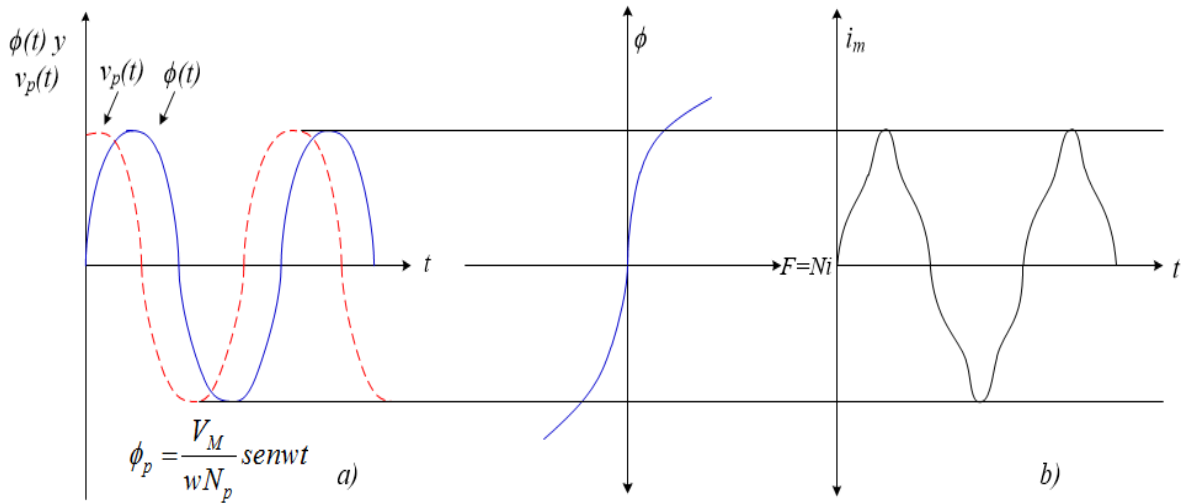


Figura 26. a) Curva de magnetización del núcleo del transformador, b) Corriente de magnetización causada por el flujo en el núcleo[17]

El otro componente de la corriente de vacío, son las llamadas corrientes de pérdidas o corrientes parasitas en el núcleo, requeridas para compensar la histéresis. Las cuales son proporcionales a  $d\phi/dt$  y son máximas cuando el flujo en el núcleo pasa por  $0W$ , por ello la corriente total requerida para compensar las pérdidas en el núcleo se muestra en la figura 27.

La corriente de pérdida en el núcleo debe cumplir con:

- \* No ser lineal debido a los efectos no lineales de la histéresis.
- \* El componente fundamental este en fase con el voltaje aplicado.

La corriente de vacío total en el núcleo es también llamada corriente de excitación, esta se muestra en la figura 28 y se expresa así:

$$i_{ex} = i_m + i_{h+e} \quad (10)$$

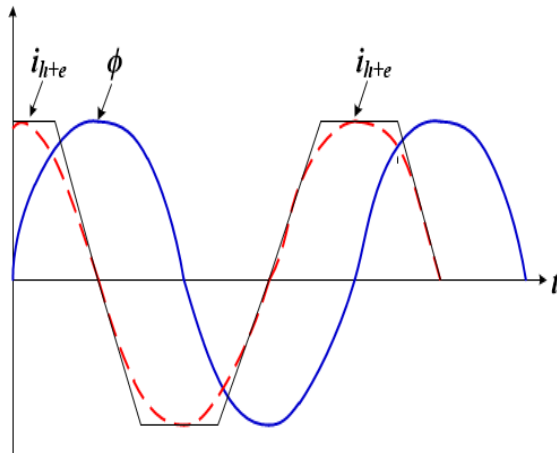


Figura 27. Corriente de pérdidas en el núcleo[17]

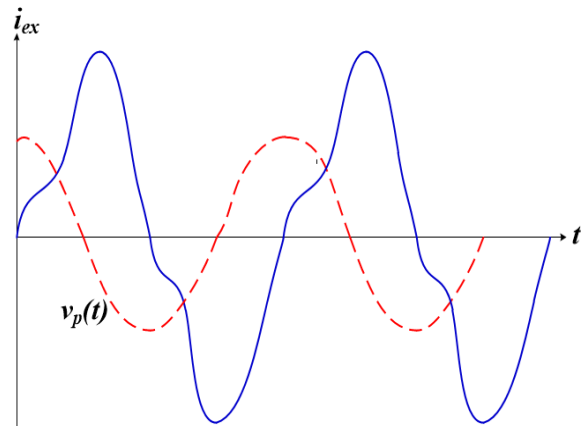


Figura 28. Corriente de excitación total[17]

### 2.3.2 Relación de corriente y convención de puntos

Al conectar una carga al circuito secundario en la figura 23, se dice que una corriente fluye hacia el extremo de un devanado marcado con un punto y produce una fuerza magnetomotriz positiva  $F$ , mientras que una corriente que fluye hacia el extremo de un devanado no marcado produce una fuerza negativa.

Así dos corrientes que fluyen hacia los extremos marcados con punto de sus respectivos devanados producen fuerzas magnetomotrices que se suman, en caso contrario se cancelan así:

$$F_{neta} = N_p i_p - N_s i_s$$

Esta fuerza magnetomotriz neta debe producir el flujo neto en el núcleo, así:

$$F_{neta} = N_p i_p - N_s i_s = \phi R$$

Si  $R$  es la reluctancia del núcleo del transformador, para un modelo bien diseñado esta será muy pequeña (casi cero) hasta que se sature el núcleo. Así la relación entre la corriente primaria y la secundaria es aproximadamente:

$$F_{neta} = N_p i_p - N_s i_s \approx 0$$

En caso de no estar saturado el núcleo es:

$$N_p i_p \approx N_s i_s$$

El hecho de que la fuerza magnetomotriz en el núcleo es casi cero representa la convención de puntos que se mencionó anteriormente.

### 2.3.3 Circuito equivalente

Para ello se toma un circuito equivalente que tome las imperfecciones del transformador real, así:

Se empieza evaluando las pérdidas en el cobre. Estas son pérdidas resistivas en el devanado primario y secundario del núcleo, equivalen a colocar un resistor  $R_p$  en el circuito primario del transformador y un resistor  $R_s$  en el circuito secundario.

Si repasamos el voltaje dado por los flujos dispersos vistos anteriormente se tiene que en el primario y secundario son respectivamente:

$$e_{DP}(t) = N_{DP} \frac{d\phi_M}{dt}$$

$$e_{DS}(t) = N_{DS} \frac{d\phi_M}{dt}$$

Debido a que parte del recorrido del flujo disperso es por el aire y a que este tiene una reluctancia constante mucho mayor que la del núcleo, el flujo  $\phi_{DP}$  es directamente proporcional a la corriente secundaria  $i_p$ , mientras que el flujo  $\phi_{DS}$  es directamente proporcional a  $i_s$ :

$$\phi_{DP} = (PN_p) i_p$$

$$\phi_{DS} = (PN_s) i_s$$

Dónde:

$P$  es la permeancia del flujo magnético,  $N_p$  es el número de vueltas en el primario y  $N_s$  es el número de vueltas en el secundario.

Reemplazando en las ecuaciones del flujo disperso, las anteriores se tienen:

$$e_{DP}(t) = N_p \frac{d}{dt} (PN_p)i_p = N_p^2 P \frac{di_p}{dt}$$

$$e_{DS}(t) = N_s \frac{d}{dt} (PN_s)i_s = N_s^2 P \frac{di_s}{dt}$$

Las constantes se pueden agrupar en:

$$e_{DP}(t) = L_p \frac{di_p}{dt} \quad (11)$$

$$e_{DS}(t) = L_s \frac{di_s}{dt} \quad (12)$$

Donde  $L_p$  y  $L_s$  son las autoinductancias de la bobina primaria y secundaria, respecto al flujo disperso se considera como si fueran inductores primarios y secundarios. Los efectos que esto trae, es la excitación en el núcleo, los cuales se representan por la corriente de magnetización  $i_m$ , siendo esta proporcional a la región no saturada al voltaje aplicado con un retraso de  $90^\circ$ , que se modela con una inductancia  $X_M$ , que se encuentra conectada a la fuente del voltaje primario. La otra corriente de pérdidas que se presenta en el núcleo es  $i_{h+e}$ , siendo esta proporcional al voltaje aplicado, que se encuentra en fase, se considera esta como una resistencia  $R_N$  que está conectada también a la fuente de voltaje primario.

Estas dos corrientes descritas anteriormente no son lineales, así  $X_M$  y  $R_N$  son solo aproximaciones de los efectos de excitación reales que se presentan en el núcleo, las respuestas de la excitación antes mencionadas se deben modelar en paralelo.

En la figura 29 se modelan estos fenómenos donde  $R_p$  es la resistencia,  $X_p$  es la reactancia por la inductancia de fuga del devanado primario,  $R_s$  es la resistencia,  $X_s$  la reactancia debida a la inductancia dispersa del devanado secundario; los elementos primarios forman la rama de excitación que se colocan dentro del circuito. Esto se debe a que el voltaje que se aplica al núcleo es el de entrada menos, las caídas internas del devanado.

La figura 24 no es muy útil para analizar circuitos prácticos, es necesario convertir a un modelo equivalente referido al primario (Figura 29) y secundario (Figura 30).

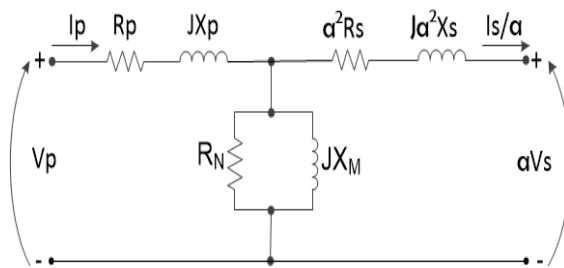


Figura 29. Modelo del transformador referido a su circuito primario[17]

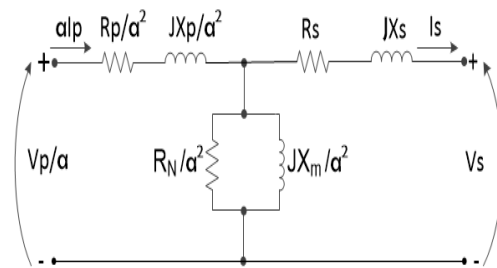


Figura 30. Modelo del transformador referido a su circuito secundario[17]

Partiendo que, la corriente de excitación es aproximadamente de 2 a 3% de la de carga total, se puede producir un circuito equivalente simplificado semejante al ideal, para esto se debe pasar al frente del transformador la rama de excitación y dejar en serie las impedancias primarias y secundarias, (figura 31,32).

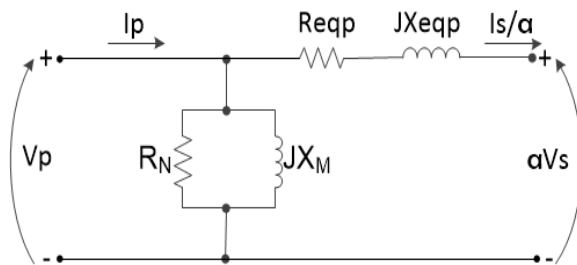


Figura 31. Circuito referido al lado primario [19]

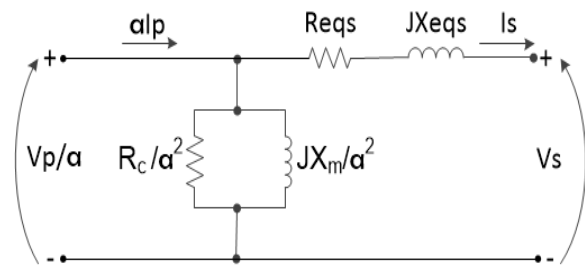


Figura 32. Circuito referido al secundario [19]

$$R_{eqp} = R_p + a^2 R_s$$

$$R_{eq} = R_p / a^2 + a^2 R_s$$

$$X_{eqp} = X_p + a^2 X_s$$

$$X_{eqp} = X_p / a^2 + a^2 X_s$$

En algunos casos se omite la rama de excitación y simplificarlos a modelos simples.

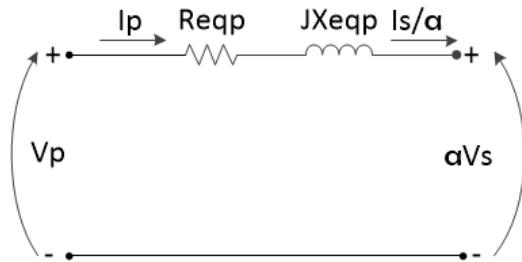


Figura 33. Sin rama de excitación referido al primario[17]

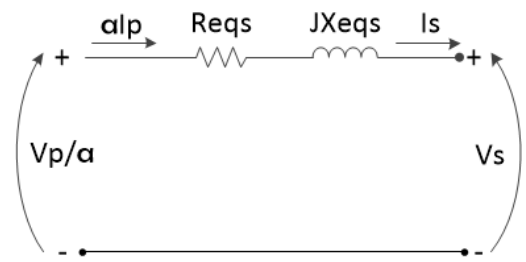


Figura 34. Sin rama de excitación referido al secundario[17]

### 2.3.4 Histéresis magnética

La curva de magnetización o ciclo de histéresis de un material, sea cual sea, tiene las siguientes características:

- Que requiere un mayor esfuerzo eléctrico al comienzo de la curva, este intervalo es llamado zona reversible.
- Que se produzca de forma proporcional en un determinado punto, este se denomina zona lineal.
- En últimas, por mucha fuerza que se induzca al material, este ya no se magnetiza más, este punto es llamado zona de inducción o saturación.

Este proceso, da origen a un calentamiento del material y con esto una pérdida de potencia y energía, generando un bajo rendimiento [9].

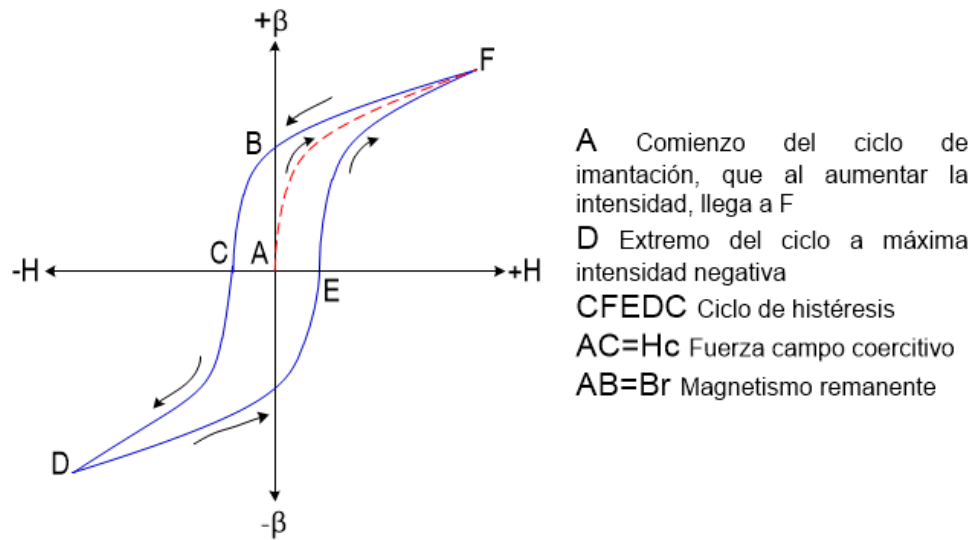


Figura 35. Ciclo de histéresis del transformador real [21]

### 2.3.5 Diagrama fasorial

Para este diagrama, se deben tener en cuenta las caídas de tensión, la reactancia y la resistencia que se presentan en el devanado primario y con ello determinar las magnitudes vectoriales[10].

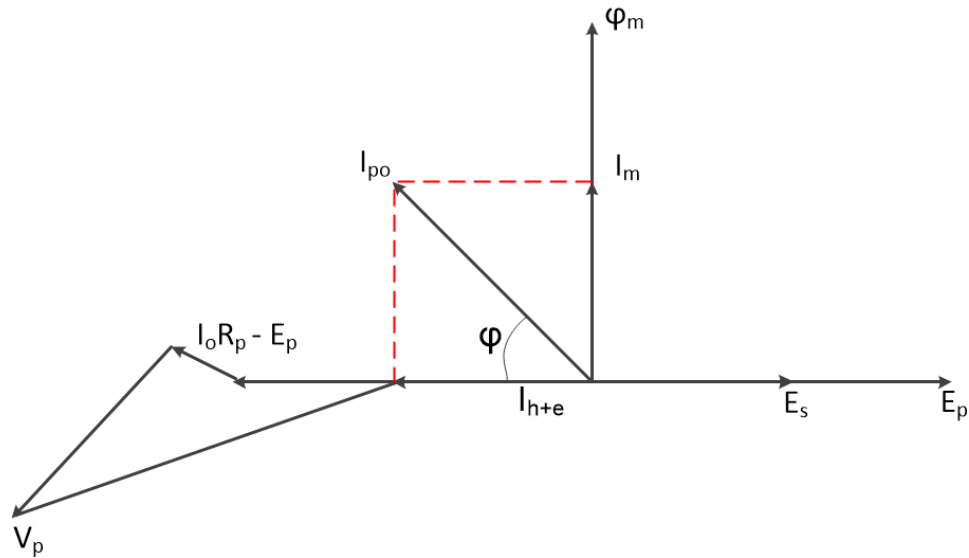


Figura 36. Diagrama fasorial de un transformador real[9]

## 2.4 Problemas en los transformadores

En el transformador real al igual que en cualquier maquina eléctrica se presentan problemas de pérdidas de potencia ya sea en el cobre de los devanados efecto Joule y por histéresis o corrientes de Foucault en el núcleo, todas estas afectan la potencia del transformador, rendimiento y eficiencia. Estas pérdidas en los transformadores que suministran potencia de varios vatios, le generan a la empresa distribuidora muchos problemas de costos.

### 2.4.1 Pérdidas

Las pérdidas que se presentan en los transformadores reales esencialmente son las siguientes:

- Por corrientes parasitas (corrientes de Foucault).
- Por ciclos de histéresis.

Estas dos llamadas perdidas en el hierro

- Por efecto Joule o llamadas perdidas en el cobre de los bobinados.

- **Pérdidas en el núcleo**

Las pérdidas de potencia en el hierro presentes en los transformadores son generalmente pequeñas, estas se describen a continuación: perdidas por histéresis ( $P_h$ ), perdidas por corrientes de Foucault ( $P_f$ ), perdidas en el hierro ( $P_{FE}$ ) que son la combinación de las pérdidas ( $P_f$ ) y ( $P_h$ ), como indica la siguiente fórmula:



$$P_F + P_H = P_{FE} \quad (13)$$

Las pérdidas en el hierro se determinan midiendo la potencia consumida por el transformador en vacío, mediante un vatímetro. En este, al ser nula la corriente en el secundario ( $I_s=0$ ), no aparecen en él pérdidas de potencia; si es muy pequeña la corriente del primario en vacío ( $I_o$ ), con respecto a la corriente de carga  $I_s$ , las pérdidas que se originan en este bobinado resultan prácticamente insignificantes.

Para reducir la pérdida de energía y la pérdida de potencia, es necesario que los núcleos que están bajo un flujo variable no sean macizos; deberán estar contruidos con chapas magnéticas de espesores mínimos, apiladas y aisladas entre sí, de esta forma la corriente eléctrica, circulara de forma independiente por cada una de las chapas, con lo que se induce menos corriente y disminuye la potencia perdida por corrientes de Foucault estas se producen en cualquier material conductor cuando se encuentra sometido a una variación del flujo magnético. Dado que los materiales magnéticos son buenos conductores eléctricos, se genera una fuerza electromotriz inducida a nivel del núcleo, que origina corriente de circulación en los mismos, lo que da lugar a pérdidas de energía por efecto Joule.

*Pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault*, dependerán del material del que esté constituido el núcleo magnético. Para el tipo de chapa magnética de una inducción de 1 Tesla o 10 000 Gauss, trabajando a una frecuencia de 60 Hz de laminado en frío, las pérdidas en el núcleo se estiman entre 0,3 W/kg y 0,5 W/kg, mientras que en caliente oscilan entre 0,8 y 1,4 W/kg, para calcular estas pérdidas se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_F = \frac{2.2 f^2 \beta_{\max} \Delta^2}{10^{11}} \quad (14)$$

$P_F$  son las pérdidas por corrientes de Foucault en W/kg,  $f$  es la frecuencia en Hz,  $B_{max}$  es la inducción máxima en Gauss,  $\Delta$  espesor de la chapa magnética en mm.

Se deduce que al aumentar la frecuencia de 50 a 60 Hz, se aumentan las pérdidas.

*Pérdidas por histéresis magnética*, es el fenómeno que se produce cuando la imantación de los materiales ferromagnéticos se calienta, los cuales no depende solo del valor del flujo, sino de los estados magnéticos anteriores. Para el caso de los transformadores, al someter el material magnético a un flujo variable se produce una imantación que se mantiene al cesar el flujo, provocando una pérdida de energía que se justifica en forma de calor. La potencia perdida por la histéresis depende del tipo de material, aunque en algunos casos puede depender de la frecuencia, pero como esta es la misma en determinada zona o país, la inducción magnética dependerá del tipo de chapa, estas pérdidas se calculan a través de la fórmula de Steinmetz.

$$P_H = K_h f \beta_{max}^n \quad (15)$$

$K_h$  es el coeficiente de cada material,  $P_H$  es la pérdida por histéresis en W/kg,  $n$  es de 1,6 para  $\beta < 1$  Tesla (104 Gauss) y  $n$  es de 2 para  $\beta > 1$  Tesla (104 Gauss).

El coeficiente de la chapa oscila entre 0,0015 y 0,003, aunque baja hasta 0,007 en el hierro o acero de muy buena calidad.

- **Pérdidas en el cobre de los bobinados o por efecto Joule**

Al circular una corriente eléctrica por un conductor, hay una pérdida de potencia, que es igual al producto de su resistencia por el cuadrado de la intensidad de corriente que circula por él.

$$P = I^2 R \quad (16)$$

Donde,  $P$  es la pérdida en el devanado,  $I$  es la corriente en el devanado y  $R$  es la resistencia efectiva del devanado.

Para un conductor tipo cable la resistencia está dada por la siguiente formula:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (17)$$

Donde  $\rho$  es la resistividad del material,  $l$  es la longitud del cable y  $A$  es el área de la sección transversal del mismo.

Uno de los efectos perjudiciales de las perdidas por efecto Joule es el calentamiento que se produce en los conductores eléctricos. Para evitar que este calentamiento alcance valores excesivos se construyen de diferentes secciones[18].

Sin embargo, en transformadores pequeños como los de comunicaciones, que no están expuestos a altas potencias, las pérdidas afectan la amplificación, distorsión y características de respuesta del circuito. Por ello es importante saberlas predecir para comprender sus efectos y la forma en que estas varían respecto a su funcionamiento.

## 2.4.2 Refrigeración

Debido a que las pérdidas se manifiestan en forma de calor en el interior de los devanados y del núcleo; la eficiencia y rendimiento con que se disipe la potencia marca el aumento de la temperatura y por ello la durabilidad del aislante. Estas pérdidas acarrearán muchos problemas térmicos de gran costo económico, en los transformadores ya que afectan el rendimiento porque alteran la potencia por aumento de sobrecalentamientos.

Para valorar la eficiencia de los transformadores se hace por medio de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent} + P_{perd}} \times 100\% \quad (18)$$

El rendimiento del transformador se hace con aplicando la relación entre la potencia cedida al exterior de la máquina por el bobinado secundario y la potencia absorbida por el primario se utilizan 2 métodos para calcularla:

*Método directo*, se mide la potencia del primario con un vatímetro y la del secundario con otro, de forma que, el rendimiento vendrá determinado por el cociente que resulta entre ellos, como se expone en la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} 100$$

*Método indirecto*, se puede determinar el rendimiento a través del cociente que resulta de la suma de potencias de pérdidas en el cobre (lo que cede al exterior) y en el hierro (lo que absorbe) [18].

$$\eta = \frac{Pu}{(Pu + P_{cu} + P_{fe})} \quad (19)$$

### 2.4.3 Fugas magnéticas

Las fugas magnéticas se deben a las caídas óhmicas del número de espiras entre el devanado primario y secundario, aunque estas fugas magnéticas contribuyen a la caída de tensión en el transformador y aumenta la diferencia entre la razón de tensiones y la razón ideal, así que este depende no solo de la carga sino también crece con la frecuencia como el transformador de comunicaciones por lo que la razón de tensiones de este es diferente a frecuencias altas que a frecuencias bajas.

#### **2.4.4 Corrientes de excitación**

Mientras que en los sistemas de potencia, la corriente de excitación suele hacer disminuir el factor de potencia ya que estas son las producidas cuando un conductor atraviesa un campo magnético variable o viceversa, este movimiento causa una circulación de electrones, o corriente inducida dentro del conductor. Estas corrientes circulares de Foucault crean electroimanes con campos magnéticos que se oponen al efecto del campo magnético aplicado a mayor conductividad del conductor o mayor velocidad relativa de movimiento, mayores serán las corrientes de excitación y los campos opositores generados [1].

### **3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR MONOFASICO TIPO COLUMNA**

El diseño y construcción del transformador se realizó en 5 etapas, en la primera, se tomó de referencia un transformador construido por industrias Elektra Ltda de Bogotá Colombia y que se encuentra como recurso pedagógico en el laboratorio de electricidad Industrial del SENA de Popayán. Con base en este transformador se realizaron los planos correspondientes usando el programa AUTOCAD; en la segunda etapa se ejecutaron los cálculos respectivos para determinar el calibre del alambre y el voltaje que debían proporcionar las salidas; en la tercera etapa se adquirieron y compraron los materiales a utilizarse; en la cuarta etapa se inició la construcción de los devanados, se cortaron y troquelaron las placas para diseñar el núcleo magnético y en la quinta etapa, se realizaron las debidas conexiones en los terminales, el ensamble con las bases ya construidas, finalmente se hicieron los ensayos requeridos para verificar el comportamiento del transformador construido.

#### **3.1 Metodología del diseño tipo columna**

Dependiendo de la forma que tenga el núcleo, se realizan los cálculos apropiados para determinar el tipo de calibre a emplearse en los bobinados y el número de vueltas a realizarse.

Los datos necesarios para este diseño son los siguientes:

Tensión del primario ( $V_1$ )

Tensión del secundario ( $V_2$ )

Potencia que va a suministrar el (secundario),  $P$  en VA

Para calcular la sección del núcleo se calcula:

*Sección neta:* en  $cm^2$  de circuito magnético

$$S_n = K \sqrt{P(VA)} \quad (20)$$

*Sección real:*

$$S_n = AB \quad (21)$$

Cada término corresponde a,  $S_n$  es la Sección neta del núcleo en  $cm^2$ ,  $A$  es la sección real del núcleo,  $B$  es el Factor de apilamiento de la chapa,  $P$  es la potencia devanados y  $k$  es el coeficiente que depende de la calidad de la chapa.

*Elección de la chapa magnética:* (ancho de la columna  $B$ ). La elección de la chapa se hace en función de la sección neta ( $S_n$ ) resultante.

*Elección del carrete:* (dimensiones de la ventana del carrete  $BA$ ). Se calculará la función de la chapa elegida que será la sección real ( $S_n$ ) del núcleo.

*Número de chapas necesario:* ( $N_{chapa}$ ). Se obtiene a partir de la medida ( $A$ ) del carrete y del espesor ( $e$ ) de la chapa.

$$N_{chapa} = \frac{A}{e} \quad (22)$$

*Número de espiras de cada devanado ( $N_1, N_2$ ):* Se calcula a partir de la siguiente formula:

$$I_1 = \frac{P}{V_1} \quad (23)$$

$$I_2 = \frac{P}{V_2} \quad (24)$$

$I_1$  es la Intensidad del primario,  $I_2$  es la Intensidad del secundario y  $P$  es la potencia del transformador

Ya obtenidas las intensidades, nos referimos a la tabla de calibres que se encuentra

en el anexo 2 y se verifica el número del calibre a utilizarse en el transformador[19].

### **3.2 Cálculos empleando el diseño tipo columna**

El transformador monofásico que se construyó tiene la configuración tipo columna, para el núcleo con devanados concéntricos, como se mostró en la figura 6 y 7 del capítulo 1. El transformador constará de un embobina primario y de 6 embobinados secundarios concéntricos. Se estableció en el embobinado primario un voltaje nominal de 220 V, y voltajes nominales de: 380, 220, 120, 48, 24 y 12 V para los embobinados secundarios.

Para las dimensiones del núcleo se ajustaron las siguientes longitudes: la sección real del núcleo (A) en 6 cm y el factor de apilamiento (B) en 11 cm, para un total de área transversal del núcleo de 66 cm<sup>2</sup>. Ver la figura 1 del anexo 1. Adicionalmente se calcularon las potencias nominales de entrada y de salida y el número de vueltas y el calibre del alambre de los embobinados. A continuación, se muestran los respectivos cálculos.

#### **3.2.1 Calculo de la potencia de los devanados**

- *Potencia del primario*



De la ecuación 20, se encuentra que la potencia del primario es:

$$S_N = S = 1.2\sqrt{P_p}$$

Se obtiene:  $P_p = 3025 \text{ W} \approx 3.0 \text{ KVA}$ .

○ *Potencia en el secundario*

La potencia del embobinado secundario se puede calcular asumiendo que este tiene el 85% del embobinado primario.

$$P_s = P_p 0.85$$

La potencia en los devanados secundarios es de  $P_s = 2571.25 \text{ W} \approx 2.6 \text{ KVA}$

Posteriormente, se calculó la potencia de salida en cada uno de los devanados secundarios, Las potencias de los seis devanados secundarios se derivan de la anterior potencia ( $P_s$ ) dividida entre 6. De esta forma la potencia de salida de cada embobinado sería:  $428.54 \text{ W}$ , o aproximadamente  $0.4 \text{ KVA}$ .

### **3.2.2 Cálculo del número de espiras de los devanados**

Seguidamente, se calculó el número de espiras para cada devanado. Para calcular este valor se usa la siguiente ecuación para núcleo cerrado, el cual determina el factor de potencia y nos permite encontrar el número de espiras por voltio ya sea del devanado primario o secundario.

$$\frac{\varepsilon}{V} = \frac{41}{\sqrt{P}}$$

Para calcular el factor de potencia se toma el valor de 41 asignado a este tipo de núcleo cerrado y se determina el número de espiras de los devanados primario y

secundario se toma el mayor de valor de potencia que cae en los devanados, que este diseño es la potencia del primario cuyo valor es:

$$\frac{\varepsilon}{V} = \frac{41}{\sqrt{P_p}} = \frac{41}{55} = 0.745 \cong 1$$

Con  $P_p = 3025W$ . La relación  $\varepsilon / V$ , se puede aproximar a 1. De esta manera se calculó el número de espiras por voltio de los devanados primarios y secundarios, de la siguiente manera:

$$N_{p220} = \frac{\varepsilon}{V} * \varepsilon_{p220} = 1 * 220 = 220 \text{ espiras}$$

$$N_{s380} = \frac{\varepsilon}{V} * \varepsilon_{s380} = 1 * 380 = 380 \text{ espiras}$$

$$N_{s220} = \frac{\varepsilon}{V} * \varepsilon_{s220} = 1 * 220 = 220 \text{ espiras}$$

$$N_{s120} = \frac{\varepsilon}{V} * \varepsilon_{s120} = 1 * 120 = 120 \text{ espiras}$$

$$N_{s48} = \frac{\varepsilon}{V} * \varepsilon_{s48} = 1 * 48 = 48 \text{ espiras}$$

$$N_{s24} = \frac{\varepsilon}{V} * \varepsilon_{s24} = 1 * 24 = 24 \text{ espiras}$$

$$N_{s12} = \frac{\varepsilon}{V} * \varepsilon_{s12} = 1 * 12 = 12 \text{ espiras}$$

### 3.2.3 Cálculo del calibre del alambre de los devanados

El calibre de los alambres para los devanados primario y secundario, se obtiene de la ecuación 23 y 24, se inicia calculando las corrientes en cada devanado y verificando en la tabla del anexo el calibre ya estandarizado para cada corriente.

$$I_{p220V} = \frac{P_{p220V}}{\varepsilon_{p220V}} = \frac{3025}{220} = 13.75A$$

$$I_{s380V} = \frac{P_{s380V}}{\mathcal{E}_{s380V}} = \frac{428.5}{380} = 1.128A$$

$$I_{s220V} = \frac{P_{s220V}}{\mathcal{E}_{s220V}} = \frac{428.5}{220} = 1.947A$$

$$I_{s120V} = \frac{P_{s120V}}{\mathcal{E}_{s120V}} = \frac{428.5}{120} = 3.57A$$

$$I_{s48V} = \frac{P_{s48V}}{\mathcal{E}_{s48V}} = \frac{428.5}{48} = 8.927A$$

$$I_{s24V} = \frac{P_{s24V}}{\mathcal{E}_{s24V}} = \frac{428.5}{24} = 17.85A$$

$$I_{s12V} = \frac{P_{s12V}}{\mathcal{E}_{s12V}} = \frac{428.5}{12} = 35.71A$$

Los calibres estándar tomados del anexo 2 se muestran en la tabla 1:

Tabla 1. Corrientes y calibres según la tabla del anexo 2

Corrientes	Calibres
$I_{p220V} = 13.75 A$	# 9
$I_{s380V} = 1.128 A$	# 21
$I_{s220V} = 1.947 A$	# 19
$I_{s120V} = 3.57 A$	# 16
$I_{s48V} = 8.927 A$	# 12
$I_{s24V} = 17.85 A$	# 10
$I_{s12V} = 16.75 A$	# 6

### 3.3 Materiales utilizados

Una vez realizados los cálculos para el modelo a construir se adquirieron los siguientes materiales para el desarrollo de este proyecto, estos se compraron en la Empresa Suntec de Medellín, Proeléctricos y la Nota Musical de Popayán, teniendo en cuenta las especificaciones requeridas en los cálculos mencionados anteriormente. Estos se muestran a continuación en la tabla 2.

Tabla 2. Materiales utilizados

ALAMBRE DE COBRE RDO AWG, Calibre No 9
ALAMBRE DE COBRE RDO AWG, Calibre No 10
ALAMBRE DE COBRE RDO AWG, Calibre No 12
ALAMBRE DE COBRE RDO AWG, Calibre No 16
ALAMBRE DE COBRE CUAD AWG, Calibre No 6
ALAMBRE DE COBRE RDO AWG, Calibre No 19
ALAMBRE DE COBRE RDO AWG, Calibre No 21
LAMINA DE ACERO AL SILICIO, Espesor 0.27 mm
BASES (Rodachines, placa aluminio, bases, tornillos, pintura azul)
SOPORTES DEL NUCLEO (Varillas, tornillos, arandelas, bases núcleo)
CONEXIONES DEVANADOS (Espaguete, terminales de ojo, conectores)

A continuación, en la figura 37, se muestra las imágenes de los materiales adquiridos en la empresa SUNTEC de Medellín para la realización del proyecto.



Figura 37. Placas de acero al silicio y alambre de cobre [Empresa Transformadores SUNTEC de Medellín]

### 3.4 Construcción

En esta etapa se inicia con la construcción de los devanados primarios y secundarios para posteriormente hacer el diseño del núcleo tipo columna con las láminas de acero a los silicios apiladas a solape y finalmente realizar el ensamble y culminación del proyecto.

#### 3.4.1 Diseño de los devanados

Se empezó con el recorte del molde utilizando el material aislante (papel cartón) para evitar cortos circuitos por contacto en los bobinados del núcleo magnético, teniendo en cuenta las medidas de los respectivos devanados (primarios y secundarios), como se muestra en la figura 38. Luego, en este molde se enrollará una maqueta que se diseñó previamente con las medidas de la bobina, sirviendo de base para la construcción de todos los devanados, como se muestra en la figura 39.



Figura 38. Molde aislante de los devanados



Figura 39. Maqueta para la construcción de los devanados

Construcción del bobinado primario: en esta se enrollaron los bobinados de calibre # 9 correspondiente al devanado primario de 220 V, con dos calibres de los devanados secundarios; el # 12 equivalente a 24 V y el # 16 correspondiente a 12 V. Se enrollaron los bobinados primarios y secundarios apilados uno sobre otro con 220 espiras, 24 espiras y 12 espiras respectivamente, tal como se muestra en la figura 40.

Bobinado secundario: en esta se enrollaron iniciando con los de mayor calibre # 21, # 19, # 16 y # 10 correspondiente a los devanados secundarios de 380 V, 220 V, 120 V y 24 V respectivamente, apilándose uno sobre otro, tal como se muestra en la figura 41.



Figura 40. Bobinado primario



Figura 41. Bobinado secundario

Vale la pena aclarar que para aislar el corto por contacto de los bobinados se utilizó papel mantequilla. La estructura que se manejó en los bobinados fue la de bloques, dado que para cada devanado se armó una maqueta distinta, lo que resultó con la creación de dos maquetas, esto permitió apilarlos uno sobre otro, además de remover o cambiar los bobinados, si se presentaba alguna falla como: cortos eléctricos o desgaste del alambre. Lo anterior, es muy importante porque facilita el control y el chequeo de posibles fallas y pérdidas en el transformador (monofásico) realizado, como se muestra en la figura 42.

Se debe agregar que una vez terminado el proceso de enrollamiento de las dos maquetas, se procede a aislarlas del núcleo magnético con cinta aislante y espaguete en las terminales de los cables, de esta forma evita cortos por contacto en los terminales del tablero del transformador, como se evidencia en la figura 43.



Figura 42. Devanados



Figura 43. Devanados con material aislante

### 3.4.2 Diseño del núcleo

Inicialmente, se hizo un corte de placas con la máquina denominada “cizalla eléctrica” y se elaboró la forma del núcleo, tal como se muestra en la figura 44. Posteriormente, los cortes de las placas se realizaron de acuerdo al tipo de núcleo cerrado, debido a que el corte en forma de U con el cortador a láser es muy costoso y difícil de conseguir, por lo cual se realizó un procedimiento con características similares al anterior que permitió la realización del núcleo troquelado apilando las placas una sobre otra de forma escalonada, para que se sujeten estas y den estabilidad al paso del flujo magnético. La forma de troquelado ya mencionada, redujo los costos del corte de las placas en forma de U, evidenciada en la figura 45.





Figura 44. Cizalla eléctrica



Figura 45. Corte de las placas del núcleo magnético

A continuación, se muestra en la figura 46 la forma de construcción del núcleo teniendo en cuenta la manera de armar las placas a solape.



Figura 46. Apilamiento de las placas de acero al silicio



Figura 47. Ajuste del núcleo magnético del transformador monofásico

Finalmente, se ajustaron las bases del núcleo magnético, que dio paso al diseño de este en el transformador monofásico sujeto de estudio, tal y como se muestra en la figura 47.

### 3.4.3 Conexiones en el tablero

En las bases construidas del transformador monofásico se colocó el núcleo magnético, como se muestra en la figura 48. Luego, se realizaron las conexiones para cada una de las terminales de los bobinados tanto primarias como secundarias, como se presenta en la figura 49 de la siguiente forma:



Figura 48. Bases del núcleo magnético

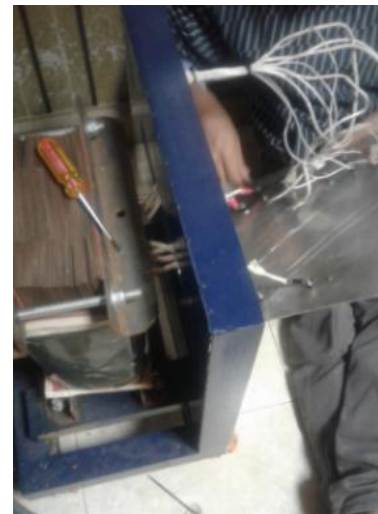


Figura 49. Conexiones de las terminales del bobinado primario y secundarios

Para finalizar, el transformador monofásico es sometido a pruebas eléctricas con resultados aceptables en cada una de ellas. Cabe resaltar que las seis salidas de los devanados secundarios de este transformador, crean las ventajas de ser un elevador, igualador y reductor de voltaje en un mismo dispositivo eléctrico, presentada en la figura 50.



Figura 50. Transformador monofásico terminado, vista frontal y vista lateral.

## **4. METODOLOGIA PARA LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES**

Este capítulo contiene la metodología empleada para realizar las mediciones de las pruebas eléctricas del transformador monofásico, según el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC.

En la norma técnica colombiana NTC 380, se establecen los ensayos a los que se debe someter un transformador de potencia además específica la normatividad aplicada a cada ensayo.

### **4.1 Pruebas eléctricas**

Se realizan para verificar el correcto funcionamiento del transformador tanto en su núcleo como en sus devanados midiendo los niveles de aislamiento, pérdidas en vacío, pérdidas en cortocircuito y cálculo de la eficiencia del equipo.

#### **4.1.1 Prueba No.1: Resistencia de aislamientos**

En este ensayo se tuvo en cuenta la norma NTC 947, la cual habla de la resistencia de los aislamientos ( $IR_t$ ) – (Insulation Resistance), para ello se toma un tiempo especificado ( $t$ ), desde el comienzo de la aplicación de la tensión, usualmente el tiempo de aplicación es de 1 minuto ( $IR_1$ ) a 10 minutos ( $IR_{10}$ ); sin embargo se pueden usar otros valores[20]. Esta prueba que se hace para evaluar la condición del aislamiento eléctrico y para verificar con mayor precisión y exactitud que el transformador cumple con la resistencia mínima bajo la operación a la que será sometido y comprobar su deterioro gradual. El método de prueba de la

resistencia de aislamiento de un transformador es el de la medición directa con el instrumento llamado (Megger)[21].

La resistencia de aislamiento o índice de polarización (IP) es la relación de las resistencias medidas, en el cual los valores superiores a 1.5 son indicativos de una buena condición del aislamiento, los transformadores de potencia generalmente registran valores entre 1.5 a 1.8 y los valores menores que 1 requieren acción correctiva inmediata.

$$IP = \frac{R_{10 \text{ min}}}{R_{1 \text{ min}}} \quad (25)$$

Cada devanado primario y secundarios se cortocircuitan entre sí, en forma independiente y se conectan las puntas del equipo para medir las resistencias de aislamiento entre primario y secundarios y entre cada uno de ellos respecto a tierra, así: alta tensión y baja tensión (A/B), alta tensión y tierra (A/T), baja tensión y tierra (B/T), como se muestra a continuación.

Los valores del índice de polarización es un valor adimensional y va a permitir hacer comparaciones sobre el estado del aislamiento del transformador, está muy poco afectados por la temperatura, por lo que salvo en condiciones en que la prueba se haya realizado a elevada temperatura (por encima de los 40°C) no necesitan corrección. Asimismo, se debe considerar que no se produce un cambio de temperatura importante durante el tiempo en que dura el ensayo[22].

En tabla 3 se muestran los valores de índice de polarización, con su respectiva grafica (Figura 51), a continuación sus circuitos de conexión (Figuras 52 a 54).

Tabla 3. Estado de la aislación eléctrica  
IRAM - 2325[22]

Índice de polarización IP 10-1 min	Condición del aislamiento – Std IRAM 2325
Menos de 1	Peligroso
Menor de 1.5	Cuestionable
1.5 a 2.0	Aceptable
2.0 a 3.0	Bueno
3.0 a 4.0	Muy bueno
Mayor a 4.0	Excelente

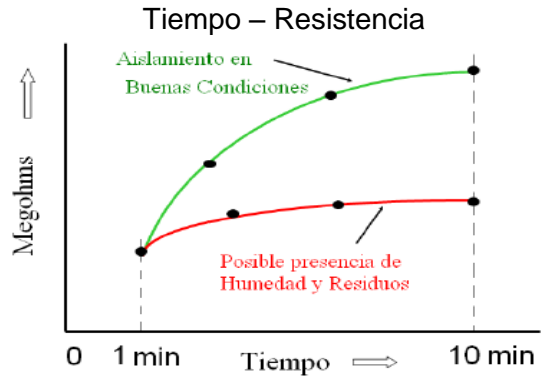


Figura 51. Grafica tiempo resistencia[22]

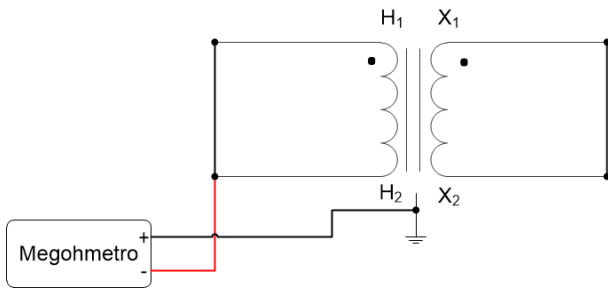


Figura 52. Polarización con primario a tierra [22]

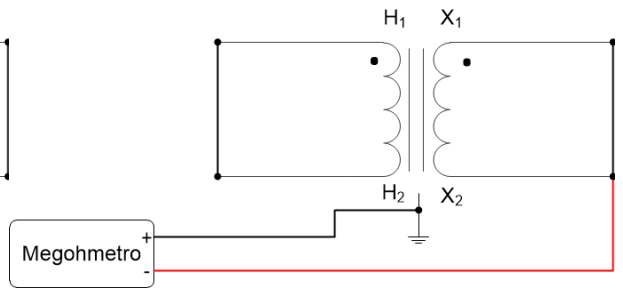


Figura 53. Polarización con secundario a tierra [22]

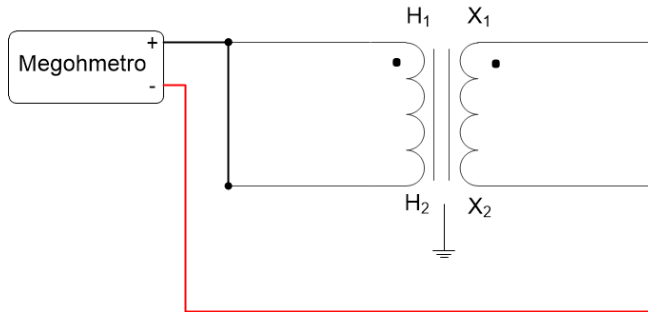


Figura 54. Polarización primario a secundario[22]

#### 4.1.2 Prueba No. 2: Resistencia en los devanados

Se aplica la norma NTC 375 que dice que el método de prueba para la medida de la resistencia en los devanados se efectúa por los métodos de caída de tensión,

(Figura 55) conociendo la intensidad de la corriente, el voltaje y determinando la resistencia por medio de la ley de ohm.

$$V = IR \quad (26)$$

La exactitud de este método depende de la medida de las dos magnitudes desconocidas por medio de instrumentos indicadores, se obtienen los resultados cuando el voltímetro y el amperímetro se pueden leer con la misma precisión[23].

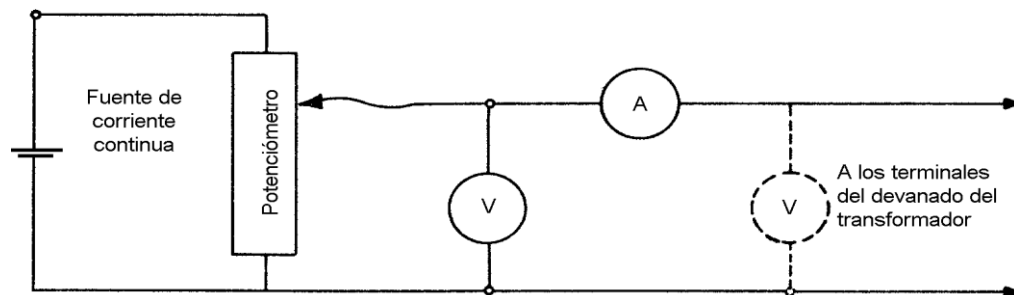


Figura 55. Circuito para medir la resistencia de los devanados por el método de la caída de tensión[23].

El método de caída de potencial, es más conveniente para las medidas de campo se realiza para determinar las pérdidas en el cobre las cuales se determinan mediante la siguiente ecuación  $P=I^2R$  de los devanados y para calcular la temperatura de los mismos al final de la prueba, se debe utilizar solamente si la corriente nominal de los devanados es mayor a 1 A. En esta medición se deben tener en cuenta lo siguiente: la corriente utilizada no deberá exceder el 15% de la corriente nominal del devanado bajo prueba, lo anterior permitirá evitar errores por calentamiento de los conductores.

Las terminales del voltímetro y amperímetro deberán ser independientes y así mismo conectarse tan cerca como sea posible del devanado a medir, las lecturas de los instrumentos, se toman hasta que las agujas se hayan habilitado. Se

tomaran al menos tres lecturas, tanto de corriente como de voltaje y el promedio de las resistencias, se consideran como la resistencia óhmica[24].

### 4.1.3 Prueba No. 3: Relación de transformación

En este ensayo se aplica la norma NTC 471, esta norma establece la forma de efectuar la medición de la relación de transformación en los transformadores de potencia.

Existen tres métodos de medición: el Método del voltímetro, Método del transformador patrón y el Método del divisor patrón. Para este caso se utilizó el método de división patrón, el cual utiliza un potenciómetro de resistencia entre los terminales de los devanados, los cuales se conectan como se muestra en la figura 56. Entre el punto variable del potenciómetro y uno de los terminales de los devanados se conecta un detector D, adecuado cuando el detector indica cero la relación de la resistencia  $R_1/R_2$ , representa la relación de transformación[25].

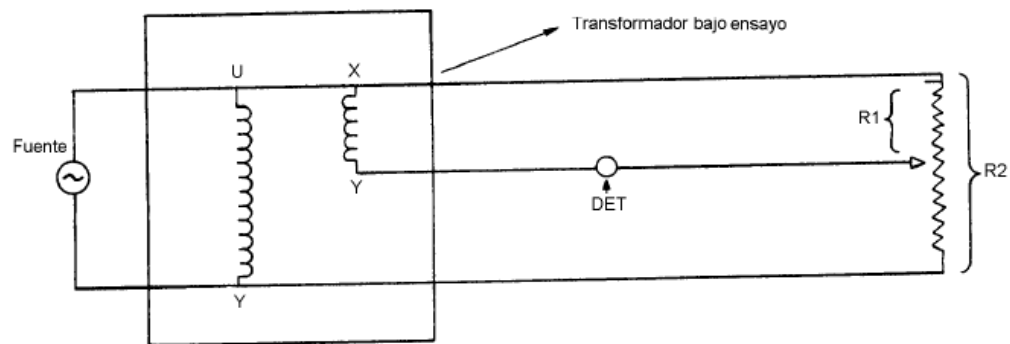


Figura 56. Circuito para medir la relación de transformación con el método de división patrón[25]

El significado de la prueba de Relación de Transformación es la razón del número de espiras del devanado de alta tensión contra las de baja tensión. Por lo tanto, en



un transformador el cual posee derivaciones de tensión (TAP's) se deberá comprobar la relación teórica según la placa de datos del mismo contra lo que se obtenga de los ensayos, así se podrá tener un pequeño panorama acerca de las condiciones de ambos devanados (Baja tensión y Alta tensión) así como del sistema magnético del núcleo.

La tolerancia para la relación de transformación, medida cuando el transformador está sin carga, debe ser de  $\pm 0,5\%$  en todas sus derivaciones. Para poder realizar la medición de este parámetro se utilizan equipos denominados medidores TTR (Transformer Turns Ratio) o DTR (Digital Transformer Ratiometer), estos equipos nos proporcionaran datos numéricos acerca de la relación de espiras en el equipo sometido a prueba [26]. Para observar la variación lineal entre el voltaje de salida y el voltaje de entrada, se realizó un ensayo con una resistencia de carga de  $28 \Omega$  y 3 A conectada al embobinado de salida. Este consistió en variar de 0 a 220 V el voltaje de entrada y medir el voltaje de salida.

#### **4.1.4 Prueba No. 4: Verificación de polaridad y medición de polaridad aditiva y sustractiva**

En esta prueba se aplica también la norma anterior NTC 471, esta dice que la polaridad indica los polos positivos y negativos de los terminales del transformador en un determinado instante.

Existen 3 métodos para verificar la polaridad: Método del transformador patrón, método de la descarga inductiva, método de la corriente alterna. Para este ensayo se utilizó el método de la corriente alterna, se conectó entre si los terminales de los devanados de alta y baja tensión contiguos del lado izquierdo del transformador, se aplica cualquier tensión de corriente alterna al devanado

completo de alta tensión y se efectúa las lecturas, primero de la tensión aplicada y luego de la tensión entre los terminales contiguos del lado derecho de ambos devanados. Si esta última lectura es de menor valor que la primera, la polaridad es sustractiva y si es de mayor valor que la primera la polaridad es aditiva[25].

Existen dos tipos de polaridades que puede tener el transformador: Polaridad aditiva (Figura 57) y sustractiva (Figura 58). En la aditiva  $H_1$  y  $X_1$  se marcan de forma diagonal entre primario y secundario. En la sustractiva  $H_1$  y  $X_1$  se marcan de forma adyacente como se muestra a continuación.

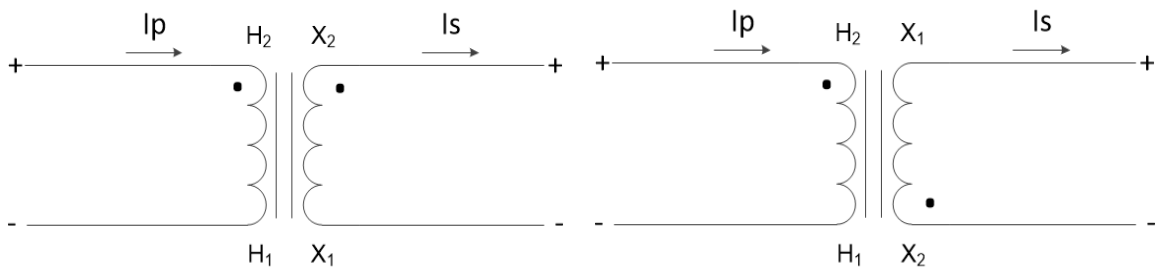


Figura 57. Polaridad sustractiva[27]

Figura 58. Polaridad aditiva[27]

Para poder determinar la polaridad aditiva y sustractiva en los transformadores se conecta una fuente en el primario, luego un cable puente entre los terminales adyacente de primario y secundario, mientras que en los terminales adyacentes restantes se conecta un voltímetro. Se considera polaridad aditiva si el mayor voltaje registrado es mayor que la fuente, y sustractivo si es menor como se muestra en la figura 59 y 60.

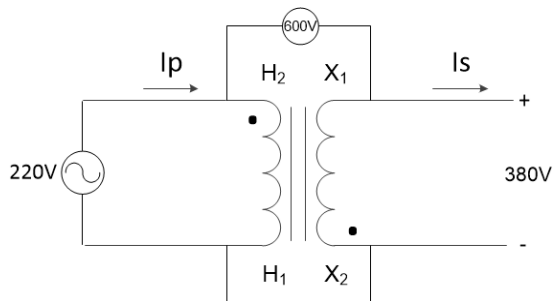


Figura 59. Circuito polaridad aditiva [27]

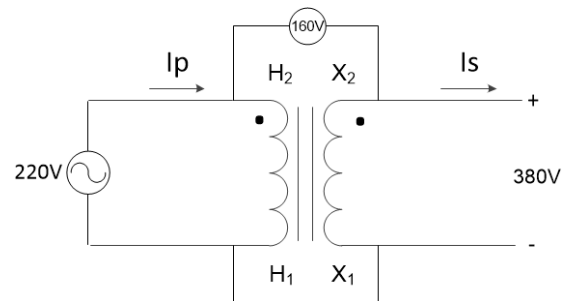


Figura 60. Circuito polaridad sustractiva[27]

La importancia de marcar la polaridad, es para poder conectarlos transformadores en paralelo (esto evita cortocircuitos por flujos contrarios de corriente) o para poder utilizarlos adecuadamente como autotransformadores [27].

#### 4.1.5 Prueba No. 5: Ensayo de vacío

Se toma la norma NTC 1031 que establece el ensayo al que debe someterse el transformador para determinar las pérdidas y las corrientes sin carga [28].

El procedimiento requerido para esta prueba es la siguiente, se deja abierto el circuito del devanado secundario y el primario se conecta a una línea de voltaje pleno, en estas condiciones, toda la corriente de entrada debe fluir a través de la rama de excitación hacia el transformador, los elementos en serie  $R_p$  y  $X_p$  son muy pequeños en comparación con  $R_N$  y  $R_M$  para causar una pérdida importante de voltaje. En el circuito de la figura 60, se muestra como se debe aplicar una línea de voltaje pleno al devanado primario y medir el voltaje, la corriente y la potencia de entrada del transformador, esta medición se hace en la rama de bajo voltaje (secundario), ya que los más altos son más fáciles de trabajar. Con esta información se determina el factor de potencia de la corriente de entrada y con ello la magnitud y el ángulo de impedancia de excitación.

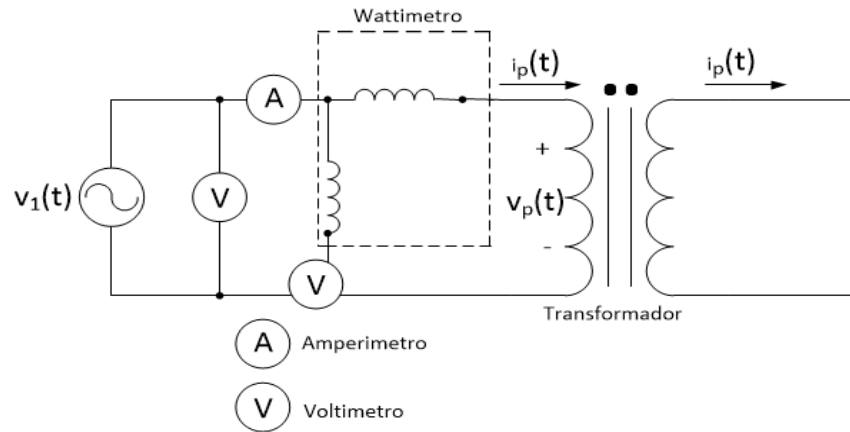


Figura 60. Conexión para la prueba de vacío del transformador[17]

Los datos a determinar con este ensayo de vacío son los valores de  $R_N$  y  $X_N$ , lo cual consiste en determinar las admitancias de la rama de excitación y la conductancia del resistor de pérdidas en el núcleo está dada por:

$$G_N = \frac{1}{R_N}$$

Y la susceptancia del inductor es dada por:

$$B_M = \frac{1}{X_M}$$

Con los términos en paralelo, se suman sus admitancias de excitación total así:

$$Y_E = G_N - jB_M$$

$$Y_E = \frac{1}{R_N} - j \frac{1}{X_M} \quad (27)$$

Cuya magnitud, puede calcularse con base en el voltaje y corriente de la prueba de circuito abierto de la siguiente manera.

$$|Y_E| = \frac{I_o}{V_o}$$

El ángulo de potencia se puede calcular con base en el factor de potencia (FP) que está en retraso en el transformador real, así:

$$FP = \cos \theta = \frac{P_o}{V_o I_o}$$

Despejando el ángulo  $\theta$  se tiene:

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_o}{V_o I_o}$$

Por ende, su ángulo de corriente estará en retraso respecto al ángulo de voltaje, en  $\theta$ , por lo tanto la admitancia  $Y_E$  es:

$$Y_E = \frac{I_o}{V_o} \angle -\theta$$

$$Y_E = \frac{I_o}{V_o} \angle -\cos^{-1} FP \quad (28)$$

Con las ecuaciones 27 y 28 se determinaron los valores de  $R_N$  y  $R_M$  directamente [15].

#### 4.1.6 Prueba No. 6: Ensayo de corto circuito

Se toma la norma NTC 1005, esta norma tiene por objeto establecer los métodos de ensayo para determinar la tensión de cortocircuito de los transformadores[29].

El procedimiento a seguir es el siguiente, se hace un cortocircuito en los terminales de bajo voltaje del transformador y las terminales de alto voltaje se conectan a una fuente variable, como se evidencia en la figura 61, esa medición se hace en el lado de alto voltaje, debido a que las corrientes serán más bajas y más fáciles de trabajar.

Para esta prueba se ajusta el voltaje de entrada hasta que la corriente en los devanados en cortocircuito sea igual a su valor nominal, “en caso de que no se

pueda alcanzar los valores nominales de corriente, se puede utilizar una corriente no menor al 25% de  $I_n$ , corrigiendo el valor obtenido”[29]. Es necesario cerciorarse de mantener el voltaje primario en un nivel seguro, ya que es peligroso quemar los devanados de los transformadores en esta prueba, de nuevo se mide el voltaje, la corriente y la potencia de entrada. Puesto que el voltaje de entrada es tan bajo durante la prueba de cortocircuito, la corriente que fluye por la rama de excitación es despreciable. Si se ignora la corriente de excitación, entonces toda la caída de voltaje se puede atribuir a los elementos en serie en el circuito.

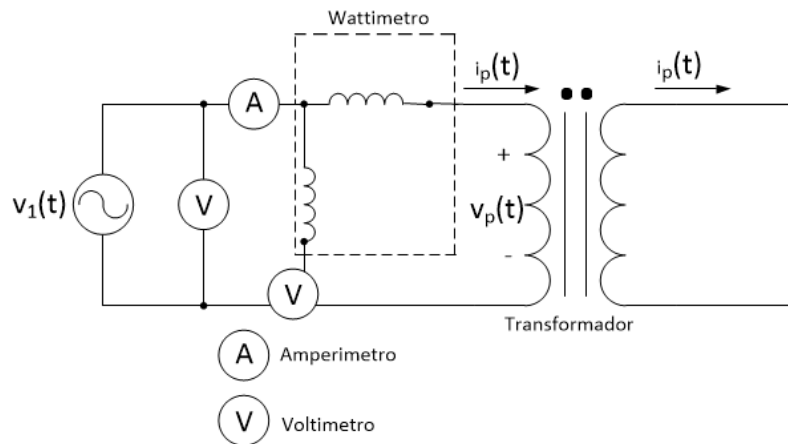


Figura 61. Conexión para la prueba de corto circuito del transformador[17]

La magnitud de las impedancias en serie referidas al lado primario son:

$$|Z_E| = \frac{V_{CC}}{I_{CC}}$$

El factor de potencia de la corriente está dado por:

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{CC}}{V_C I_{CC}}$$

Y este factor de potencia está en retraso; por lo tanto, el ángulo de corriente es negativo y el ángulo de impedancia total  $\theta$  es positivo.

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{CC}}{V_C I_{CC}}$$

Así, la impedancia es:

$$Z_{SE} = \frac{V_{CC} \angle 0^\circ}{I_{CC} \angle -\theta^\circ} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \angle \theta^\circ$$

La impedancia en serie es  $Z_{SE}$  es igual a:

$$Z_{SE} = R_{eq} + jX_{eq} \tag{29}$$
$$Z_{SE} = (R_p + a^2 R_s) + j(X_p + a^2 X_s)$$

Se puede determinar la impedancia en serie total que está referida al lado de alto voltaje, por medio de la técnica anteriormente descrita, aunque no hay una forma fácil de dividir la impedancia en serie en sus componentes primario y secundario.

La prueba de circuito abierto que determinan los parámetros  $R_N$  y  $R_M$  se debe realizar en el lado de bajo voltaje del transformador, y la de cortocircuito con los parámetros de  $R_{eq}$  y  $X_{eq}$  se realiza en el lado de alto voltaje. Todos los elementos se deben referir al mismo lado para crear el circuito equivalente final[15].

## 5. RESULTADOS Y ANALISIS

Después de la construcción, el equipo se sometió a una serie de pruebas eléctricas requeridas en todo transformador de potencia, en este caso se hizo una aproximación de los ensayos realizados a los transformadores de distribución y se aplicaron estos ensayos al transformador diseñado, estas pruebas fueron: Prueba No. 1: Resistencia de aislamientos , Prueba No. 2: Resistencia en los devanados, Prueba No. 3: Relación de transformación, Prueba No. 4: Verificación de polaridad y medición de polaridad aditiva y sustractiva, Prueba No. 5: Ensayo de vacío y Prueba No. 6: Ensayo en corto circuito.

Estas pruebas se realizaron para verificar el nivel de aislamiento, correcta polaridad en los devanados y para determinar las pérdidas en los devanados y núcleo del transformador para obtener de forma experimental los valores aproximados de las impedancias y resistencias que se iban a modelar en los circuitos equivalentes.

A continuación se describen los equipos empleados para la realización de los ensayos, así como los resultados y análisis que se realizó a cada ensayo.

### 5.1 Equipos utilizados en las pruebas eléctricas

1 Transformador monofásico.	1 Variac de (0 – 5A).	1 Pinza
1 Micrómetro OM20	2 Multímetros digitales.	1 Megger
1 Analizador de red	Cables conectores.	

Todos estos equipos fueron debidamente calibrados para tomar las medidas.



## 5.2 Resultados de los ensayos eléctricos realizados

Los resultados de los ensayos anteriormente descritos fueron:

### 5.2.1 Prueba No. 1: Resistencia de aislamientos

En este ensayo se inició cortocircuitando todas las bobinas primaria y secundarias, luego se inyectó un voltaje nominal de entrada de 120V en DC a cada devanado por separado, se midió la resistencia en la conexión alta tensión y tierra (A/T), alta tensión y baja tensión (A/B), baja tensión y tierra (B/T) (Figura 62). Para la medida de resistencia de aislamientos se utilizó el instrumento llamado Megger que mostró el resultado de la resistencia y de esta forma se determinó el nivel de aislamiento en un intervalo de tiempo de (1-10) minutos, verificando que sus valores se encontraran en el rango requerido en la norma como se muestra en la tabla 3 de la página 60.



Figura 62. Resistencia de aislamientos en configuración A/T - A/B - B/T

A continuación, se muestran los datos y gráficas correspondientes a cada conexión

Tabla 4. Resultados de la prueba resistencia de aislamientos

Tiempo	A/T (MΩ)	A/B(MΩ)	B/T(MΩ)
1	65,9	174,1	11,88
2	78,8	198,9	16,83
3	90,9	223,7	19,82
4	101,6	239,3	22,69
5	118,5	249,7	25,82
6	131,3	255,5	27,8
7	145,6	257,8	30,1
8	153,2	259,8	33,8
9	160,8	260,6	36,6
10	170,3	261,2	39,1

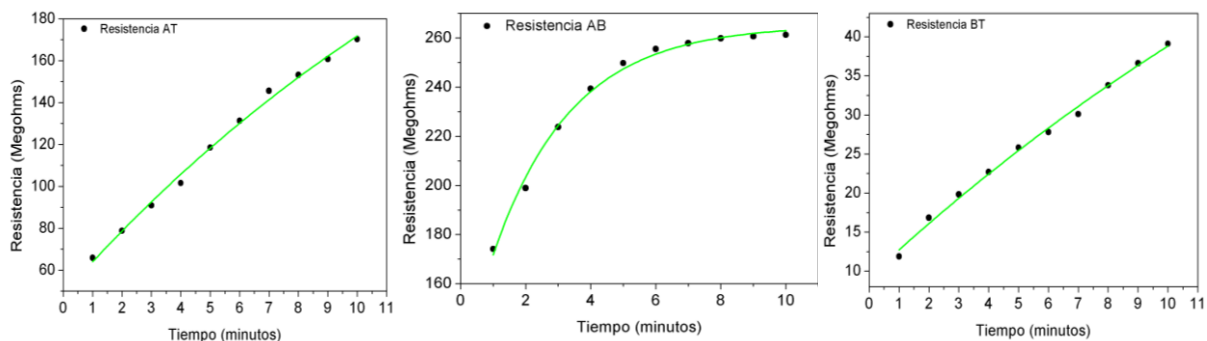


Figura 63. Graficas resistencias de aislamiento A/T - A/B - B/T

El resultado del nivel de aislamiento o índice de polarización IP para cada conexión calculado utilizando la ecuación 25 de la página 59, el cual se derivó de la razón entre la medida de resistencia en el minuto 1 y minuto 10, fueron de:

Para la conexión de alta tensión y tierra (A/T) el valor del índice de polarización calculado fue de 2,6.

Para la conexión de alta tensión y baja tensión (A/B) el valor del índice de polarización fue de 1,5.

Para la conexión de baja tensión y tierra (B/T) el valor del índice de polarización calculado fue de 3,3.

## 5.2.2 Prueba No. 2: Resistencia en los devanados

En este ensayo se aplicó una corriente en DC igual o inferior a 1A como indica la norma NTC 375 y se midió la resistencia con un equipo llamado Micrómetro OM20 debido a que el display del equipo estaba dañado se utilizó un multímetro para medir el voltaje y luego calcular la resistencia en cada una de las medidas con la ayuda de la ley de ohm, también se corroboró que la temperatura ambiente y la humedad se encontraban en  $T = 26,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , a 50% de humedad, de esta forma evaluar si afecta o no la prueba.

En la figura 64 se muestra el montaje experimental para este ensayo.



Figura 64. Ensayo de resistencia en los devanados y equipo utilizado Micrómetro OM20

Se realizaron las medidas de corriente, voltaje y se calcularon las resistencias para cada uno de los devanados primario y secundarios obteniendo los siguientes resultados, los cuales se agruparon en la tabla 5.

Tabla 5. Resultado ensayo de resistencia en los devanados secundario

<b>Devanado</b>	<b>Voltaje nominal(V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Voltaje medido(V)</b>	<b>Resistencia (<math>\Omega</math>)</b>
Primario	220	1	0,2796	0,2796
Secundario	380	0,01	0,0644	6,4
Secundario	220	0,01	0,0213	2,1
Secundario	120	0,1	0,0701	0,7
Secundario	48	1	0,1268	0,1268
Secundario	24	1	0,036	0,036
Secundario	12	1	0,0092	0,009

Se realizó una gráfica de los valores de resistencia contra voltaje nominal en los secundarios que se muestra en la figura 65.

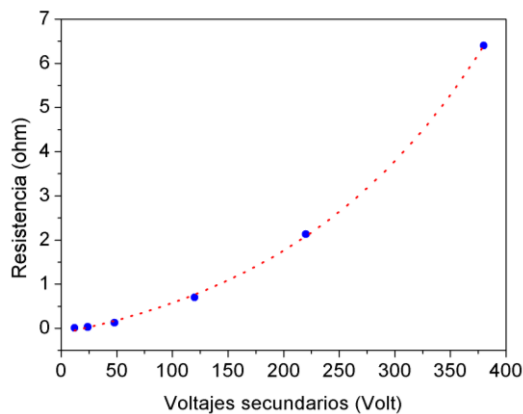


Figura 65. Grafica de voltaje secundarios Vs resistencia

### 5.2.3 Prueba No. 3: Relación de transformación

*Método 1:* Este ensayo se realizó con un instrumento de medida llamado TTR (Transformador de relación de vueltas), para ello se inyectó un voltaje en AC de 220V en el devanado primario y se conectaron los terminales del equipo a cada uno de los devanados secundarios para que este equipo de medida compare el voltaje de entrada suministrado y de salida recibido y realice el debido cálculo y muestre el resultado.

En la figura 66 se muestra el montaje experimental para el ensayo.



Figura 66. Ensayo relación de transformación

Los resultados y el respectivo calculo del porcentaje de error para cada medida se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados del ensayo “Relación de transformación”

<b>Configuración</b>	<b>Resultado practico</b>	<b>Resultado teórico</b>	<b>% de error</b>
380V/220V	0,554	0,58	4,4
220V/220V	0,972	1	2,8
220V/120V	1,77	1,83	3,2
220V/48V	4,52	4,58	1,3
220V/24V	9,07	9,1	0,2
220V/12V	18,08	18,3	1,2

*Método 2:* También se midió la relación de transformación variando el voltaje de entrada del devanado primario utilizando una fuente o Variac de (20 – 220) V en intervalos de 20V, se conectó una resistencia de carga de 28 ohmios en el secundario. Con ayuda de dos multímetros se tomaron la medidas de los voltajes repitiendo el mismo procedimiento para cada devanado secundario, este ensayo se realizó con el fin de verificar la linealidad que presenta dicha relación como se muestra en la figura 67.



Figura 67. Medida de voltaje de entrada y salida y equipos utilizados Variac, Multímetro digital

A continuación, se muestra la gráfica de los datos tomados en este ensayo el cual se realizó con el fin de verificar la linealidad que presenta dicha relación como se muestra en la figura 68.

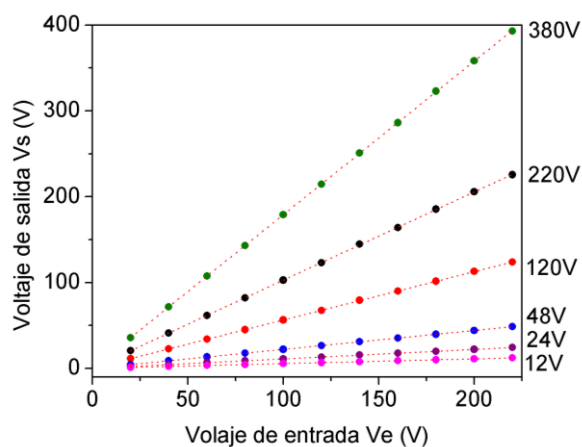


Figura 68. Voltaje de entrada y voltaje de salida

La incertidumbre que se tiene en cada medida es alrededor del 0,5 %

#### 5.2.4 Prueba No. 4: Verificación de polaridad y medición de polaridad aditiva y sustractiva

Para la realización de este ensayo primero se verifico que los terminales en el tablero del transformador correspondieran a las conexiones de los principios y finales en el equipo y posteriormente se midió la polaridad aditiva y sustractiva.

Para medir la polaridad aditiva, se aplicó en el primario un voltaje de 220V utilizando un equipo llamado Variac, luego se conectó un cable puente entre los terminales adyacentes del primario y secundario el cual se enchufó a un voltímetro que midió los voltajes de salida en cada uno de los devanados secundarios y de esta forma se evaluó la polaridad sustractiva.

En la figura 69, se muestra el montaje experimental del ensayo.



Figura 69. Ensayo de polaridad aditiva y sustractiva, equipos utilizados Variac y multímetro digital

En la tabla 7 se muestra los resultados de las medidas de polaridad aditiva, y en la figura 70 se observa la polaridad aditiva teórica y experimental en función de los voltajes nominales.

Tabla 7. Polaridad aditiva

<b>Voltajes secundarios</b>	<b>380V</b>	<b>220V</b>	<b>120V</b>	<b>48V</b>	<b>24V</b>	<b>12V</b>
<i>Aditiva practica (V)</i>	612	444	344,2	268,8	244,5	234
<i>Aditiva teórica (V)</i>	600	440	340	268	244	232
<i>% de error</i>	2%	0,9%	1,2%	0,3%	0,2%	0,8%

El porcentaje de error en la medida vario alrededor de (0.2 al 2%).

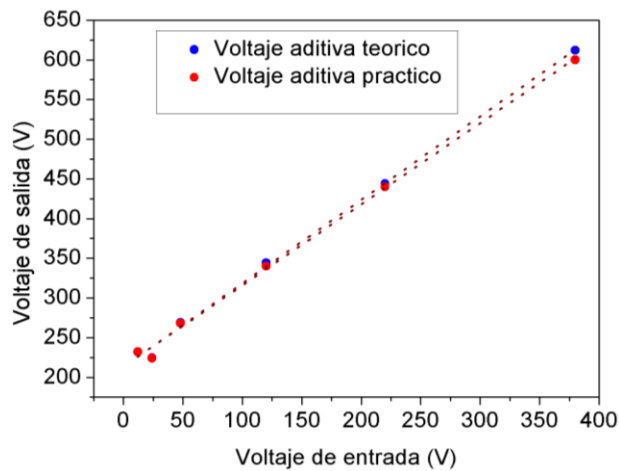


Figura 70. Polaridad aditiva

Para medir la polaridad sustractiva, se aplicó un voltaje de 220V en el primario utilizando un Variac, luego se conectó un cable puente entre los terminales alternados del primario y secundario el cual se vinculó a un voltímetro que midió los voltajes de salida en cada uno de los secundarios.

En la tabla 8 se observan los resultados obtenidos y en la figura 71 se observa polaridad teórica y experimental en función de los voltajes nominales.



Tabla 8. Resultados de ensayo polaridad de transformadores

<b>Voltajes secundarios</b>	<b>380V</b>	<b>220V</b>	<b>120V</b>	<b>48V</b>	<b>24V</b>	<b>12V</b>
<i>Sustractiva practica(V)</i>	-163,8	0,09	96	171,7	196,4	210
<i>Sustractiva teórica (V)</i>	-160	0,01	100	172	196	208
<i>% de error</i>	2,3%	8%	4%	0,17%	0,2%	0,9%

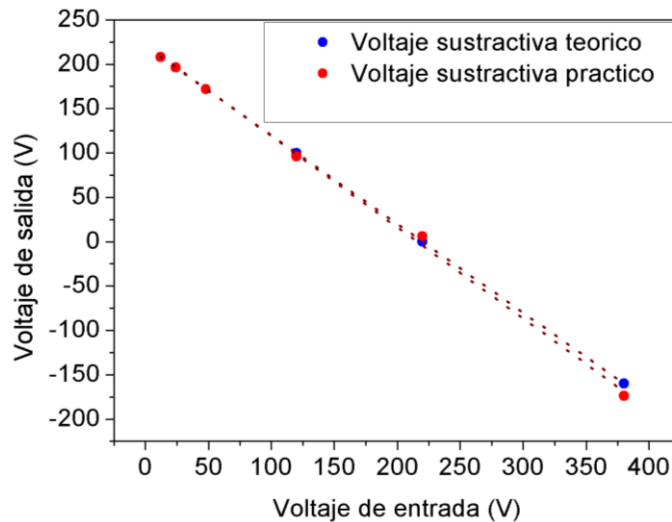


Figura 71. Polaridad sustractiva

De la tabla 8, se corroboró que el porcentaje de error vario entre el (0.17 al 8%)

### 5.2.5 Prueba No. 5: Prueba de vacío

Con la prueba de vacío se determinó las perdidas magnéticas, o perdidas en el núcleo, el procedimiento que se siguió fue el siguiente. Se energizo con un equipo de inyección primaria un voltaje de 220V AC en el devanado primario, dejando los devanados secundarios del transformador abiertos y se midió cuanto consume en vacío en el primario, el equipo mostro los siguientes resultados de corriente, voltaje y la potencia de vacío requeridos en este ensayo.

En la figura 72 se muestra el montaje del ensayo y en la tabla 9 sus resultados.

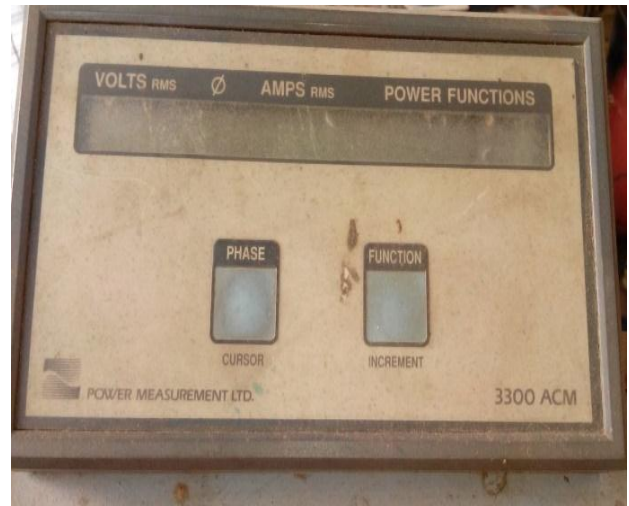


Figura 72. Prueba de vacío

En la tabla 9 se muestra los resultados del ensayo de vacío.

Tabla 9. Datos de prueba de vacío

<i><b>Voltaje de vacío (<math>V_0</math>)</b></i>	<i><b>Corriente de vacío (<math>I_0</math>)</b></i>	<i><b>Potencia de vacío (<math>P_0</math>)</b></i>
236 V	0,1 A	13 W

### 5.2.6 Prueba No. 6: Prueba de corto circuito

El procedimiento fue cortocircuitar cada devanado secundario por separado y aumentar la corriente con un Variac, hasta llegar a la corriente nominal en cada devanado secundario y medir con el analizador de red la potencia, corriente y voltaje en cortocircuito que se generaba en el devanado primario, con los datos de corriente y con las medidas de resistencia en los devanados que se determinaron en la tabla 5 de la página 74, se calcularon las pérdidas por efecto Joule en cada devanado y la sumatoria total de estas pérdidas, posteriormente se calcularon los parámetros de la rama de magnética y de los bobinados los cuales se modelaron

en los circuitos equivalentes referidos al lado primario del transformador y finalmente se calcularon las eficiencias de cada configuración que tiene el transformador tomando un factor de carga (C) igual a 1.

La figura 73 muestra el montaje del ensayo de corto circuito y el equipo utilizado.

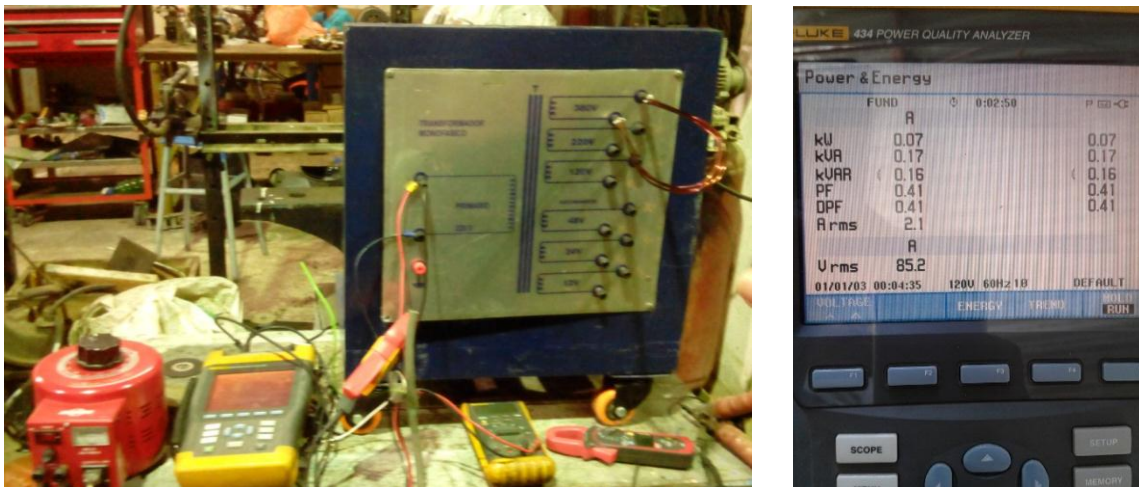


Figura 73. Montaje prueba de corto circuito y los resultados en el analizador de red.

En la tabla 10 se presentan los resultados para el ensayo de cortocircuito.

Tabla 10. Resultados ensayo de corto circuito

<b>Configuración</b>	<b>Voltaje de corto (V)</b>	<b>Corriente de corto (A)</b>	<b>Potencia de corto (W)</b>	<b>Porcentaje de pérdida</b>
(220/380) V	85,2	3,4	110	38%
(220/220) V	93,8	3,7	130	42%
(220/120) V	95,7	3,9	150	43%
(220/48) V	3,4	1,1	3,5	1.5%
(220/24) V	3,9	1	3,8	1.7%
(220/12) V	4,7	0,9	4	2.1%

En la tabla 11 se observa las corrientes nominales utilizadas para cada devanado así como las pérdidas por efecto Joule en cada bobinado.

Tabla 11. Corrientes nominales en el devanado primario y en los secundarios

<i>Devanado</i>	<i>Primario</i>	<i>sec.</i>	<i>sec.</i>	<i>sec.</i>	<i>sec.</i>	<i>sec.</i>	<i>sec.</i>
<i>Voltajes nominales (V)</i>	220	380	220	120	48	24	12
<i>Corrientes nominales (I)</i>	13,75	2,1	3,7	6,6	4,3	8,3	16,5
<i>Perdidas I<sup>2</sup>R (W)</i>	52,86	28,2	28,7	30,5	2,3	2,48	2,45


Se tomó las potencia medidas en el ensayo y se comparó con la potencia calculadas por efecto Joule el resultado se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Pérdidas totales y pérdidas por efecto Joule

<i>Configuración</i>	<i>(220/380)V</i>	<i>(220/220)V</i>	<i>(220/120)V</i>	<i>(220/48)V</i>	<i>(220/24)V</i>	<i>(220/48)V</i>	<i>Total</i>
<i>Pérdidas totales(W)</i>	110	130	150W	3,5	3,8	4	401,3
<i>Pérdidas I<sup>2</sup>R (W)</i>	81,06	81,56	83,36	55,16	55,34	55,31	411,8

La suma de las pérdidas totales fueron de 401,3W y la suma de las pérdidas por efecto Joule fueron de 411,8W.

### 5.3 **Análisis de resultados**

 En la prueba No.1, correspondiente a las mediciones de resistencia de aislamientos, se observó que el índice de polarización para la primera conexión de alta tensión y tierra (A/T) fue de 2.6, representó un nivel bueno de aislamiento como lo establece la tabla 3 de la condición de aislamiento – Std IRAM 2325 (pág. 60).


Por otro lado, La segunda conexión entre alta tensión y baja tensión (A/B), significó un nivel aceptable de aislamiento y la tercera conexión entre baja tensión y tierra (B/T), constituyó un nivel muy bueno de aislamiento.

Estos valores adimensionales del índice de polarización permitieron hacer comparaciones sobre el estado de humedad y posibles residuos en el

transformador, de esta forma se determinó que no presentó humedad ni suciedad en los bobinados, además se verificó que en el tiempo de medida de 1 a 10 minutos, la corriente de absorción o de fugas que paso por los bobinados fue anulada; ya que, esta se origina por la presencia de humedad y residuos en el mismo..

Sin embargo, estos valores no se vieron afectados por la temperatura; debido a que, la medida se realizó a temperatura ambiente (26,8 °C), de modo que no se sobrepasó los 40 °C que establece la norma para los transformadores de potencia, también se observó que no se produjo ningún cambio de temperatura importante en el transformador durante el tiempo que se realizó el ensayo.


Las gráficas obtenidas en la figura 63 representaron que en todos los casos, la curva crece exponencialmente, que comparando cada una de ellas con la gráfica de la figura 51; demostrando que todos los devanados tuvieron muy buena condición de aislamiento, así se corroboró que los aislamientos no se encontraron en una zona de riesgo por la presencia de humedad o residuos, de no ser así la curva decaería.

 En la prueba No. 2, correspondiente a las mediciones de resistencia en los devanados, se determinó los ohmios que tiene cada devanado primario y secundarios, midiendo la resistencia en sus mismos.

De la tabla 5, se observó que el resultado de resistencia obtenido para el devanado primario de 220V, corresponde a 0,2796  $\Omega$ , lo que significa una resistencia pequeña del orden de los mili ohmios que es una respuesta tolerable; esta medida tuvo en cuenta que la corriente no superó el 15% del valor nominal, como lo establece la norma NTC 375.

Por otra parte, los devanados secundarios se analizaron utilizando la figura 65, observando como el valor de las resistencias varían entre  $0,7$  a  $6,4\Omega$  en los devanados de  $120$ ,  $220$  y  $380V$  por lo cual, el crecimiento apresurado permitió predecir que las pérdidas por efecto Joule crecen en mayor cantidad en estos devanados mientras que en los de  $12$ ,  $24$  y  $48V$  los valores de resistencia son pequeños; dado que, varían entre  $0,009$  a  $0,1268\Omega$ , por ende las perdidas por efecto Joule son menores.

Se referencio a  $20$  grados cada valor de resistencia para que los cálculos de las pérdidas por efecto Joule se trabajen a una misma escala o a las mismas condiciones para que no se alteren los resultados; debido a que, en el caso de existir varios transformadores juntos eso no afectaría en el calentamiento de los mismos.

 En la prueba No. 3, correspondiente a las mediciones de relación de transformación, para el método No. 1, se determinó adecuadamente la relación entre el número de espiras del primario y secundarios.

En el cual, se observó que los resultados fueron aceptables para este ensayo, ya que el porcentaje de error vario entre  $0,2$  a  $4,4\%$ , indicando que se cumplio con la relacion de vueltas entre el devanado primario y secundarios, es decir se realizo una buena construccion, dado quese tuvo cuidado de no dejar espiras abiertas, conexiones cortocircuitadas o conexiones incorrectas.

En el Método No. 2, se verificó que los valores de  $V_s$  respecto a  $V_p$  crecen linealmente en cada devanado, a medida que se aumenta el voltaje (entre  $20 - 220V$ ) en el devanado primario (figura 68), es decir la pendiente de las líneas en cada devanado indico el valor de la relación de transformación en cada caso,

comprobando que la incertidumbre en la medida de los datos cumplió con el valor de 0,5% estipulado en la norma NTC 471.

En la prueba No. 4, correspondiente al ensayo de verificación de polaridad y medición de polaridad aditiva y sustractiva, se confirmó que se realizaron las adecuadas conexiones en los terminales del tablero del transformador marcando los principios y finales en la construcción de los bobinados, por eso no se cometió el error de invertir las polaridades en ningún momento de terminación de la construcción de las bobinas; además verificar la polaridad fue muy importante, porque indico que el sentido del recorrido de la corriente en el devanado primario corresponde al mismo sentido en los secundarios, confirmando que se enrolló el alambre en la misma dirección en los ambos casos.


Ya verificada la polaridad, se analizaron los datos obtenidos en la medición de la polaridad aditiva y sustractiva. Se observó la gráfica 70, que mostró los valores de la medida de la polaridad aditiva, los datos aumentaron de forma lineal y creciente, es decir a medida que aumenta el voltaje en el primario de 20 a 220V en el eje X, los secundarios en el eje Y aumentaron, lo que represento que el voltaje registrado en los secundarios fue mayor que el aplicado en el primario.

Además, de la tabla 7, se confirmó que el porcentaje de error en las medidas vario entre 0,3 – 2%, lo que representó un margen de error tolerable, ya que sus valores se aproximaron en gran medida al valor estimado.

Por otra parte, la gráfica 71 correspondiente a la polaridad sustractiva, muestra como los datos tomados en el ensayo decrecen linealmente, es decir, a medida que aumenta el voltaje en el primario de 20 a 220V en el eje X, los valores de voltaje de salida en los secundarios en el eje Y disminuyeron, esto representó que

el voltaje registrado en los secundarios fue menor que el voltaje de la fuente. Por lo tanto, en la tabla 8, se corroboró que el porcentaje de error en las medidas varió entre 0,2 a 8%, lo que corresponde a un margen de error tolerable, porque se aproxima en gran medida al valor teórico.

La comprobación de que los bobinados primarios y secundarios se bobinaron en el mismo sentido, permitirá realizar otras conexiones en el transformador, como conexión en paralelo con otros transformadores para obtener variedad de voltajes requeridos y poder utilizarlo adecuadamente sin riesgo a que se presenten cortocircuitos.

 En la prueba No. 5, correspondiente a las mediciones de vacío, se determinó las pérdidas en el hierro y la rama de magnetización de circuito equivalente del transformador (tabla 9).

Al estar el transformador sin carga, la corriente que circuló por el devanado primario resultó ser muy pequeña de 0,1 A, en estas condiciones las pérdidas en los secundarios se consideraron despreciables, porque se encontraban en circuito abierto, por lo que las mediciones de corriente en todos ellos marcaron 0A.

La medida de la potencia de pérdidas en el hierro fue de 13W, que es relativamente pequeña, esto se debió a que: se controlaron en gran medida las pérdidas por la histéresis magnética, utilizando acero aleado al silicio de buena calidad que minimizó dichas pérdidas, porque este material es especial y posee importantes propiedades magnéticas, como la zona de histéresis pequeña que evitó que se disipara la energía; además, la alta permeabilidad magnética propia del material, contribuyó en gran medida a que se redujeran las pérdidas en el núcleo.



Las pérdidas por corrientes de foucault también fueron controladas; debido a que el núcleo se laminó con una placa de 0,27 mm de espesor, la cual es una sección muy delgada, que favoreció que la distribución de las corrientes parasitarias fueran muy pequeñas en todo el núcleo.

✚ En la prueba No. 6, correspondiente a las medidas de corto circuito de la tabla 10, se verificó que el porcentaje de las pérdidas de los devanados de 380, 220 y 120V fueron del 38, 42 y 43% respectivamente, las cuales se deben a que en estos tres casos el transformador se comportó como elevador de voltaje, mientras que en los devanados de 48, 24 y 12V fueron de 1.5, 1.7 y 2.1% siendo acertadas, porque el transformador en este caso se comportó como un reductor de voltaje y cumplió con lo requerido en la norma NTC 1005, que establece que el valor de la tensión de cortocircuito o tensión de impedancia, esta generalmente entre el 1 y el 15% de la tensión del devanado de excitación.

Utilizando los resultados de la tabla 10, que indicaron los valores de las corrientes nominales en cada devanado y la tabla 5 del ensayo de resistencia, se determinó las pérdidas por efecto Joule en cada uno (devanados) con ayuda de la ecuación 26, observando que en los casos anteriores se presentó mayor pérdida en los 380, 220 y 120V y menor en 48, 24 y 12V, debido a que en este cálculo se tuvo en cuenta la resistencia interna en los devanados para cada caso y como fue mayor para los primeros tres, hizo que se incrementaran las pérdidas; dicha resistencia dependió de la densidad del material, la longitud y del calibre del conductor, por eso se utilizó un calibre menor y mayor longitud de cable al enrollar las vueltas en la construcción de estos bobinados, ayudando a aumentaren gran medida el valor. Por otro lado, La tabla 12 permitió comparar las pérdidas totales y por efecto Joule, siendo una variación de 2,5%, indicando que las pérdidas calculadas fueron correspondientes a la suma de todas ellas en el transformador. Al aumentar la

corriente nominal, se evidenció un aumento de la vibración magnética en el núcleo, debido a las pérdidas por fuga magnética entre lámina y lámina.

#### 5.4 Resultados de los cálculos de parámetros del transformador y su circuito equivalente.

El transformador monofásico se puede representar por medio de un circuito equivalente exacto, aunque se utilizara el circuito equivalente aproximado que permite hacer los cálculos fácilmente, como se muestra a continuación.

Se requirió calcular las impedancias del circuito equivalente de cada transformador quien entrega una potencia de 3000 W, voltaje de entrada y salida de 220/380 V a una frecuencia de 60 Hz, la prueba de circuito abierto se realizó en la prueba del circuito secundario del transformador (para reducir el voltaje máximo que se tenía que medir), y la prueba de cortocircuito se realizó en el lado primario del transformador (para reducir la máxima corriente que se tenía que medir), los resultados de los ensayos de vacío y de corto se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Resultados prueba de vacío y de corto circuito

<i>Prueba de vacío (en el secundario)</i>	<i>Prueba de corto circuito(en el primario)</i>
$V_o = 236V$	$V_{cc} = 85,2 V$
$I_o = 0,1 A$	$I_{cc} = 3,4 A$
$P_o = 13 W$	$P_{cc} = 110 W$

A partir de los datos de los ensayos de vacío y de corto circuito y las ecuaciones de la sección 4.1.5 y 4.1.6 se determinaron los parámetros magnéticos y eléctricos de los circuitos así:

Para la configuración de 220/380 V, la relación de vueltas fue de  $a = 0,554$ , primero se calculó el factor de potencia FP para el ensayo de vacío así:

$$FP = \cos \theta = \frac{P_o}{V_o I_o}$$

$$FP = \cos \theta = \frac{13W}{(236V)(0,1A)} = 0,55 \text{ en retraso}$$

Se encuentra la admitancia de excitación:

$$Y_E = \frac{I_o}{V_o} \angle -\cos^{-1} FP$$

$$Y_E = \frac{0,1A}{236V} \angle -\cos^{-1} 0,55$$

$$Y_E = 4,24 \times 10^{-4} \angle -56,63$$

$$Y_E = 2,33 \times 10^{-4} - 3,54 \times 10^{-4} j = \frac{1}{R_N} - \frac{1}{X_M} j$$

Por lo tanto, los valores de la rama de excitación referidos al lado de bajo voltaje (secundario) son:

$$R_N = 4,3k \Omega \quad X_M = 2,8 k\Omega$$

El factor de potencia durante la prueba de cortocircuito es:

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{CC}}{V_{CC} I_{CC}}$$

$$FP = \cos \theta = \frac{110W}{(85,2V)(3,4A)} = 0,38 \text{ en retraso}$$

La impedancia en serie está dada por:

$$Z_{SE} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \angle \cos^{-1} FP$$

$$Z_{SE} = \frac{85,2V}{3,4A} \angle \cos^{-1} 0,38$$

$$Z_{SE} = 9,52 + 23,2j$$

Por lo tanto, la resistencia y reactancia equivalentes referidas al lado de alto voltaje (primario) son:

$$R_{eq} = 9,52 \Omega$$

$$X_{eq} = 23,2 \Omega$$

El circuito equivalente simplificado resultante que se refirió al lado de alto voltaje (primaria) se determinó convirtiendo los valores de la rama de excitación al lado de alto voltaje, así:

$$R_{Np} = a^2 R_{Ns} = (0,554)^2 4,3K\Omega = 1,32K\Omega = 1320\Omega$$

$$X_{Ns} = a^2 X_{Ms} = (0,554)^2 2,8K\Omega = 0,86K\Omega = 860\Omega$$

Para todos las demás configuraciones se realizó el mismo cálculo respectivo de sus impedancias equivalentes así como se refirió cada uno al lado primario teniendo en cuenta la relación de transformación de cada uno y luego se realizaron sus circuitos equivalentes para cada caso, estos se presentan en la figura 74.

En la tabla 14, se muestran los cálculos de las impedancias equivalentes para cada caso:

Tabla 14. Resultados de  $R_{eq}$  y  $X_{eq}$  para cada uno de los devanados secundarios

Voltaje secundarios	380 V	220 V	120 V	48 V	24 V	12 V
$R_{eq}$	9,52 $\Omega$	9,38 $\Omega$	9,82 $\Omega$	2,87 $\Omega$	3,78 $\Omega$	4,94 $\Omega$
$X_{eq}$	23,2 $\Omega$	23,55 $\Omega$	22,49 $\Omega$	1,14 $\Omega$	0,95 $\Omega$	1,7 $\Omega$

Posteriormente se determinó los valores de la rama de excitación al lado de alto voltaje (Tabla 15), así:

Tabla 15. Resultados de  $R_{NP}$  y  $X_{MS}$  para cada uno de los devanados secundarios

Voltaje secundarios	380 V	220 V	120 V	48 V	24 V	12 V
$R_{NP}$	1,32 K $\Omega$	4,06 k $\Omega$	13,47 k $\Omega$	87,85 k $\Omega$	353,7 k $\Omega$	1405 k $\Omega$
$X_{MS}$	860 $\Omega$	2,65 k $\Omega$	8,77 k $\Omega$	57,20 k $\Omega$	230,3 k $\Omega$	915 k $\Omega$

A continuación, se muestran los circuitos equivalentes para cada configuración.

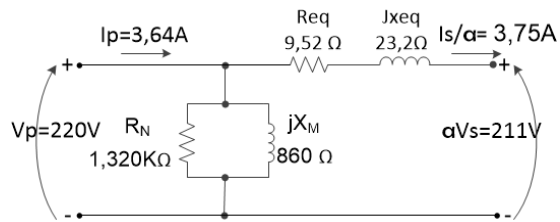


Figura 74 a Circuito equivalente de (220/380)V

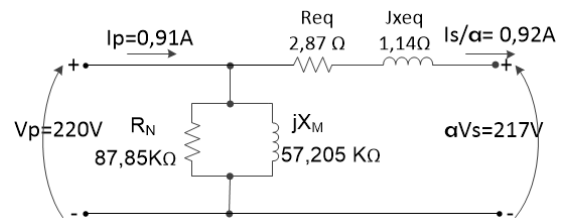


Figura 74 b Circuito equivalente de (220/48)V

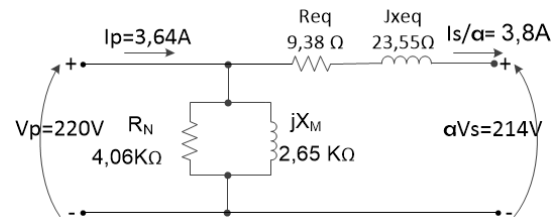


Figura 74 c Circuito equivalente de (220/220)V

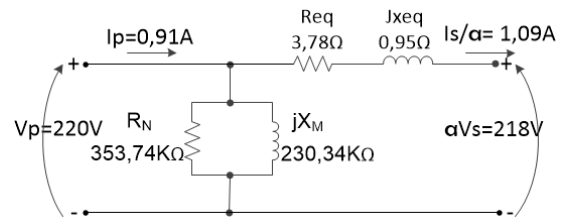


Figura 74 d Circuito equivalente de (220/12)V

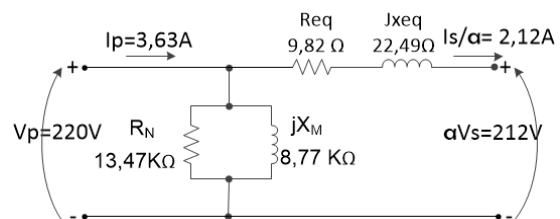


Figura 74 e Circuito equivalente de (220/120)V

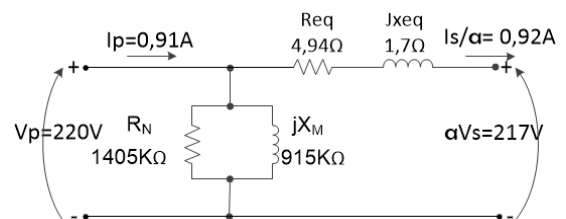


Figura 74 f Circuito equivalente de (220/12)V

Figura 74. Circuitos equivalentes de cada transformador

Estos modelos de circuito representan que como era de esperarse las resistencias en las configuraciones de las figuras 74a, 74c, 74e son mayores lo que aumento las perdidas y la eficiencia en estas configuraciones.

## 5.5 Resultados de eficiencia y rendimiento

Se calculó la eficiencia que tiene el transformador, se utilizando la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} 100\% = \frac{V_{2N} I_{2N} \cos \varphi_L}{V_{2N} I_{2N} \cos \varphi_L + CP_{cc} + P_o/C} \times 100\%$$

En esta ecuación se toma el cociente entre el producto de la potencia de salida del transformador entre las potencias salidas más las potencias de pérdidas en el hierro y en el cobre, se toma un factor de potencia de carga de  $\cos \varphi_L=1$ , considerando que el transformador está trabajando a plena carga es decir ( $C=1$ ), los resultados de eficiencia para cada devanado se muestra en la tabla 16.

Tabla 16. Resultados de eficiencia y rendimiento

Configuración	Eficiencia ( $\eta$ )
380V/220V	86,5%
220V/220V	84,7%
220V/120V	82,9%
220V/48V	92,2%
220V/24V	92%
220V/12V	93%

El rendimiento que tiene el transformador esta entre el (82,9%- 93%), lo que significó que el transformador logrará su máxima eficiencia trabajando bajo carga y que estos valores de eficiencia son representativo, si se considera que un transformador debe cumplir con el 90% de eficiencia bajo carga.

Los valores de eficiencia de los devanados de (380V,220V,12V) fueron de (86.5%,84.7%,82.9%) estos fueron favorables teniendo en cuenta que se redujo su eficiencia debido a que las perdidas medidas en el ensayo de vacío

provenientes de las altas resistencias redujeron la eficiencia pero no en un nivel relevante, lo que represento que el diseño de transformador tipo columna es viable porque existe una proporción favorable entre los materiales empleados en la construcción y el resultado que se obtuvo.

## 5.6 Simulación en Femm

Femm es una herramienta de simulación de elementos finitos en este caso se tomó el caso magnético, porque se requiere determinar la distribución de flujo magnético y las cantidades derivadas para el caso de un transformador monofásico. Se asignaron los materiales de constitución del núcleo y devanados, definiendo sus condiciones del circuito, sus espiras y condiciones de frontera. Se definió el mallado, a partir de este y se determinó las otras variables (densidad de flujo magnético B).

Se consideraron 4 casos a resolver:

*Caso 1. Corrientes ideales:* Se asumen las corrientes nominales de la tabla 17.

Tabla 17. Corrientes para el caso 1

<b>Calibres alambre (AWG)</b>	<b>Voltajes</b>	<b>Bobinado</b>	<b>corriente (A)</b>	<b>Potencia (W)</b>
9	220	Primario	13,75	3025
21	380	Secundario	2,1	798
19	220	Secundario	3,7	814
16	120	Secundario	6,6	792
12	48	Secundario	4,3	206,4
10	24	Secundario	8,3	199,2
6	12	Secundario	16,5	198

*Caso 2. Condición de cortocircuito:* Se asumirá que las corrientes del ensayo de cortocircuito (tabla 18).

Tabla 18. Corrientes para el caso 2

<b>Calibres alambre (AWG)</b>	<b>Voltajes</b>	<b>Bobinado</b>	<b>corriente (A)</b>	<b>Potencia (W)</b>
9	220	Primario	12	415
21	380	Secundario	3,7	110
19	220	Secundario	3,8	130
16	120	Secundario	3,9	150
12	48	Secundario	1,1	3,5
10	24	Secundario	1	3,8
6	12	Secundario	0,9	4

Caso 3. Condición de vacío: Se simulará asumiendo la corriente del ensayo de vacío la cual es una corriente de 1% en el primario y sin corrientes en los secundarios para emular una condición de vacío en el transformador (tabla 19).

Tabla 19. Corrientes para el caso 3

<b>Calibres alambre (AWG)</b>	<b>Voltajes</b>	<b>Bobinado</b>	<b>corriente (A)</b>	<b>Potencia (W)</b>
9	220	Primario	0,1	13
21	380	Secundario	0	0
19	220	Secundario	0	0
16	120	Secundario	0	0
12	48	Secundario	0	0
10	24	Secundario	0	0
6	12	Secundario	0	0

Caso 4: Se asumirá que las corrientes nominales se elevan diez veces tanto en el primario como en los secundarios por efectos de una falla tipo cortocircuito (tabla 20).

Tabla 20. Corrientes para el caso 4

<b>Calibres alambre (AWG)</b>	<b>Voltajes</b>	<b>bobinado</b>	<b>corriente (A)</b>
9	220	Primario	137,5
21	380	secundario	21
19	220	secundario	37
16	120	secundario	66
12	48	secundario	43
10	24	secundario	83
6	12	secundario	165



*Resultado de los casos:*

Se presentan los resultados obtenidos de la distribución de la densidad de flujo magnético para los diferentes casos, las líneas representan el flujo magnético ( $\Phi$ ) y el diagrama de colores la densidad de flujo magnético ( $B$ ), estas dos cantidades son proporcionales ya que se relacionan según la ecuación de la densidad de flujo que indica que tantas líneas atraviesan un área determinada.

$$\Phi = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Los valores máximos de densidad de flujo alcanzados en el núcleo para los diferentes casos son:

Caso 1	1,897 Teslas	Caso 2	1,732 Teslas
Caso 3	0,85 Teslas	Caso 4	2,016 Teslas

Al comparar estos valores se observa que el núcleo está más saturado para el caso 4 (condición de cortocircuito), mientras que para el caso 3 (condición de vacío) el material ferromagnético está trabajando en la zona lineal y presenta la menor saturación.

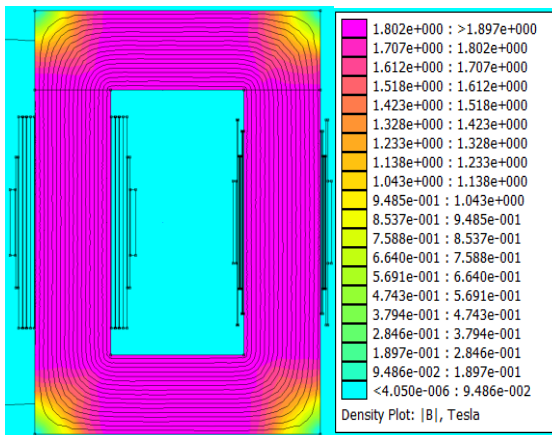


Figura 76 a. Caso 1, Corrientes nominales

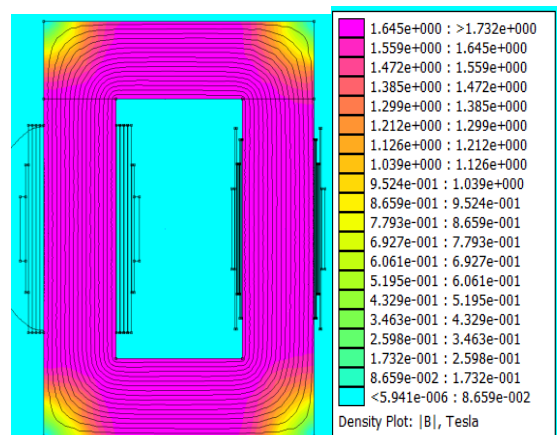


Figura 76 b. Caso 2, Corrientes de corto circuito

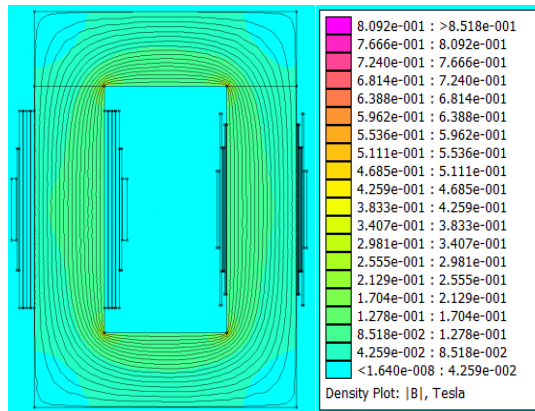


Figura 76 c. Caso 3, Corrientes de vacío

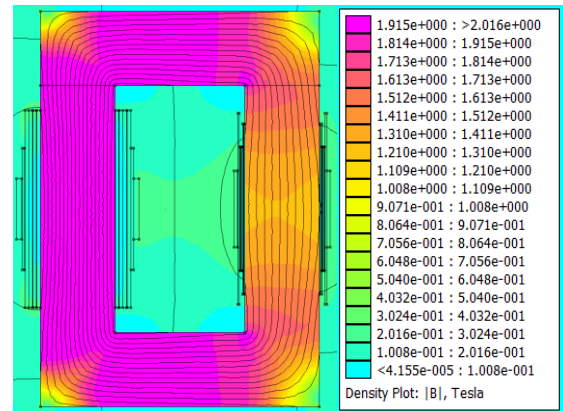


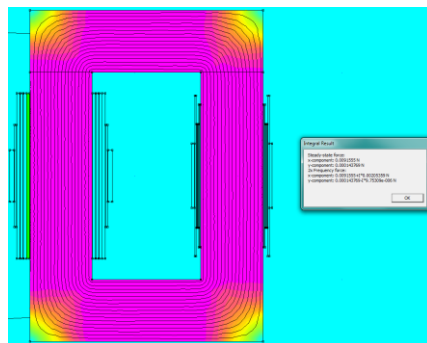
Figura 76 d. Caso 4, Corrientes en condición de falla

Figura 75. Casos de flujo magnético, simulación en Femm

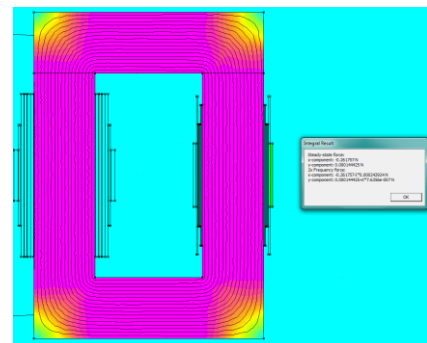
A continuación se determinaran las fuerzas de cortocircuito para la capa mas cercana al nucleo (220V primario) y la mas alejada (24 V secundario), esto con el objetivo de ver el efecto de la ubicación y la corriente en las fuerzas.

Las fuerzas de cortocircuito se determinan como la integral de volumen del rotacional de la densidad de corriente y la densidad de flujo magnetico.

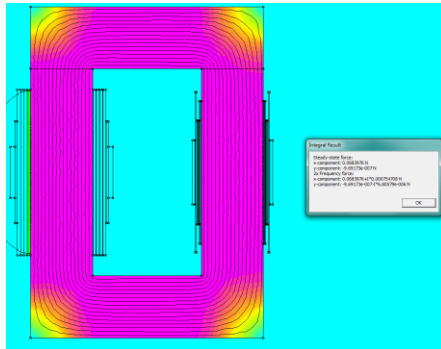
$$F = \int_V (\vec{J} \times \vec{B}) * dV [N]$$



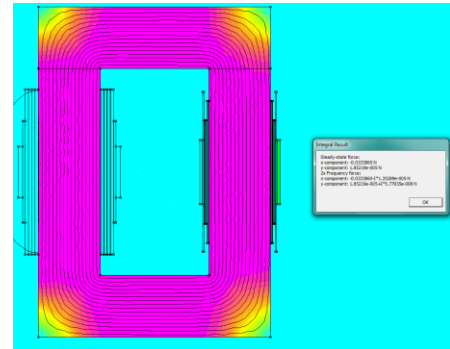
Caso 1 capa 1 devanado primario



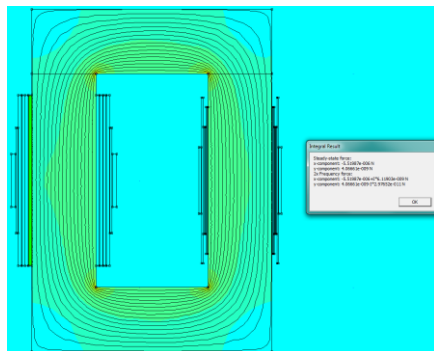
Caso 1 capa 24 V secundario



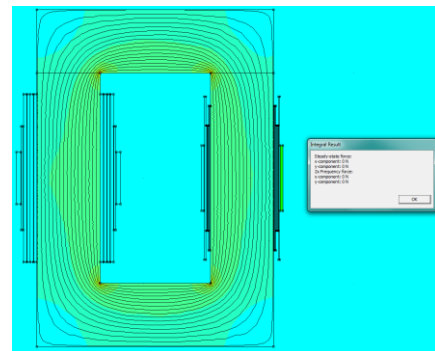
Caso 2 capa 1 devanado primario



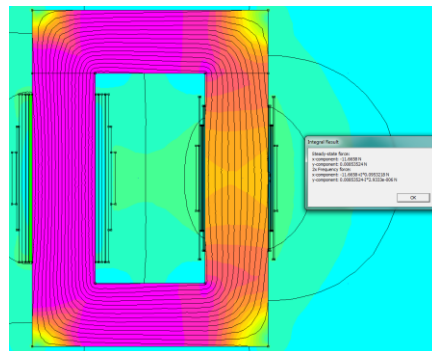
Caso 2 capa 24 v secundario



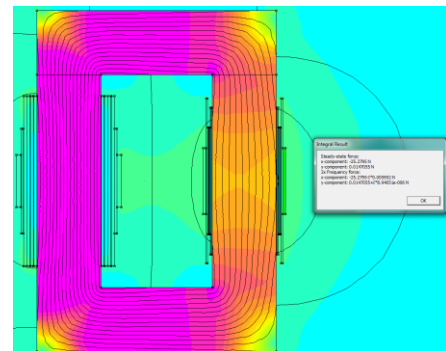
Caso 3 capa 1 devanado primario.



Caso 3 capa 24 v secundario



Caso 4 capa 1 devanado primario



Caso 4 capa 24 v secundario

Figura 76. Resultados de fuerzas en cada caso

A continuación, se compara los resultados de fuerzas obtenidas.

Tabla 21. Fuerzas Axiales y Radiales para cada caso

Caso	Fuerza Capa 1 devanado 220V primario (N)		Fuerza Capa 24V secundario (N)	
	Radiales	Axiales	Radiales	Axiales
1	0,00915	0,0001437	0,000704	-1,12974E-6
2	0,06839	9,69E-7	0,0823	-7,439
3	5,51E-6	4,066E-9	0	0
4	11,6658	0,0085	0,000722	1.03E-7

Para el caso 4 que corresponde a la condición de cortocircuito por aumento de la corriente a 10 veces que la nominales, se obtienen las mayores fuerzas, es de esperarse ya que estas están influenciadas por el valor de la corriente en los conductores también a que las fuerzas radiales son mayores que las axiales debido a que la densidad de flujo magnético axial crece más en estas zonas. El devanado de 24V tiene mayores fuerzas radiales comparadas con el devanado de 220V, el caso de menores fuerzas correspondió a la condición de vacío (caso 3).

También se trabajó el comportamiento de la temperatura en el caso 2 la condición de corto circuito a (0s y 60s) como se muestra en la figura 77 y 78:

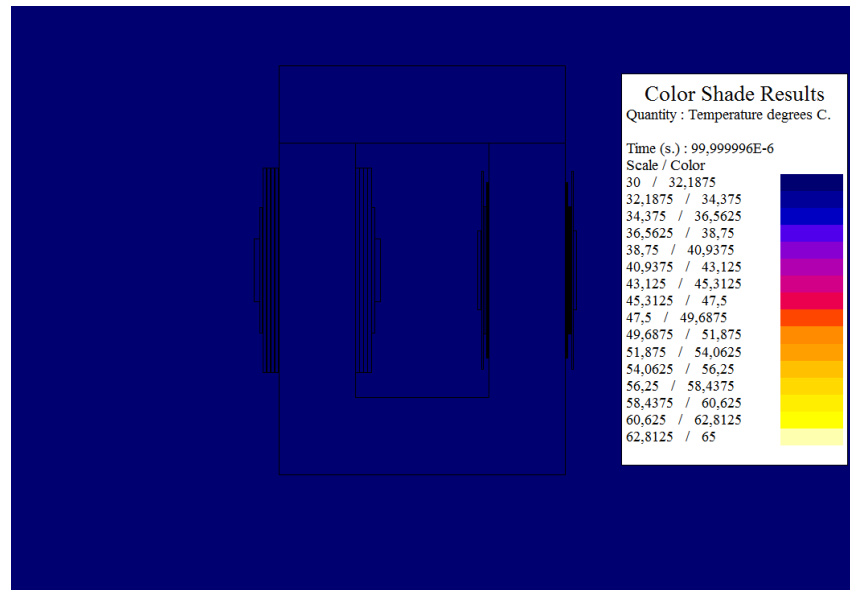


Figura 77. Caso 2: Condición de corto circuito, temperatura 0 segundos

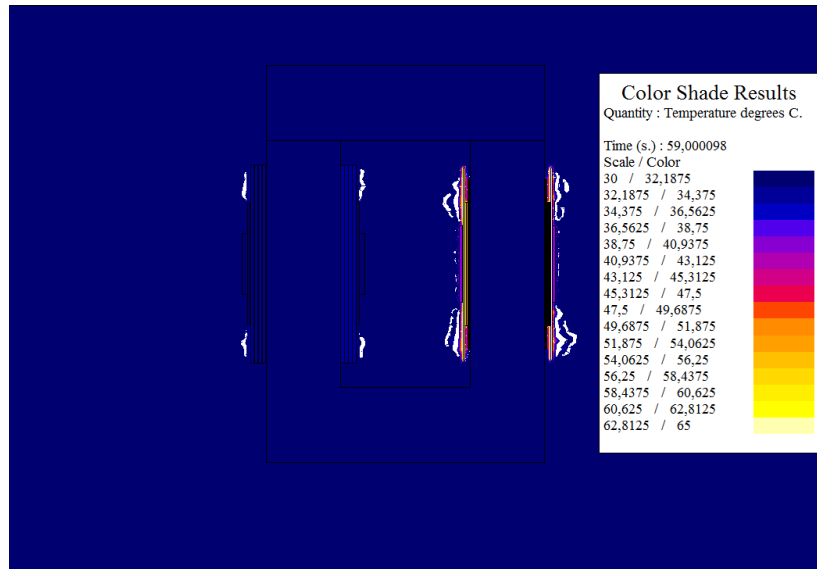


Figura 78. Caso 2: Temperatura 60 segundos

También se considera un caso 5 en las que se consideran las pérdidas por efecto Joule como se muestra en la tabla 22.

Tabla 22. Caso 5: Perdidas en el cobre en cada devanado por efecto Joule

<b>Calibres alambre (AWG)</b>	<b>Voltajes</b>	<b>Bobinado</b>	<b>corriente (A)</b>	<b>Potencia (W)</b>
9	220	Primario	12	52,86
21	380	secundario	3,7	28,22
19	220	secundario	3,8	28,75
16	120	secundario	3,9	30,49
12	48	secundario	1,1	2,35
10	24	secundario	1	2,48
6	12	secundario	0,9	2,45

Las gráficas obtenidas para el tiempo de 0s y 60s fueron las siguientes, (figura 79 y 80).

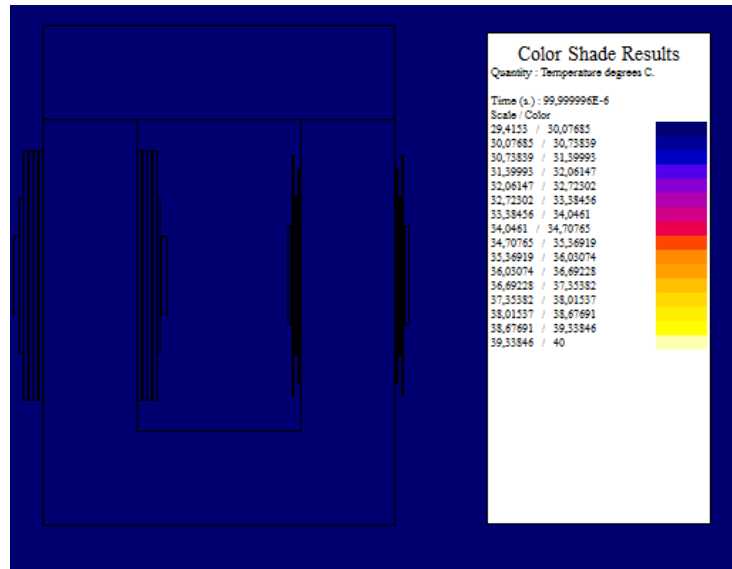


Figura 79. Caso 5: temperatura en t=0seg

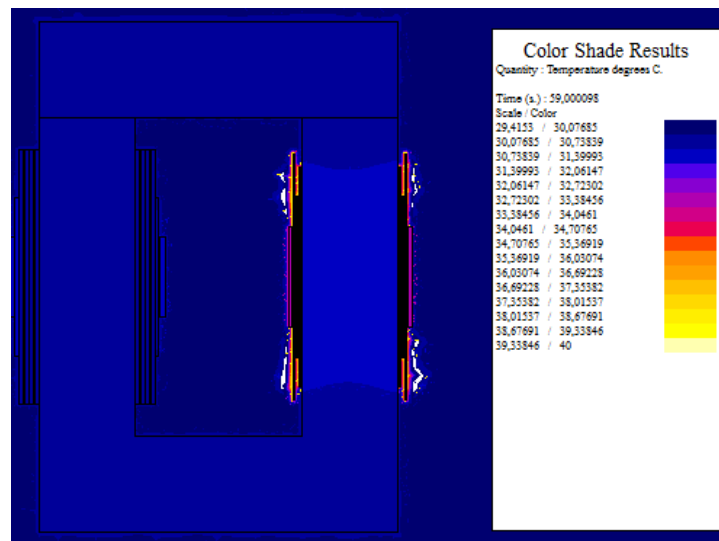


Figura 80. Caso 5: temperatura t= 60s

En los dos casos se presentaron pérdidas en los devanados secundarios en mayor medida como se verifica en las gráficas, esto se debió a que presentaron mayores resistencias ya sea por el calibre que se utilizó, por el apilamiento de dos de los secundarios en el devanado primario que aumento la resistencias de estos y por tanto las pérdidas fueron mayores.

## CONCLUSIONES

✚ La metodología desarrollada en este trabajo permitió diseñar y construir un transformador monofásico tipo columna con un devanado primario y seis secundarios, con la ventaja de ser elevador, igualador y reductor de voltaje en un mismo dispositivo eléctrico. Se donará al Sena-Popayán, con el propósito de que se use como instrumento pedagógico en las asignaturas del programa de Electricidad Industrial y de posibles trabajos de investigación aplicada en esa institución.

✚ Se obtiene un transformador con las siguientes características: potencia total nominal 3.0 KVA, potencial nominal en el primario: 3.0 KVA, potencias nominales en el secundario: 12V a 0,2 KVA, 24V a 0,2 KVA, 48V a 0,2 KVA, 120V a 0,8KVA, 220V a 0,8KVA, 380V a 0,8KVA. Se tendrá un primario que trabajara con una tensión de 220V a una tensión nominal de 13,75 A y seis secundarios con voltajes y corrientes nominales siguientes: 12V: 16,64A, 24V: 8,32A, 48V: 4,16A, 120V: 6,64A, 220V: 3,6A, 380V: 2,08A. El transformador trabajara a una frecuencia de 60Hz.

✚ Las pérdidas de magnetización son mínimas como mostró el ensayo de circuito abierto. En estas condiciones se obtuvo un voltaje, corriente y potencia de: 226V, 0.1A y 13 W respectivamente. Se concluye que se controlaron las perdidas por histéresis y corriente de Foucault, construyendo el transformador con acero al silicio y un laminado de 0.27 mm de espesor.

✚ El ensayo de cortocircuito muestra que las perdida en el cobre de los devanados de (380, 220,120)V, son mayores debido al mayor calibre o resistencia del alambre, en los devanados de (48, 24,12)V estas pérdidas fueron menores ya

que las resistencias disminuyeron. De acuerdo a esto, las pérdidas de potencia por efecto Joule en los devanados de (380, 220,120)V, es del orden de los 30W y en los devanados de (48, 24,12)V, es del orden de 3.0W

✚ Un factor de potencia de 0.55 y 0.38 en retraso se obtuvieron para el ensayo de vacío y el ensayo de corto respectivamente. Estos valores de factor de potencia permitieron construir los circuitos equivalentes para cada transformador.

✚ Los ensayos de aislamientos, muestran un buen nivel de aislamiento, evitando cortocircuitos y riesgos para los usuarios. Del ensayo de polaridad se corrobora que los devanados primario y secundarios se bobinaron en el mismo sentido, Esto permitirá realizar otras conexiones en el transformador ya sea en paralelo y poder utilizarlo adecuadamente sin riesgo a que se presenten cortocircuitos por flujos contrarios de corriente.

✚ Se encontró una buena relación lineal entre los voltajes de salida y de entrada. El valor experimental obtenido para la relación de transformación para todas las configuraciones están por debajo del 5%.

✚ La simulación por Femm permitió valorar la densidad de flujo magnético a diferentes casos: para corrientes nominales la densidad de flujo magnético fue de 1,9 Teslas, para la condición de cortocircuito 1,7T, para la condición de vacío 0,85T y para el caso de corrientes de condición de falla 2,0T. Se encontró también por simulación que las fuerzas radiales son despreciables con respecto a las fuerzas axiales, una pérdida por efecto Joule mayor en los devanados secundarios, de alto voltaje con respecto a los de bajo voltaje por causa de las mayores resistencias.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] C. C. Villacián, “Aportaciones al modelado del transformador en altas frecuencias,” *Universidad de Cantabria*. Santander, Cantabria, España, p. 26, 2012.
- [2] A. Beléndez, “La unificación de luz , electricidad y magnetismo : la ‘síntesis electromagnética’ de Maxwell,” *Rev. Bras. Ensino Fis.*, p. 14, 2008.
- [3] J. M. Villalba, L. Ferreira, E. Arribas, A. Nájera, and A. Beléndez, “Estudio experimental de la inducción electromagnética entre dos bobinas: Dependencia con la corriente eléctrica,” *Univ. Alicant. España*, vol. 37, no. 1, pp. 1–7, 2015.
- [4] M. J. Martín Martínez *et al.*, “Exposición de aparatos de medida de los laboratorios de Física,” *Dep. Fis. Apl. y Fis. Fundam. , Fac. ciencias*, pp. 35–36, 2015.
- [5] J. F. Mora, *Genios de la Ingeniería Eléctrica*, Colección. España, 2006.
- [6] V. Museum, “Museo Galileo,” *Gaulard y Gibbs generador secundario*, 2015. [Online]. Available: <http://catalogue.museogalileo.it/object/GaulardGibbsSecondaryGenerator.html>.
- [7] S. R. M. Whelan and S. Normandin, “Edison Tech Center,” *La historia del transformador*, 2014. [Online]. Available: <http://www.edisontechcenter.org/Transformers.html#about>.
- [8] S. Campillo, “Genios electricos,” p. 546, 2006.
- [9] F. Cristhian Moran, “Descripción, selección y aplicación de los transformadores eléctricos tesis profesional.” Estado de Mexico, pp. 139–144, 2013.
- [10] Cristian Moran Federico, “Descripción, selección y aplicación de los

- transformadores eléctricos.” Estado de Mexico, pp. 32–51, 2013.
- [11] J. F. Mora, *Maquinas-Elctricas-Jesus-Fraile-Mora-6ta-Edicion*, McGraw Hil. Madrid, España, 2003.
- [12] A. Correa Montoya and J. S. Giraldo Murcia, “Diagnóstico de fallas en transformadores de distribución monofásicos para la empresa Emcartago.” p. 27, 2014.
- [13] NTC, “Ntc 618-Transformadores Eléctricos, Placa De Características,” 1999.
- [14] I. M. Lozano, *Cargador de bateria inalambrico en aplicaciones de baja potencia. .*
- [15] S. J. Chapman, *Maquinas Electricas Quinta edicion*, McGraw Hil. 2012.
- [16] A. J. S. Gómez, *Fundamentos de circuitos*, Ediciones. Bogotá, Colombia, 2009.
- [17] S. J. Chapman, *Maquinas Electricas 3ra Edicion Chapman*, MacGraw Hi. 2000.
- [18] N. a Lemozy, “Ensayo de transformadores,” pp. 1–29, 1935.
- [19] Departamento de Electricidad, “Calculo de pequeños transformadores,” no. 1. pp. 1–9, 2015.
- [20] I. C. de N. T. y C. ICONTEC, “NTC 947- Práctica recomendada para el ensayo de resistecia de aislamiento de maquinaria eléctrica,” no. 571, pp. 2–11, 2016.
- [21] H. J, “Indice de Polarización,” 2016. [Online]. Available: [http://www.syse.com.mx/indice\\_polarizacion.html](http://www.syse.com.mx/indice_polarizacion.html).
- [22] M. I. SAC, “Transformadores de potencia.” pp. 70–74, 2016.
- [23] I. C. de N. T. y C. ICONTEC, “NTC 375 - Transformadores medida de la resistencia de los devanados,” pp. 4–6, 1970.
- [24] Electron, “Prueba de resistencia óhmica de los devanados,” 2015.
- [25] li. C. de N. T. y C. INCONTEC, “Ntc 741. Transformadores, relacion de transformacion, verificacion de la polaridad y relacion de fase,” p. 12, 1974.
- [26] J. G. Santamaría, “Análisis de diagnostico y líquidos aislantes en ingeniería

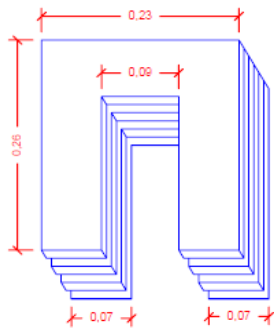
elétrica,” 2016. [Online]. Available:  
<http://andilaelec.blogspot.com.co/2015/02/relacion-de-transformacion-ttrdr.html>.

- [27] R. Dominguez, “Polaridad de los transformadores eléctricos: aditiva y sustractiva,” *Faradayos, Tecnologia electrica*, 2016. [Online]. Available: <http://faradayos.blogspot.com.co/2015/01/polaridad-transformadores-aditiva-sustractiva-determinacion.html>.
- [28] I. C. de N. T. y C. ICONTEC, “NTC 1031 - Transformadores. Ensayos Para La Determinación De Pérdidas Y Corriente (en vacio),” *Normas Tec. Colomb.*, p. 9, 1998.
- [29] I. C. de N. T. y C. ICONTEC, “NTC 1005 - Transformadores, determinacion de la tension de cotocircuito,” pp. 3–4, 1975.

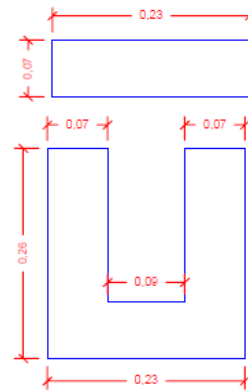
## ANEXOS

### ANEXO 1A. PLANOS DEL NUCLEO DEL TRANSFORMADOR

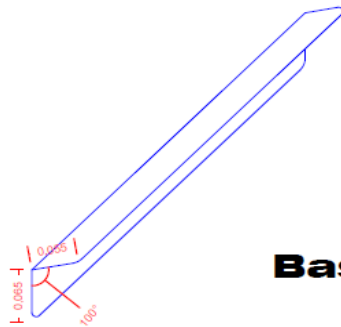
#### Núcleo Magnético



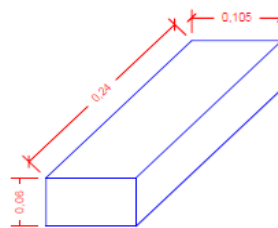
#### Chapas magnéticas



#### Soportes del núcleo magnético

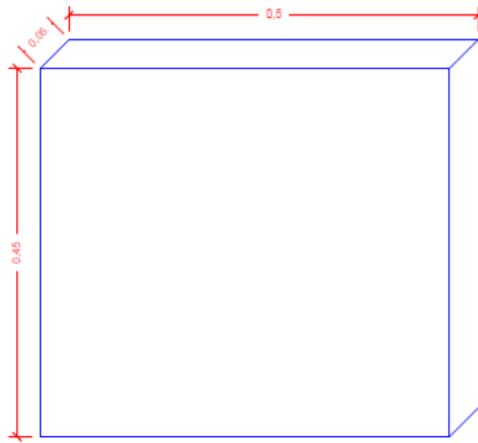


#### Bases del núcleo magnético

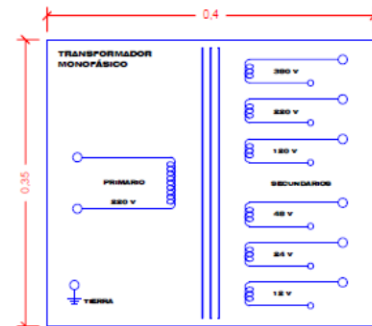


## **ANEXO 1B. PLANOS DEL TABLERO Y LA BASE DEL TRANSFORMADOR**

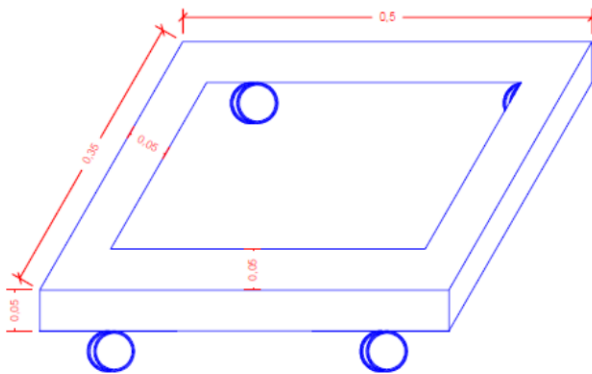
### Tablero frontal



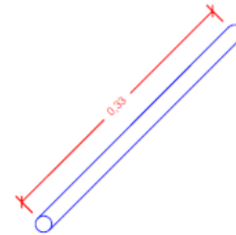
### Panel de tareas



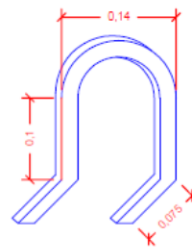
### Base



### Varilla



### Soportes del transformador



**ANEXO 2. TABLA DE CALIBRES DEL ALAMBRE DE COBRE**

AWG	Diam. mm	Amperaje	AWG	Diam. mm	Amperaje
1	7.35	120	16	1.29	3,7
2	6.54	96	17	1.15	3,2
3	5.86	78	18	1.024	2,5
4	5.19	60	19	0.912	2,0
5	4.62	48	20	0.812	1,6
6	4.11	38	21	0.723	1,2
7	3.67	30	22	0.644	0,92
8	3.26	24	23	0.573	0,73
9	2.91	19	24	0.511	0,58
10	2.59	15	25	0.455	0,46
11	2.30	12	26	0.405	0,37
12	2.05	9,5	27	0.361	0,29
13	1.83	7,5	28	0.321	0,23
14	1.63	6,0	29	0.286	0,18
15	1.45	4,8	30	0.255	0,15

### ANEXO 3A. PRESUPUESTO DEL TRANSFORMADOR

PRESUEPESTO DEL TRANSFORMADOR					
Descripción	Cantidad (Kg)	Precio unitario (\$/Kg)	Subtotal (\$)	IVA (16%)	Total (\$)
ALAMBRE COBRE CUAD AWG No6	0,66	\$ 24.813	\$ 16.377	\$ 2.620	\$ 18.997
ALAMBRE COBRE RDO AWG No9	0,51	\$ 23.500	\$ 11.985	\$ 1.918	\$ 13.903
ALAMBRE COBRE RDO AWG No10	3,55	\$ 23.512	\$ 83.468	\$ 13.355	\$ 96.822
ALAMBRE COBRE RDO AWG No12	0,5	\$ 23.531	\$ 11.766	\$ 1.882	\$ 13.648
ALAMBRE COBRE RDO AWG No16	0,49	\$ 23.644	\$ 11.586	\$ 1.854	\$ 13.439
ALAMBRE COBRE RDO AWG No19	0,44	\$ 24.879	\$ 10.947	\$ 1.751	\$ 12.698
ALAMBRE COBRE RDO AWG No21	0,49	\$ 27.540	\$ 13.495	\$ 2.159	\$ 15.654
ALAMBRE COBRE RDO AWG No21	0,62	\$ 33.399	\$ 20.707	\$ 3.313	\$ 24.021
LAMINA ACERO AL SILICIO	60	\$ 13.138	\$ 788.280	\$ 126.125	\$ 914.405
LAMINA DE ALUMINIO	1	\$ 103.469	\$ 103.469	\$ 16.555	\$ 120.024
LAMINA DE HIERRO	1	\$ 86.230	\$ 86.230	\$ 13.797	\$ 100.027
RODACHINES	4	\$ 8.690	\$ 34.760	\$ 5.562	\$ 40.322
TRANSFORMACION DE LA BASE	1	\$ 172.039	\$ 172.039	\$ 27.526	\$ 199.565
CONECTORES CALIBRE 6	2	\$ 862	\$ 1.724	\$ 276	\$ 2.000
CONECTORES CALIBRE 10	2	\$ 862	\$ 1.724	\$ 276	\$ 2.000
CONECTORES CALIBRE 12	2	\$ 862	\$ 1.724	\$ 276	\$ 2.000
CONECTORES CALIBRE 16	2	\$ 1.724	\$ 3.448	\$ 552	\$ 4.000
CONECTORES CALIBRE 19	2	\$ 1.724	\$ 3.448	\$ 552	\$ 4.000
CONECTORES CALIBRE 20	2	\$ 431	\$ 862	\$ 138	\$ 1.000
TERMINALES A TIERRA	15	\$ 604	\$ 9.060	\$ 1.450	\$ 10.510
TORNILLOS DE 10MM	4	\$ 1.293	\$ 5.172	\$ 828	\$ 6.000
<b>SUBTOTAL</b>					<b>\$ 1.615.032</b>
<b>IMPROVISTO (3%)</b>					<b>\$ 48.451</b>
<b>TOTAL(\$)</b>					<b>\$ 1.663.483</b>



### **ANEXO 3B. ANALISIS DE PRESUPUESTO**

De acuerdo al anexo 3A en el cual se muestra el presupuesto en detalle de los costos de los materiales del transformador monofásico fabricado en el Laboratorio de electricidad industrial del SENA Popayán, se hizo un análisis del costo beneficio de su construcción, para ello se comparó el valor total del transformador con el costo real de un transformador en el mercado.

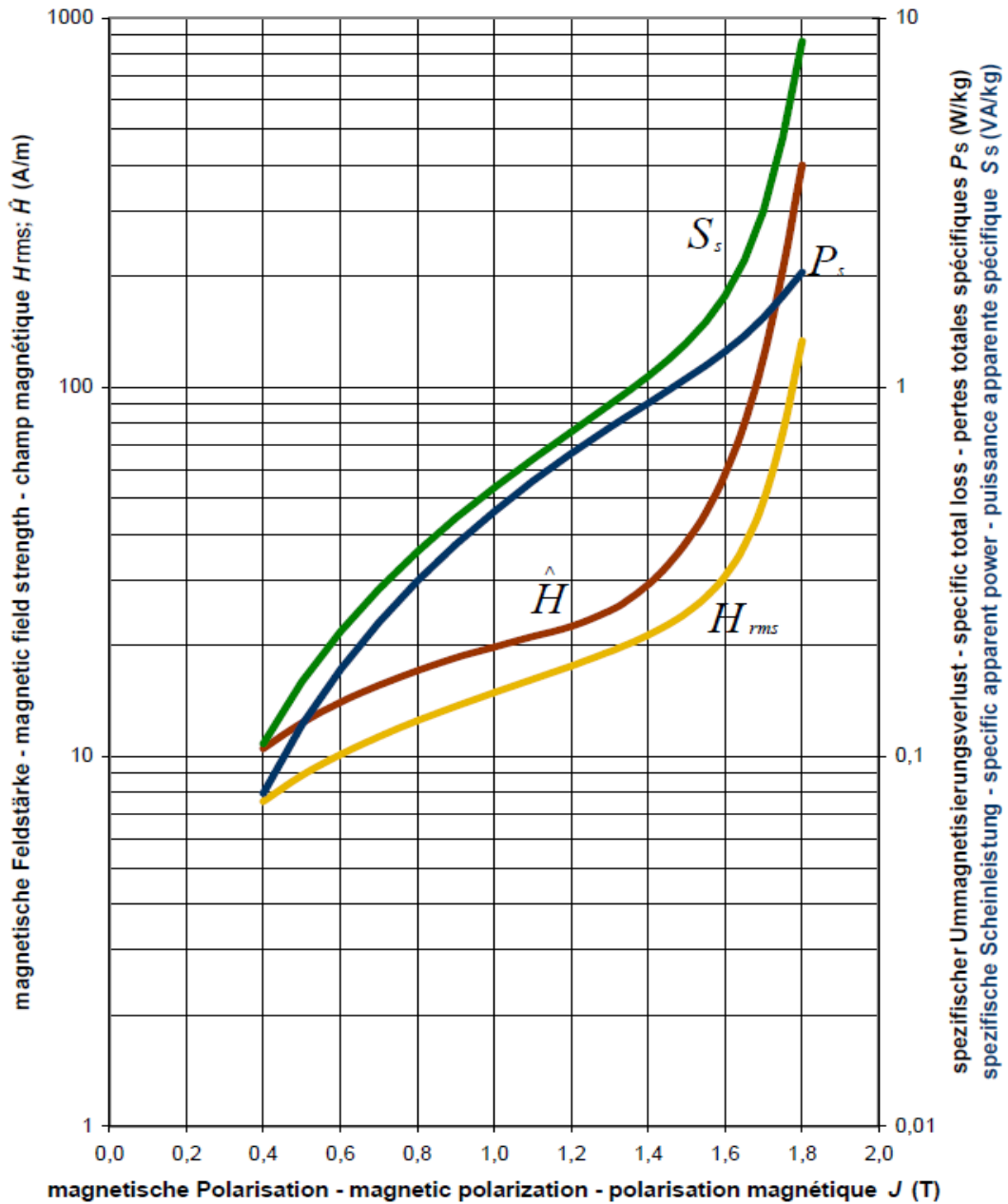
Como se observa del anexo el precio del transformador fue de \$1.663.483 y el costo real consultado en varias empresas energéticas como CEDELCA, Transformadores SUNTEC Medellín, el costo fue de \$2.800.000, por ello al calcular un porcentaje del costo que fue de un 68%, lo cual represento un valor muy beneficioso para este proyecto ya que es viable construirlo que comprarlo, generaría más beneficio considerando los costos de dinero por lo que los costos asociados con la construcción serían menores.

Además una de las mayores ventajas de la construcción fue el aprendizaje que se adquirió la cual no se puede cuantificar.

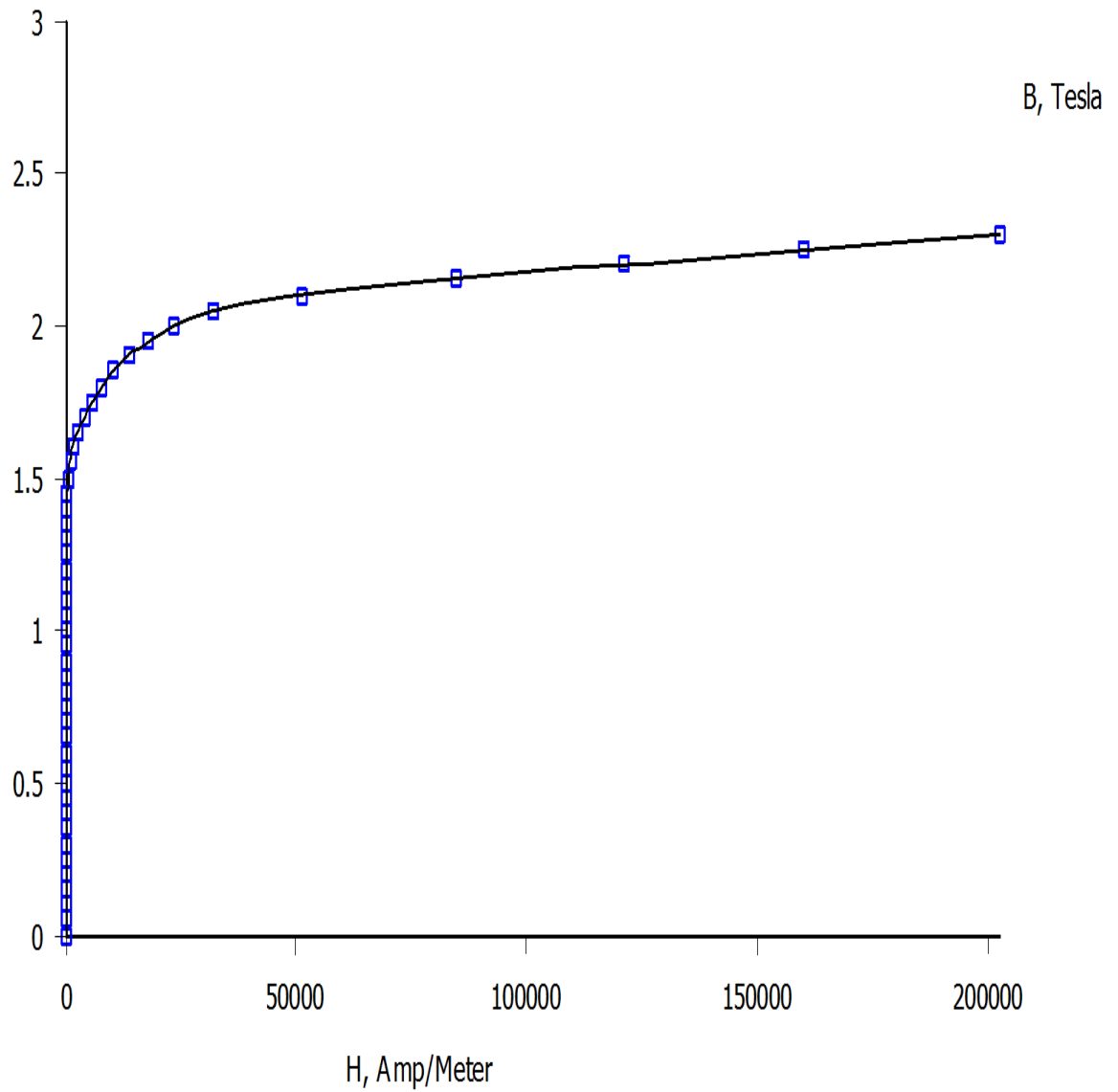
**ANEXO 4A. CURVA DE MAGNETIZACIÓN DE LA PLACA DE ACERO AL  
SILICIO**

# PowerCore<sup>®</sup> C 120-27

typical values at 60Hz



**ANEXO 4B. CURVA MAGNETICA DE LA PLACA DE ACERO AL SILICIO EN EL PROGRAMA FEMM**



## ANEXO 5. PLACA DE CARACTERISTICAS PARA EL TRANSFORMADOR MONOFASICO

- Potencia total nominal: 3,0 KVA
- Potencia nominal en el primario: 3,0 KVA
- Potencia nominal del secundario: 12V a 0,2 KVA, 24V a 0,2 KVA, 48V a 0,2 KVA, 120V a 0,8KVA, 220V a 0,8KVA, 380V a 0,8KVA.
- Tensión primaria: 220V (13,75A)
- Tensión secundarios:
  - 12V : 16,64A
  - 24V: 8,32A
  - 12V: 4,16A
  - 120V: 6,64A
  - 220V: 3,6A
  - 380V: 2,08A
- Rendimiento(Eficiencia): 94% - 99%
- Tipo de núcleo: Acero al silicio, calibre 0,27 mm.  
Forma "U".
- Frecuencia : 60 Hz
- Altura máxima de operación : 1.738 metros sobre el nivel del mar.
- Temperatura ambiental máxima : 19 ° C
- Temperatura máxima devanados : 40 ° C
- Regulación : (Promedio) con un factor de potencia =1
  - 12V: 2,1%
  - 24V: 1,77%
  - 48V: 1,54%
  - 120V: 43,5%
  - 220V: 42,6%
  - 380V: 38,5%
- Refrigeración : Aire normal
- Tipo de alambre : Cobre esmaltado

- Construcción: Arrollamientos a la vista tipo galleta, terminales de salida para rosca y banana. Soporte en hierro (ángulo y lamina cold-rolled) masillada y pinatada, 4 ruedas giratorias.

Todos los devanados tienen polaridad identificada con las letras P (Principio) y F (Fin).

## ANEXO 6. RECOMENDACIONES

- ✚ Utilizar un material de menor densidad, así se disminuirían significativamente las resistencias, también se puede realizar una geometría más conveniente para la construcción de los devanados que requiera una longitud menor en las bobinas distinto al devanado concéntrico y así se disminuyan las pérdidas en los bobinado.
- ✚ Realizar cortes en U para este diseño tipo columna antes que troquelar las placas para brindar más sujeción y estabilidad al núcleo disminuyendo las pérdidas por fugas magnéticas y posibles ruidos que se presentaran en su funcionamiento cuando el transformador este trabajando bajo carga.