



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA
CALIFORNIA**

**ESCUELA DE CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
TRANSFORMADOR DE 80 VA**

TESIS

Que para obtener el grado de:

INGENIERO ELÉCTRICO

Presenta:

HECTOR DAVID RAMIREZ GONZALEZ

Director de tesis:

DR. ALLEN A. CASTILLO BARRÓN

Tijuana, Baja California, 18 de septiembre de 2017

*“En la vida no hay
nada que temer,
sólo hay que
comprender”*

- Marie Curie

DEDICATORIA

A mis padres, que siempre han estado ahí para mí y a mi hermano, que siempre ha alegrado mi vida con su sola sonrisa.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su incondicional apoyo para la realización de este proyecto.

Al Dr. Allen A. Castillo Barrón por sus enseñanzas mientras fue mi profesor y su tiempo mientras fue mi director de tesis. Gracias por siempre motivarme a dar lo mejor de mí.

Al M.C Alberto Delgado por su apoyo y paciencia durante la etapa de manufactura.

A todos mis profesores que dieron de su tiempo y conocimientos durante mi preparación como Ingeniero Eléctrico.

A la Universidad Autónoma de Baja California, por su plan de estudios y las instalaciones que permitieron mi preparación.

A mis compañeros Andrea López y Mauricio Cisneros por su gran apoyo para la realización de las pruebas.

A mi amiga Jazmín, por ayuda y motivación para seguir adelante.

A PRODEP por el apoyo económico brindado por medio de una beca.

RESUMEN

Los transformadores son una pieza vital en los sistemas de potencia eléctrica, debido a que permiten la distribución, modificación, medición y utilización práctica de la energía eléctrica. Existe mucha literatura, modelos, artículos y normas que se encuentran enfocados al diseño y pruebas de transformadores de elevada potencia. Comparativamente no existe mucha información que se centre en el diseño de transformadores de baja potencia (considerados con potencias aparentes menores a los 1000 VA).

En el presente trabajo se propone una metodología para el diseño y construcción de un transformador de 80 VA, estableciendo parámetros iniciales de diseño como la eficiencia, la regulación de voltaje, el máximo incremento de temperatura, etc. Al construir los prototipos se realizaron pruebas a los mismos para verificar que cumplieran con los parámetros establecidos inicialmente. El prototipo final cumplió con todos los parámetros iniciales de diseño.

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 TRANSFORMADOR TIPO POSTE DE 37,500VA.	1
Ilustración 2 a) “TRANSFORMADOR” CONSTRUIDO POR FARADAY. b) BOBINAS UTILIZADAS POR JOSEPH HENRY EN SUS EXPERIMENTOS.....	3
Ilustración 3 BOBINA DE INDUCCIÓN DE CALLAN.....	3
Ilustración 4 TRANSFORMADOR DE STANLEY MODIFICADO POR WESTINGHOUSE, SHALLENBERGER Y SCHMID	6
Ilustración 5 CONSTRUCCIÓN TIPO COLUMNAS	14
Ilustración 6 CONSTRUCCIÓN TIPO ACORAZADO	15
Ilustración 7 NÚCLEO DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 4 PIERNAS	16
Ilustración 8 LÍNEAS DE CAMPO MAGNÉTICO ALREDEDOR DE UN ALAMBRE CONDUCTOR LARGO Y RECTO.....	17
Ilustración 9 LÍNEAS DE CAMPO MAGNÉTICO PRESENTES EN UN IMÁN ...	19
Ilustración 10 EL CAMPO MAGNÉTICO/DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO RESPECTO AL FLUJO MAGNÉTICO Y UNA SECCIÓN DE ÁREA TRANSVERSAL.....	20
Ilustración 11 UNA BOBINA SENCILLA.....	21
Ilustración 12 CONFIGURACIÓN DE LAS LÍNEAS DE CAMPO MAGNÉTICO EN CASO DE QUE FLUYA UNA CORRIENTE POR UNA BOBINA Y SE ENCUENTRE SUJETA A UN NÚCLEO DE AIRE.....	22

Ilustración 13 DIFERENTES TIPOS DE LÁMINAS UTILIZADAS PARA LOS NÚCLEOS DE LOS TRANSFORMADORES	26
Ilustración 14 DIMENSIONAMIENTO ESTÁNDAR DE LÁMINAS EI	26
Ilustración 15 MÉTODO DE APILAMIENTO ALTERNADO PARA LÁMINAS EI	27
Ilustración 16 BOBINA DEVANADA SOBRE UN NÚCLEO FERROMAGNÉTICO	28
Ilustración 17 NÚCLEO FERROMAGNÉTICO CON 2 BOBINAS DEVANAS SOBRE EL MISMO	31
Ilustración 18 CIRCUITO ELÉCTRICO BÁSICO PARA DEMOSTRACIÓN DE LEY DE OHM	34
Ilustración 19 REPRESENTACIÓN DE UN CIRCUITO MAGNÉTICO	35
Ilustración 20 REPRESENTACIÓN DE NÚCLEO FERROMAGNÉTICO CON BOBINA QUE PORTA UNA CORRIENTE DEVANADA EN UNA DE SUS PIERNAS.....	37
Ilustración 21 CIRCUITO MAGNÉTICO EQUIVALENTE DE NÚCLEO DE ILUSTRACIÓN 20	39
Ilustración 22 NÚCLEO FERROMAGNÉTICO CON BOBINA DEVANADA EN LA PIERNA CENTRAL	40
Ilustración 23 MODELO RESULTANTE DE CIRCUITO MAGNÉTICO	42
Ilustración 24 MODELO RESULTANTE EQUIVALENTE DE CIRCUITO MAGNÉTICO.....	43
Ilustración 25 a)REPRESENTCIÓN DE NÚCLEO FERROMAGNÉTICO CON BOBINA ENERGIZADA, b) ONDA SENOIDAL DE CORRIENTE ALTERNA.....	45

Ilustración 26 CURVA DE HISTÉRESIS	46
Ilustración 27 EJEMPLOS DE CURVAS DE MAGNETIZACIÓN DE ALGUNOS MATERIALES.....	47
Ilustración 28 SECCIONES DE UNA CURVA DE MAGNETIZACIÓN	48
Ilustración 29 REPRESENTACIÓN DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO MAGNÉTICO EN UN TRANSFORMADOR REAL	49
Ilustración 30 REPRESENTACIÓN DE REALINEAMIENTO DE LOS DOMINIOS ENTRE CICLO POSITIVO Y CICLO NEGATIVO DEL FLUJO MAGNÉTICO DENTRO DEL NÚCLEO FERROMAGNÉTICO	51
Ilustración 31 MODELO DE UN TRANSFORMADOR REAL	53
Ilustración 32 MODELO REAL EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR.....	54
Ilustración 33 DIAGRAMA DE CONEXIÓN PARA PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO.....	55
Ilustración 34 DIAGRAMA DE CONEXIÓN PARA PRUEBA DE CORTO CIRCUITO.....	56
Ilustración 35 NÚCLEO SENCILLO QUE MUESTRA UNA VENTANA CENTRAL	67
Ilustración 36 a) EMBOBINADO CUADRADO, b) EMBOBINADO HEXAGONAL	71
Ilustración 37 REPRESENTACIÓN DEL 40 % CONSIDERADO COMO EL FACTOR DE UTILIZACIÓN DE VENTANA.....	72
Ilustración 38 CONEXIONES PARA PRUEBA DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN	77
Ilustración 39 CONEXIONES PARA PRUEBA A PLENA CARGA	78

Ilustración 40 CURVA DE MAGNETIZACIÓN PARA ACERO M-13 NO ORIENTADO	89
Ilustración 41 DIMENSIONES DE LÁMINA EI-114A	93
Ilustración 42 DIMENSIONES DE LÁMINA EI-114 ^a . SE MUESTRAN LAS LLAMADAS LONGITUDES MEDIAS EN LINEAS PUNTEADAS	94
Ilustración 43 MODELO EQUIVALENTE DEL PROTOTIPO FINAL.....	109

ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	i
Índice de Figuras.....	ii
Índice General.....	vi
Capítulo I. Introducción	1
1.1 Naturaleza del problema	1
1.2 Estado del arte	1
1.3 Objetivo general	8
1.4 Justificación.....	8
1.5 Metodología	9
Capítulo II. Marco Teórico.....	10
2.1 Definición e importancia del transformador.....	10
2.2 Clasificación de los transformadores	11
2.2.1 Clasificación de transformadores de acuerdo a su voltaje y potencia ...	11
2.2.2 Clasificación de los transformadores de acuerdo a su construcción	14
2.2.3 Comparación entre tipo columnas y acorazado.....	15
2.3 Flujo magnético, densidad de flujo magnético y permeabilidad	17
2.4 Solenoides e intensidad de campo magnético.....	21
2.5 Materiales ferromagnéticos.....	23
2.5.1 Descripción de los materiales ferromagnéticos	23
2.5.2 Láminas ferromagnéticas.....	25
2.6 Principios de funcionamiento de los transformadores.....	27
2.6.1 Ley de Ampere	28

2.6.2 Ley de Faraday: Voltaje inducido por un flujo magnético variable	30
2.7 Circuitos magnéticos	33
2.8 Curvas B-H.....	44
2.9 Consideraciones para los transformadores ideales	49
2.10 Pérdidas en un transformador real.....	50
2.10.1 Pérdidas sin carga	50
2.10.2 Pérdidas con carga	52
2.11 Modelo de un transformador real	53
2.12- Temperatura del transformador	57
2.12.1 Medición de la temperatura en frío:.....	59
2.12.2 Mediciones de resistencia.....	60
2.12.3 Metodología para obtener el incremento promedio de la temperatura.	61
2.13 Consideraciones de diseño	65
2.13.1 Método de diseño: Producto Área.....	66
2.13.2 Método de diseño: geometría del núcleo o método kg	69
2.13.3 Factor de utilización de ventana	70
2.13.4 Selección del material y tamaño del núcleo.....	72
2.13.5 Densidad de corriente.....	73
2.13.6 Regulación de voltaje y caída de tensión.....	74
2.13.7 Eficiencia	75
2.14 Pruebas al transformador.....	76
2.14.1 Relación de transformación	76
2.14.2 Prueba a plena carga.....	77
2.14.3 Incremento de temperatura.....	78

Capítulo III. Diseño del transformador	79
3.1 Diseño del transformador	79
3.2 Especificaciones mecánicas de diseño:	86
3.3 Especificaciones eléctricas de diseño:	86
3.4 Selección de los calibres de los conductores	86
3.4.1 Selección del calibre del conductor primario	87
3.4.2 Selección del calibre del conductor secundario	87
3.5 Determinación de la densidad magnética de operación del transformador ..	88
3.6 Determinación de las dimensiones de las laminaciones	90
3.6.1 El método producto área	90
3.6.2 El método kg de McLyman	91
3.6.3 Selección de las dimensiones de las laminaciones	92
3.7 Longitud del recorrido magnético y sección transversal del núcleo	93
3.8 Determinación del número de vueltas de los devanados	95
3.9 Características del prototipo inicial	97
Capítulo IV. Construcción y pruebas	98
4.1 Construcción del transformador	98
4.2 La prueba de circuito abierto y relación de transformación	98
4.3 La prueba a plena carga	99
4.4 Cambio en la densidad de campo magnético, obtención y caracterización del prototipo final	102
4.5 Características del prototipo final:	110
4.6 Prueba de máximo incremento de temperatura	110
4.7 Comportamiento del transformador monofásico a diferentes cargas	114

4.8 Análisis de pruebas.....	118
Capítulo V. Conclusiones y trabajos futuros.....	124
5.1 Conclusiones.....	124
5.2 Trabajos futuros.....	125
Anexo A. Calibres de alambre magneto.....	126
Anexo B. Diseño mecánico.....	127
Referencias bibliográficas.....	143

Capítulo I. Introducción

1.1 Naturaleza del problema

El transformador es una pieza vital en los sistemas de distribución de potencia eléctrica debido a que permite manipular la energía para su distribución, medición y utilización práctica (utilización en dispositivos domésticos comunes).

En la actualidad la industria eléctrica está enfocada principalmente a la producción masiva de distintos tipos de transformadores que se diseñan con potencias aparentes en el rango de kVA y MVA.

Gran parte de los autores que proponen diseños para los transformadores se centran principalmente en transformadores de elevada potencia y grandes dimensiones, sin embargo, existe poca literatura que se enfoque al diseño de transformadores con potencia menor a 1 kVA.



FIGURA 1: TRANSFORMADOR TIPO POSTE DE 37,500VA. EXISTEN AMPLIOS ESTUDIOS PARA LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIAS ELEVADAS Y COMERCIALES

1.2 Estado del arte

La invención del primer transformador puede ser atribuida a Michael Faraday. Las investigaciones de Faraday fueron inspiradas por el físico danés Hans Christian Oersted quien en 1820 realizó un experimento en el cual se relacionó la fuerza eléctrica y la fuerza magnética (2 campos que hasta entonces se estudiaban por separado).

Desde un punto de vista lógico, Faraday dedujo que si una corriente eléctrica podía generar un campo magnético, tendría sentido que un campo magnético pudiera inducir una corriente [1-3]

El 29 de agosto de 1831 Faraday presentó el primer transformador de la historia.

En resumen, lo que Faraday descubrió fue que para poder inducir corriente en un conductor era necesario un campo magnético que “variara”. Pese a que la fuente conectada a este primer transformador era una batería galvánica (no había otra fuente disponible en aquel tiempo) Faraday logró crear esta “variación” de campo abriendo y cerrando el circuito eléctrico de cd que generaba el campo magnético. Esta interesante relación entre la electricidad y el magnetismo es lo que actualmente se denomina “inducción electromagnética”.

El transformador de Faraday contenía todos los elementos básicos de los transformadores: 2 bobinas independientes y un núcleo de hierro cerrado. Sin embargo en aquel tiempo aún no era utilizada la corriente alterna por lo que la invención de Faraday resultaba impráctica y costosa [1-2], [4-5].

Sin embargo, de acuerdo a Massimo Guarnieri [6], sería inapropiado llamar a Faraday como el inventor del transformador, esto debido a que Faraday pasó por alto una característica fundamental de los transformadores: la capacidad de transformar y adaptar el voltaje de un generador a una carga específica.

En 1832, Joseph Henry, un científico estadounidense, notó que con la interrupción de la corriente a voltajes muy elevados, era posible la inducción de voltaje debido al rápido cambio de flujo magnético. La figura 2b) muestra algunas de la bobinas utilizadas por Henry en sus experimentos. Fueron estos experimentos los que llevaron a la construcción de las “bobinas de inducción”. Éstas eran dispositivos de cd que podían producir mucho más voltaje que las batería galvánicas (éste era su principal propósito) [1], [5].



FIGURA 2: a) "TRANSFORMADOR" CONSTRUIDO POR FARADAY. b) BOBINAS UTILIZADAS POR JOSEPH HENRY EN SUS EXPERIMENTOS. [1]

El hombre que tuvo la idea clara sobre conmutar un campo magnético para el acoplamiento de 2 bobinas fue Nicholas Joseph Callan, un clérigo irlandés. En 1836 construyó el primer dispositivo capaz de efectuar el acoplamiento mutuo

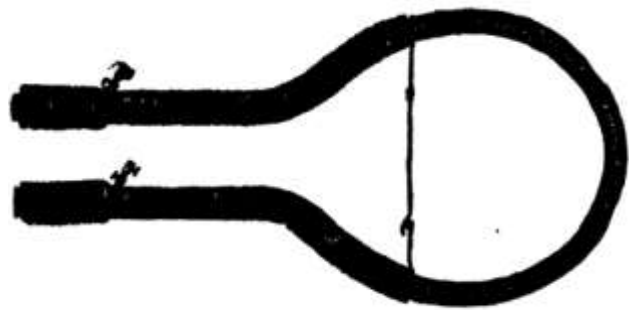


FIGURA 3: BOBINA DE INDUCCIÓN DE CALLAN [5]

de forma eficiente. Callan fabricó este dispositivo por necesidad personal: el necesitaba altos voltajes para sus experimentos, por lo que con el dispositivo que había creado logró obtenerlos de los bajos voltajes provenientes de las baterías de cd. Este dispositivo era básicamente un tipo de "bobina de inducción" [4-6].

Las primeras bobinas de inducción sólo podían proveer chispas con unos pocos milímetros de longitud, pero entre 1851 y 1853 Heinrich Daniel Ruhmkorff, un creador de instrumentos alemán, logró incrementar la longitud de la chispa a 200 mm y posteriormente a 450mm [1], [4].

Esta “bobina de inducción” creada por Ruhmkorff (llamada “bobina de Ruhmkorff”) resulta ser un hecho a notar, pues muchos inventores trabajaron y buscaron mejorar este dispositivo de cd.

La “bobina de Ruhmkorff” tuvo amplias aplicaciones en el telégrafo además de que resultó ser un dispositivo fundamental para la utilización de voltajes elevados (producidos de manera más eficiente que en otras máquinas electrostáticas contemporáneas) en investigaciones científicas como la aparición del concepto de rayos-X y algunos importantes avances en el estudio de partículas subatómicas [6].

En este punto es fácil notar que un factor importante que limitaba en gran medida el desarrollo del transformador fue la utilización generalizada de corriente directa (proveniente de generadores y baterías).

En 1850 existía una aplicación en el campo en el cual no existía mucha diferencia entre la utilización de cd y ca: lámparas para alumbrado. Circundante a esos años las lámparas eran alimentadas inicialmente por cd (proveniente no de baterías, sino de generadores de vapor). Sin embargo, se observó que los generadores sin conmutador eran más económicos de construir y más seguros para operar, por lo que estos fueron utilizados en las “lámparas de arco” (lámparas utilizadas en aquel entonces) [1], [4].

En 1870 Pavel Jablochhoff, un ingeniero e inventor ruso, desarrolló un novedoso invento al cual nombró: “vela de Jablochhoff” (“Jablochhoff candle”). Este invento consistía en una “lámpara de arco” simple y económica que necesitaba ca para su operación). Se puede considerar que este invento desarrollado por Jablochhoff fue un invento muy importante pues gracias a éste se da un gran avance en la utilización práctica de la ca [1], [4], [6].

En 1881 Lucien Gaulard y John Dixon Gibbs desarrollaron un dispositivo derivado de la “bobina de Ruhmkorff” al cual se le denominó “generador secundario” (“secondary generator”). Este dispositivo tenía una relación de vueltas 1:1 y un núcleo de hierro abierto. Estos fueron en su tiempo dispositivos novedosos los cuales se conectaban en serie en las terminales primarias mientras que las

terminales secundarias alimentaban cargas independientes a bajo voltaje [1-2], [4], [6].

El generador secundario con núcleo de hierro abierto (y por lo tanto una elevada reactancia) puede ser comparado con un transformador de soldadura en nuestro días. El voltaje en terminales que caía fuertemente al conectar las cargas era provechoso para alimentar las lámparas de arco (estas funcionaban a muy bajos voltajes), de hecho es posible decir que esta imperfección en el transformador secundario era la que aseguraba el funcionamiento del sistema [4].

En 1886 Gaulard sacó a la luz una versión mejorada del ya mencionado “generador secundario”, esta vez con un **núcleo de hierro cerrado**. Sin embargo cabe mencionar que Ottó Titusz Bláthy (ingeniero húngaro) construyó en 1885 el primer transformador toroidal con núcleo cerrado. En el mismo año Messrs Karoly Zipernowski y Miksa Deri presentaron un transformador el cual realizaba un buen trabajo eléctrico aunque la construcción del mismo no era del todo eficiente. Esta construcción y los avances comprendidos en 1885-1886 trajeron consigo 2 importantes elementos [1-2], [4], [6].

- 1- La conexión de cargas en paralelo a los transformadores.
- 2- La construcción de los transformadores con núcleo cerrado, con bajas caídas de voltaje y pocas pérdidas.

Por lo tanto, los años 1885-1886 son considerados vitales para el avance de los transformadores pues además de los descubrimientos ya mencionados, en Estados Unidos, William Stanley (Ingeniero de la Westinghouse Electric Company) propuso la construcción de transformadores con núcleo cerrado en la compañía de George Westinghouse (inventor e industrialista estadounidense). Este transformador se conoció como “Stanley’s Paccionotti Ring” debido a que era una adaptación de la “armadura de Paccionotti” [1].

En diciembre de 1885 con la ayuda de Shallenberger y Albert Schmid, Westinghouse realizó modificaciones al transformador elaborado por Stanley de forma que pudiera ser manufacturado de forma económica (ver figura 4). El núcleo

se realizó con delgadas láminas de acero cortadas en forma de letras **H**. Las bobinas se encontraban aisladas y enrolladas en la rama central de la letra **H**. Stanley sugirió utilizar láminas con forma de la letra **E**, además de que éstas debían superponerse en direcciones alternadas (configuración que aún se utiliza hoy en día) [2].



FIGURA 4: TRANSFORMADOR DE STANLEY MODIFICADO POR WESTINGHOUSE, SHALLENBERGER Y SCHMID [2]

Entre los años 1880 y 1890 se utilizó hierro para fabricar los núcleos de los transformadores. Sin embargo a partir del año 1900 se descubrieron avances importantes en este ámbito, algunos de los cuales se mencionan a continuación:

-Aceros al silicio: La adición de silicio reduce las pérdidas por histéresis, aumenta la permeabilidad y aumenta la resistividad. Sin embargo al agregar más de 4.5% de silicio al acero del núcleo provoca que este se vuelva quebradizo. Las láminas de acero al silicio se utilizaron por primera vez cerca del año 1906 [1].

-Aceros laminados en frío con grano orientado: Este tipo de acero surgió comercialmente cerca del año 1939. Este material presenta pocas pérdidas en las partes rectas de los núcleos pues el material facilita en gran medida el paso del flujo magnético [1].

-Aleaciones con Níquel: Este tipo de aleaciones tienen una permeabilidad mayor que los aceros al silicio pero se saturan a bajas densidades de flujo magnético [7].

-Aceros amorfos: Este material apareció recientemente y cuando se fabrica adecuadamente presenta pérdidas que corresponden al 20 y 25% de las pérdidas en los mejores aceros al silicio. Sin embargo al considerar densidades de flujo magnético superiores a los 1.56 T las pérdidas incrementan considerablemente.

Es sencillo notar que las laminaciones E-I, surgieron de los transformadores diseñados por Zipernowski y Deri además de los transformadores diseñados en la compañía de Westinghouse. Sin embargo resulta muy complicado encontrar

bibliografía que describa exactamente como surgieron propiamente los transformadores de baja potencia.

Existe bibliografía respecto a las características y el diseño de transformadores de potencia. Dasgupta [8] hace una descripción detallada de las características básicas que describen a los transformadores junto con sus componentes, así como fórmulas y ecuaciones que relacionan parámetros básicos para el diseño (volts/vuelta, densidad de flujo magnético de operación, voltaje en terminales, etc.), entre otros temas.

Flanagan [7] describe detalladamente tipos y aplicaciones de transformadores, características y fundamentos electromagnéticos, materiales magnéticos, consideraciones mecánicas, entre otros temas de suma importancia. Este autor propone y ejemplifica la metodología “clásica” para el diseño de transformadores, además de generalizar dicha metodología para transformadores pequeños también.

McLyman [9] propone su metodología de diseño de una forma bastante clara, además de que describe el origen matemático de muchos factores y fórmulas utilizadas de forma generalizada en el diseño de transformadores.

Al igual existen múltiples artículos que proponen mejoramiento en los materiales y en los procedimientos de construcción de transformadores. Un ejemplo claro es el artículo escrito por Bodger y Liew [10] donde proponen no un diseño clásico, sino uno basado en la ingeniería inversa.

En esta investigación, el motivo de utilizar láminas E-I para la transformadores pequeños queda justificado gracias a los libros de Flanagan [7], McLyman [9] y Álvarez [11], siendo los procedimientos y las metodologías de Flanagan [7] y McLyman [9] las más útiles para esta investigación.

1.3 Objetivo general

Diseñar y construir un transformador de 80 VA 127/12 V que cumpla con los requerimientos de regulación de voltaje y eficiencia establecidos en la etapa de diseño.

1.4 Justificación

Existen aplicaciones en las cuales es necesario utilizar transformadores con rangos de voltaje y potencia bajos, los cuales no se encuentran en el sector comercial o en caso de encontrarse no cumplen con las características o parámetros deseados. En estos casos es necesario diseñar y construir el transformador de baja potencia, lo cual es el objetivo del presente trabajo.

Existe una gran cantidad de bibliografía existente para el estudio y modelado de transformadores, [7-9], [11-13]. Cada diseño y metodología varía de acuerdo a la aplicación y características a las que se destina el transformador.

Algunas metodologías pueden resultar imprácticas debido a que se enfocan a potencias muy elevadas o condiciones muy especiales. Por lo tanto, establecer una metodología clara y flexible para el diseño aplicable a transformadores de baja potencia es una tarea importante y necesaria.

1.5 Metodología

Para efectuar el diseño y construcción del transformador es necesario establecer de forma clara y precisa el proceso a seguir:

1. Establecer los parámetros mecánicos iniciales: tipo de construcción, tipo de laminaciones, material de las laminaciones y material de los conductores (cobre o aluminio).
2. Especificar los parámetros eléctricos y magnéticos iniciales: Potencia aparente, voltaje primario, voltaje secundario, frecuencia de operación, eficiencia, regulación de voltaje, máxima densidad de flujo magnético, máxima densidad de corriente y máximo incremento de temperatura.
3. Seleccionar los calibres para las bobinas primaria y secundaria, en base a la máxima densidad de corriente establecida, la corriente nominal calculada, la eficiencia y los catálogos de los fabricantes.
4. Determinar la densidad de flujo magnético en base a la curva de magnetización del material previamente seleccionado.
5. Seleccionar las dimensiones de las laminaciones en base al método del área-producto y el método kg de McLyman [9].
6. Determinar el número de vueltas inicial para la bobina primaria y secundaria.
7. Calcular el área ocupada por los conductores y verificar si el espacio es suficiente de acuerdo a las laminaciones seleccionadas.
8. Embobinar el circuito primario y secundario (circuito de alta tensión se embobina en la parte interna del transformador).
9. Ensamblar las láminas para formar el núcleo (la altura del mismo queda definido por la máxima altura del carrete).
10. Realizar pruebas al transformador y verificar que cumpla con los requerimientos iniciales.
11. Caracterizar el transformador.

Capítulo II. Marco Teórico

2.1 Definición e importancia del transformador

De forma simple un transformador puede definirse como un dispositivo que cambia la potencia eléctrica alterna con un nivel de voltaje a potencia eléctrica alterna con otro nivel de voltaje mediante la acción de un campo magnético [12] [14].

De manera más precisa un transformador puede definirse como un dispositivo eléctrico estático con 2 o más bobinas vinculadas por un flujo magnético que permite enlazar 2 o más circuitos. Este enlace se puede dar con ayuda de un núcleo ferromagnético, aunque estrictamente dicho núcleo no es necesario para que exista un flujo magnético mutuo entre las bobinas.

Los transformadores se utilizan de forma masiva en los sistemas eléctricos de potencia y su diseño depende en gran medida del rango de aplicación, la construcción, la potencia de funcionamiento y los niveles de voltaje con los que trabajará [15].

La invención del transformador estuvo acompañada con el desarrollo de las fuentes de potencia alterna las cuales desplazaron a las fuentes de potencia directa. Esto basado en el principio de que un transformador cambia de forma ideal un nivel de voltaje alterno a otro nivel de voltaje alterno sin afectar la potencia que se suministra [1- 2], [4], [6], [14-15].

En la actualidad los transformadores son pieza vital en la distribución de potencia eléctrica y tienen aplicaciones prácticas en básicamente todos los sectores sociales. A la potencia eléctrica que se genera en un sitio determinado, se le eleva el voltaje para transmitirla a largas distancias con pocas pérdidas y luego se reduce nuevamente para dejarla en un nivel de utilización final, esto resulta obvio cuando se sabe que las pérdidas de transmisión en las líneas de potencia son proporcionales al cuadrado de la corriente, por lo tanto al elevar con transformadores 10 veces el voltaje de transmisión se reduce la corriente en el mismo número de veces y las pérdidas de transmisión se reducen 100 veces [14].

2.2 Clasificación de los transformadores

Los transformadores se pueden clasificar de muchas formas, sin embargo en este trabajo la clasificación de acuerdo a su potencia, voltaje y construcción es necesaria y suficiente.

2.2.1 Clasificación de transformadores de acuerdo a su voltaje y potencia

De acuerdo al IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants [16] existe una forma simple de clasificar las clases de voltaje:

- Bajo Voltaje: Voltajes nominales menores a los 1000 V. Utilizados para suministrar a dispositivos con aplicaciones específicas.
- Medio Voltaje: Voltajes nominales iguales o mayores a los 1000 V y menores a los 100,000 V. Utilizados para suministrar a transformadores de distribución que reducen el voltaje para dispositivos con aplicaciones específicas.
- Alto Voltaje: Voltajes nominales iguales o mayores que los 100,000 V. Son utilizados para transmitir enormes de cantidades de potencia eléctrica entre subestaciones de transmisión.

Para los sistemas de potencia existe una clasificación sencilla respecto a los transformadores de acuerdo a su potencia y voltaje: los transformadores con una potencia hasta de 2.5 MVA y un voltaje hasta de 36 kV son considerados transformadores de distribución, mientras que todos los transformadores con parámetros superiores a los anteriormente mencionados son transformadores de potencia (particularmente son definidos por ANSI/IEEE como los transformadores que transfieren energía eléctrica entre el generador y los circuitos de distribución primarios).

Los transformadores de potencia pueden ser sub-clasificados. Los que se encuentran directamente conectados al generador se denominan "Transformadores de generador", su potencia puede ser superior a los 1000 MVA y sus rangos de voltaje se extienden hasta los 1500 kV. Los transformadores de potencia que

funcionan como vínculo de conexión entre los sistemas de diferente nivel de alto voltaje se denominan como "transformadores de red", que de igual forma pueden ser de una potencia superior a los 1000 MVA y sus rangos de voltaje exceden los 1500 kV.

Por otra parte, los transformadores de distribución se utilizan en las redes eléctricas de distribución para transmitir energía de media tensión a baja tensión. Los transformadores de distribución han sido definidos por ANSI/IEEE como transformadores para transferir energía del circuito primario de distribución al circuito de servicio o circuito del consumidor [15].

De acuerdo al IEEE Standard for General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers [17], de forma general la potencia nominal de un transformador será la potencia de salida que puede ser entregada en el tiempo especificado (a voltaje y frecuencia nominales), sin exceder el incremento de temperatura especificado durante las condiciones de prueba y los diferentes estándares. La bibliografía anterior también muestra una tabla con las potencias nominales continuas preferidas para transformadores monofásicos y trifásicos:

POTENCIAS NOMINALES PREFERIDAS	
Transformadores Monofásicos (kVA)	Transformadores trifásicos (kVA)
1.0	15.0
3.0	30.0
5.0	45.0
7.5	75.0
10.0	112.5
15.0	150.0
25.0	225.0
37.5	300.0
50.0	500.0
75.0	750.0
100.0	1000.0
167.0	1500.0
250.0	2000.0
333.0	2500.0
500.0	3750.0
833.0	5000.0
1250.0	7500.0
1667.0	10000.0
2500.0	12000.0
3333.0	15000.0
5000.0	20000.0
6667.0	25000.0
8333.0	30000.0
10000.0

TABLA T1: POTENCIAS NOMINALES PREFERIDAS PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS Y TRIFÁSICOS

[17]

Una gran parte de las normas respecto a transformadores se enfocan en potencias y voltajes muy elevados, sin embargo, por cuestiones prácticas y de acuerdo a la tabla T1 podemos considerar a los transformadores con potencias aparentes menores a 1 kVA como transformadores de baja potencia.

2.2.2 Clasificación de los transformadores de acuerdo a su construcción

El tipo de construcción escogida para un transformador depende de las especificaciones técnicas del mismo, las limitaciones de la manufactura y algunas cuestiones de espacio y transporte [13].

Los transformadores con núcleos ferromagnéticos se construyen básicamente de 2 maneras:

1- Tipo columnas: Para transformadores monofásicos, las bobinas se encuentran en las columnas externas del transformador. Como puede observarse en la figura 5, existe un solo camino definido para el flujo magnético (en caso de transformadores trifásicos, puede existir una pierna central que produzca una bifurcación del flujo magnético). Las bobinas se colocan en las piernas del núcleo una vez que se termina la construcción de éste. La parte del núcleo que no está cubierta por las bobinas pero que cierra el camino para el flujo magnético se llama “yugo” [11-12], [14].

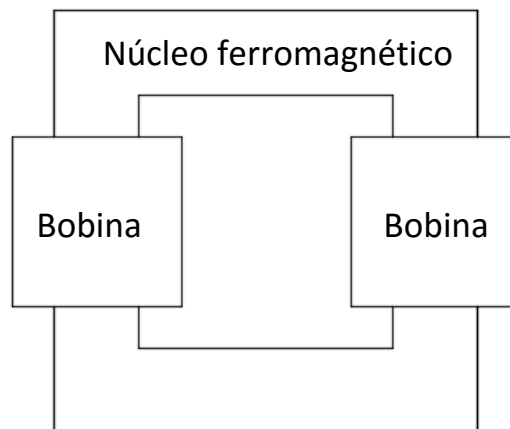


FIGURA 5: CONSTRUCCIÓN TIPO COLUMNAS

2- Tipo acorazado: En este tipo de construcción el núcleo ofrece una estructura la cual provee más de un camino para el flujo magnético. Las bobinas son sujetas a la pierna central del núcleo y se encuentran rodeadas por las piernas externas. Algunas variedades de transformadores trifásicos tipo acorazado pueden tener núcleos de hasta 5 o 7 piernas, dependiendo de la aplicación [12], [14].

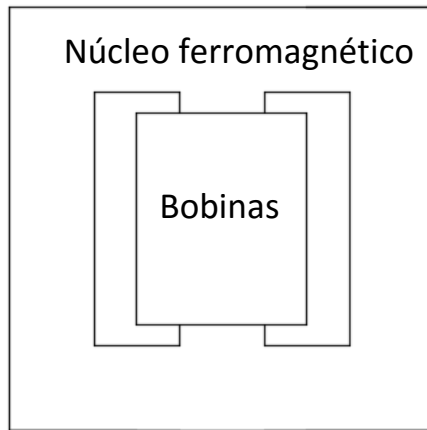


FIGURA 6: CONSTRUCCIÓN TIPO ACORAZADO

2.2.3 Comparación entre tipo columnas y acorazado

La selección para el tipo de construcción del núcleo del transformador depende en gran medida a la aplicación para la cual se destina el mismo.

La construcción tipo columnas es más común, más simple, el enfriamiento es mejor y la reparación y mantenimiento del mismo es más sencillo. Este tipo de construcción suele utilizarse para potencias más elevadas.

La construcción tipo acorazado tiene la ventaja de que al devanar las bobinas de alto y bajo voltaje una sobre la otra, se logra tener una impedancia más baja. Una desventaja de este tipo de núcleo es que resulta más complicado de construir, así como de dar mantenimiento (esto se hace notorio al intentar inspeccionar las

bobinas de alto y bajo voltaje, pues en este tipo de construcción se devanan una sobre la otra) [13].

De acuerdo a la bibliografía [12], los núcleos rectangulares se utilizan para aplicaciones de baja potencia y como transformadores auxiliares en los transformadores de potencia. Es fácil observar que el núcleo tipo acorazado consume menos espacio que el tipo columnas, por lo que este tipo de construcción resulta ideal para transformadores con aplicaciones como dispositivos auxiliares o dispositivos dentro de circuitos con determinado espacio disponible (este tipo de construcción es utilizado ampliamente en los transformadores de control).

Para aplicaciones de elevada potencia suelen utilizarse tipos de construcción un tanto más complejas que combinan características de los núcleos tipo columna y tipo acorazado. Un ejemplo claro es el núcleo mostrado en la figura 7 el cual pertenecería a un transformador monofásico de cuadro piernas (por cuestiones de diseño magnético, al agregar mayor cantidad de piernas, se reduce la altura del núcleo, por lo que el transformador puede ser transportado más fácilmente) [13].

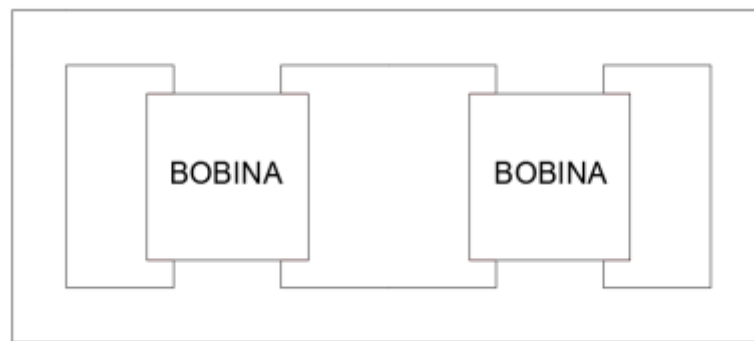


FIGURA 7: NÚCLEO DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 4 PIERNAS [13]

Para fines prácticos de esta investigación los núcleos compuestos como el de la figura 7, no son importantes y conocer las principales características y aplicaciones de las construcciones tipo acorazado y tipo núcleo es más que necesario y suficiente.

2.3 Flujo magnético, densidad de flujo magnético y permeabilidad

Antes de continuar con los materiales ferromagnéticos, curvas de magnetización (curvas B-H), principios básicos para el funcionamiento del transformador, circuitos magnéticos, etc., se definirán de forma clara y precisa algunos conceptos básicos para la adecuada comprensión de estos temas.

En física cuando se estudia el campo eléctrico se suele tomar como ejemplo el hecho de que existen 2 cargas en estado estático o en estado dinámico. Sin embargo, en comparación con el campo eléctrico, el campo magnético únicamente está presente al considerar cargas en movimiento, esto debido al hecho de que el campo magnético se relaciona matemáticamente de forma proporcional a la fuerza magnética la cual a su vez se relaciona de forma proporcional con la velocidad de las cargas estudiadas [3], [18].

Considérese un alambre conductor el cual porta una determinada corriente eléctrica. Alrededor de este alambre se generará un campo magnético como se muestra en la figura 8. La magnitud del campo magnético decrece de forma inversa a la distancia de la corriente que fluye por el conductor.

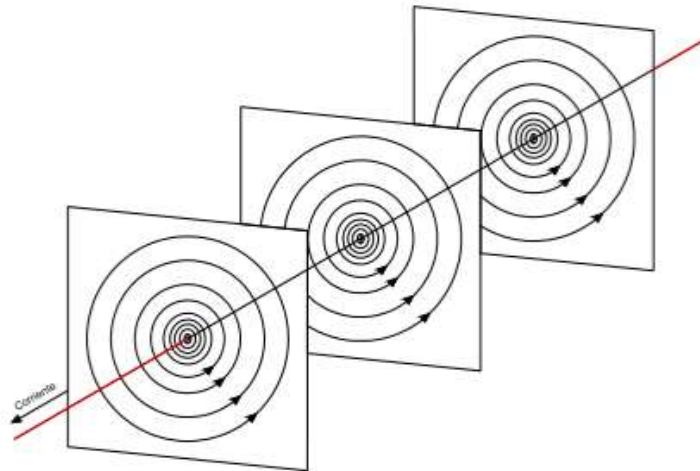


FIGURA 8: LÍNEAS DE CAMPO MAGNÉTICO ALREDEDOR DE UN ALAMBRE CONDUCTOR LARGO Y RECTO [18]

Respecto a la figura anterior es fácil intuir que el campo magnético existe siempre que exista un flujo de corriente eléctrica. Considérese que una carga puntual se mueve a una determinada velocidad v dentro del alcance del campo magnético producido por la corriente eléctrica que fluye por el alambre conductor. Dicha carga sufrirá una fuerza en dirección paralela a la corriente:

$$F = (qv)\left(\frac{\mu I}{2\pi r}\right) \quad (1)$$

Donde:

F es la fuerza paralela que actúa sobre la carga (*newtons*)

q es la magnitud de la carga (*coulombs*)

v es la velocidad a la que se mueve la carga (*m/s*)

μ es la permeabilidad del medio (*henrys/m*)

I es la magnitud de la corriente eléctrica (*amperes*)

r es la distancia entre la carga y el vector de campo magnético (*m*)

Al segundo factor de la ecuación (1) se le suele denominar “campo magnético de la corriente” y se representa mediante la letra B [3], [18]:

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (2)$$

Ahora bien, en la ecuación anterior se encuentra un término interesante: la permeabilidad μ . La cual se puede representar de una forma más completa como $\mu = \mu_r \mu_0$, donde μ_0 es la permeabilidad de vacío y μ_r es la permeabilidad relativa del material por el cual circulan las líneas de flujo magnético.

De forma simple la permeabilidad μ representa la facilidad relativa para establecer un campo magnético en un determinado medio o material [14]. En otras palabras,

entre mayor sea la permeabilidad de un determinado medio o material, mejores propiedades magnéticas poseerá.

Para esta investigación los efectos de fuerza sobre una carga puntual debidas a un campo magnético resultan imprácticas y no se tomarán en cuenta. Se trabajará a partir del campo magnético descrito en la ecuación (2).

Como se observa en la figura 8 el campo magnético se puede representar mediante líneas de campo. Considerando que la intensidad del campo magnético disminuye con la distancia, también lo hace la densidad de las líneas. A diferencia del campo eléctrico cuyas líneas son radiales, las líneas de campo magnético siempre forman ciclos cerrados. Una forma simple de describir esto es considerar las líneas de campo presentes en un imán. Los imanes poseen dos polos: un polo norte y un polo sur, las líneas de campo magnético salen del polo norte y entran al polo sur (formando un ciclo cerrado) como se muestra en la figura 9.

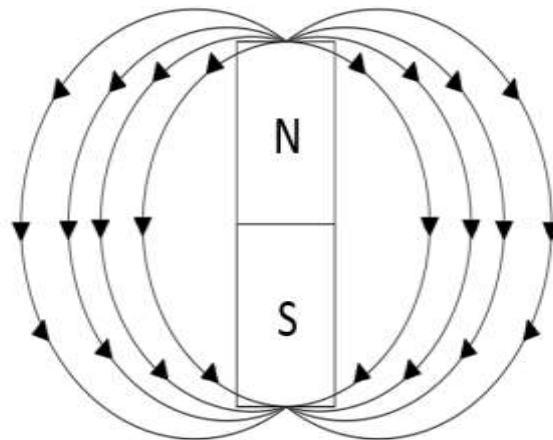


FIGURA 9: LÍNEAS DE CAMPO MAGNÉTICO PRESENTES EN UN IMÁN

La propiedad de las líneas de campo magnético de formar ciclos cerrados se expresa matemáticamente como [3], [14], [18]:

$$\phi = 0 \quad y \quad \oint B \, dA = 0 \quad (3)$$

Por lo tanto:

$$\phi = \oint B \, dA \quad (4)$$

Donde:

ϕ es el flujo magnético (*webers*)

B es el vector de campo magnético (*teslas*)

dA es la diferencial del área (m^2)

En base a la ecuación (4), se puede describir el concepto de campo magnético (también conocido como densidad de flujo magnético) como la cantidad de líneas de flujo magnético que atraviesan determinada superficie. Para visualizar lo anterior, considérese la figura 10.

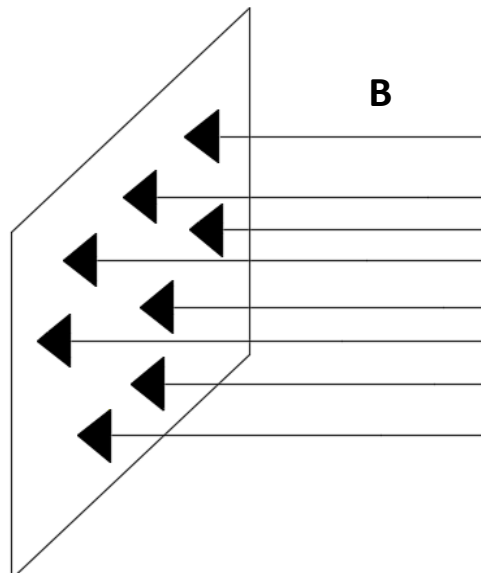


FIGURA 10: EL CAMPO MAGNÉTICO/DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO SE DEFINE COMO EL COCIENTE ENTRE UN DETERMINADO FLUJO MAGNÉTICO Y LA SUPERFICIE QUE ATRAVIESA

En la figura 10 se describe al campo magnético en términos de un flujo magnético y una superficie, sin embargo no se ha descrito como se puede “crear” dicho flujo. En la siguiente sección se observará como el flujo magnético puede ser creado a partir de un solenoide.

2.4 Solenoides e intensidad de campo magnético

De forma simple un solenoide o bobina se define como un alambre conductor devanado helicoidal apretado de N vueltas [18].

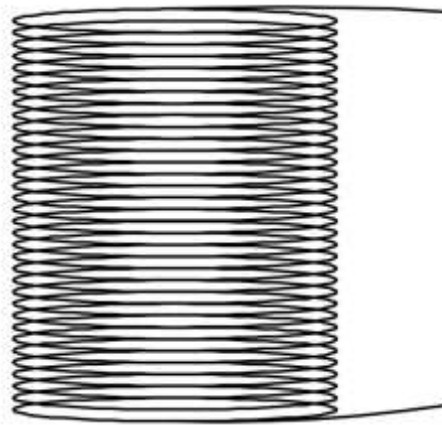


FIGURA 11: UNA BOBINA SENCILLA

Una corriente eléctrica que fluya por la bobina producirá un campo magnético dentro de la bobina. Si se considera que la bobina se devana dentro del aire terrestre entonces se tendría una configuración de campo magnético como se muestra en la figura 12.

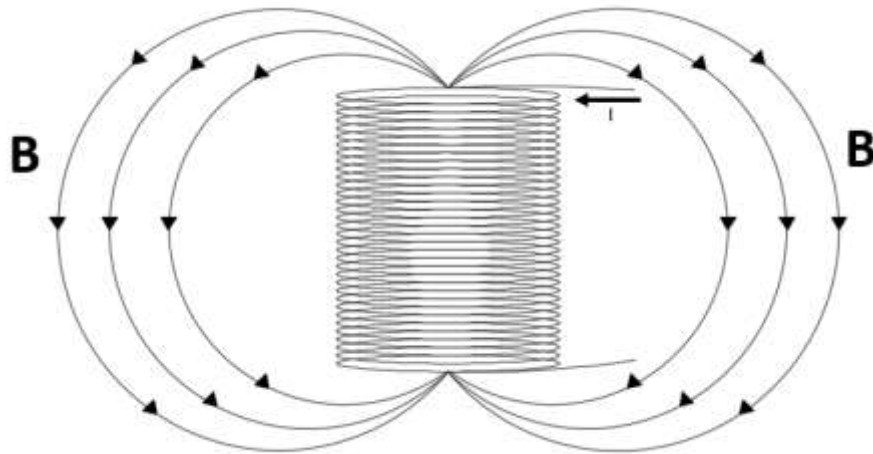


FIGURA 12: CONFIGURACIÓN DE LAS LÍNEAS DE CAMPO MAGNÉTICO EN CASO DE QUE FLUYA UNA CORRIENTE POR LA BOBINA Y SE ENCUENTRE SUJETA A UN NÚCLEO DE AIRE

En la figura 12 es fácil observar que al fluir corriente por la bobina se tiene una configuración de campo magnético como el imán mostrado en la figura 9 (la bobina forma un polo norte y un polo sur), pues el aire tiene una permeabilidad muy baja y las líneas de campo magnético siempre deben formar caminos cerrados.

La magnitud del campo magnético depende de la permeabilidad del material donde se encuentre devanada la bobina. Como se describirá en la sección 2.7 de Circuitos Magnéticos, si la bobina se devana sobre un núcleo ferromagnético, es decir, sobre un material con una permeabilidad muy elevada entonces el flujo magnético producido formará un ciclo cerrado dentro de dicho material.

La densidad de flujo magnético B y la permeabilidad μ se relacionan por medio de un tercer elemento, llamado: intensidad de campo magnético H [7], [14], [19-20]:

$$B = \mu H \quad (5)$$

De forma simple la intensidad de campo magnético representa el esfuerzo de la corriente que fluye por la bobina de establecer un campo magnético en un material o medio dado [14]. En la sección 2.8 de Curvas B-H se explicará la importancia de la relación existente entre la densidad de flujo magnético B y la intensidad de campo

magnético H , además del impacto que tiene en el diseño de transformadores y máquinas eléctricas en general.

2.5 Materiales ferromagnéticos

En el diseño de transformadores, las características magnéticas del material que conforma el núcleo resultan de suma importancia para describir la funcionalidad del transformador. Existen una gran cantidad de materiales que son utilizables para la construcción del núcleo del transformador, pero solamente los materiales que son catalogados como “ferromagnéticos” ofrecen características magnéticas y eléctricas que permiten diseños óptimos y de alta eficiencia para bajas frecuencias.

2.5.1 Descripción de los materiales ferromagnéticos

Los CRGO (Cold Rolled Grain Oriented Steel) por sus siglas en inglés “Acero laminado en frío de grano orientado”, son los aceros ferromagnéticos actualmente utilizados para la construcción de los núcleos de los transformadores. En los años recientes se le ha prestado una especial importancia al ahorro de energía para la protección del medio ambiente. En los transformadores, estos ahorros de energía se traducen básicamente como disminución de pérdidas ocurridas durante la operación de los dispositivos.

Con el avance de la industria y el crecimiento de la población humana resulta obvio y necesario resaltar el crecimiento de la demanda eléctrica, esto claro hace destacar más la importancia de reducir las pérdidas en los dispositivos de transmisión eléctrica y por lo tanto mejorar la eficiencia de los transformadores [8].

Para la reducción de pérdidas en los transformadores es posible considerar la utilización de distintos tipos de aceros ferromagnéticos, aunque se tiene el conocimiento que cualquier acero con un porcentaje bajo en silicio (1%, 2 %, 3%,

4%, 5%, 6%) funciona de una forma bastante segura y eficiente siempre y cuando se elabore bajo las medidas de control adecuadas.

La reducción de las pérdidas no solamente reduce los costos de operación, sino que también ayuda a disminuir el tamaño del armazón del núcleo y por lo tanto el tamaño de las bobinas.

El proceso que suele seguirse para determinar las propiedades de las aleaciones magnéticas, consiste en efectuar medidas de cada una de las propiedades, sobre muestras de cada clase de material fabricado. Los datos obtenidos se utilizan entonces para trazar curvas características del material en cuestión (Curvas B-H, como se verá más adelante) [19].

Los materiales ferromagnéticos se caracterizan por uno o varios de los siguientes atributos [19]:

- a) Pueden imanarse mucho más fácilmente que los demás materiales. Esta característica viene indicada con una gran permeabilidad relativa μ/μ_o
- b) Tienen una inducción magnética intrínseca máxima $B_{m\acute{a}x}$ muy elevada.
- c) Se imanar con una facilidad muy diferente según sea el valor del campo magnético. Este atributo lleva a una relación no lineal entre los módulos B de campo magnético y H de intensidad de campo magnético.
- d) Un aumento del campo magnético les origina una variación de flujo magnético diferente de la variación que originaría una disminución igual de campo magnético. Este atributo indica que las relaciones que expresan la inducción magnética y la permeabilidad μ como funciones del campo magnético, no son lineales ni uniformes.
- e) Conservan la imanación cuando se suprime el campo magnético (principio de los imanes permanentes). Normalmente conocido como retentividad [14], [19].
- f) Tienden a oponerse a la inversión del sentido de la imanación una vez imanados.

De entre los materiales que se dispone, el hierro es el más utilizado. Su permeabilidad es grande y su costo por unidad de peso es el más bajo de todos los materiales ferromagnéticos disponibles. En su forma comercialmente pura, se emplea frecuentemente en las estructuras de muchas máquinas. También se emplea como elemento básico en casi todas las aleaciones ferromagnéticas. La aleación producida en mayor cantidad es probablemente, la compuesta por hierro esencialmente puro con un 1-4 % de silicio, dependiendo este porcentaje del fin a que se destine el material. Dando a esta aleación un tratamiento térmico adecuado, se obtiene un material que, comparado con el hierro, tiene mejores propiedades magnéticas para campos magnéticos débiles y una resistividad mayor [19].

2.5.2 Láminas ferromagnéticas

Los núcleos ferromagnéticos no se construyen con trozos solidos de metal, puesto que, si se realizaran de esta manera, los transformadores tendrían una gran cantidad de pérdidas, calentamiento, baja eficiencia y pésimo rendimiento (véase la sección 2.10 sobre pérdidas en un transformador real). En su lugar se utilizan las llamadas láminas ferromagnéticas, las cuales se apilan una sobre la otra para formar el núcleo del transformador. Gracias a los avances en la tecnología de maquinado, existen una gran cantidad de láminas en distintas formas y tamaños como se muestra en la figura 13.

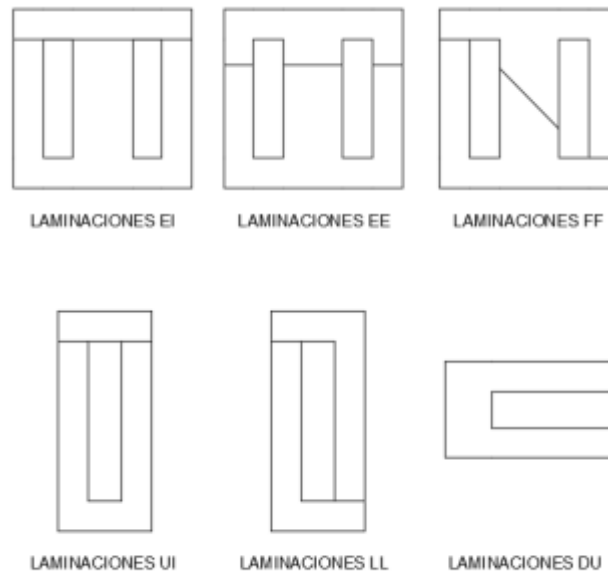


FIGURA 13: DIFERENTES TIPOS DE LÁMINAS UTILIZADAS PARA LOS NÚCLEOS DE LOS TRANSFORMADORES [9]

De acuerdo a McLyman [9] y Flanagan [7] la lámina más utilizada para transformadores pequeños es la de tipo EI, esto debido a que es la que produce menos desperdicio durante el maquinado, además de que como se verá en la sección 2.7 sobre circuitos magnéticos, la geometría de dichas láminas permite una densidad de flujo magnético B e intensidad de campo magnético H constantes en todo el núcleo.

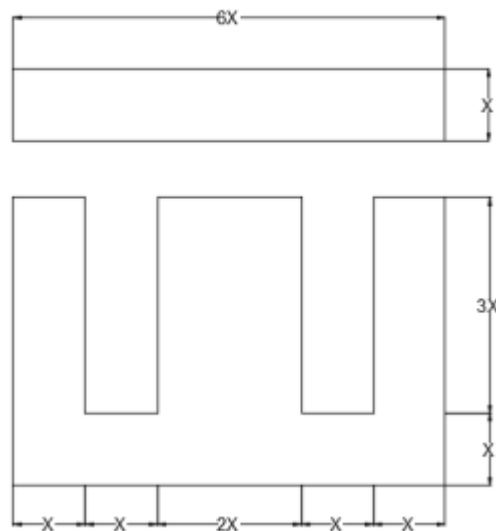


FIGURA 14: DIMENSIONAMIENTO ESTÁNDAR DE LÁMINAS EI

Existen una gran cantidad de métodos para apilar las láminas, sin embargo, la más utilizada y útil en esta investigación es llamado método de “apilamiento alternado”. En este método un juego de láminas E1 se acoplan, posteriormente sobre las mismas se coloca otro juego de E1 pero de forma invertida como se muestra en la figura 15 y se repite el proceso hasta alcanzar la altura del núcleo deseada. De esta forma se reduce el espacio entre las láminas (menor cantidad de aire entre las mismas) y se disminuye la reluctancia del núcleo [7], [9], [11].

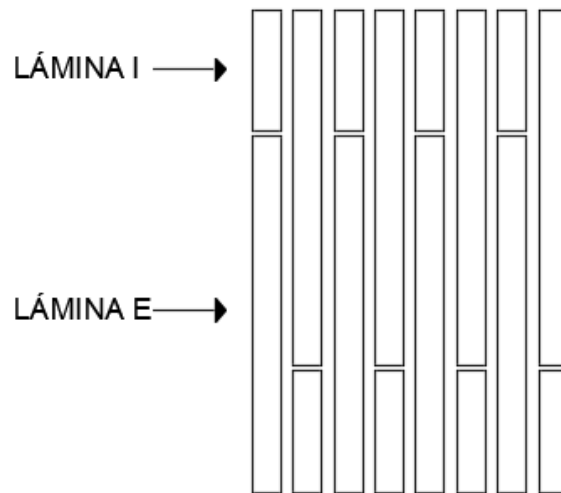


FIGURA 15: MÉTODO DE APILAMIENTO ALTERNADO PARA LÁMINAS E1 [9]

2.6 Principios de funcionamiento de los transformadores

Ya se estudió de forma básica los conceptos de densidad de flujo magnético B , intensidad de campo magnético H , flujo magnético ϕ y permeabilidad μ , además de las características de los materiales ferromagnéticos. Ahora se procederá a relacionar estos conceptos entre sí y respecto a las características geométricas de determinado material. Se comenzará con la descripción de la Ley de Ampere.

2.6.1 Ley de Ampere

Considérese la figura 16:

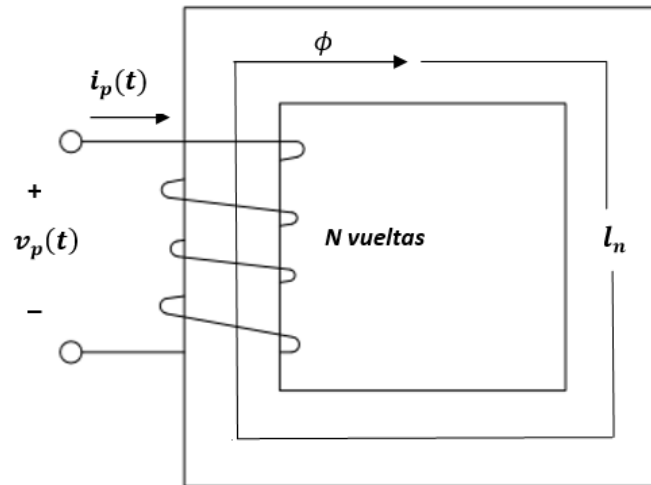


FIGURA 16: BOBINA DEVANADA SOBRE UN NÚCLEO FERROMAGNÉTICO

En la figura 16 se observa un núcleo ferromagnético el cual posee una determinada profundidad hacia el fondo de la hoja. Este núcleo tiene enrollada alrededor de una de sus piernas una bobina de N vueltas. Dicha bobina se encuentra conectada a una fuente de voltaje alterno $v_p(t)$. Por lo tanto existe una determinada corriente alterna $i_p(t)$ que fluye por la misma. Considerando que el núcleo ferromagnético posee una alta permeabilidad, se generará un flujo magnético ϕ dentro del mismo. Nótese que el flujo magnético forma una trayectoria cerrada.

La ley de Ampere es la ley que gobierna la producción de un campo magnético debido a una corriente y se representa como: [7], [14], [18], [20]:

$$(H)(l_n) = (N)(i_p(t)) \quad (6)$$

Donde:

H es la intensidad de campo magnético dentro del núcleo $\left(\frac{(\text{amperes})(\text{vuelta})}{m}\right)$

l_n en la longitud media del núcleo (m)

N es el número de vueltas de la bobina

$i_p(t)$ es la corriente alterna que fluye por la bobina (amperes)

Si se considera que el elemento estudiado es un núcleo ferromagnético se puede afirmar que casi todo el flujo magnético permanece dentro del núcleo pues la permeabilidad de estos materiales es sumamente elevada en comparación con la permeabilidad del aire [7], [14], [18-20]. Esta característica se observa de forma más clara en la ecuación (5), la cual indica que entre mayor sea la permeabilidad mayor será la densidad de flujo magnético B y menor será la intensidad de campo magnético H (será necesario un menor esfuerzo por parte de la corriente para establecer el campo magnético).

Al sustituir la magnitud de H representada por la ecuación (6) en la ecuación (5) se obtiene:

$$B = \frac{\mu N i_p(t)}{l_n} \quad (7)$$

Considerando la ecuación (7), es sencillo observar que la densidad de flujo magnético dentro de un núcleo ferromagnético será mayor cuando se considere una permeabilidad elevada por parte del material así como una gran cantidad de vueltas que conformen a la bobina. También se tendría una gran cantidad de densidad de flujo si se considera una corriente elevada en la bobina, sin embargo al momento de diseñar alguna máquina eléctrica esto resultaría problemático, pues dependiendo del calibre de alambre que se utilice para la bobina, esta solamente soportaría determinada magnitud de corriente, por lo que resulta vital establecer la corriente dentro de los parámetros iniciales de diseño.

Ahora se debe de tomar de nuevo en cuenta la ecuación (4). Dicha ecuación describe al flujo magnético en términos de la integral de la densidad de flujo

magnético respecto a una sección de área transversal. Si se considera que el vector de densidad de flujo magnético forma un ángulo de 90° respecto a la sección de área transversal (es decir B es perpendicular a A) entonces la ecuación (4) se reduce a:

$$\phi = BA \quad (8)$$

Sustituyendo la ecuación (7) en la ecuación (8) se obtiene:

$$\phi = \frac{\mu N i_p(t) A}{l_n} \quad (9)$$

La aplicación de las ecuaciones (7), (8) y (9) están justificadas como principios básicos para el análisis de los circuitos magnéticos por los trabajos de Chapman [14], Flanagan [7], Matsh [20] y el M.I.T (Massachusetts Institute of Technology) [19].

2.6.2 Ley de Faraday: Voltaje inducido por un flujo magnético variable

En 1831, mientras realizaba sus experimentos, Michael Faraday hizo uno de los descubrimientos más importantes en electromagnetismo. Ahora conocida como “Ley de Faraday de inducción electromagnética”, reveló una relación fundamental entre el voltaje y el flujo magnético en un circuito. La ley de Faraday establece que: [21]

- 1- Si el flujo magnético que vincula una bobina varía como una función de tiempo, se induce un voltaje entre sus terminales.
- 2- El valor de voltaje inducido es proporcional a la velocidad de cambio de flujo.

Esta ley representa la base del funcionamiento del transformador. En resumen, la ley de Faraday establece que si un flujo magnético variante con el tiempo atraviesa una bobina de alambre conductor, se induce en ésta un voltaje directamente proporcional a la tasa de cambio del flujo con respecto al tiempo.

Considérese la figura 17

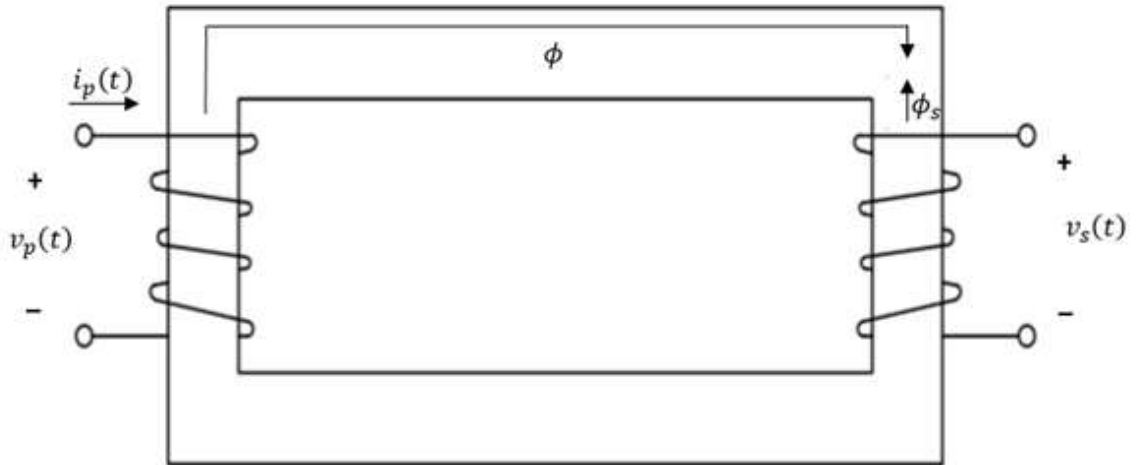


FIGURA 17: NÚCLEO FERROMAGNÉTICO CON 2 BOBINAS DEVANAS SOBRE EL MISMO

Considerando la figura 17 se tiene una bobina primaria conectada a una fuente de alimentación alterna. En dicha bobina existe un voltaje alterno $v_p(t)$ entre ambas terminales y fluye una corriente alterna $i_p(t)$. Como se describió en la sección anterior, esta configuración produce un flujo magnético ϕ dentro del núcleo. Ahora bien, en la figura 17 se muestra una segunda bobina sujeta en la pierna opuesta del núcleo. La ley de Faraday indica que al pasar un determinado flujo magnético ϕ por la bobina secundaria se inducirá un voltaje $v_s(t)$ en la misma. Esto puede expresarse mediante la ecuación (10) [13-14], [21]:

$$v_s(t) = -\frac{d\phi}{dt} \quad (10)$$

Donde

$v_s(t)$ es el voltaje inducido en la bobina secundaria (*volts*)

ϕ es el flujo magnético producido en la bobina primaria (*webers*)

dt se refiere al diferencial de tiempo

Si la bobina secundaria tiene N_s vueltas y el mismo flujo pasa a través de todas ellas entonces, el voltaje inducido en toda la bobina secundaria está dado por la ecuación (11) [13-14], [21]:

$$v_s(t) = -N_s \frac{d\phi}{dt} \quad (11)$$

Donde

$v_s(t)$ es el voltaje inducido en la bobina secundaria (*volts*)

N_s es el número de vueltas de alambre de la bobina secundaria

ϕ es el flujo magnético que atraviesa la bobina secundaria (*webers*)

El signo menos en las ecuaciones (10) y (11) es una expresión de la Ley de Lenz, la cual establece que la polaridad de voltaje inducido en la bobina es tal que si los extremos de ésta estuvieran en cortocircuito, se produciría en ella una corriente que generaría un flujo opuesto al flujo inicial [14], [20]. Este flujo opuesto se muestra en la figura 17 como ϕ_s .

De acuerdo con Wildi [21], Kulkarni y Khaparde [13] es posible expresar los términos de voltaje primario y secundario con magnitudes, lo cual simplificaría considerablemente los cálculos. Por lo tanto para el voltaje primario:

$$V_p = 4.44fN_p\phi \quad (12)$$

Donde

V_p es la magnitud rms del voltaje en el primario (*volts*)

4.44 es una constante que surge de $\frac{2\pi}{\sqrt{2}}$

f es la frecuencia de operación (*hertz*)

N_p es el número de vueltas en la bobina primaria

ϕ es el flujo magnético creado por la fuerza magnetomotriz de la bobina primaria (*webers*)

Para el voltaje secundario:

$$V_s = 4.44 f N_s \phi \quad (13)$$

Donde

V_s es la magnitud rms del voltaje en el secundario (*volts*)

4.44 es una constante que surge de $\frac{2\pi}{\sqrt{2}}$

f es la frecuencia de operación (*hertz*)

N_s es el número de vueltas en la bobina secundaria

ϕ es el flujo magnético creado por la fuerza magnetomotriz de la bobina primaria (*webers*)

Cabe destacar que en las ecuaciones (12) y (13) se considera un voltaje rms y un valor pico de flujo magnético. También dichas ecuaciones se consideran sobre un transformador ideal (un transformador sin pérdidas) y sin carga conectada.

2.7 Circuitos magnéticos

La teoría de los circuitos magnéticos representa un elemento básico para el diseño de transformadores. La forma más sencilla de comenzar a explicar dicha teoría es considerar la ley de Ohm en su forma más simple. La ley de Ohm se resume en la siguiente ecuación:

$$V = I R \quad (14)$$

Donde:

V es voltaje (*volts*)

I es corriente (*amperes*)

R es resistencia (*ohms*)

Para confirmar la ecuación (14) considérese la siguiente figura:

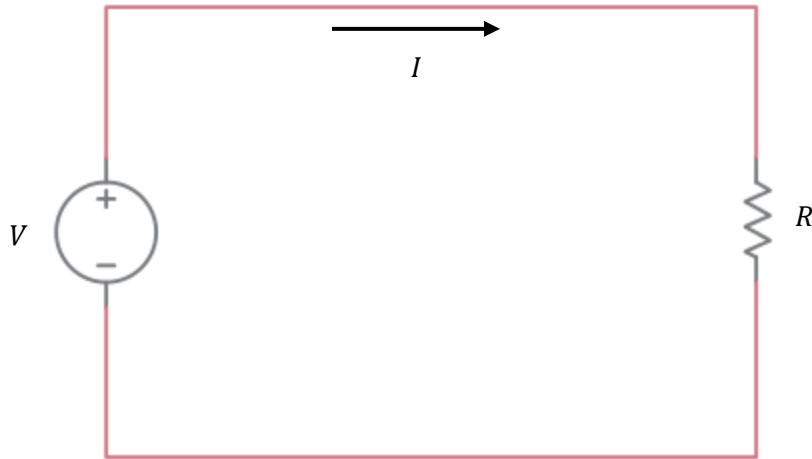


FIGURA 18: CIRCUITO ELÉCTRICO BÁSICO PARA DEMOSTRACIÓN DE LEY DE OHM

Ahora bien, es posible considerar una analogía de la ley de Ohm para los circuitos magnéticos. Considérese de nuevo la figura 16. En dicha figura puede observarse que al enrollar una bobina de N vueltas en la pierna de un núcleo ferromagnético se produce la circulación de un flujo magnético ϕ . Ahora podemos considerar un nuevo concepto llamado “fuerza magnetomotriz”.

La magnitud de la fuerza magnetomotriz depende de 2 elementos: el número de vueltas y la corriente que fluye por la bobina:

$$F_T = N i_p(t) \quad (15)$$

Donde:

F_T es la fuerza magnetomotriz (*amperes x vuelta*)

N es el número de vueltas de la bobina

$i_p(t)$ es la corriente alterna que circula en la bobina (*amperes*)

De la ecuación (15) es fácil observar que entre mayor sea el número de vueltas y mayor sea la magnitud de la corriente que pasa por la bobina, mayor será la fuerza magnetomotriz.

Retomando la ley de ohm, se sabe que un voltaje conectado a una resistencia como muestra la figura 18 produce una corriente. De forma analógica, se dice la fuerza magnetomotriz produce un flujo magnético cuando la bobina se enrolla y energiza alrededor de un material ferromagnético. En el circuito eléctrico se dice que la resistencia óhmica se opone a al flujo de la corriente. Para los circuitos magnéticos la oposición al flujo magnético producido por la fuerza magnetomotriz se le conoce como reluctancia. Por lo tanto, la fuerza magnetomotriz también puede expresarse como:

$$F_T = \phi_T R_T \quad (16)$$

Donde:

F_T es la fuerza magnetomotriz (*amperes x vuelta*)

ϕ_T es el flujo magnético total dentro del núcleo (*webers*)

R_T es la reluctancia del circuito magnético ($\frac{\text{amperes x vuelta}}{\text{webers}}$)

Es posible entonces, representar un circuito magnético de la siguiente forma:

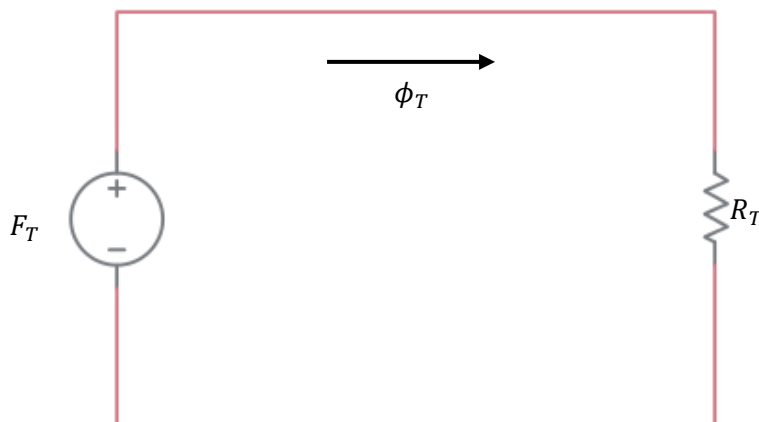


FIGURA 19: REPRESENTACIÓN DE UN CIRCUITO MAGNÉTICO

La reluctancia (la oposición al flujo magnético) depende de 2 elementos: el tipo de material al que se le aplique la fuerza magnetomotriz y la geometría del mismo. De la ecuación (9) se observa que el flujo magnético también puede representarse directamente proporcional al producto de la permeabilidad del material, el número de vueltas de la bobina, la corriente en la bobina, la sección de área transversal del núcleo e inversamente proporcional a la longitud media del núcleo. Para facilidad de lectura se reescribe esta ecuación:

$$\phi = \frac{\mu N i_p(t) A}{l_n} \quad (9)$$

Reorganizando la ecuación (9), considérese:

$$\phi_T = (N)(i_p(t)) \left(\frac{\mu_T A_T}{l_n} \right)$$

$$\phi_T = F_T \left(\frac{\mu_T A_T}{l_n} \right)$$

Por lo tanto:

$$F_T = \phi_T \left(\frac{l_n}{\mu_T A_T} \right) \quad (17)$$

Nótese que se considera un subíndice T únicamente para referirse a los mismos conceptos como “totales dentro del núcleo”, es decir ϕ_T es flujo magnético total dentro del núcleo, A_T es área de sección transversal del núcleo, etc., todo respecto a un núcleo ferromagnético. De igual forma μ_T hace referencia a la permeabilidad propia del núcleo ferromagnético.

Respeto a las ecuaciones (16) y (17) es fácil observar que:

$$R_T = \left(\frac{l_n}{\mu_T A_T} \right) \quad (18)$$

Por lo tanto, se puede afirmar que la calidad de un circuito magnético mejorará siempre y cuando se produzca la mayor cantidad de flujo magnético posible y esto se logrará reduciendo la reluctancia del mismo. Como puede observarse en la

ecuación (18) entre mayor sea la sección de área transversal del núcleo y menor sea la longitud media del mismo, menor será la reluctancia y por lo tanto se tenderá a generar mayor cantidad de flujo magnético.

El análisis anterior queda justificado gracias a Chapman [14], Flanagan [7], Matsh [20] y el M.I.T (Massachusetts Institute of Technology) [19].

Vale la pena considerar de forma más analítica el modo en que la geometría del núcleo del transformador influye en el modelo del circuito magnético. Considérese la figura 20.

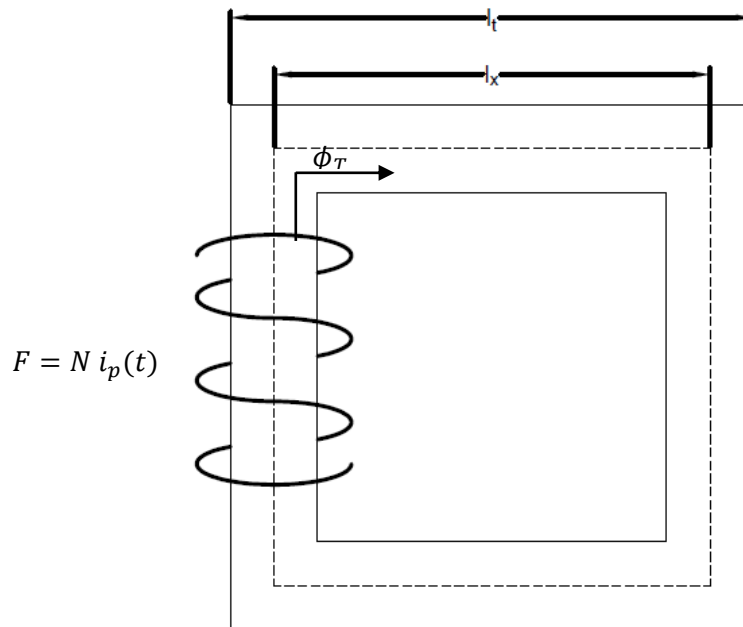


FIGURA 20: REPRESENTACIÓN DE NÚCLEO FERROMAGNÉTICO CON BOBINA QUE PORTA UNA CORRIENTE DEVANADA EN UNA DE SUS PIERNAS

La figura anterior representa una bobina sujeta a un núcleo ferromagnético. El núcleo posee un dimensionamiento muy simple. Nótese que la longitud total de uno de los lados del núcleo es de l_t , sin embargo para el análisis de circuitos magnéticos se debe considerar una llamada “longitud media”. La longitud media de cada lado

está representado por l_x . Por lo tanto la longitud media total del núcleo l_n queda representada por:

$$l_n = 4l_x \quad (19)$$

El flujo total dentro del núcleo (suponiendo que el núcleo es infinitamente permeable, es decir, todo el flujo magnético permanece dentro del núcleo) queda definido por la ecuación (8) (considerando las magnitudes totales dentro del núcleo):

$$\phi_T = (B_T)(A_T) \quad (20)$$

Donde:

ϕ_T es el flujo total dentro del núcleo (*webers*)

B_T es la densidad de flujo magnético dentro del núcleo (*teslas*)

A_T es el área de sección transversal del núcleo (m^2)

Si se considera que la bobina sujeta al núcleo porta una determinada corriente alterna entonces la fuerza magnetomotriz quedará determinada por la ecuación (16):

$$F_T = (\phi_T)(R_T) \quad (16)$$

Donde:

F_T es la fuerza magnetomotriz total producida dentro del núcleo (*amperes x vuelta*)

ϕ_T es el flujo total dentro del núcleo (*webers*)

R_T es la reluctancia total dependiente del tipo de material del cual esté conformado el núcleo y la geometría del mismo ($\frac{\text{amperes x vuelta}}{\text{webers}}$)

Por lo tanto, desarrollando la ecuación (16) en los términos geométricos mostrados en la figura 20 (considérese la ecuación (19) y (20)) es posible concluir:

$$F_T = (\phi_T) \left(\frac{4l_x}{\mu_T A_T} \right) = (N)(i_p(t)) \quad (21)$$

Por lo tanto, el circuito magnético del núcleo mostrado en la figura 20, quedaría representado como:

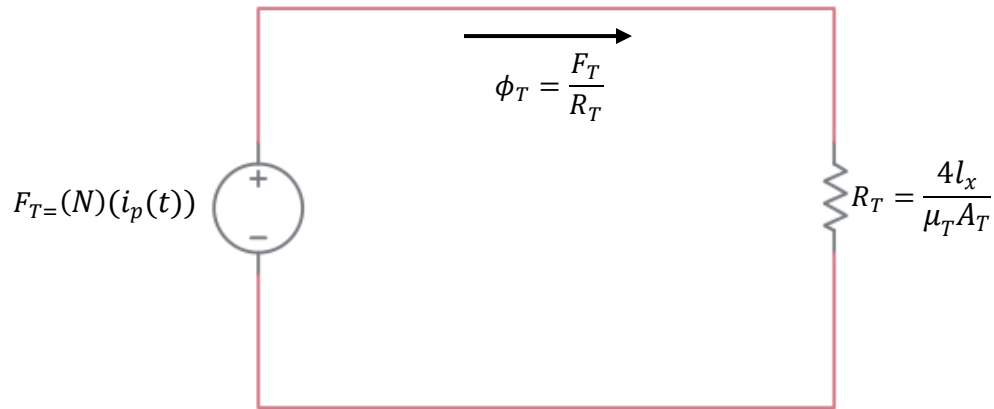


FIGURA 21: CIRCUITO MAGNÉTICO EQUIVALENTE DE NÚCLEO DE FIGURA 20

El análisis anterior resulta bastante sencillo, puesto que la geometría del núcleo es bastante simple. En el caso anterior el flujo magnético permanece constante en cada sección del núcleo. De igual forma la densidad de flujo e intensidad de campo magnético permanecen constantes en cada sección. Sin embargo, esto no siempre ocurre.

Ahora bien, la figura 22 muestra otra configuración de núcleo ferromagnético con una bobina devanada en la pierna central. Nótese que la pierna central tiene el doble de ancho que las piernas laterales.

La altura/profundidad del núcleo hacia la hoja se representa como h .

El flujo magnético en la pierna central se representa como:

$$\phi_c = (B_c)(A_c) = (B_c)(h)(2x) \quad (22)$$

Donde:

ϕ_C es el flujo magnético en la pierna central (*webers*)

B_C es la densidad de flujo magnético en la pierna central (*teslas*)

A_C es el área de sección transversal de la pierna central (m^2)

h es la altura/profundidad (hacia la hoja) del núcleo (m)

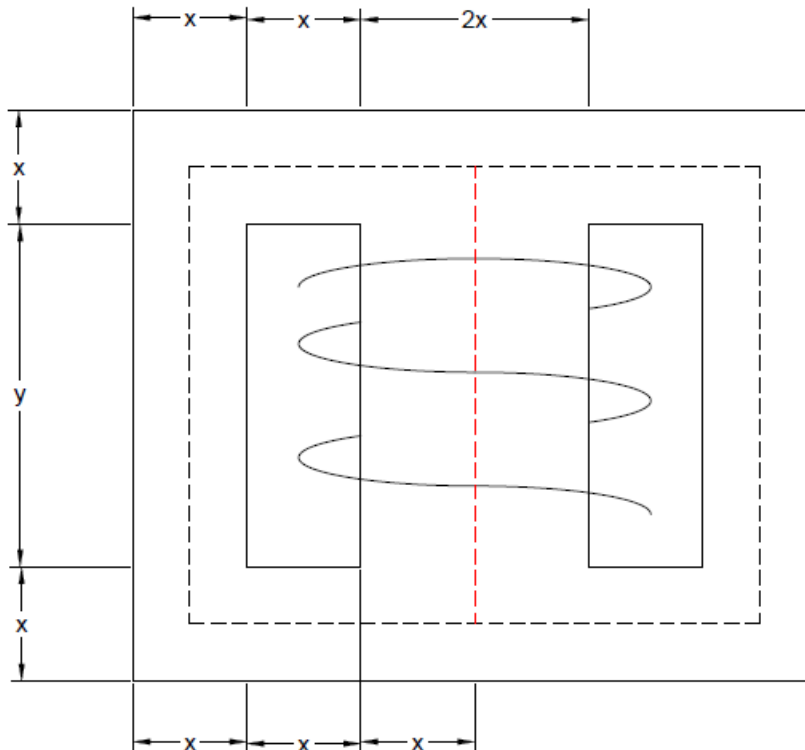


FIGURA 22: NÚCLEO FERROMAGNÉTICO CON BOBINA DEVANADA EN LA PIERNA CENTRAL

Por cuestiones geométricas, se afirma que el flujo magnético en las piernas izquierda y derecha equivale a la mitad del flujo magnético de la pierna central:

$$\phi_I = \phi_D = \frac{\phi_C}{2} = \frac{(B_C)(h)(2x)}{2} \quad (23)$$

Donde:

ϕ_I es el flujo magnético en la pierna izquierda (*webers*)

ϕ_D es el flujo magnético en la pierna derecha (*webers*)

Respecto a la densidad de flujo magnético de la pierna izquierda y derecha:

$$B_I = B_D = \frac{\phi_I}{A_I} = \frac{\phi_D}{A_D} = \frac{(B_C)(h)(2x)}{(h)(x)} = B_C \quad (24)$$

Donde:

B_I es la densidad de flujo magnético en la pierna izquierda (*teslas*)

B_D es la densidad de flujo magnético en la pierna derecha (*teslas*)

A_I es el área de sección transversal de la pierna izquierda (m^2)

A_D es el área de sección transversal de la pierna derecha (m^2)

De acuerdo al análisis anterior se puede observar el flujo magnético no es constante en todo el núcleo (es el doble en la pierna central). Sin embargo, la densidad de flujo magnético se mantiene constante en todo el núcleo.

En la figura 22 se observa que la línea roja punteada representa la longitud media central $l_C = y + x$, mientras que las líneas punteadas negras representan las longitudes medias de las piernas laterales tanto izquierda como derecha $l_I = l_D = 6x + y$

La reluctancia de la pierna central quedaría definida como:

$$R_C = \frac{x+y}{(A_C)(\mu_T)} = \frac{x+y}{(2xh)(\mu_T)} \quad (25)$$

La reluctancia de las piernas izquierda y derecha:

$$R_I = R_D = \frac{6x + y}{\left(\frac{A_C}{2}\right)(\mu_T)} = \frac{6x + y}{(xh)(\mu_T)} \quad (26)$$

La permeabilidad μ_T se considera constante en todo el núcleo.

Si se considera que la pierna central tiene enrollada a su alrededor una bobina de N vueltas que porta una corriente $i_p(t)$ entonces se estará aplicando una fuerza magnetomotriz (ecuación (15)):

$$F_T = (N)(i_p(t)) \quad (15)$$

El modelo resultante de circuito magnético sería:

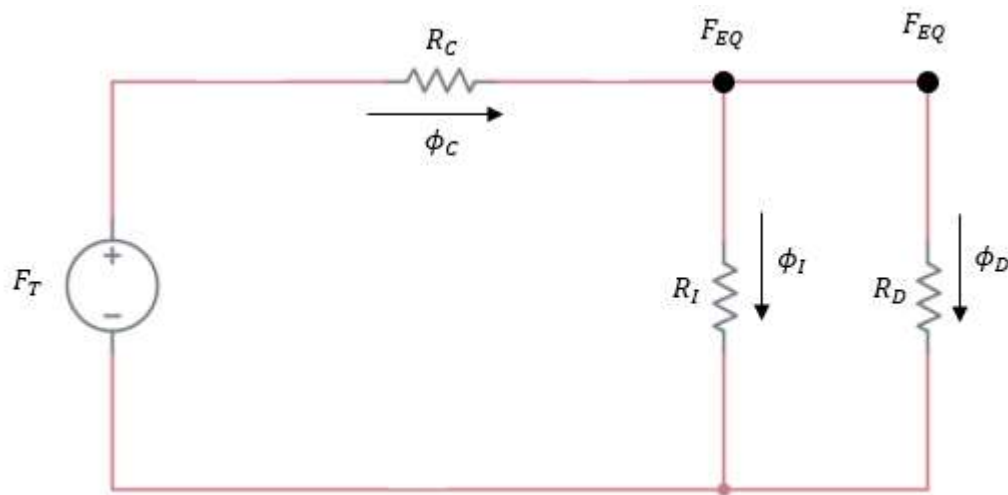


FIGURA 23: MODELO RESULTANTE DE CIRCUITO MAGNÉTICO

Respecto a la figura anterior nótese que las ramas de las reluctancias de la pierna izquierda y derecha están definidas (además del flujo magnético que fluye por las mismas) por una fuerza magnetomotriz F_{EQ} .

Las reluctancias en serie y paralelo obedecen las mismas reglas que las resistencias en los circuitos magnéticos. Por lo tanto:

$$R_{EQ} = \frac{(R_I)(R_D)}{R_I + R_D} \quad (27)$$

La R_{EQ} quedaría representada como:

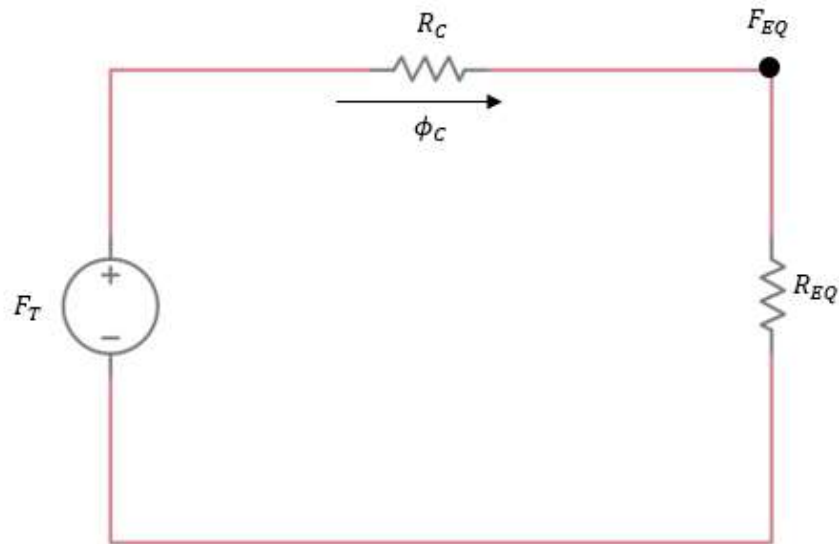


FIGURA 24: MODELO RESULTANTE EQUIVALENTE DE CIRCUITO MAGNÉTICO

Por lo tanto, el flujo magnético de la pierna central queda definida como:

$$\phi_C = \frac{F_T}{(R_C + R_{EQ})} \quad (28)$$

La fuerza magnetomotriz F_{EQ} queda definida como:

$$F_{EQ} = F_T - (R_C)(\phi_C) \quad (29)$$

Por lo tanto:

$$\phi_I = \frac{F_{EQ}}{R_I} = \frac{\phi_C}{2} \quad (30.1)$$

$$\phi_D = \frac{F_{EQ}}{R_D} = \frac{\phi_C}{2} \quad (30.2)$$

Tomando en cuenta que para este caso se considera que la densidad de flujo magnético y la permeabilidad son constantes en todo el núcleo, se considera también que la intensidad de campo magnético es constante en todo el núcleo: (Véase la ecuación (5))

$$H_C = H_I = H_D \quad (31)$$

Donde:

H_C es la intensidad de campo magnético en la pierna central $\left(\frac{(\text{amperes})(\text{vuelta})}{m}\right)$

H_I es la intensidad de campo magnético en la pierna izquierda $\left(\frac{(\text{amperes})(\text{vuelta})}{m}\right)$

H_D es la intensidad de campo magnético en la pierna derecha $\left(\frac{(\text{amperes})(\text{vuelta})}{m}\right)$

2.8 Curvas B-H

Durante el diseño de cualquier máquina eléctrica, la curva de magnetización resulta de vital importancia para la selección de un valor adecuado para la intensidad de campo magnético (H) y la densidad de flujo magnético (B). Estos valores se seleccionan a partir de una metodología basada principalmente en el análisis de la curva de magnetización.

En teoría todos los materiales son susceptibles a la magnetización. En términos de permeabilidad los materiales que tienen una permeabilidad relativa que no es apreciablemente mayor que la permeabilidad propia del material, son considerados no magnéticos [20].

Como se había mencionado de forma breve anteriormente, la permeabilidad relativa es la relación que existe entre la permeabilidad propia del material y la permeabilidad del aire [7], [14], [19], [20].

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (32)$$

Donde:

μ_r es la permeabilidad relativa (sin *unidades*)

μ es la permeabilidad propia del material $\left(\frac{\text{henrys}}{m}\right)$

μ_0 es la permeabilidad del aire que equivale a $4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{henrys}}{\text{m}}$

De acuerdo con Chapman [14] y la bibliografía [12], la permeabilidad magnética de los materiales ferromagnéticos es muy alta, entre 1500 y 6000 veces la permeabilidad del espacio libre. Cabe destacar que la permeabilidad es constante en el espacio libre pero no lo es en el hierro y en otros materiales ferromagnéticos.

La relación que existe entre B y H define la utilización técnica del material además de que representa un factor vital para el diseño de transformadores con base en los circuitos magnéticos [14], [19-21].

Considérese la figura 25.

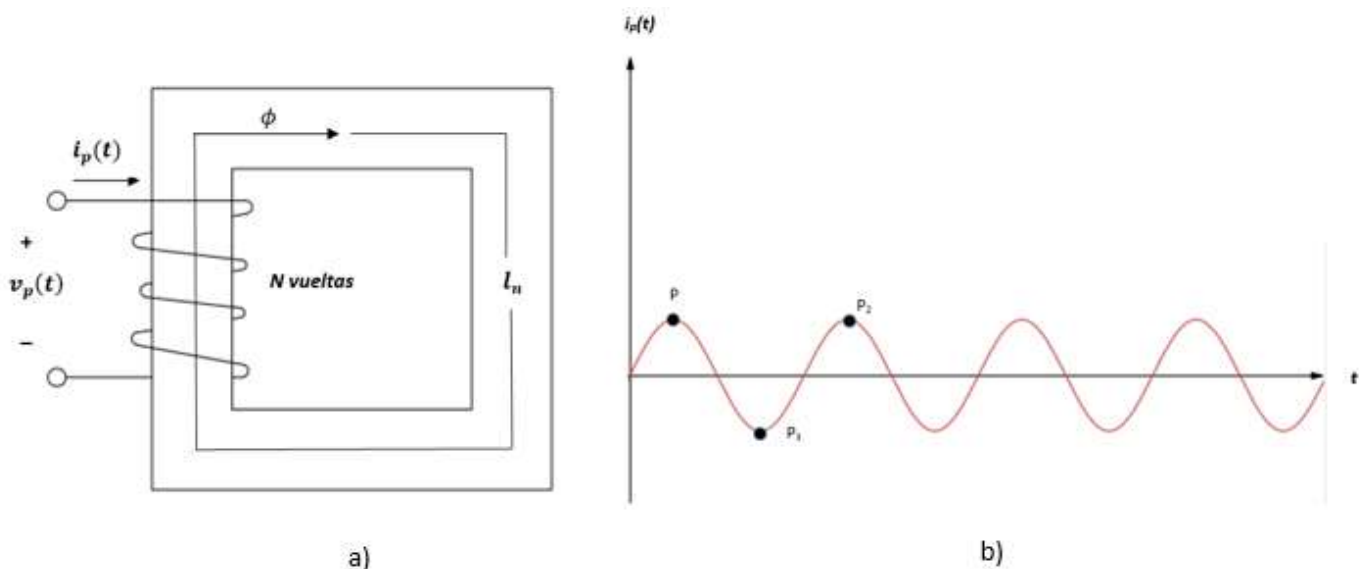


FIGURA 25:

- a) REPRESENTACIÓN DE NÚCLEO FERROMAGNÉTICO CON BOBINA ENERGIZADA
- b) ONDA SENOIDAL DE CORRIENTE ALTERNA $i_p(t)$ QUE FLUYE POR LA BOBINA

Ahora bien, considérese la figura 26. Supóngase que inicialmente el núcleo ferromagnético de la figura 25a) se encuentra sin imanar. En la 26 se observa un conjunto de curvas trazadas respecto a dos ejes. El eje horizontal representa la intensidad de campo magnético mientras que el eje vertical representa la densidad

de flujo magnético dentro del núcleo ferromagnético. Digamos ahora que comienza a circular la corriente $i_p(t)$ por la bobina (figura 25a).

Al aumentar la corriente $i_p(t)$ al punto **P** en la figura 25b) se dice que la intensidad de campo magnético H aumenta en el núcleo ferromagnético al igual que la densidad de flujo magnético. Este aumento sigue la trayectoria a-b en la figura 26. Cuando la magnitud de la corriente desciende hasta el punto **P₁**, B y H siguen ahora la trayectoria b-c-d-e en la figura 26. Cuando la magnitud de la corriente aumenta hasta el punto **P₂**, ahora se sigue la trayectoria e-f-g-b.

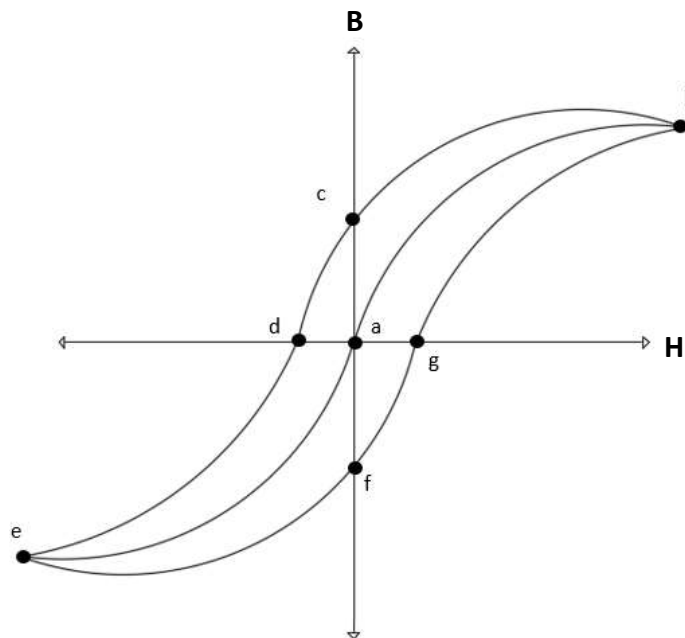


FIGURA 26: CURVA DE HISTÉRESIS

Lo que se concluye de la figura 26 es el hecho de que el incremento de B y H en el núcleo depende del historial magnético en el mismo. De acuerdo al M.I.T [19] esto se explica de forma más clara al afirmar que los materiales ferromagnéticos tienen cierta tendencia a oponerse a su imanación, es decir a su “saturación” magnética. Dicha propiedad recibe el nombre de histéresis [14], [19-21]. Este fenómeno se describe como una disipación de energía (calor), es decir, se traduce como una

pérdida en el transformador. La curva mostrada en la figura 26 se denomina curva de histéresis.

Por lo tanto, ahora es posible afirmar que para el diseño de máquinas eléctricas no existen valores de B y H concretos o fijos, sino que estos valores se encuentran dentro de un amplio rango que depende de la “historia” magnética previa del material. En muchos casos de diseño no se conoce esta “historia” magnética previa por lo que es necesario utilizar la llamada: “curva de imanación normal” del material también conocida como “curva de saturación” o “curva de magnetización”. Esta curva se obtiene trazando una sola curva que pasa por los puntos angulosos de una serie de ciclos de histéresis cada vez mayores [19]. Esta curva resulta vital para el diseño con base en los circuitos magnéticos, pues permite cierta libertad para ajustar los parámetros del transformador con el fin de que cumplan ciertos requerimientos de diseño.

La figura 27 muestra algunos ejemplos de curvas de magnetización.

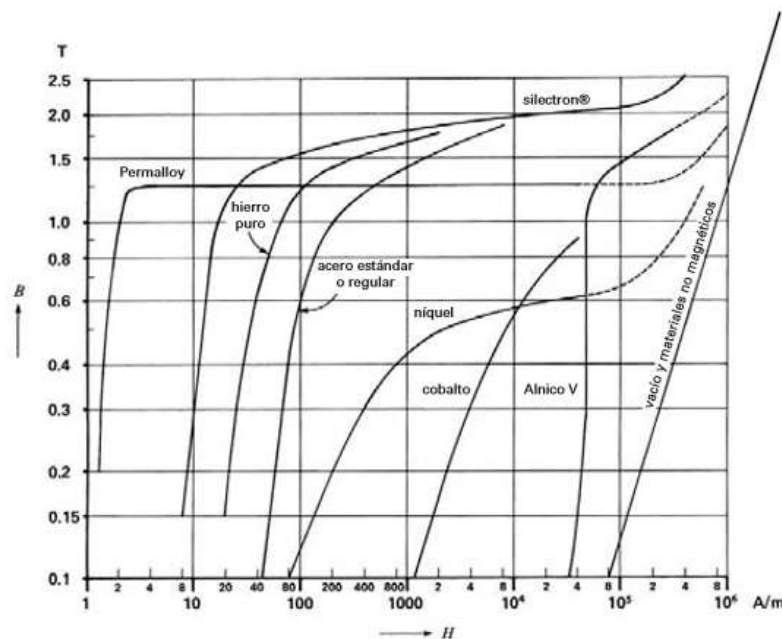


FIGURA 27: EJEMPLOS DE CURVAS DE MAGNETIZACIÓN DE ALGUNOS MATERIALES [21]

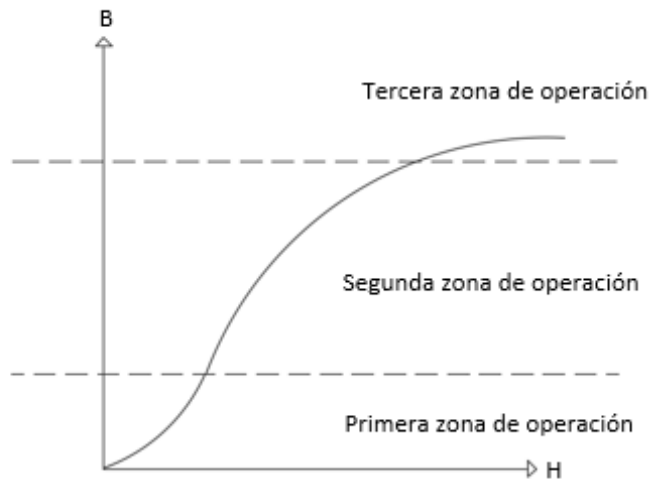


FIGURA 28: SECCIONES DE UNA CURVA DE MAGNETIZACIÓN

Básicamente las curvas de magnetización están conformadas por 3 secciones como se muestra en la figura 28. Por lo tanto, existen de forma básica 3 estados de operación en los que se puede encontrar determinado núcleo ferromagnético:

***Primera zona de operación:** En este punto un pequeño aumento de corriente en la bobina produce un gran aumento de B , en este punto el núcleo no se encuentra saturado.

***Segunda zona de operación:** En este punto sigue existiendo un gran aumento de B al existir un gran aumento de corriente. El límite entre la segunda y tercera zona representa el codo de la curva. El núcleo aún no se encuentra saturado.

***Tercera zona de operación:** En este punto un gran aumento de corriente provocará un pequeño incremento de B . El núcleo se encuentra saturado.

Para el diseño de máquinas eléctricas se deben escoger los valores de operación de B y H de tal forma que se produzca el máximo flujo posible dentro de las estructuras ferromagnéticas [14] además de que se debe cuidar que éstas estén por debajo de la zona de saturación en condiciones específicas de sobrevoltaje [12]. Por lo tanto, se debe seleccionar un punto de operación próximo al codo de la curva de saturación (el núcleo no debe alcanzar el nivel de saturación) [12], [14], [20].

2.9 Consideraciones para los transformadores ideales

En las secciones 2.6 y 2.7 se considera un transformador ideal, es decir un transformador que no tiene pérdidas [13-14], [21].

Una característica importante del transformador ideal es que éste no tiene flujo de dispersión (es infinitamente permeable), en otras palabras, todo el flujo magnético producido en la bobina primaria induce un voltaje en la bobina secundaria (Ley de Faraday).

En la práctica los transformadores ideales no existen. El considerar que todo el flujo producido por las bobinas se mantiene dentro del núcleo no es correcto, pues una parte del flujo magnético se dispersa a través del aire pese a que éste tenga una baja permeabilidad.

Considérese la figura 29

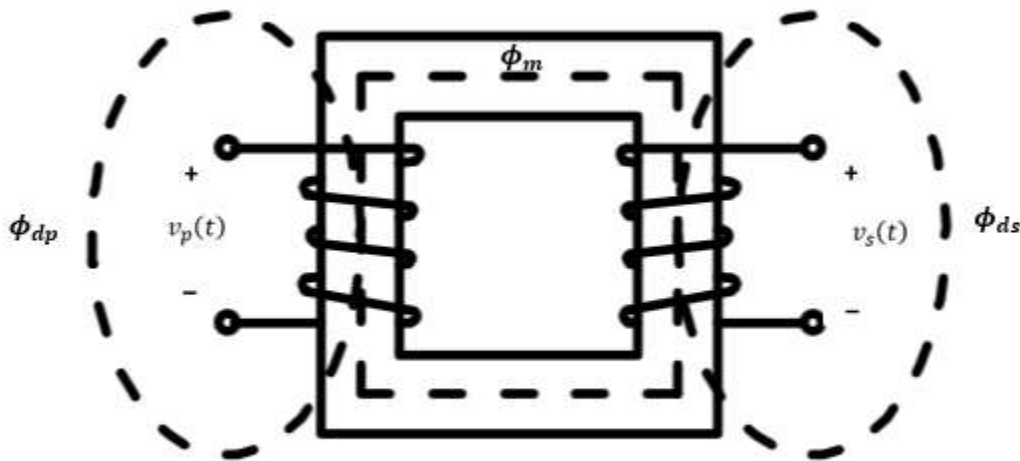


FIGURA 29: REPRESENTACIÓN DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO MAGNÉTICO EN UN TRANSFORMADOR REAL

La figura 29 muestra una sencilla representación entre el flujo disperso de las bobinas y el flujo mutuo de ambas bobinas. El voltaje $v_p(t)$ representa el voltaje conectado a la fuente, al cual le corresponde la bobina primaria de N_p vueltas por la cual circula una corriente $i_p(t)$, por lo tanto existe una fuerza magnetomotriz en la

bobina primaria que produce 2 componentes de flujo magnético: el flujo ϕ_{dp} que representa el flujo que no alcanza a la bobina secundaria (se dispersa en el aire) y el flujo ϕ_m que representa el flujo magnético mutuo producido por la bobina primaria y que enlaza a ambas bobinas. Este flujo magnético ϕ_m es el que produce la inducción del voltaje $v_s(t)$ en la bobina secundaria (debido a la Ley de Faraday). Gracias a esta inducción de voltaje la bobina secundaria también tiene 2 componentes de flujo magnético: el flujo ϕ_{ds} que representa la componente del secundario que se dispersa en el aire y el flujo ϕ_m que es el flujo magnético mutuo que enlaza a ambas bobinas. Estos principios son sustentados por Chapman [14], Wildi [21], Matsch [20], y Kulkarni y Khaparde [13].

Como conclusión los transformadores ideales resultan ser una herramienta útil para comprender los principios básicos de la producción de un flujo magnético y como éste se comporta en un material infinitamente permeable. Aunque un transformador adecuadamente construido pueda acercarse al comportamiento de un transformador ideal, es útil y necesario considerar el modelo de un transformador real.

2.10 Pérdidas en un transformador real

En los transformadores reales, básicamente existen 2 tipos de pérdidas: las pérdidas con carga y las pérdidas sin carga.

2.10.1 Pérdidas sin carga

Estas se refieren a pérdidas continuas en el transformador, es decir, existen con o sin carga conectada. De forma más precisa estas pérdidas hacen referencia a pérdidas en el núcleo del transformador. Prácticamente existen 2 componentes propias de las pérdidas sin carga: la histéresis y las corrientes de Eddy.

***Histéresis:** A nivel microscópico el material del núcleo se encuentra conformado por pequeños dominios en los que los átomos se encuentran dispuestos. Antes de magnetizar el núcleo (aplicando una fuerza magnetomotriz sobre el mismo) estos dominios no se encuentran alineados entre sí. Considérese que el flujo magnético inducido dentro del núcleo varía con el tiempo (debido a que es producido por un voltaje y corriente alterna). Esta naturaleza alterna produce que en cada semi-ciclo positivo los dominios en el núcleo se alineen de acuerdo a la dirección magnética del flujo magnético positivo. Cuando el flujo entra al semi-ciclo negativo los dominios tenderán a alinearse respecto a la dirección magnética del flujo magnético negativo (véase figura 30). Para alternar su dirección respecto al flujo magnético positivo y flujo magnético negativo, los dominios deben consumir energía (la cual se traduce en pérdidas en forma de calor). Ésta energía requerida se traduce como las pérdidas por histéresis (ver sección 2.8: Curvas B-H). Una curva de histéresis es presentada en la figura 26 y el área de la misma representa el total de calor disipado.

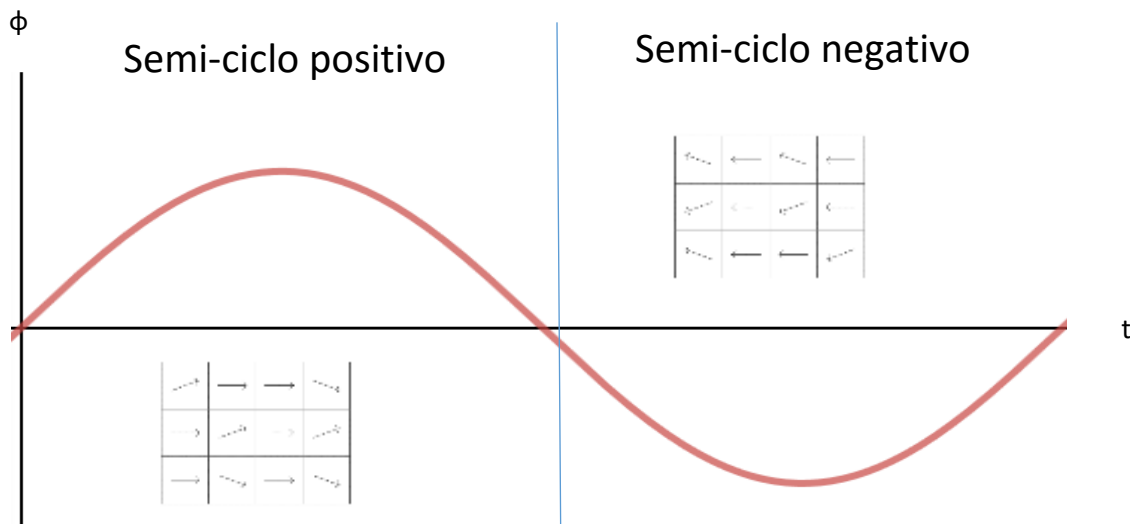


FIGURA 30: REPRESENTACIÓN DE REALINEAMIENTO DE LOS DOMINIOS ENTRE CICLO POSITIVO Y CICLO NEGATIVO DEL FLUJO MAGNÉTICO DENTRO DEL NÚCLEO FERROMAGNÉTICO

***Corrientes de Eddy:** Este factor hace referencia a pequeñas corrientes que circulan dentro del núcleo. De forma parecida a la histéresis, estas corrientes se deben al comportamiento alternante del flujo magnético pues éste induce pequeños

voltajes dentro del núcleo que a su vez inducen pequeñas corrientes en forma de remolino dentro del mismo.

Las pérdidas por histéresis y corrientes de Eddy pueden reducirse al utilizar un material magnético de alta calidad y laminar el núcleo respectivamente. Al utilizar un material de mejor calidad se mejoran las propiedades magnéticas del núcleo y por lo tanto la reorientación de los dominios no consumirá tanta energía. Al laminar el núcleo se reduce el área efectiva en la que pueden actuar las corrientes de Eddy (además también se barnizan dieléctricamente las láminas para aislarlas eléctricamente entre sí pero no magnéticamente) [12-15].

2.10.2 Pérdidas con carga

Estas pérdidas surgen cuando el transformador es conectado a una carga. Las 2 componentes básicas para este tipo pérdidas son las pérdidas por efecto Joule del alambre conductor que conforma las bobinas y las pérdidas por el flujo disperso en las mismas.

***Efecto Joule:** Este tipo de pérdida se refiere al factor I^2R donde I es la corriente que fluye por el alambre conductor de la bobina y R es la resistencia de la bobina. Esta pérdida existe para todas las bobinas del transformador.

***Flujo disperso:** Como se había señalado en la sección 2.9: Consideraciones para los transformadores ideales, existe un flujo mutuo el cual permite vincular magnéticamente a la bobina primaria y la bobina secundaria (véase figura 29). El flujo disperso se considera una pérdida pues representa una parte del flujo producido en el transformador que no se aprovecha y simplemente se “disipa”. Si el transformador cuenta con una cobertura metálica externa con tornillería y accesorios entonces el flujo disperso tenderá a enlazar estas estructuras [12-15].

2.11 Modelo de un transformador real

Conociendo las diferentes pérdidas con las que cuenta el transformador es posible obtener un modelo del mismo que permita incluir estas pérdidas y además modelar un comportamiento realista del transformador.

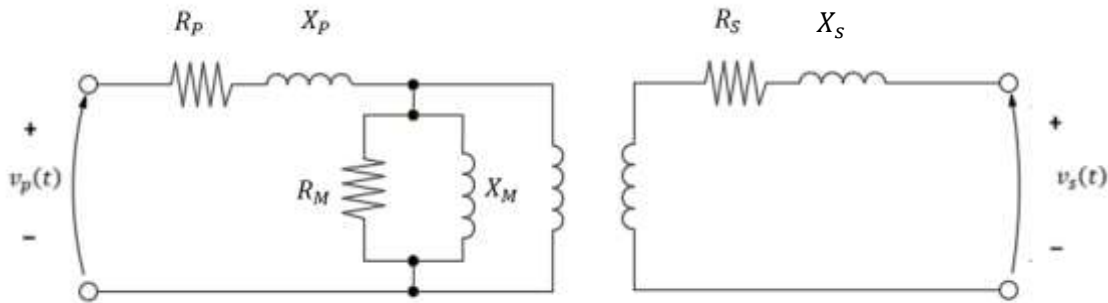


FIGURA 31: MODELO DE UN TRANSFORMADOR REAL

Respecto a la figura 31 la rama de magnetización está conformada por la resistencia R_M (representa las pérdidas por histéresis y corrientes de eddy) y la reactancia X_M (representa el retraso de 90° de la corriente de magnetización [corriente necesaria para generar un flujo magnético dentro del núcleo]).

Las resistencias R_p y R_s representan las pérdidas reales en el cobre de las bobinas primaria y secundaria respectivamente (pérdidas I^2R).

Las reactancias X_p y X_s representan el flujo magnético disperso de la bobina primaria y la bobina secundaria respectivamente (flujo que se dispersa en el aire y no enlaza a ambas bobinas).

Con el modelo de la figura 31 es posible aproximar el comportamiento real del transformador. En muchas ocasiones es posible utilizar modelos “simplificados” basados en el modelo de la mencionada figura.

La figura 32 muestra un modelo simplificado del transformador. La R_{eqP} representa la pérdida de potencia real en el cobre para la bobina primaria y secundaria referida al lado primario mientras que la X_{eqP} representa el flujo de dispersión equivalente

para la bobina primaria y secundaria referida al lado primario. El factor $av_s(t)$ representa el voltaje secundario referido al lado primario donde a representa la relación de transformación ($a = \frac{\text{voltaje primario}}{\text{voltaje secundario}} = \frac{\text{Número de vueltas primarias}}{\text{Número de vueltas secundarias}}$)

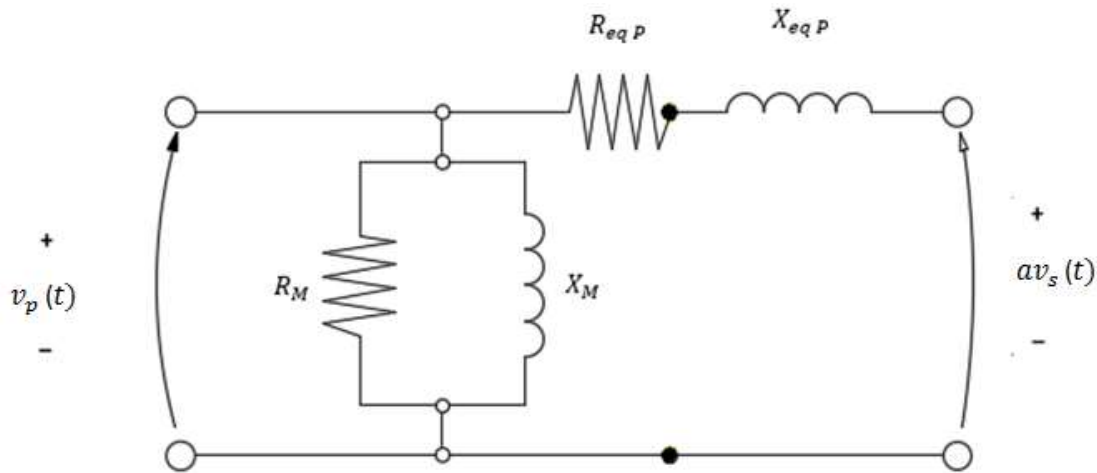


FIGURA 32: MODELO REAL EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR

Para obtener los modelos anteriores es necesario realizar 2 tipos de pruebas al transformador: la prueba de circuito abierto y la prueba de cortocircuito.

***Prueba de circuito abierto:** Para esta prueba se dejan las terminales abiertas para el devanado secundario y se conecta el devanado primario al voltaje de alimentación. Considérese la figura 33.



Voltímetro



Amperímetro

$v_p(t)$ es el voltaje de alimentación primario (voltaje nominal para el circuito primario)

$v_{poc}(t)$ es el voltaje medido en el devanado primario (no es igual al voltaje de alimentación debido a la resistencia del alambre conductor y el flujo magnético disperso)

i_{poc} es la corriente medida en el circuito primario

$v_{soc}(t)$ es el voltaje secundario medido (sin carga para esta prueba)

Siguiendo el diagrama mostrado en la figura 33, las mediciones a tomar son el voltaje, la corriente y la potencia real en el lado primario del transformador. Pese a que el mencionado diagrama muestra que las mediciones son realizadas en el lado primario, también es posible realizarlas en el lado secundario (conectando una fuente a la bobina secundaria que suministre el voltaje secundario nominal, abriendo las terminales del circuito primario y realizando las mismas conexiones y mediciones que se muestran en la figura 33 en el lado secundario).

Con esta prueba se obtienen los valores de la rama de magnetización R_M y X_M (véase figura 32)

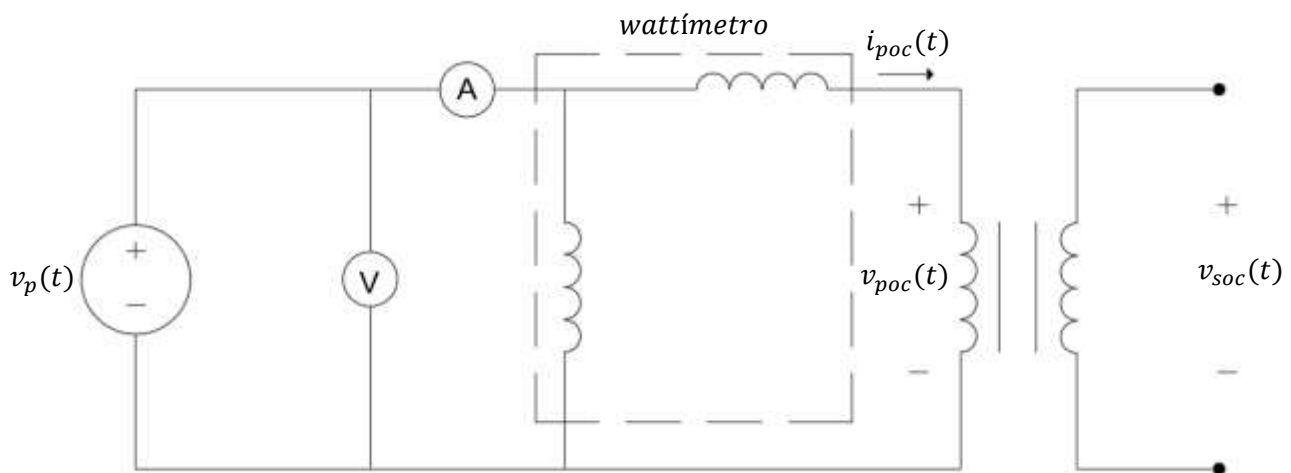


FIGURA 33: DIAGRAMA DE CONEXIÓN PARA PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

[14]

***Prueba de cortocircuito:** Para esta prueba se cortocircuitan las terminales de la bobina secundaria y se ajusta el voltaje en el lado primario hasta que la corriente en el devanado en cortocircuito sea igual a la corriente nominal. Considérese la figura 34:



Voltímetro



Amperímetro

$v_{psc}(t)$ es el voltaje medido en el devanado primario (no es igual al voltaje de alimentación debido a la resistencia del alambre conductor y el flujo magnético disperso)

$i_{psc}(t)$ es la corriente medida en el circuito primario

$i_{ssc}(t)$ es la corriente medida en el circuito secundario

$v_{ssc}(t)$ es el voltaje secundario medido (comienza en cero y se incrementa lentamente hasta que $i_{ssc}(t)$ alcanza su valor nominal)

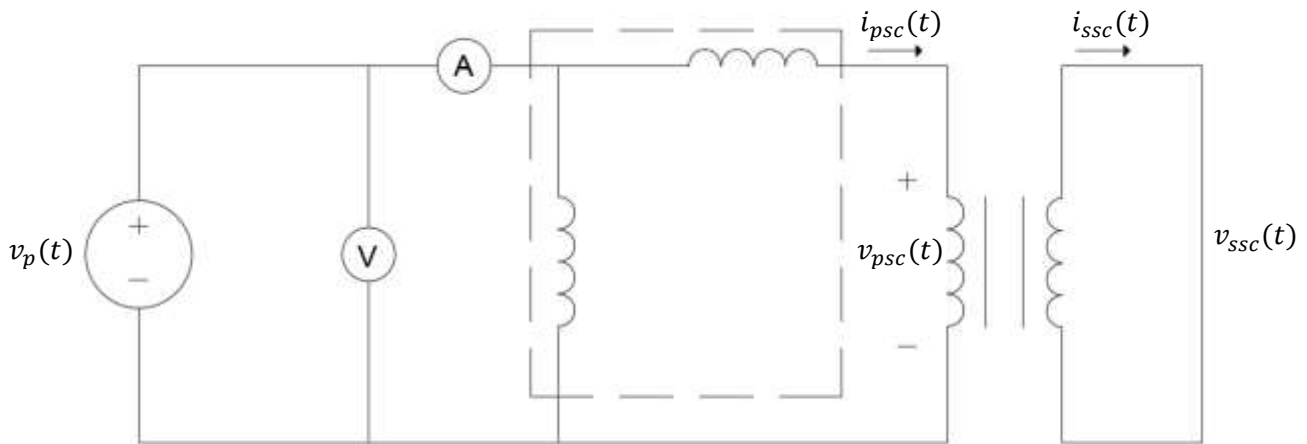


FIGURA 34: DIAGRAMA DE CONEXIÓN PARA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO
[14]

Es necesario tener cuidado pues no se desea quemar el devanado en cortocircuito. Al cortocircuitar y energizar las terminales de la bobina secundaria se debe comenzar desde 0 volts e ir incrementando lentamente hasta que la corriente que fluye por dicha bobina alcance su valor nominal. Siguiendo el diagrama mostrado en la figura 34, las mediciones a tomar son el voltaje, la corriente y la potencia real en el lado primario del transformador. Con esta prueba se obtienen los valores de R_{eqP} y X_{eqP} (véase figura 32).

De forma análoga a la prueba de circuito abierto es posible cortocircuitar las terminales del lado primario y realizar las mediciones en el lado secundario.

Tanto para la prueba de circuito abierto como de cortocircuito se considera por simplicidad una metodología basada en mediciones y modelado en el circuito primario.

Los modelos y las pruebas mencionados anteriormente se sustentan de los autores: Chapman [14], Harlow [12] y Kulkarni y Khaparde [13].

2.12- Temperatura del transformador

A los transformadores se les designa con un incremento máximo de temperatura, este valor suele ser usualmente de 80 °C, 115 °C o 150 °C. Estos valores usualmente se consideran junto con una temperatura ambiente de 30°C a 40 °C. La máxima temperatura de una bobina se obtiene sumando el máximo incremento promedio de temperatura de dicha bobina, un factor de punto caliente y la temperatura ambiente. El aislamiento de los conductores también posee una temperatura máxima la cual suele ser de 200 °C o 220 °C. Ésta se refiere a la máxima temperatura que los aislamientos pueden tolerar sin degradarse.

Un transformador seco para interiores deseable y respetable usualmente tiene un incremento máximo de 115 °C con un aislamiento que soporte una temperatura de 200 °C además de que no requiere ningún elemento de enfriamiento externo (ejemplo: un ventilador).

Los transformadores con eficiencias menores al 96% suelen tener incrementos considerables de temperatura [22].

Un aislamiento de 220 °C permite un incremento promedio máximo de 150 °C, una temperatura ambiente de 40 °C y un punto caliente de 30 °C .

Es posible considerar un transformador con una temperatura de aislamiento de 220 °C con un incremento máximo menor a 150 °C (como 115 °C o 80 °C) [23].

INSULATION RATING	AVERAGE WINDING TEMPERATURE RISE	HOT SPOT TEMPERATURE RISE	MAXIMUM WINDING TEMPERATURE
Class 105	55°C	65°C	105°C
Class 150 or 130	80°C	110°C	150°C
Class 180	115°C	145°C	180°C
Class 200	130°C	160°C	200°C
Class 220	150°C	180°C	220°C

TABLA T2: RANGOS DE AISLAMIENTO PARA DIFERENTES CONDICIONES DE TEMPERATURA [23]

Respecto a la tabla T2:

- Average Winding Temperature Rise/Máximo incremento promedio de temperatura de la bobina: Se refiere a la temperatura tomada de dos terminales de una bobina del transformador (no se refiere al promedio de varias mediciones realizadas a distintas bobinas). Se deben realizar las conexiones en el transformador que produzcan su máximo incremento de temperatura. La temperatura ambiente para las pruebas debe considerarse mayor a 10 °C y menor o igual a 40 °C (por lo general se utiliza el valor de 30 °C o 40 °C como referencia) [24].
- Hot Spot/Punto caliente: Se suele definir como Máximo incremento promedio de temperatura de la bobina más un factor “permisible” de punto caliente (generalmente de 15 °C) [25].
- Maximum Winding Temperature/ Temperatura máxima de la bobina: Es la suma del Máximo incremento promedio de temperatura de la bobina más la temperatura ambiente más el factor de punto caliente.

De acuerdo con el fabricante Allen-Bradley los transformadores de control de potencia con un rango de potencia de 50-150 VA, voltajes de entrada de 120-600 V

y voltajes de salida de 24-240 V tienen aislamientos de clase 105 °C (con un máximo incremento promedio de temperatura de la bobina de 55 °C).

Para obtener el incremento promedio de la temperatura del transformador, el cual es un parámetro importante en el diseño de transformadores, es necesario realizar mediciones de temperatura en frío así como mediciones de resistencia, a continuación se explica cómo realizar estas mediciones para posteriormente mostrar las fórmulas necesarias para calcular el incremento promedio de temperatura del transformador.

2.12.1 Medición de la temperatura en frío:

Para unidades ventiladas la medición de temperatura en frío debe realizarse como un promedio de mediciones realizadas con termómetros insertados entre las bobinas. Es importante no asumir directamente que la temperatura en frío es la misma que la temperatura ambiente. Sin embargo es válido asumir la cuestión anterior siempre y cuando:

- Todas las temperaturas en frío medidas de las bobinas no difieran en 2 grados respecto a la temperatura ambiente.
- Respecto a unidades selladas, la temperatura del contenedor no debe variar más de 2 °C respecto a la temperatura ambiente.
- La temperatura ambiente no debe variar más de 3 °C en por lo menos 3 horas.
- No se haya aplicado voltaje o corriente al transformador de 24 a 72 horas antes de las pruebas (dependiendo del tamaño del transformador)

Para reducir al mínimo los posibles errores que pueden surgir debido al atraso de la temperatura del transformador y la temperatura ambiente, los sensores de temperatura que vayan a utilizarse para determinar la temperatura ambiente deben

estar dispuestos en “recipientes” los cuales posean dimensiones que permitan solamente una variación de 6.3 °C en no menos de 2 horas en caso de que dichos sensores se expongan a una temperatura ambiente mayor o menor en 10°C respecto a una temperatura de equilibrio que se habría alcanzado dentro del recipiente. Se recomiendan por lo menos 3 sensores de temperatura dispersados de forma uniforme alrededor del transformador a una distancia entre 0.9 m – 1.8 m [24].

2.12.2 Mediciones de resistencia

Las mediciones de resistencia deben realizarse tanto en la bobina primaria como secundaria. En caso de que se vaya a realizar una medición de incremento de temperatura es importante realizar la medición de la resistencia en frío en las mismas bobinas y utilizando las mismas conexiones que en la medición a plena carga (al alcanzar un estado estable).

La polaridad con la que el núcleo se magnetiza debe mantenerse igual en todas las pruebas.

La corriente que se utilice no debe de exceder el 15% de la corriente nominal de la bobina a la cual se le realice la medición.

Se recomiendan intervalos de medición de 5 a 10 segundos. Intervalos de medición mayores pueden realizarse pero es importante sólo tomar en cuenta mediciones en donde el transformador ya haya alcanzado un “estado estable”.

Una consideración importante es que se recomienda realizar la medición de la resistencia en frío de las bobinas antes de energizar el transformador, es decir, antes de realizar la medición de la resistencia en caliente. Sin embargo es posible realizar la medición en frío después de la medición en caliente siempre y cuando se permita un tiempo de “enfriado” de 24 horas.

Para la medición de la resistencia en caliente se busca obtener el aumento de la temperatura del transformador respecto a la temperatura ambiente. Se considera que el último incremento de temperatura se alcanza cuando la temperatura de la superficie se vuelve constante respecto a la temperatura ambiente (se considera que el incremento de temperatura del transformador se vuelve constante cuando no varía más de 2°C en un periodo de 3 horas). Cuando la temperatura del transformador se vuelve constante se retiran tanto el voltaje como la corriente así como la ventilación (en caso de que se utilizara). Posterior a esto, se deben tomar las medidas de resistencia en caliente (debe realizarse en los primeros 6 minutos posteriores a la desconexión del transformador). Dichas mediciones deben realizarse tanto en el primario como en el secundario. Posterior a la primera medida se pueden realizar 3 mediciones posteriores (con espaciamento de 1 minuto entre las mismas) para trazar la curva de “enfriamiento”- para estas medidas se considera el tiempo, la resistencia y la temperatura [24].

2.12.3 Metodología para obtener el incremento promedio de la temperatura

De las consideraciones anteriores es posible obtener una metodología sencilla que permita entender de forma práctica como obtener el incremento promedio de la temperatura del transformador:

1. Inicialmente es necesario determinar cuál es la temperatura ambiente a la cual opera el transformador. La temperatura ambiente a considerar debe estar comprendida entre el rango 10°C- 40°C.
2. Se deben seleccionar los sensores de temperatura a utilizar (se recomienda un mínimo de 3) para determinar la temperatura ambiente. Estos sensores deben de encontrarse a una distancia entre 0.9 m – 1.8 m del transformador además se recomienda que se encuentren dentro de recipientes especiales que cumplan los requerimientos descritos en este documento.
3. Se realiza la medición de resistencia en frio así como la temperatura a la que se encuentran las bobinas a dicha temperatura.

4. Se conecta el transformador a su voltaje y corriente nominal.
5. Se espera a que el transformador alcance una temperatura estable. Dicha temperatura se alcanza cuando el transformador no varía su temperatura en más de 2 °C por al menos 3 horas consecutivas.
6. Cuando el transformador alcanza su temperatura estable se le desconecta el voltaje y la corriente de alimentación, así como la ventilación (en caso de tenerla).
7. Durante los primeros 6 minutos de la desconexión se debe realizar la medición para obtener la resistencia en caliente, así como la temperatura a la que se encuentra dicha resistencia.
8. Es posible realizar 3 mediciones posteriores (con espaciamiento de 1 minuto entre las mismas) para trazar la curva de “enfriamiento”- para estas medidas se considera el tiempo, la resistencia y la temperatura.

En base a los pasos anteriores se pueden obtener los parámetros básicos para la resistencia y la temperatura del transformador. De acuerdo a la norma IEEE Std. C57.12.91TM-2011 [24] es necesario utilizar las siguientes fórmulas para completar el análisis:

*Para la temperatura promedio de la bobina:

$$T = \frac{R}{R_o(T_k + T_o) - T_k} \quad (33)$$

o

$$T = \left(\frac{R - R_o}{R_o} \right) (T_k + T_o) + T_o \quad (34)$$

*Para el máximo incremento promedio de temperatura de la bobina:

$$T_r = T - T_a \quad (35)$$

Donde:

T es la temperatura promedio de una bobina la cual corresponde a una determinada resistencia R

R_o es la resistencia en frio

T_o es la temperatura en °C que corresponde a la resistencia en frio.

T_r es el incremento promedio de temperatura de la bobina (respecto a la temperatura ambiente)

T_a es la temperatura ambiente que corresponde a la resistencia en caliente R

R es la resistencia en caliente de la bobina

T_k es de 234.5 °C para alambre de cobre y 225 °C para el aluminio

9. Para el valor de T obtenido anteriormente se deben considerar factores de corrección como lo indica la norma IEEE Std. C57.12.91TM-2011 [24] sólo en caso de que se utilice una temperatura ambiente diferente de 30 °C, la corriente de prueba sea diferente a la corriente nominal, que el transformador opere a altitudes superiores a los 1000 m.
10. Con el valor final de T se escoge el tipo de aislamiento que se utilizará de acuerdo a la tabla T2.

En el estándar IEEE Std C57.12.01TM-2015 [17] se recomienda que el punto más caliente del incremento de temperatura no debe exceder los límites dados en la tabla T3. De igual forma el incremento promedio de temperatura no deberá exceder los límites descritos en la tabla T3

Insulation system temperature class (°C)	Winding hottest-spot temperature rise (°C)	Average winding temperature rise by resistance (°C)
130	90	75
155	115	95
180	140	115
200	160	135
220	180	150

TABLA T3: LÍMITES DE TEMPERATURA PARA BOBINAS
DE TRANSFORMADORES SECOS A POTENCIA
CONTINUA [17]

Ahora bien, como se indica en la norma [17] los valores indicados en la tabla T3 pueden ser excedidos siempre y cuando el fabricante demuestre con datos experimentales que el aislamiento en el transformador soporta el incremento de temperatura.

Si el transformador posee una carcasa o partes metálicas en contacto o adyacentes al aislamiento es, éstas no deberán superar la temperatura del incremento de temperatura del punto más caliente (hot spot).

Es importante considerar que la metodología anterior va de acuerdo a la norma de la IEEE [24] aplicable para transformadores secos de distribución y transformadores de potencia. No existe una norma similar aplicable a transformadores de baja potencia, sin embargo es posible utilizar como base las normas aplicadas a transformadores de elevada potencia.

La temperatura de las partes externas del transformador con las cuales podrán tener contacto los operadores no deberán superar los incrementos de temperatura ambiente respecto a las cargas máximas nominales que se muestran en la tabla T4 [17].

Readily accesible	65 °C
Not readily accesible	80 °C

TABLA T4: NOT READILY ACCESIBLE (NO FÁCILMENTE ACCESIBLE) SE REFIERE A DISPOSITIVOS INSTALADOS A AL MENOS 2 METROS DEL SUELO (EN GENERAL DISPOSITIVOS QUE LAS PERSONAS NO SE TOPARÍAN ACCIDENTALMENTE CON FACILIDAD) [17]

2.13 Consideraciones de diseño

Existen diferentes metodologías para el diseño de los transformadores, éstos varían de acuerdo a los autores, necesidades, parámetros y aplicaciones para las cuales estará destinado la construcción final de los mismos. No existe una metodología fija aplicable al diseño de dispositivos magnéticos, ni siquiera en forma computarizada [26].

Al considerar múltiples metodologías también consideramos múltiples posibilidades de diseño. En muchas ocasiones, los diseñadores suelen enfocarse en completar una determinada metodología y realizar pruebas a sus prototipos con el fin de comprobar que el transformador opere bajo ciertos parámetros que por lo general se proponen desde un principio. Esto puede verificarse al revisar los diseños propuestos por Flanagan [7], McLyman [9], Njiende et al [26] y la literatura [27], los cuales proponen a un algoritmo de diseño el cual después de completarse no suele dar un modelo final, sino que es necesario verificar (con pruebas) que cumpla con los requerimientos necesarios, de no cumplirlos es necesario volver en algún punto del algoritmo propuesto y modificar algún elemento en el mismo (tipo de material utilizado, altura del núcleo, calibre de los conductores de las bobinas, etc.). En otras palabras, es necesario realizar varias veces el algoritmo para obtener una solución de diseño funcional y óptima. Se puede considerar estos procedimientos como el diseño clásico del transformador. En muchos casos para optimizar el diseño es necesario aumentar el peso neto del transformador [28].

Adly y Abd-El-Hafiz [28] proponen una optimización “multi-objetiva” para evitar un procedimiento repetitivo como el anterior descrito.

La optimización del diseño de transformadores consiste en mejorar su funcionalidad y eficiencia reduciendo los costos de su construcción. En la actualidad la optimización es uno de los puntos clave del diseño pues los diseñadores se introducen cada vez más en un mercado internacional altamente agresivo y competitivo, por lo que reducir costos y mantener una buena funcionalidad son puntos clave para mantener las ventas de sus productos [28].

Por lo general las formulaciones para la optimización (relacionado con el tamaño y geometría del transformador) se basan en el concepto del producto área [26].

Esta sección se enfocará en describir los principales parámetros que se consideran para el diseño de transformadores. Como se describió al principio de la sección, los parámetros iniciales como las metodologías varían de acuerdo a los autores y aplicaciones.

2.13.1 Método de diseño: Producto Área

El producto área representa un código de asignación numérico para los núcleos de los transformadores. Los fabricantes utilizan estos números para resumir las propiedades dimensionales y eléctricas de los núcleos en sus catálogos. El producto área representa la “habilidad de manejo de potencia” del transformador [9].

$$A_p = W_a A_c \quad (36)$$

Donde:

A_p es el producto área (*unidades⁴*)

W_a es el área de la ventana (*unidades²*)

A_c es el área de sección transversal del núcleo (*unidades²*)

De acuerdo con la figura 35 se observa un núcleo simple de transformador. Considérese que el núcleo tiene una determinada profundidad (hacia la hoja) representada por h . Para determinar la sección de área transversal de dicho núcleo:

$$A_c = (X)(h) \quad (37)$$

El área de la ventana quedaría determinada por:

$$W_a = A_x^2 \quad (38)$$

Por lo tanto, el producto área de la figura 35, quedaría definido como:

$$A_p = (A_x^2)(X)(h) \quad (39)$$

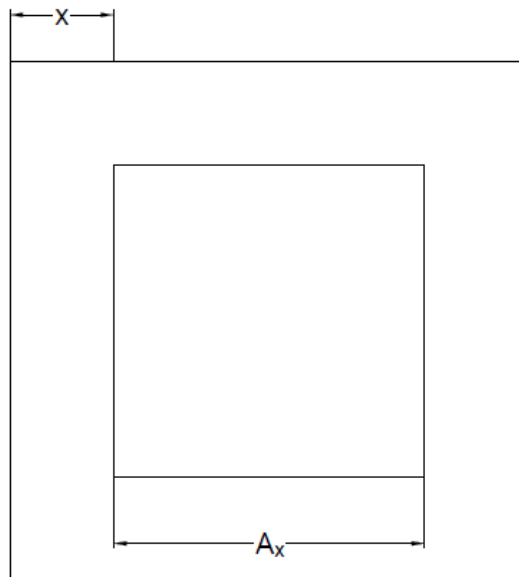


FIGURA 35: NÚCLEO SENCILLO QUE MUESTRA UNA VENTANA CENTRAL

El área de la ventana es básicamente la sección (o secciones) que estarán ocupadas por las bobinas del transformador. Aquí es importante considerar que espacio de la ventana las bobinas ocuparán realmente.

El producto área representa un factor y elemento de diseño muy importante.

Para McLyman [9] es un elemento vital para obtener la densidad de corriente de las bobinas, la corriente en las mismas y el calibre de alambre conductor que debe utilizarse.

Considerando las formulaciones de McLyman [9], Rmana y Ramanarayanan [29] y la fuente [30], la formulación para el producto área queda expresada como:

$$A_p = \frac{S \times 10^2}{\sqrt{2} \pi \eta B J f K_u} \quad (40)$$

Donde:

S es la potencia aparente del transformador (*volts x amperes*)

η es la eficiencia del transformador (%)

B es la densidad de campo magnético de operación (*teslas*)

J es la densidad de corriente de operación ($\frac{\text{amperes}}{\text{m}^2}$)

f es la frecuencia de operación (*hertz*)

K_u es el factor de utilización de ventana (ver sección 2.13.3)

Respecto a la formula anterior, la constante $\sqrt{2}\pi$ se le llama “factor de forma” y tiene un valor aproximado de 4.44 para ondas senoidales y 4.0 para ondas cuadradas [8-9], [28], [30].

Para la literatura [27], el producto área además de que permite obtener las características físicas de las bobinas, permite obtener el incremento de temperatura del transformador. De acuerdo a estos autores el producto área se relaciona con el coeficiente de factor de forma, el factor de utilización de ventana, la densidad de corriente en las bobinas, la frecuencia de operación, la densidad de campo magnético de operación y la suma de los productos del voltaje y corriente primaria

y voltaje y corriente secundaria (considérese que los autores enfocan la aplicación para estas fórmulas en el diseño y construcción de un transformador de media frecuencia).

De acuerdo a Adly y Abd-El-Hafiz [28] las pérdidas por corrientes de Eddy en las bobinas son dependientes del área de la ventana del transformador.

La metodología de diseño por medio de la utilización del producto área resulta el método más popular debido a su simplicidad, sin embargo, no garantiza un diseño óptimo [29].

2.13.2 Método de diseño: geometría del núcleo o método kg

El “método K_g ” descrito en esta sección fue desarrollado por Mcllyman [9] y ofrece un diseño más óptimo que el método de “producto área” [29]. Considérense las siguientes fórmulas:

$$\text{factor } kg = P_t / (2K_e RV) \quad (41)$$

$$P_t = P_o(1/\eta + 1) \quad (42)$$

$$K_e = 0.145(\sqrt{2\pi})^2 f^2 B^2 10^{-4} \quad (43)$$

Donde:

P_t es la potencia real total del transformador (*watts*)

P_o es la potencia de salida del transformador (*watts*)

η es la eficiencia teórica del transformador (*p. u*)

K_e es una constante que queda determinada por las condiciones de operación (eléctricas y magnéticas)

RV es la regulación de voltaje teórica (*p. u*)

f es la frecuencia de operación (*hertz*)

B es la densidad de flujo magnético de operación (*teslas*)

2.13.3 Factor de utilización de ventana

Para muchos diseñadores, las dimensiones del área de la ventana de los transformadores son una característica importante [9], [26-28], [30]. Al dar una revisión a la distintas propuestas de diseño, se puede observar que las dimensiones de la ventana se relacionan con la potencia perdida en el cobre, la densidad de flujo magnético de operación, potencia aparente en el circuito primario y secundario y de forma más directa del factor de utilización de ventana K_u .

El factor de utilización de ventana se puede definir como la cantidad real de cobre que se encuentra en el área de la ventana del transformador [9].

Este elemento se encuentra definido principalmente por 5 factores: [9]

1. Aislamiento del cobre (S_1): Cuando el alambre de cobre que conforma las bobinas lleva un aislamiento externo, la razón del alambre de cobre desnudo respecto al alambre de cobre con aislamiento puede variar de 0.941 a 0.673 dependiendo del calibre del conductor. Naturalmente entre menor sea el calibre y el aislamiento, mayor será el valor de la relación anteriormente mencionada.
2. Factor de llenado (S_2): Este factor se encuentra sujeto a la tensión del alambre de cobre, la calidad del mismo, diámetro continuo del conductor y la calidad con la que se realiza el embobinado. Básicamente se consideran 2 tipos embobinados "ideales": el embobinado cuadrado y el embobinado hexagonal. El embobinado cuadrado es el más sencillo y se logra con facilidad al embobinar por capas (aislamiento entre las vueltas de la bobina que funciona también como una superficie lisa que ayuda al embobinado). Tiene un factor de llenado teórico de 0.785. Un mejor factor de llenado puede lograrse con el embobinado hexagonal, el cual funciona mejor con bobinas pequeñas (en bobinas demasiado grandes puede generar un embobinado

“aleatorio”, es decir, no ordenado). El embobinado hexagonal tiene un factor de llenado teórico de 0.907. La figura 36 muestra los dos tipos de embobinados “ideales” ya descritos. Resulta muy complicado alcanzar los factores de llenado teóricos, por lo que se considera para ambos tipos de embobinados un factor de llenado de 0.61

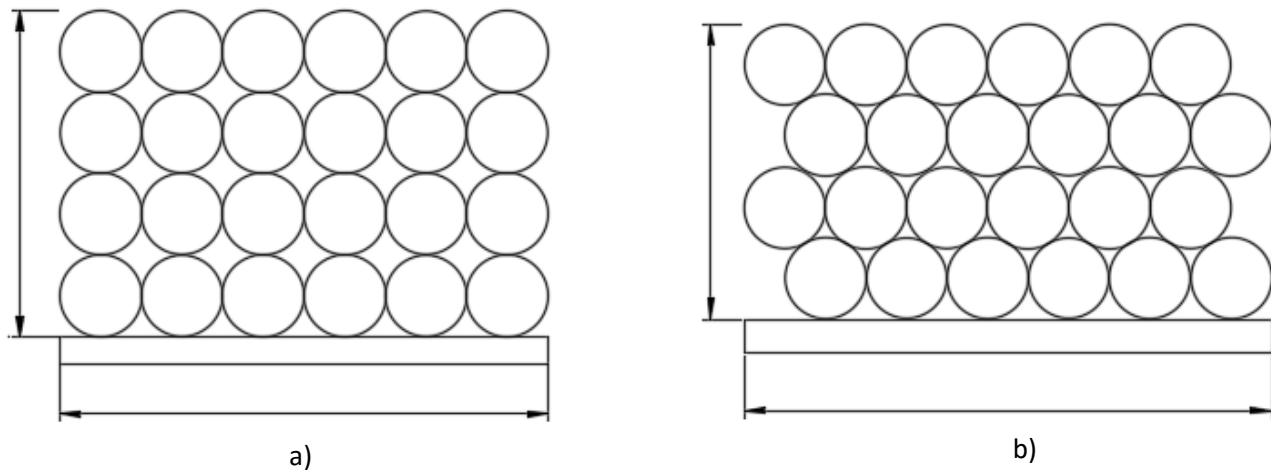


FIGURA 36: [9]

- a) EMBOBINADO CUADRADO
- b) EMBOBINADO HEXAGONAL

3. Ventana efectiva (S_3): Se refiere a cuando espacio de la ventana puede ser utilizado realmente por el alambre de cobre de la bobina. Depende directamente de la forma en que se construya la bobina y el tipo de núcleo sobre el cual se acoplen las mismas.
4. Factor de aislamiento (S_4): Se refiere a cuanto del espacio disponible de la ventana está siendo utilizado por el aislamiento.
5. Calidad del embobinado: Este factor hace referencia a la habilidad con la que se construyan las bobinas. La experiencia y el equipo utilizado para el embobinado son elementos importantes pues al construir un buen embobinado se aprovecha el espacio de la ventana al máximo.

Los elementos anteriormente descritos influyen directamente en el factor de utilización de ventana K_u de la siguiente forma:

$$K_u = S_1 S_2 S_3 S_4$$

Una buena aproximación del factor de utilización de ventana (aplicable de forma generalizada a una amplia variedad de diseños) es $K_u = 0.4$ [9]

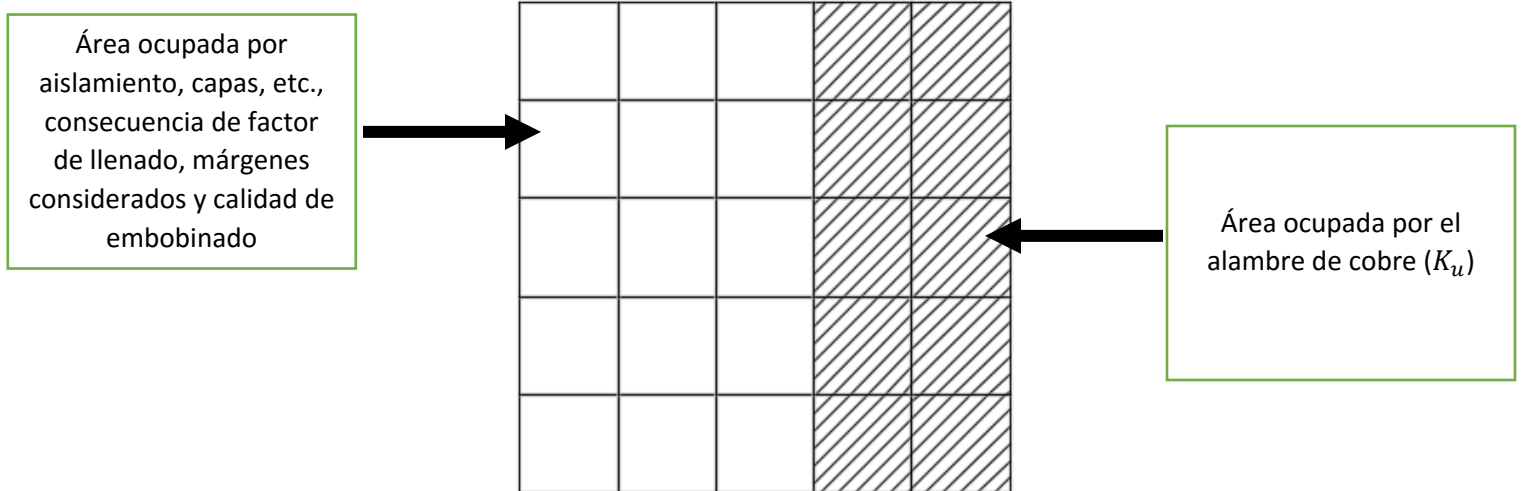


FIGURA 37: REPRESENTACIÓN DEL 40 % CONSIDERADO COMO EL FACTOR DE UTILIZACIÓN DE VENTANA [9]

2.13.4 Selección del material y tamaño del núcleo

Como se describió en la sección 2.5 de Materiales Ferromagnéticos, los núcleos de los transformadores están formados por materiales los cuales poseen una alta permeabilidad. Existen una amplia variedad de materiales los cuales se utilizan según los parámetros de diseño, la funcionalidad y eficiencia deseada, además de la aplicación final y los costos de los materiales. Para fines prácticos de ésta investigación se consideran los núcleos conformados de las láminas EI de acero al silicio. Estos núcleos son populares por sus bajos costo, fácil ensamblaje y embobinado, además de una gran variedad de componentes acoplables con los mismos [30].

Para diversos diseños resulta de suma importancia conocer las dimensiones del núcleo, pues en base a la geometría del mismo se pueden obtener circuitos equivalentes para conocer el funcionamiento del transformador [31].

2.13.5 Densidad de corriente

De forma sencilla la densidad de corriente se relaciona con la corriente que fluye por la sección transversal del alambre de cobre que conforma las bobinas:

$$J = \frac{I}{d} \quad (44)$$

Donde:

J es la densidad de corriente ($\frac{\text{amperes}}{\text{mm}^2}$)

I es la corriente que fluye por la bobina (*amperes*)

d es el diámetro de la sección transversal del conductor (mm^2)

De acuerdo a McLyman [9] una densidad de corriente adecuada es de $200 \frac{\text{amperes}}{\text{cm}^2} = 2.0 \frac{\text{amperes}}{\text{mm}^2}$.

De forma errónea se podría considerar que la densidad de corriente queda definida por la máxima capacidad de corriente que puede soportar un alambre conductor de determinada sección de área transversal, sin embargo, al revisar el Anexo A, se puede observar que la densidad de corriente obtenida al considerar la máxima corriente y la sección de área transversal de cada conductor no coincide con la densidad de corriente recomendada por McLyman, por lo que se puede considerar al valor de $J = 2.0 \frac{\text{Amperes}}{\text{mm}^2}$ como un parámetro de seguridad.

2.13.6 Regulación de voltaje y caída de tensión

La regulación de voltaje se expresa como: [13-14]:

$$RV = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100 \% \quad (45)$$

Donde:

RV es la regulación de voltaje (%)

V_{NL} es el voltaje secundario sin carga (obtenido en la prueba de circuito abierto)

V_{FL} es el voltaje secundario a plena carga (obtenido al conectar el secundario con su carga nominal)

Un transformador ideal tiene una regulación de voltaje del 0% (pues el V_{NL} y V_{FL} coinciden). En los transformadores reales se debe procurar que la regulación de voltaje sea tan pequeña como sea posible [14].

Es fácil observar que la regulación de voltaje está relacionada directamente con la caída de tensión que existe en el transformador al conectar una carga (producida por la resistencia de las bobinas y el flujo disperso en el transformador). Respecto a la caída de tensión permisible en el transformador, las normas de la IEEE se enfocan principalmente a transformadores con capacidades superiores a los 10kVA. La IEEE Std. C57.12.01TM2015 [17] considera 3 categorías para clasificar a los transformadores de acuerdo a su potencia, como se muestra a continuación:

Categoría	Monofásico (kVA)	Trifásico (kVA)
I	1 - 500	15 - 500
II	501 -1667	501 - 5000
III	1668 - 10,000	5001 - 30,000

TABLA T5: CATEGORIAS PARA CLASIFICAR TRANSFORMADORES DE ACUERDO A POTENCIA [17]

Puede observarse de la tabla anterior, que la mínima potencia aparente considerada para transformadores monofásicos es la de 1000 VA. La categoría I es la que más se ajusta a los parámetros de diseño establecidos en esta investigación.

De acuerdo a la norma IEEE Std C57.12.01TM-2015 [17] cuando el transformador se encuentra conectado a voltaje nominal en el lado primario, el voltaje del secundario no debe variar más del 0.5% (considerando que no exista ninguna carga conectada al secundario).

De acuerdo con Shneider Electric [32], siempre se debe tener en cuenta un transformador con una caída de voltaje menor al 10 %. En este caso se le da demasiada tolerancia. Sin embargo de acuerdo a la NEMA St. 20-2014 [33] y Nkosinathi Buthelezi [34], el voltaje de salida a plena carga solamente debe variar $\pm 5\%$.

2.13.7 Eficiencia

La eficiencia surge de la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada en el transformador cuando el mismo se encuentra conectado a su carga nominal. La eficiencia se expresa como [13-14]:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \times 100 \quad (46)$$

Donde:

η es la eficiencia del transformador (%)

P_{OUT} es la potencia de salida del transformador (*watts*)

P_{IN} es la potencia de entrada del transformador (*watts*)

Siempre debe procurarse que la eficiencia del transformador sea lo más alta posible, pues un transformador con baja eficiencia producirá altos costos de operación, alto calentamiento y baja funcionalidad.

2.14 Pruebas al transformador

Para verificar que el transformador cumpla con los parámetros de diseño (relación de transformación, regulación de voltaje, eficiencia e incremento de temperatura), se le deben hacer algunas pruebas al equipo terminado.

2.14.1 Relación de transformación

Esta prueba consiste en conectar el transformador en circuito abierto y medir los voltajes en el primario y secundario del transformador como se indica en la figura 38. La medición de voltaje del secundario $v_{soc}(t)$ será el término V_{NL} de la fórmula (45) utilizada en la regulación de voltaje. La línea punteada en la figura 38 únicamente se utiliza para reafirmar que el voltaje medido $v_{poc}(t)$ no es el mismo que el voltaje de alimentación $v_p(t)$ debido a la resistencia y flujo magnético disperso de la bobina primaria.

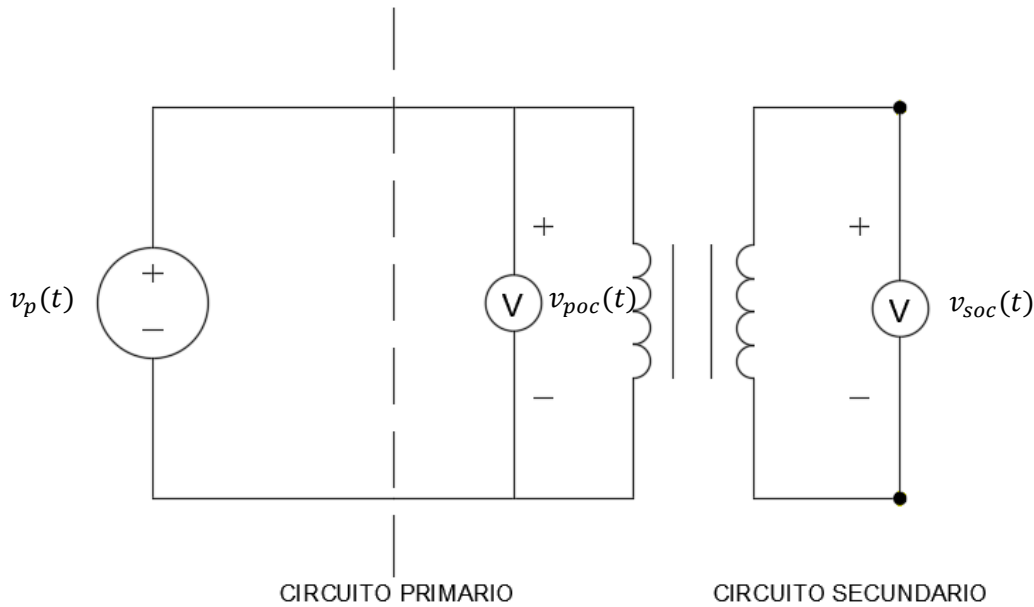


FIGURA 38: CONEXIONES PARA PRUEBA DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

2.14.2 Prueba a plena carga

Esta prueba consiste en someter a carga nominal el transformador y realizar las mediciones correspondientes como se muestra en la figura 39. De esta prueba se obtienen parámetros tales como $v_{sfl}(t)$ que es el voltaje suministrado a la carga y corresponde al término V_{FL} de la fórmula (45) para determinar la regulación de voltaje. Otros parámetros importantes son la potencia real de entrada y salida que se obtienen gracias a los wattmetros conectados y corresponden a los términos P_{IN} y P_{OUT} de la ecuación (46) respectivamente, que se utilizan para determinar la eficiencia de la máquina.

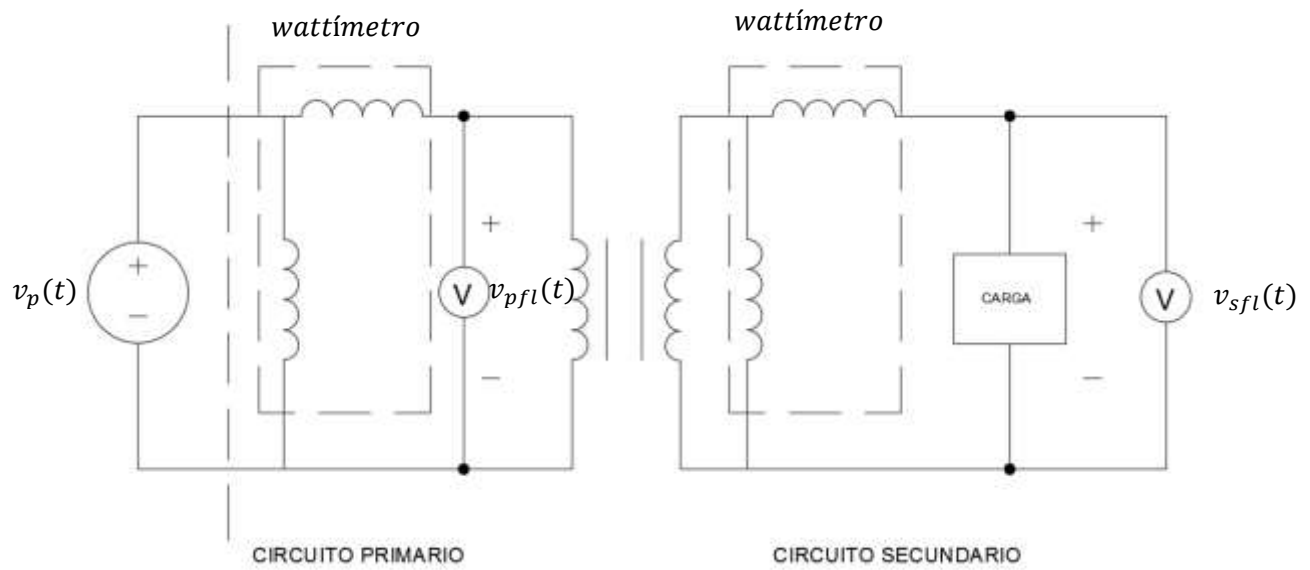


FIGURA 39: CONEXIONES PARA PRUEBA A PLENA CARGA

2.14.3 Incremento de temperatura

Se debe realizar la metodología descrita en el apartado 2.12 con el transformador funcionando a plena carga, como se muestra en la figura 39.

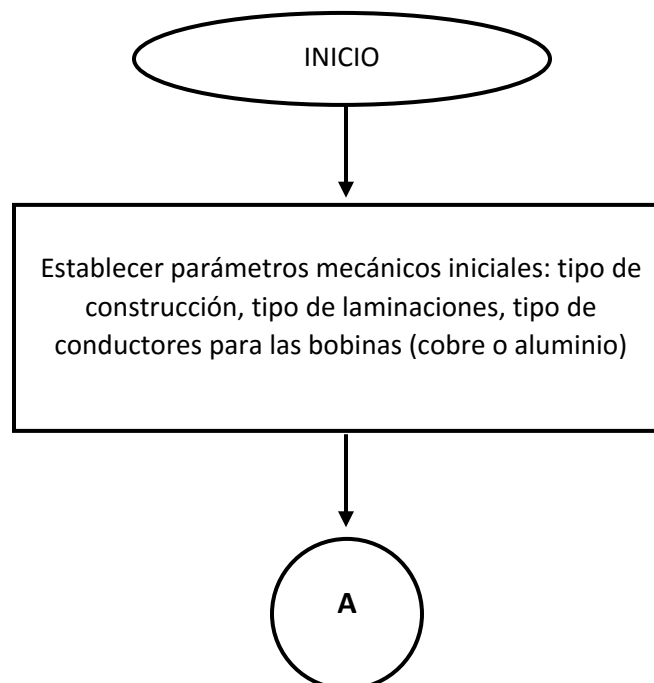
Capítulo III. Diseño del transformador

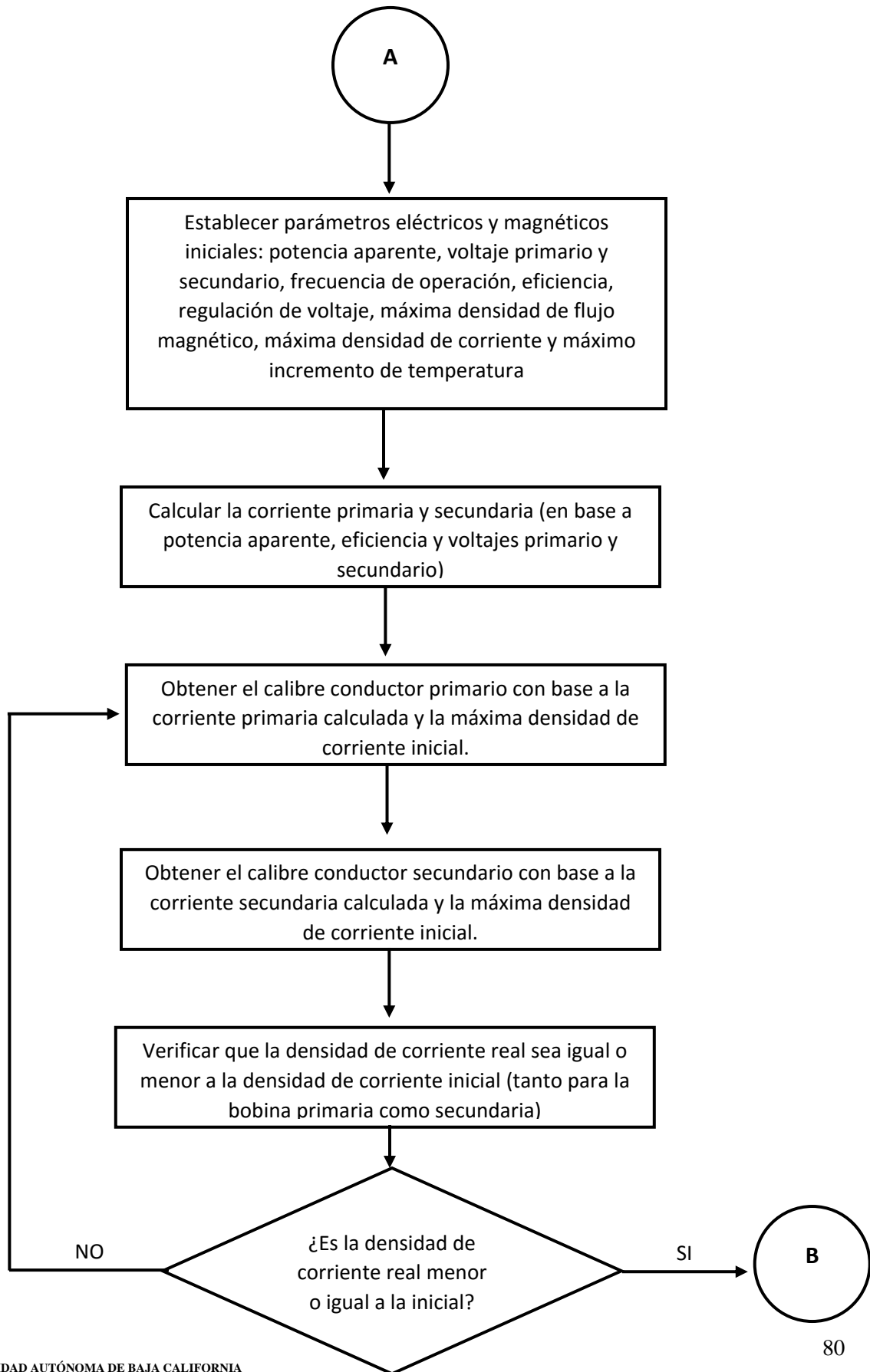
3.1 Diseño del transformador

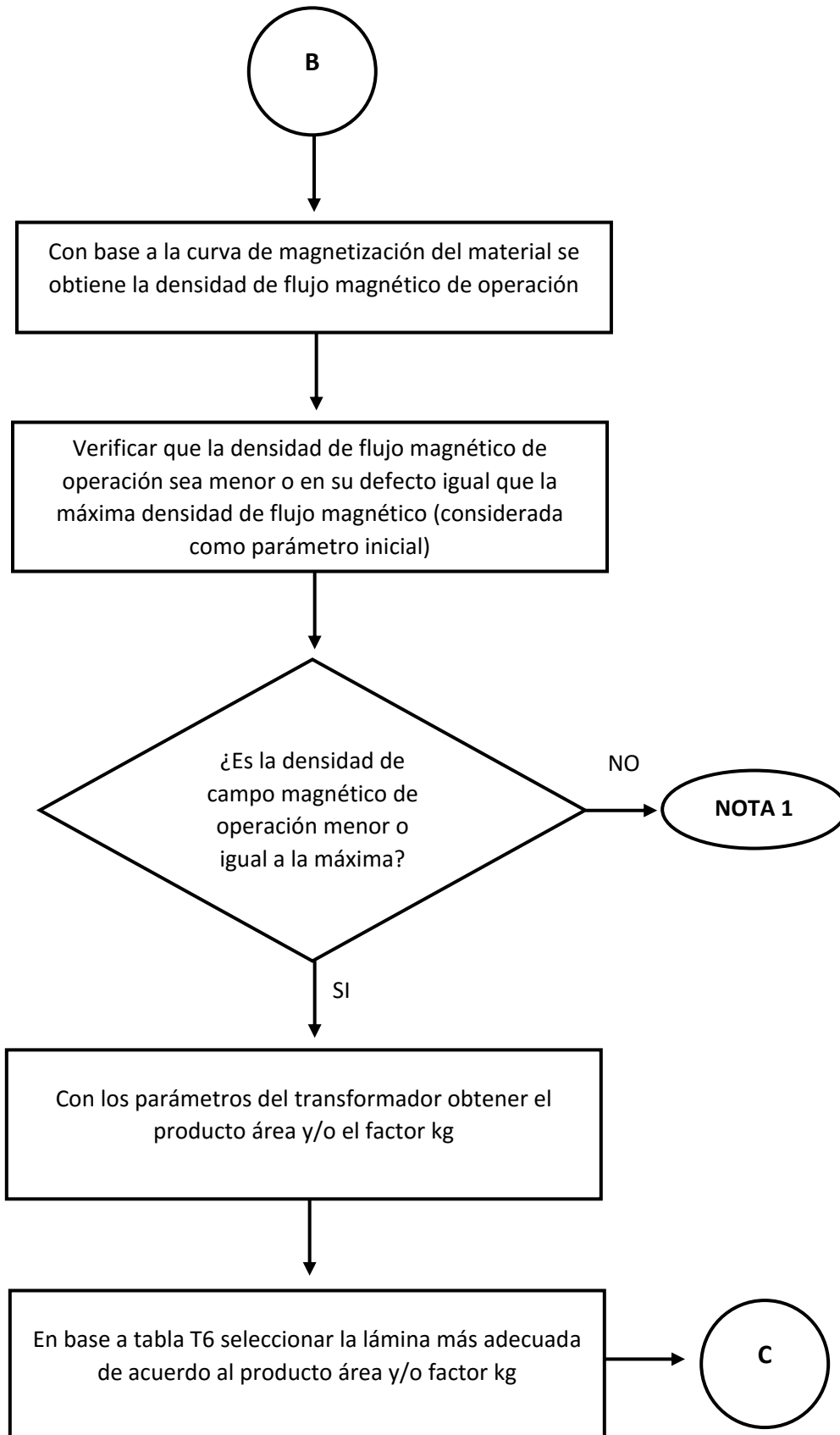
En general, la realización de un transformador no es una tarea lineal, más bien es un proceso iterativo [19], en el cual se brindan las especificaciones de diseño, se realiza una primera aproximación y en base a ésta se construye un primer prototipo. Posteriormente se realizan las pruebas pertinentes, y en caso de no cumplir con los requerimientos de diseño es necesario realizar ajustes para obtener una segunda aproximación, construir un segundo prototipo, etc. El proceso iterativo se concluye hasta que las pruebas satisfacen los requerimientos de diseño. Este tipo de diseño se conoce como diseño “clásico” del transformador y como se describe en la sección 2.13, es una metodología aplicada por una gran cantidad de autores.

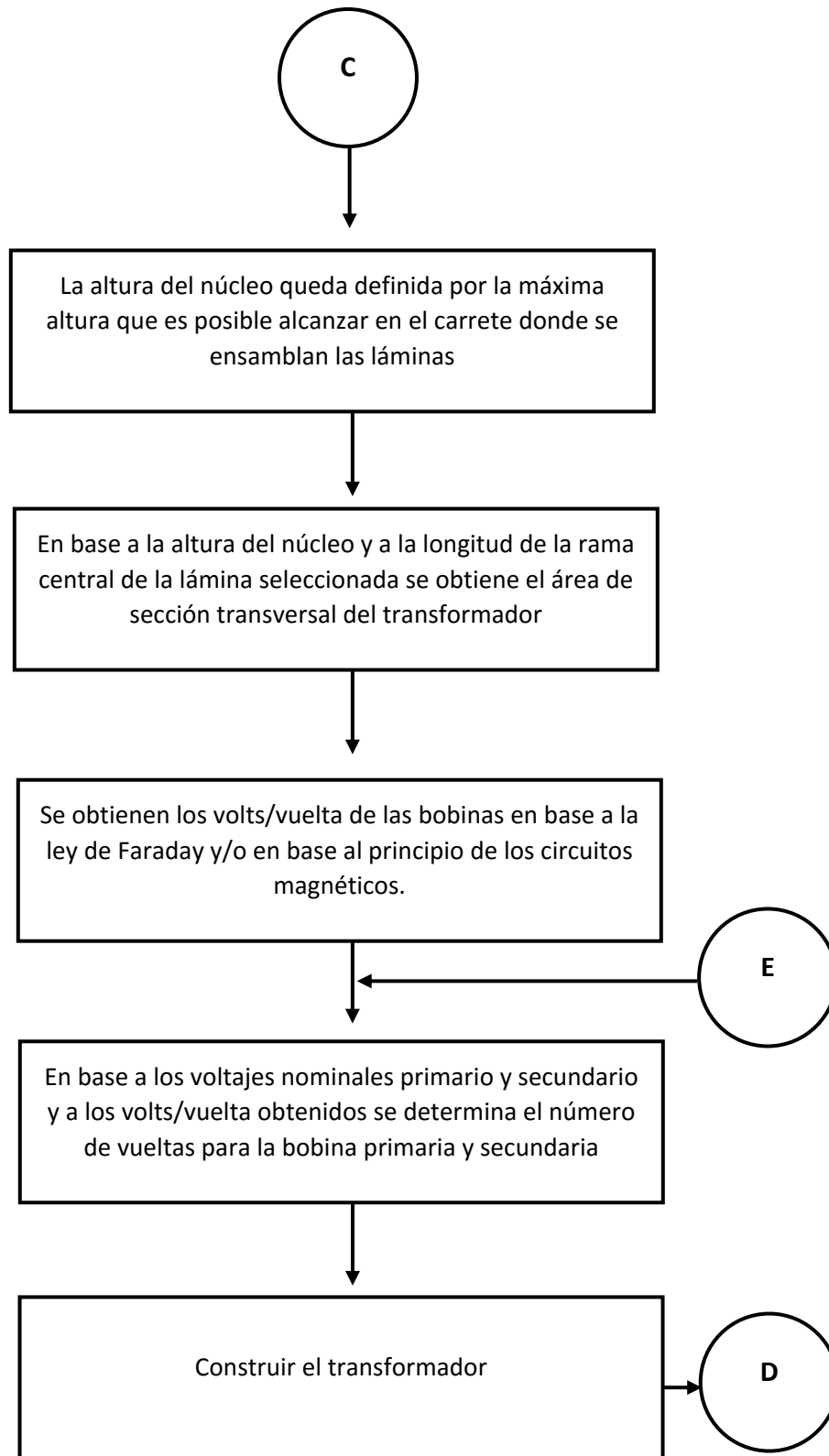
En este capítulo se proporcionan las especificaciones de diseño mecánico y eléctrico, se desarrolla todo el diseño eléctrico de forma explícita para obtener una primera aproximación. En el siguiente capítulo se construye el prototipo y se le realizan pruebas.

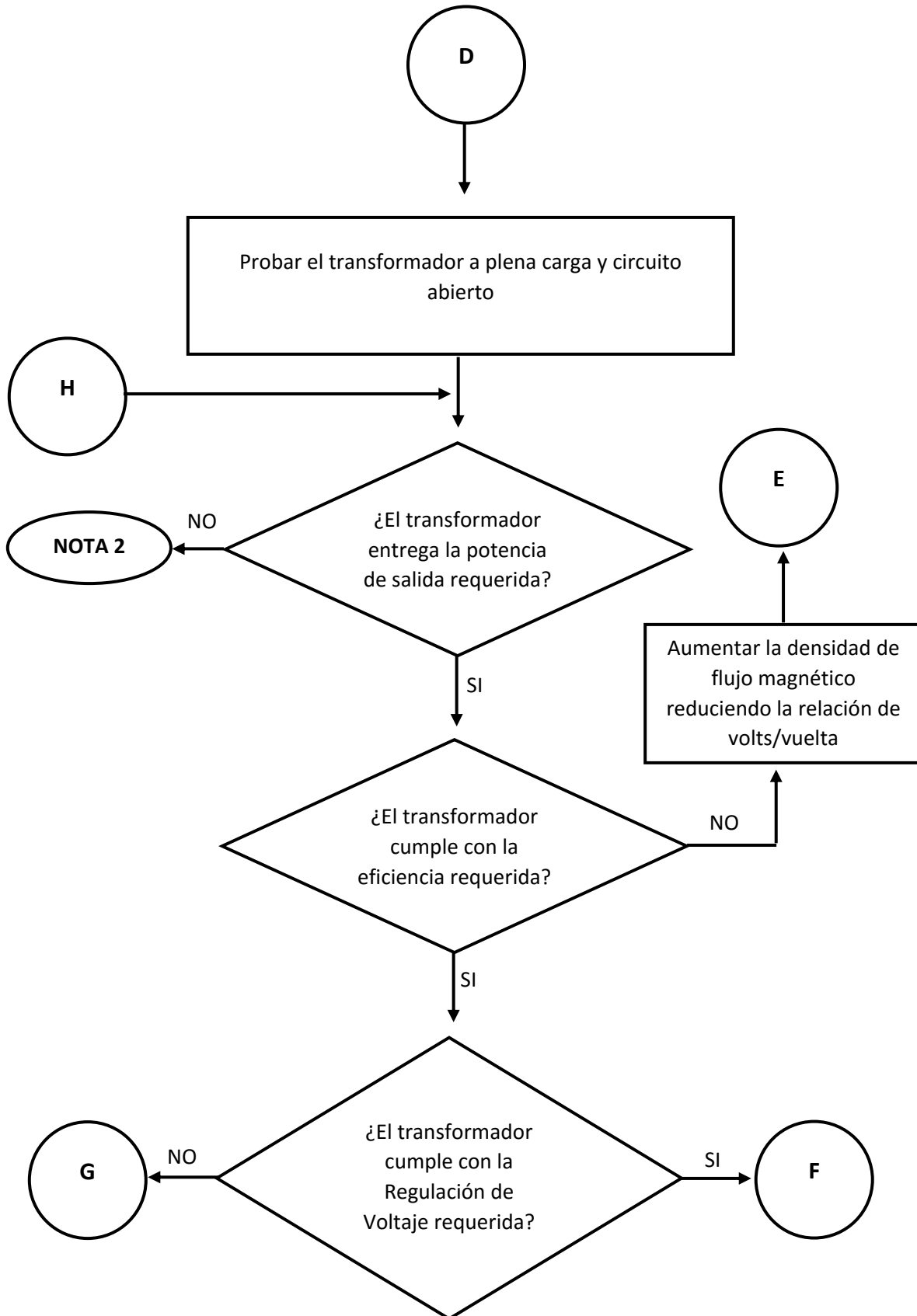
El siguiente diagrama de flujo muestra el proceso a seguir:

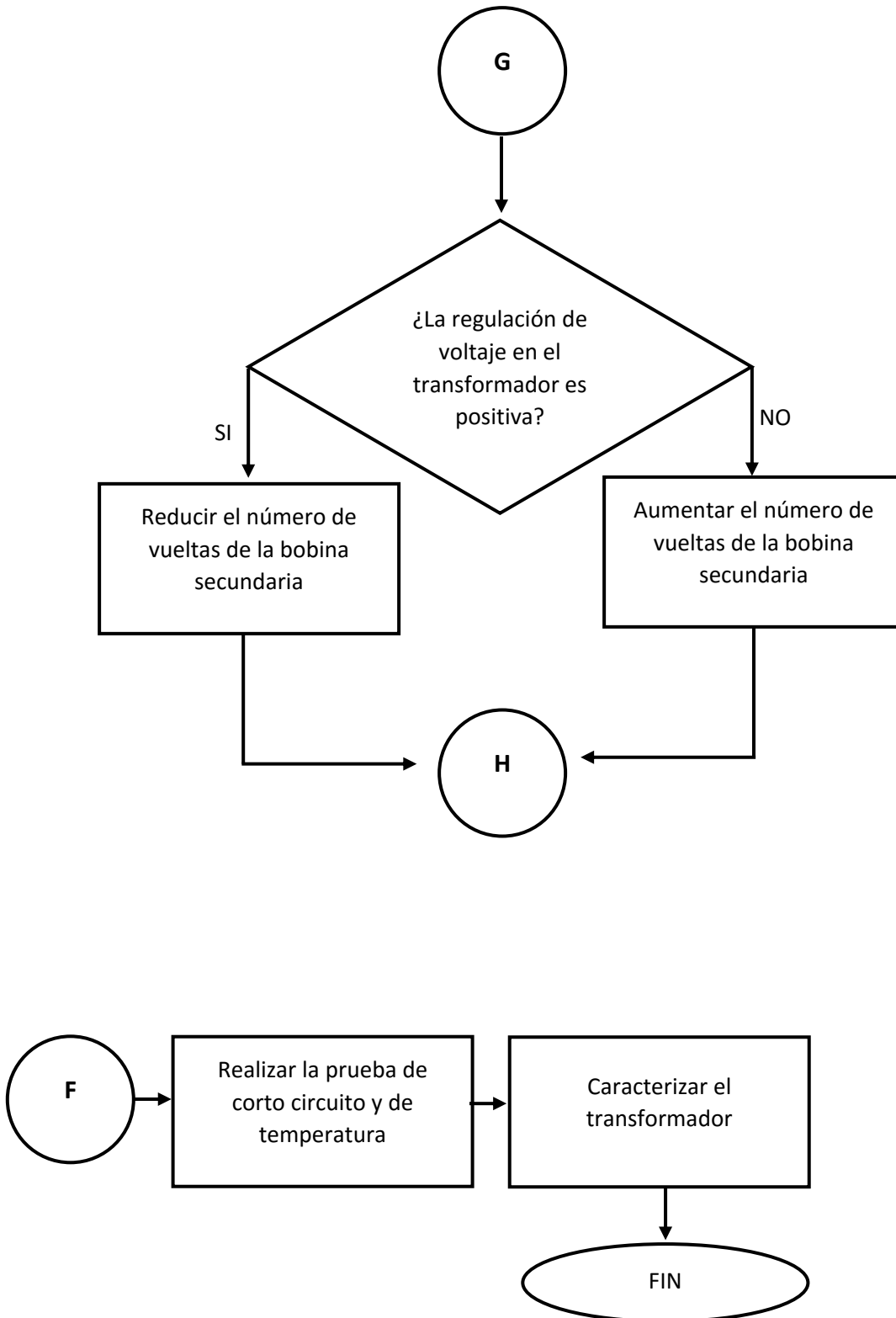












NOTA 1: En la sección 2.8 se describen las curvas de magnetización para los materiales magnéticos. Existen una gran variedad de materiales en el mercado, sin embargo, en muchas ocasiones algunos materiales comparten ciertas semejanzas, como por ejemplo, el punto donde alcanzan la saturación magnética. Por lo tanto, al tratar con un cierto tipo de material se puede considerar inicialmente un punto máximo permisible para la densidad de flujo magnético (máxima densidad de flujo magnético). Al obtener o en su defecto proponer la curva de magnetización del material a utilizar es posible ser flexible hasta cierto punto al seleccionar el valor final para la densidad de flujo magnético (densidad de campo magnético de operación) incluso si supera el límite establecido como parámetro inicial.

NOTA 2: Para este caso en particular el transformador no está entregando la potencia de salida requerida a plena carga. Considerando que la altura del núcleo es la máxima altura posible, la única solución sería considerar utilizar láminas magnéticas de mejor calidad o inclusive mayor dimensionamiento. Algunos parámetros como la eficiencia mejoran considerablemente cuanto se reduce la relación $\frac{\text{volts}}{\text{vuelta}}$ en la bobinas (se aumenta el número de vueltas para cada bobina), sin embargo, si el transformador ni siquiera es capaz de suministrar la potencia de salida, es improbable que esta opción solucione el problema.

Respecto al diagrama de flujo, un dato importante es que se busca el diseño y la construcción de un transformador funcional y seguro que cumpla con los requerimientos de temperatura, eficiencia y regulación de voltaje principalmente. Sin embargo, la optimización del transformador está fuera de los parámetros de esta investigación.

A continuación, se muestran las especificaciones mecánicas y eléctricas que deberá cumplir el transformador.

3.2 Especificaciones mecánicas de diseño:

- Material de los devanados: Alambre magneto de cobre
- Tipo de construcción: tipo acorazado con laminaciones E-I
- Material del núcleo: Acero eléctrico no orientado M13 (asignación AISI)

3.3 Especificaciones eléctricas de diseño:

- Potencia aparente // $S = 80 VA$
- Voltaje primario // $V_p = 127 V$
- Voltaje secundario // $V_s = 12 V$
- Frecuencia de operación // $f = 60 Hz$
- Eficiencia // $n = 85\%$
- Máxima regulación de voltaje // $RV = \pm 5 \%$
- Máxima densidad de flujo magnético // $B = 1.6 T$
- Máxima densidad de corriente teórica // $J = 2.5 \frac{A}{mm^2}$
- Máximo incremento de temperatura // $T_{max} = 200 ^\circ C$

3.4 Selección de los calibres de los conductores

Para determinar los calibres de los conductores a utilizar, como primer paso se calculan las corrientes del primario y secundario:

$$i_p = \frac{S}{v_p n} = \frac{80 VA}{(127 V)(0.85)} = 0.741 A \quad (47)$$

$$i_s = \frac{S}{v_s} = \frac{80 VA}{12 V} = 6.66 A \quad (48)$$

3.4.1 Selección del calibre del conductor primario

Considerando una densidad de corriente teórica de $J = 2.5 \frac{A}{mm^2}$ se obtiene para el alambre de cobre del devanado primario una sección transversal teórica de:

$$A_{pt} = \frac{i_p}{J} = \frac{0.741 A}{2.5 \frac{A}{mm^2}} = 0.2964 mm^2 \quad (49)$$

Por lo tanto, el alambre de cobre debe tener un diámetro teórico de:

$$d_{pt} = 0.614 mm$$

El alambre magneto a utilizar que se seleccionó es de la marca Viakon de capa sencilla, redondo, clase térmica 200 °C. De acuerdo a los datos del fabricante, el calibre del conductor es AWG #22, por lo que el diámetro y sección transversal definitivos para el alambre de cobre de la bobina primaria son:

$$d_p = 0.643 mm$$

$$A_p = 0.3247 mm^2$$

Considerando el conductor AWG #22 se obtiene la densidad de corriente primaria real de:

$$J_p = \frac{0.741 A}{0.3247 mm^2} = 2.28 \frac{A}{mm^2} \quad (50)$$

Dado que la densidad de corriente obtenida ($2.28 \frac{A}{mm^2}$) es menor que la especificación de diseño inicial ($2.5 \frac{A}{mm^2}$), se determina que el calibre es adecuado.

3.4.2 Selección del calibre del conductor secundario

Considerando la densidad de corriente teórica de $J = 2.5 \frac{A}{mm^2}$ se obtiene para el alambre de cobre secundario una sección transversal teórica:

$$A_{st} = \frac{i_p}{J} = \frac{6.66 \text{ A}}{2.5 \text{ A/mm}^2} = 2.664 \text{ mm}^2 \quad (51)$$

Por lo tanto, el diámetro teórico para el conductor secundario es:

$$d_{st} = 1.84 \text{ mm}$$

El alambre magneto que se seleccionó para la bobina secundaria es de la marca Viakon de capa sencilla, redondo, clase térmica 200 °C. De acuerdo a los datos del fabricante, el calibre del conductor es AWG #12, por lo que el diámetro y sección transversal definitivos para el alambre de cobre de la bobina secundaria son:

$$d_s = 2.052 \text{ mm}$$

$$A_p = 3.3071 \text{ mm}^2$$

Considerando el conductor AWG #12 se obtiene la densidad de corriente secundaria definitiva:

$$J_s = \frac{6.66 \text{ A}}{3.3071 \text{ mm}^2} = 2.01 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad (52)$$

Dado que la densidad de corriente obtenida ($2.01 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$) es menor que la especificación de diseño inicial ($2.5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$), se determina que el calibre es adecuado.

3.5 Determinación de la densidad magnética de operación del transformador

Dentro de los parámetros eléctricos iniciales se considera la máxima densidad de flujo magnético en la que operará el transformador. Dicho parámetro está definido por el tipo de material a utilizar para el núcleo y por lo tanto se obtiene de la curva de magnetización del mismo.

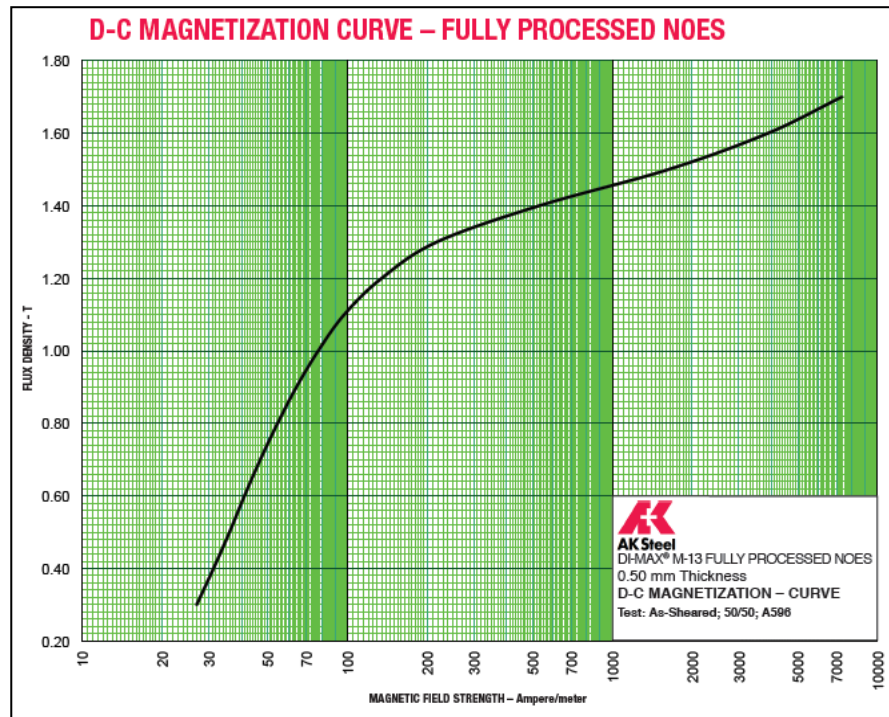


FIGURA 40: CURVA DE MAGNETIZACIÓN PARA ACERO M-13 NO ORIENTADO

En la figura 40 se muestra la curva de magnetización del acero ferromagnético seleccionado para conformar el núcleo del transformador. Para este caso en particular se utiliza una curva de magnetización de lámina de acero al silicio de grano no orientado M-13 obtenida del fabricante AK-Steel [35].

Es importante considerar un valor adecuado para B y H puesto que los valores de los mismos influyen enormemente en el desempeño del transformador y en general de cualquier máquina eléctrica. Como se describió en la sección 2.8, la saturación magnética en los aceros amorfos ocurre cuando se tienen valores cercanos a $B=1.4$ T y de acuerdo a la curva de magnetización se selecciona el valor de 1.44 T. Nótese que dicho valor es menor que la máxima densidad de flujo magnético considerada como parámetro inicial, por lo que se le considera un valor adecuado.

3.6 Determinación de las dimensiones de las laminaciones

Para determinar las dimensiones de las láminas E-I a utilizar se considerará el método típicamente llamado “producto área” [29], posteriormente se utilizará el método basado en la geometría del núcleo, el método K_g , desarrollado por McLyman [9].

3.6.1 El método producto área

Para la utilización del método del “producto área” considérese la ecuación (40) en la sección 2.13.1:

$$\text{Producto Área} = \frac{S \times 10^2}{\sqrt{2} \pi \eta B J f K_u} \quad (40)$$

Donde:

S es la potencia aparente del transformador (80 VA)

η es la eficiencia del transformador (85%)

B es la densidad de flujo magnético de operación (1.44 T)

J es la densidad de corriente de operación ($2.0 \frac{A}{mm^2}$)

f es la frecuencia de operación (60 Hz)

K_u es el factor de utilización de ventana (0.4)

Para este caso en especial, se considera la densidad de corriente $J = 2.0 \frac{A}{mm^2}$, debido a que es el valor menor entre J_p y J_s .

Sustituyendo valores:

$$\text{Producto Área} = \frac{(80 \text{ VA}) \times 10^2}{\sqrt{2} \pi (.85) (1.44 \text{ T}) (2.0 \text{ A/mm}^2) (60 \text{ Hz}) (0.40)} = 30.65 \text{ cm}^4 \quad (53)$$

3.6.2 El método kg de McLyman

Para poder determinar las dimensiones por el método de McLyman [9] es necesario considerar las ecuaciones (41)-(43) descritas en la sección 2.13.2:

$$factor\ kg = P_t / (2K_e RV) \quad (41)$$

$$P_t = P_o(1/\eta + 1) \quad (42)$$

$$K_e = 0.145(\sqrt{2\pi})^2 f^2 B^2 10^{-4} \quad (43)$$

Donde:

P_t es la potencia real total del transformador (*watts*)

P_o es la potencia de salida del transformador (80 W)

η es la eficiencia del transformador (85%)

K_e es una constante que queda determinada por las condiciones de operación eléctricas y magnéticas.

f es la frecuencia de operación (60 Hz)

B es la densidad de campo magnético de operación (1.44 T)

RV es la regulación de voltaje teórica (5 %)

Sustituyendo los parámetros de diseño en las ecuaciones:

$$P_t = (80\ W) \left(\frac{1}{0.85} + 1 \right) = 174.11765\ W \quad (54)$$

$$K_e = 0.145(\sqrt{2\pi})^2 (60\ Hz)^2 (1.44\ T)^2 10^{-4} = 2.1366 \quad (55)$$

$$Factor\ K_g = \frac{174.11765\ W}{(2)(2.1366)(5)} = 8.15\ cm^5 \quad (56)$$

3.6.3 Selección de las dimensiones de las laminaciones

Finalmente, para determinar el tipo de lámina que se utilizará se emplea la tabla T6 propuesta por Mcllyman [9]:

EI, Laminations, (Tempel) 14 mil										
Part NO.	W _{tcu} grams	W _{tfe} grams	MLT cm	MPL cm	W _a	A _c cm ²	W _a cm ²	A _p cm ⁴	Kg cm ⁵	A _t cm ²
					A _c					
EI-375	36.1	47.2	6.7	7.3	1.754	0.862	1.512	1.303	0.067	46.2
EI-021	47.6	94.3	8.2	8.3	1.075	1.523	1.638	2.510	0.188	62.1
EI-625	63.5	170.0	9.5	9.5	0.418	2.394	1.890	4.525	0.459	83.2
EI-750	108.8	296.0	11.2	11.4	0.790	3.448	2.723	9.384	1.153	120.0
EI-875	171.0	457.0	13.0	13.3	0.789	4.693	3.705	17.384	2.513	163.0
EI-100	254.0	676.0	14.8	15.2	0.790	6.129	4.839	29.656	4.927	212.9
EI-112	360.0	976.0	16.5	17.2	0.789	7.757	6.124	<u>47.504</u>	<u>8.920</u>	269.4
EI-125	492.0	1342.0	18.3	19.1	0.789	9.577	7.560	72.404	15.162	333.0
EI-138	653.0	1768.0	20.1	21.0	0.789	11.588	9.148	106.006	24.492	403.0
EI-150	853.0	2334.0	22.0	22.9	0.789	13.790	10.887	150.136	37.579	479.0
EI-175	1348.0	3711.0	25.6	26.7	0.789	18.770	14.818	278.145	81.656	652.0
EI-225	2844.0	7976.0	32.7	34.3	0.789	31.028	24.496	760.064	288.936	1078.0

TABLA T6: DATOS PROPUESTOS POR MCLYMAN [9] PARA SELECCIÓN DE DIMENSIONES DE LÁMINAS MAGNÉTICAS

Se observa que tanto para el producto-área 30.65 cm^4 y para el factor $K_g = 8.15 \text{ cm}^5$ la lámina mínima que se debe utilizar es la EI-112. La lámina más cercana que se encontró en el mercado es la EI-114A, la cual se utilizará en esta investigación. Esta lámina tiene las siguientes características:

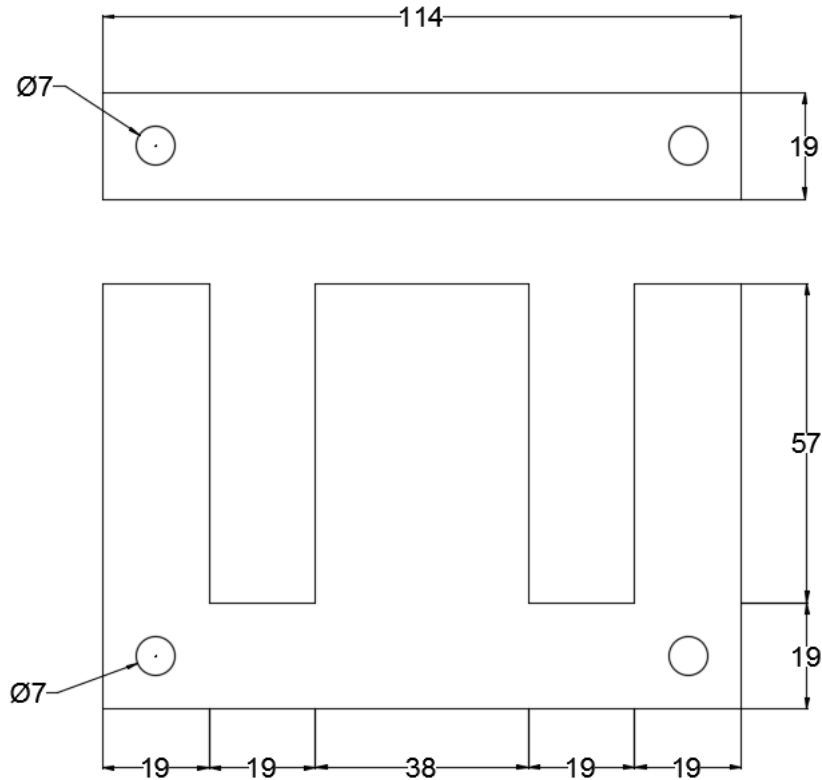


FIGURA 41: DIMENSIONES DE LÁMINA EI-114A (TODAS LAS MEDIDAS EN mm). CADA LÁMINA TIENE UN ESPESOR DE 0.5mm

3.7 Longitud del recorrido magnético y sección transversal del núcleo

Ahora considérese la figura 42. Se muestra la lámina EI-114A ensamblada y sin perforaciones. Nótese entonces que la lámina se describe mediante llamadas longitudes medias [14].

La longitud media central, se expresa como:

$$l_c = 57 \text{ mm} + 19 \text{ mm} = 76 \text{ mm} \quad (57)$$

Las longitudes media izquierda y media derecha se expresan respectivamente como:

$$l_i = l_d = 19 \text{ mm} + 19 \text{ mm} + 19 \text{ mm} + 57 \text{ mm} + 19 \text{ mm} + 19 \text{ mm} + 19 \text{ mm} = 171 \text{ mm} \quad (58)$$

Se dice entonces que el “Magnetic Path Length” [21] queda definido como:

$$MPL = l_c + l_i = l_c + l_d = 247 \text{ mm} = 0.247 \text{ m} \quad (59)$$

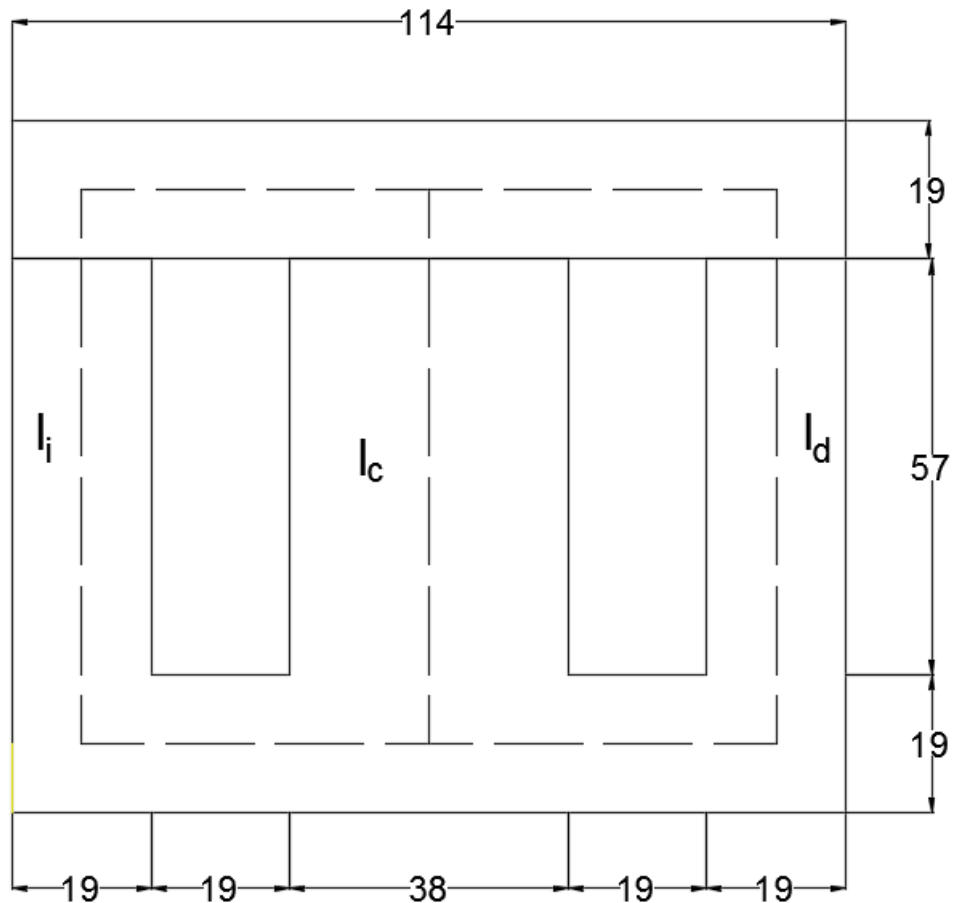


FIGURA 42: DIMENSIONES DE LÁMINA EI-114A (TODAS LAS MEDIDAS EN mm). SE MUESTRAN LAS LLAMADAS LONGITUDES MEDIAS EN LINEAS PUNTEADAS

Considerando la lámina con las dimensiones descritas anteriormente se considera un núcleo ferromagnético con una sección transversal de:

$$A_c = (0.95)(3.9 \text{ cm})(3.8 \text{ cm}) = 14.08 \text{ cm}^2 \quad (60)$$

En la ecuación (60) se considera un factor de apilamiento de 0.95, 3.9 cm de altura y 3.8 cm de la rama central.

3.8 Determinación del número de vueltas de los devanados

Ahora es necesario determinar el número de vueltas que deben tener las bobinas.

De acuerdo con la ley de Faraday se pueden calcular el número de vueltas inicial [9]:

$$N_{pt} = \frac{V_p \times 10^4}{\sqrt{2} \pi B f A_c} \quad (61)$$

Donde:

N_{pt} son las vueltas del primario inicial

V_p es el voltaje del primario (*volts*)

B es la densidad de campo magnético (*teslas*)

f es la frecuencia de operación (*hertz*)

A_c es el área de la sección transversal de la pierna central (*cm²*)

$$N_{pt} = \frac{127 \times 10^4}{\sqrt{2} \pi (1.44 T)(60 Hz)(14.08 \text{ cm}^2)} = 234.97 \sim 235 \text{ vueltas} \quad (62)$$

El factor $\frac{\text{volts}}{\text{vuelta}}$ se encuentra dividiendo el voltaje del primario sobre las vueltas del primario, en este caso es:

$$\frac{127 \text{ volts}}{235 \text{ vueltas}} = .54 \frac{\text{volts}}{\text{vuelta}} \quad (63)$$

La formulación anterior es clásica en la literatura [8-9], y brinda una buena primera aproximación, sin embargo ésta no considera la curva de magnetización del

material. En este trabajo se considerará la curva de magnetización (figura 40) en caso de ser necesario el rediseño.

Si se escoge 1.44 T, utilizando la curva de magnetización de la figura 40, se encuentra que la correlación indica que son necesarios $760 \frac{\text{Amperes} \cdot \text{vuelta}}{\text{metro}}$, y ya que el recorrido magnético (*MPL*) es de 0.247 m y la corriente del primario es de 0.741 A. Con base a la teoría de circuitos magnéticos es posible afirmar:

$$N_{pt} = \frac{H}{(i_p/MPL)} = \frac{760 \frac{\text{Amperes} \cdot \text{vuelta}}{\text{metro}}}{0.741 \text{ A}/0.247\text{m}} = 253.33 \sim 253 \text{ vueltas} \quad (64)$$

La ecuación (64) es solamente aplicable de forma directa debido a la geometría de la lámina (la rama central tiene el doble de ancho que las ramas laterales), y a la teoría de circuitos magnéticos.

El factor $\frac{\text{volts}}{\text{vuelta}}$ se encuentra dividiendo el voltaje del primario sobre las vueltas del primario, en este caso es:

$$\frac{127 \text{ volts}}{253 \text{ vueltas}} = .501 \frac{\text{volts}}{\text{vuelta}} \quad (65)$$

Por medio de ambos métodos los valores son muy cercanos a $0.5 \frac{\text{volts}}{\text{vuelta}}$, el cual se utilizará en el primer prototipo. Entonces el número de vueltas definitivo para el devanado primario y secundario son:

$$N_p = \frac{V_p}{\frac{\text{volts}}{\text{vuelta}}} = \frac{127 \text{ volts}}{0.5 \text{ volts/vuelta}} = 254 \text{ vueltas} \quad (66)$$

$$N_s = \frac{V_s}{\frac{\text{volts}}{\text{vuelta}}} = \frac{12 \text{ volts}}{0.5 \text{ volts/vuelta}} = 24 \text{ vueltas} \quad (67)$$

El número de vueltas del secundario puede aumentar en el prototipo final para cumplir con la regulación de voltaje requerida.

3.9 Características del prototipo inicial

Laminaciones de acero al silicio de grano no orientado **EI-114A** de 0.5 mm de espesor.

254 vueltas en el devanado primario.

24 vueltas en el devanado secundario.

Voltaje primario (voltaje de alimentación) de **127 V**.

Voltaje secundario (voltaje conectado a la carga) de **12 V**.

El devanado interno es el devanado de alta tensión.

Calibre **22 AWG** de alambre magneto marca Viakon de capa sencilla, redondo, clase térmica 200 °C para la bobina primaria.

Calibre **12 AWG** de alambre magneto marca Viakon de capa sencilla, redondo, clase térmica 200 °C para la bobina secundaria.

Capítulo IV. Construcción y pruebas

4.1 Construcción del transformador

Después de construir el prototipo inicial propuesto en el capítulo anterior, las pruebas realizadas fueron la prueba de circuito abierto, relación de transformación y la prueba a plena carga. La prueba de circuito abierto se realizó en el lado de alta tensión del transformador.

4.2 La prueba de circuito abierto y relación de transformación

Por simplicidad se incluyen los resultados de las dos pruebas de forma conjunta, sin embargo, dichas pruebas se realizaron en forma separada. Considérese un voltaje de alimentación de 127 V para el circuito primario.

Los resultados de la prueba de circuito abierto y relación de transformación se muestran en la siguiente tabla:

<i>Prueba</i>	<i>v/t</i>	<i>h</i>	<i>S_p</i>	<i>Q_p</i>	<i>P_p</i>	<i>f.p.</i>	<i>I_p</i>	<i>V_p</i>	<i>V_s</i>	<i>a</i>
OC	0.5	3.9	50.4	49.5	9.6	0.17	0.398	126.1	12.49	10.09

TABLA T7: RESULTADOS DE PRUEBA A CIRCUITO ABIERTO Y RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

Donde:

OC se refiere a la prueba de circuito abierto

v/t es la relación de volts/vuelta

h es la altura de la sección transversal del transformador (*cm*)

S_p es la potencia aparente medida en el circuito primario (*volts x amperes*)

Q_p es la potencia reactiva medida en el circuito primario
(volts x amperes (reactivos))

P_p es la potencia real medida en el circuito primario (watts)

$f.p.$ es el factor de potencia medido en el circuito primario ($p.u$)

I_p es la corriente en el circuito primario (amperes)

V_p es el voltaje medido en el circuito primario (volts)

V_s es el voltaje en el circuito secundario (circuito abierto) (volts)

a es la relación de transformación respecto a los voltajes medidos (Sin unidades)

4.3 La prueba a plena carga

Para esta prueba se conecta la carga total, la cual es 80 W, al ser una carga puramente resistiva, la corriente se ajusta a 6.66 A. Considérese un voltaje de alimentación de 127 V para el circuito primario. Los resultados obtenidos fueron:

<i>Prueba</i>	<i>v/t</i>	<i>h</i>	S_p	Q_p	P_p	$f.p.$	V_p	V_s	I_p	I_s	P_s	η	RV
FL	0.5	3.9	102	46.4	90.8	0.89	126.2	12.08	0.807	6.66	80.4	88.5	3.39

TABLA T8: RESULTADOS DE PRUEBA A PLENA CARGA

Donde

FL se refiere a la prueba a plena carga

v/t es la relación de volts/vuelta

h es la altura de la sección transversal del transformador (cm)

S_p es la potencia aparente medida en el circuito primario (volts x amperes)

Q_p es la potencia reactiva medida en el circuito primario
(volts x amperes (reactivos))

P_p es la potencia real medida en el circuito primario (watts)

$f.p.$ es el factor de potencia medido en el circuito primario (p. u)

V_p es el voltaje medido en el circuito primario (volts)

V_s es el voltaje en el circuito secundario (circuito conectado a carga resistiva) (volts)

I_p es la corriente en el circuito primario (amperes)

I_s es la corriente en el circuito secundario (amperes)

P_s es la potencia real medida en el circuito secundario (watts)

η es la eficiencia del transformador (%)

RV es la regulación de voltaje (%)

NOTA:

La regulación de voltaje se obtiene considerando el voltaje secundario sin carga V_s en la prueba a circuito abierto y el voltaje a plena carga V_s obtenido en la prueba a plena carga, reconsidérese la ecuación (45):

$$RV = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100 \% \quad (45)$$

Donde:

RV es la regulación de voltaje (%)

V_{NL} es el voltaje secundario sin carga (obtenido en la prueba de circuito abierto)

V_{FL} es el voltaje secundario a plena carga (obtenido al conectar el secundario con su carga nominal)

Para la eficiencia se consideran la potencia del circuito secundario P_s y la potencia real P_p del circuito primario en la prueba a plena carga. Reconsidérese la ecuación (46):

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \times 100 \quad (46)$$

Donde:

η es la eficiencia del transformador (%)

P_{OUT} es la potencia de salida del transformador (*watts*)

P_{IN} es la potencia de entrada del transformador (*watts*)

De los resultados anteriores se observa que la regulación de voltaje es la esperada, sin embargo la eficiencia se puede mejorar, por lo tanto se puede proceder de dos maneras:

1. Se puede proponer una menor densidad de corriente, con lo cual se tendría que colocar un calibre menor a los conductores.
2. Se puede proponer una mayor densidad de flujo magnético, lo cual requerirá una mayor cantidad de alambre magneto, lo cual se sabe mejorará la eficiencia, sin embargo, la regulación de voltaje podría empeorar debido a la inclusión de mayor cantidad de material.

4.4 Cambio en la densidad de campo magnético, obtención y caracterización del prototipo final

Se procederá a cambiar el número de vueltas de los devanados, de acuerdo con la relación $\frac{\text{volts}}{\text{vuelta}} = 0.4$

Entonces el número de vueltas del devanado primario y secundario es:

$$N_p = \frac{V_p}{\frac{\text{volts}}{\text{vuelta}}} = \frac{127 \text{ volts}}{0.4 \text{ volts/vuelta}} = 318 \text{ vueltas} \quad (68)$$

$$N_s = \frac{V_s}{\frac{\text{volts}}{\text{vuelta}}} = \frac{12 \text{ volts}}{0.4 \text{ volts/vuelta}} = 30 \text{ vueltas} \quad (69)$$

También se aumenta levemente la altura del núcleo del transformador de 3.9 cm a 4.12 cm apilando unas cuantas láminas más.

Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO TRANSFORMADOR 80 VA, 127/12 V, 0.4v/t								
Número de vueltas	<i>h</i>	<i>S_p</i>	<i>Q_p</i>	<i>P_p</i>	<i>f · p</i>	<i>I_p</i>	<i>V_{pp}</i>	<i>V_s</i>
30	4.12	13.7	12.7	5	0.37	0.108	127	13.13
29	4.12	13.8	12.9	5.1	0.36	0.109	127	12.74
28	4.12	14	13	5.1	0.36	0.110	127	12.34

TABLA T9: RESULTADOS DE PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO PARA PROTOTIPO MODIFICADO. NÓTESE QUE SE HACEN VARIAR LAS VUELTAS EN LA BOBINA SECUNDARIA DE 28 A 30 VUELTAS

Respecto a la tabla T9:

h es la altura del transformador (*cm*)

S_p es la potencia aparente medida en el circuito primario (VA)

Q_p es la potencia reactiva medida en el circuito primario (VAR)

P_p es la potencia real medida en el circuito primario (W)

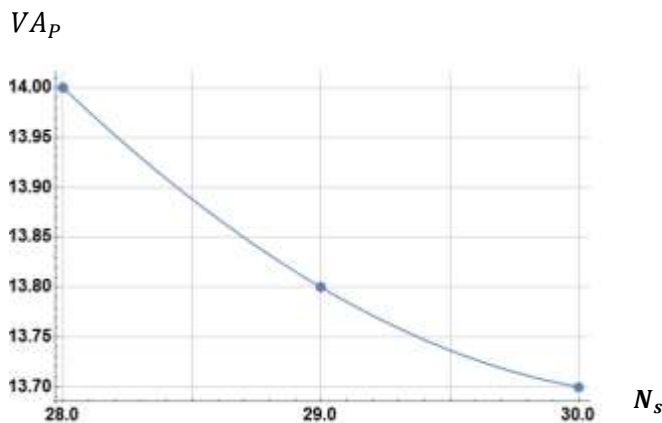
$f.p$ es el factor de potencia medido en el circuito primario

I_p es la corriente medida en el circuito primario

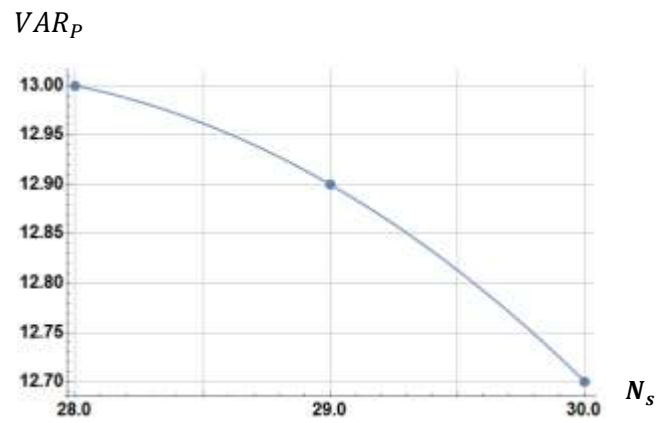
V_{pp} es el voltaje de alimentación (127 V)

V_s es el voltaje medido en el circuito secundario

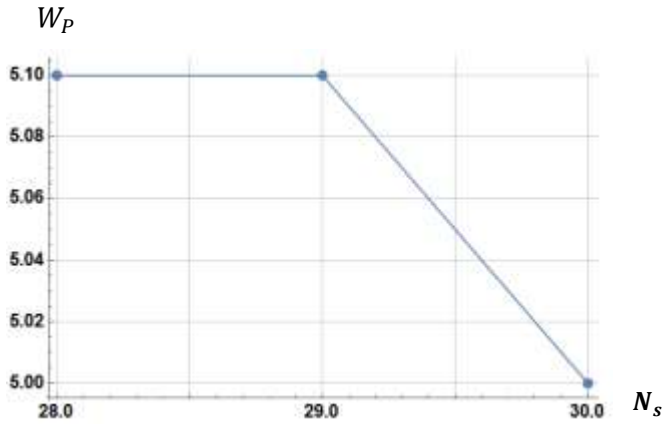
Ahora se muestran algunas gráficas de los resultados obtenidos respecto a la prueba de circuito abierto de acuerdo a la variación de vueltas en el devanado secundario. Las gráficas se realizan en Wolfram Mathematica 10.0 por medio de aproximación de funciones:



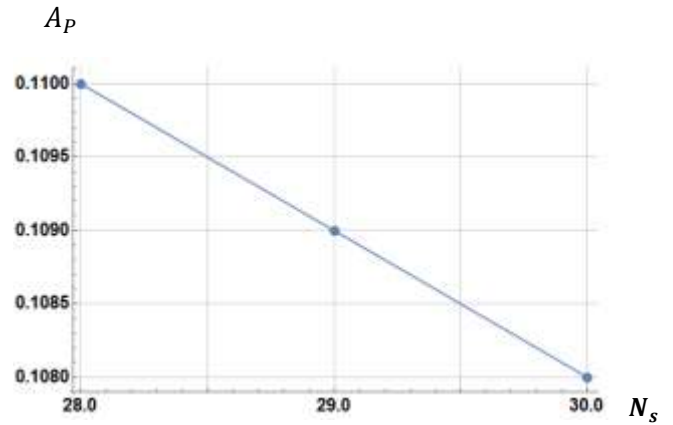
G1a) RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL SECUNDARIO Y LA POTENCIA APARENTE DEL PRIMARIO



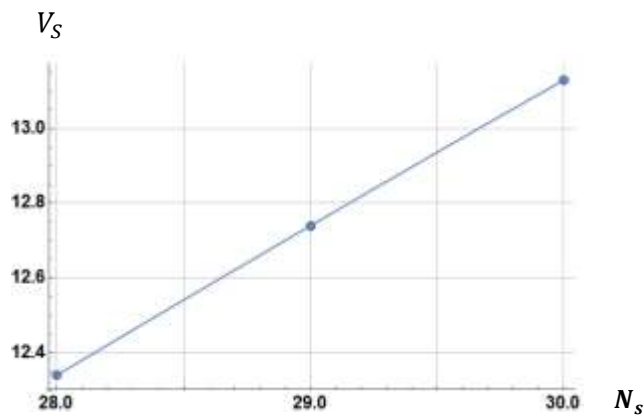
G1b) RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL SECUNDARIO Y LA POTENCIA REACTIVA DEL PRIMARIO



G1c) RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL SECUNDARIO Y LA POTENCIA REAL DEL PRIMARIO



G1d) RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL SECUNDARIO Y LA CORRIENTE DEL PRIMARIO



G1e) RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE VUELTAS Y VOLTAJE EN EL SECUNDARIO

GRÁFICAS G1 a)-e)

A continuación se muestran los resultados de la prueba a plena carga:

PRUEBA A PLENA CARGA

Número de vueltas	TRANSFORMADOR 80 VA, 127/12 V, 0.4 $\frac{\text{volts}}{\text{vuelta}}$											
	h	S_p	Q_p	P_p	$f \cdot p$	I_p	V_{pp}	I_s	V_s	P_s	η	RV
30	4.12	93.6	11.6	92.8	0.99	0.739	127	6.66	12.51	83.32	89.78	4.95
29	4.12	90.2	11.7	89.2	0.99	0.712	127	6.66	12.28	81.78	91.68	3.75
28	4.12	88.1	12.1	87.3	0.99	0.693	127	6.66	11.78	78.45	89.86	4.75

TABLA T10: RESULTADOS DE PRUEBA A PLENA CARGA PARA PROTOTIPO MODIFICADO. NÓTESE QUE SE HACEN VARIAR LAS VUELTAS EN LA BOBINA SECUNDARIA DE 28 A 30 VUELTAS

Respecto a la tabla T10:

h es la altura del transformador (*cm*)

S_p es la potencia aparente medida en el circuito primario (*volts x amperes*)

Q_p es la potencia reactiva medida en el circuito primario (*volts x amperes (reactivos)*)

P_p es la potencia real medida en el circuito primario (*watts*)

$f \cdot p$ es el factor de potencia medido en el circuito primario (*p. u*)

I_p es la corriente medida en el circuito primario (*amperes*)

V_{pp} es el voltaje de alimentación (*127 V*)

V_s es el voltaje medido en el circuito secundario (*volts*)

P_s es la potencia de salida en el secundario (*watts*)

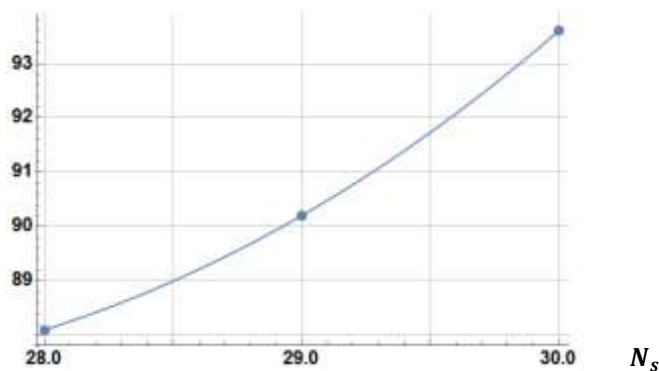
η es la eficiencia del transformador (*p. u*)

RV es la regulación de voltaje del transformador (%)

Respecto a la tabla T10 se observa que el transformador con 29 vueltas en el secundario tiene una eficiencia de 91.68% y una regulación de voltaje de 3.75%, cumpliendo con los requerimientos iniciales de diseño, por lo que se escoge éste como prototipo final.

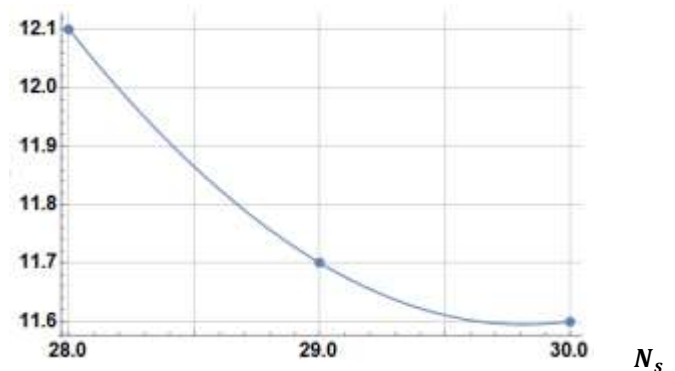
A continuación, se muestran algunas gráficas que relacionan algunos resultados obtenidos en la prueba a plena carga de acuerdo a la variación de vueltas en el devanado secundario. Las gráficas se realizan en Wolfram Mathematica 10.0 por medio de aproximación de funciones:

VA_p

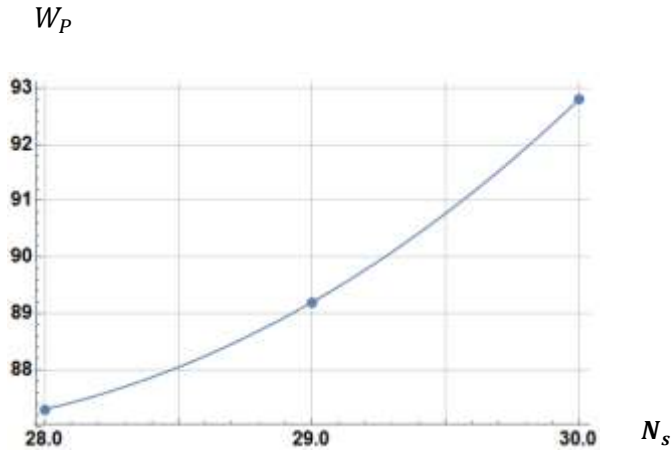


G2a) RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL SECUNDARIO Y LA POTENCIA APARENTE DEL PRIMARIO

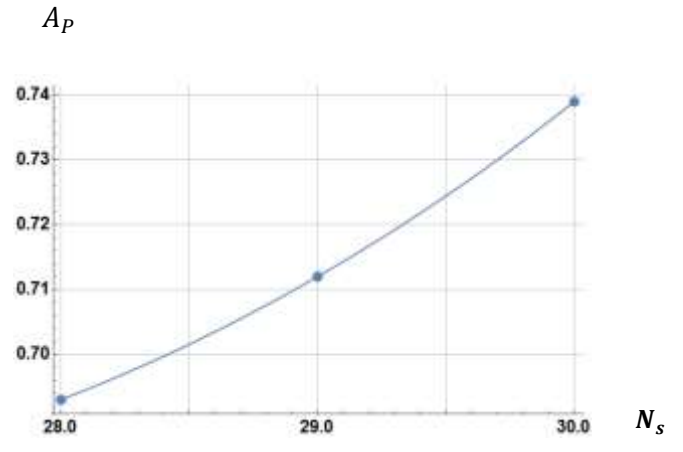
VAR_p



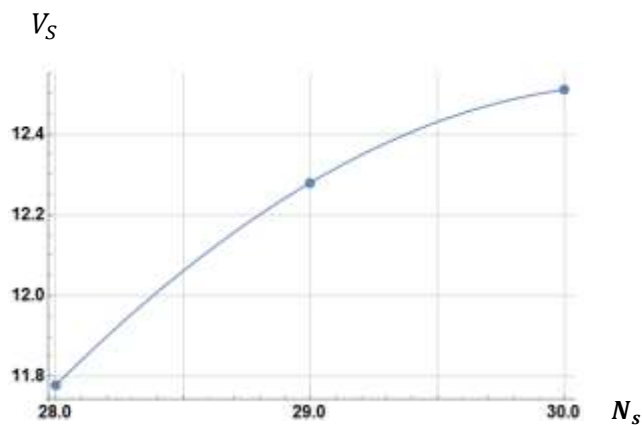
G2b) RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL SECUNDARIO Y LA POTENCIA REACTIVA DEL PRIMARIO



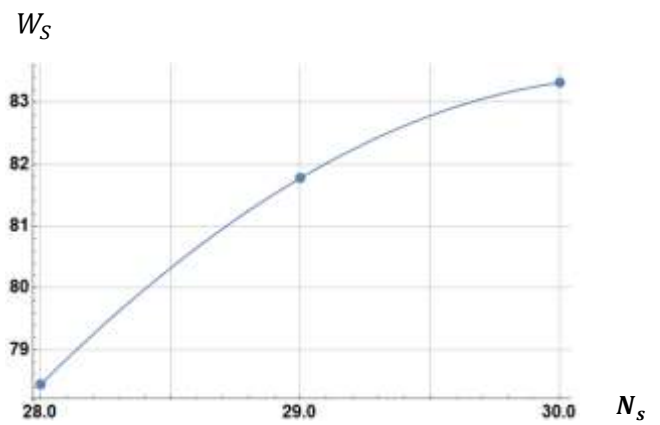
G2c) RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL SECUNDARIO Y LA POTENCIA REAL DEL PRIMARIO



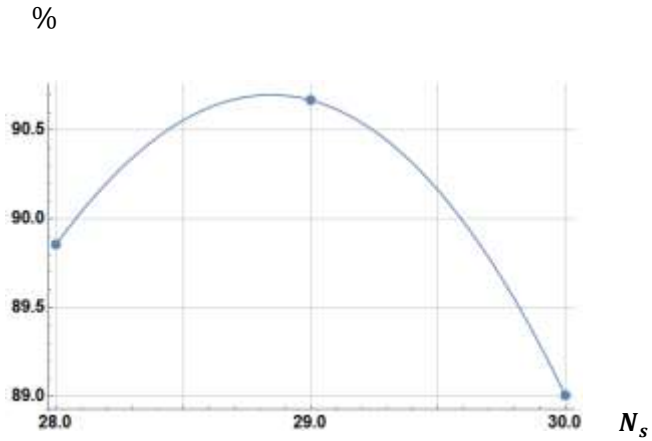
G2d) RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL SECUNDARIO Y LA CORRIENTE DEL PRIMARIO



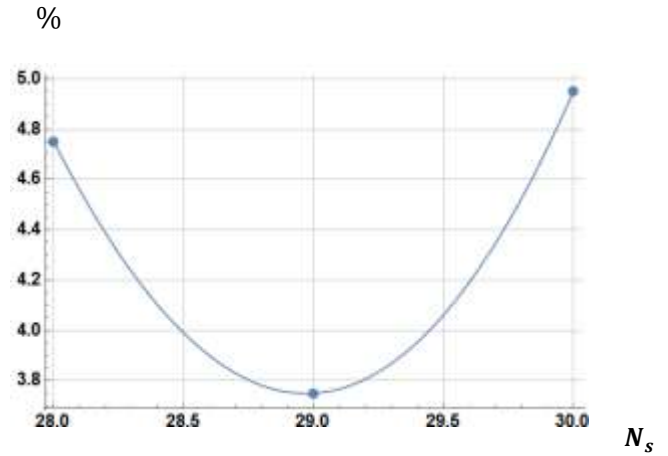
G2e) RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE VUELTAS Y VOLTAJE EN EL SECUNDARIO



G2f) RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE VUELTAS Y POTENCIA REAL EN EL SECUNDARIO



G2g) RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL SECUNDARIO Y LA EFICIENCIA DEL TRANSFORMADOR



G2h) RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL SECUNDARIO Y LA REGULACIÓN DEL VOLTAJE DEL TRANSFORMADOR

GRÁFICAS G2 a)-h)

Finalmente, para terminar de caracterizar el transformador se realiza la prueba de cortocircuito.

PRUEBA DE CORTO CIRCUITO

TRANSFORMADOR 80 VA, 127/12, 0.4 $\frac{\text{volts}}{\text{vuelta}}$						
Numero de vueltas	h	S_p	Q_p	P_p	I_p	V_p
29	4.12	3.7	0.3	3.7	0.631	5.9
28	4.12	3.9	0.4	3.9	0.630	6.2

TABLA T11: RESULTADOS DE PRUEBA DE CORTO CIRCUITO PARA PROTOTIPO MODIFICADO. NÓTESE QUE SE HACEN VARIAR LAS VUELTAS EN LA BOBINA SECUNDARIA DE 28 A 29 VUELTAS

Respecto a la tabla T11:

h es la altura del transformador (cm)

S_p es la potencia aparente medida en el circuito primario ($volts \times amperes$)

Q_p es la potencia reactiva medida en el circuito primario ($volts \times amperes$ (*reactivos*))

P_p es la potencia real medida en el circuito primario ($watts$)

I_p es la corriente medida en el circuito primario ($amperes$)

V_p es el voltaje medido en el circuito primario ($volts$)

Considerando el modelo con 29 vueltas en el secundario se obtiene el modelo equivalente del transformador:

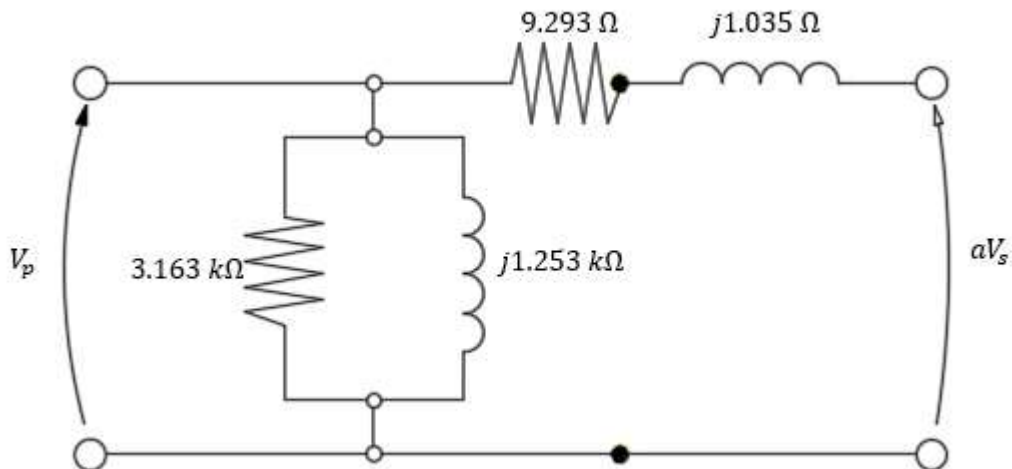


FIGURA 43: MODELO EQUIVALENTE DEL PROTOTIPO FINAL

4.5 Características del prototipo final:

- Material de los devanados: Alambre de cobre
- Tipo de construcción: tipo núcleo con laminaciones EI-114A
- Tipo de material a utilizar para el núcleo: Acero eléctrico no orientado M13 (asignación AISI)
- Potencia aparente $S = 80 \text{ VA}$
- Voltaje primario $V_p = 127 \text{ V}$
- Voltaje secundario $V_s = 12 \text{ V}$
- Número de vueltas en devanado primario $N_p = 318 \text{ vueltas}$
- Número de vueltas en devanado secundario $N_s = 29 \text{ vueltas}$
- Altura del transformador $h = 4.12 \text{ cm}$
- Frecuencia de operación $f = 60 \text{ Hz}$
- Eficiencia $\eta = 91.68 \%$
- Regulación de voltaje $RV = 3.75 \%$

4.6 Prueba de máximo incremento de temperatura

En la sección 2.12.3 se muestra la metodología para obtener incremento promedio de la temperatura. Siguiendo dicho procedimiento se obtienen los resultados mostrados en las siguientes tablas:

T_F	R_{Fp}	R_{Fs}
22.8	3.4	0.2

TABLA T12: RESULTADOS DE LA TEMPERATURA Y RESISTENCIA EN FRIO

Respecto a la tabla T12:

T_F es la temperatura medida en frio ($^{\circ}\text{C}$)

R_{Fp} es la resistencia en frio del circuito primario (Ω)

R_{FS} es la resistencia en frio en el circuito secundario (Ω)

T_C	R_{Cp}	R_{Cp1}	R_{Cp2}	R_{Cp3}
24.4	3.7	3.6	3.6	3.6

TABLA T13: RESULTADOS DE LA TEMPERATURA Y RESISTENCIA EN CALIENTE PARA EL CIRCUITO PRIMARIO

Respecto a la tabla T13:

T_C es la temperatura en caliente ($^{\circ}C$)

R_{Cp} es la resistencia en caliente medida en el primario justo después de la desconexión (Ω)

R_{Cp1} es la resistencia en caliente tomada en el primario 1 minuto después de la desconexión (Ω)

R_{Cp2} es la resistencia en caliente tomada en el primario 2 minutos después de la desconexión (Ω)

R_{Cp3} es la resistencia en caliente tomada en el primario 3 minutos después de la desconexión (Ω)

T_C	R_{Cs}	R_{Cs1}	R_{Cs2}	R_{Cs3}
24.4	0.3	0.3	0.3	0.3

TABLA T14: RESULTADOS DE LA TEMPERATURA Y RESISTENCIA EN CALIENTE PARA EL CIRCUITO SECUNDARIO

Respecto a la tabla T14:

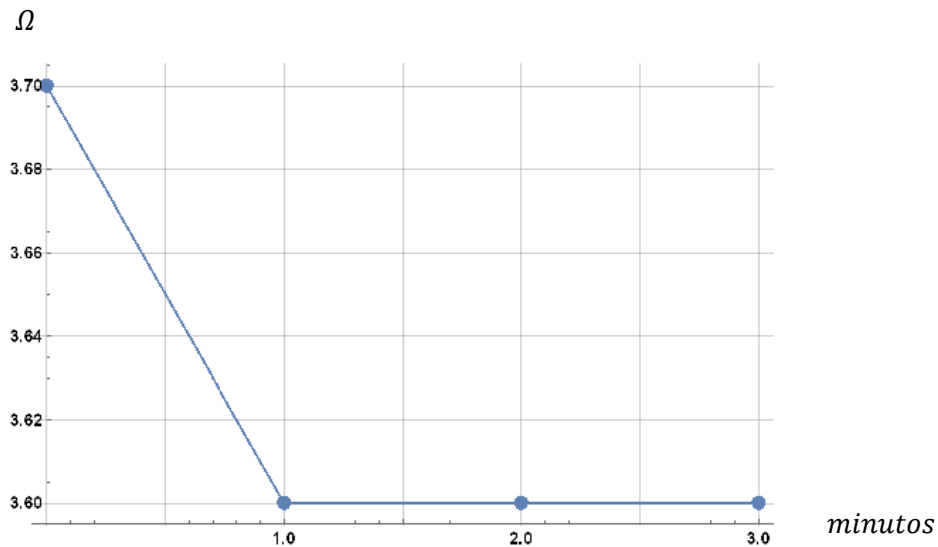
T_C es la temperatura en caliente ($^{\circ}C$)

R_{CS} es la resistencia en caliente medida en el secundario justo después de la desconexión (Ω)

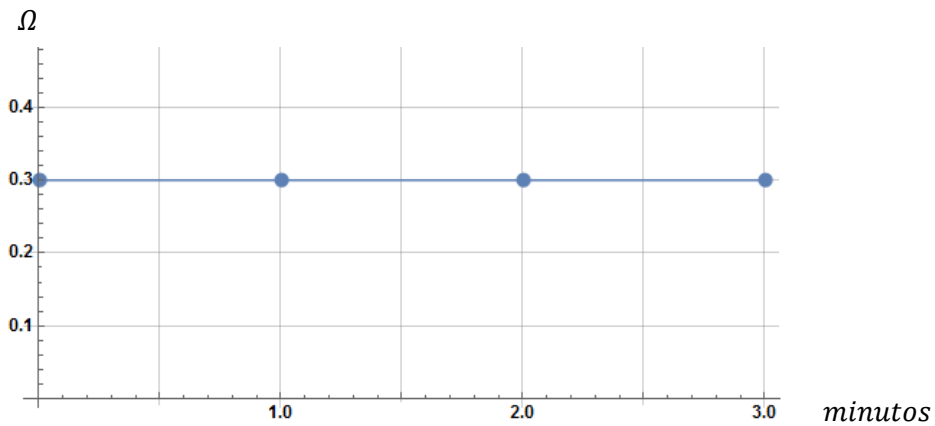
R_{CS1} es la resistencia en caliente tomada en el secundario 1 minuto después de la desconexión (Ω)

R_{CS2} es la resistencia en caliente tomada en el secundario 2 minutos después de la desconexión (Ω)

R_{CS3} es la resistencia en caliente tomada en el secundario 3 minutos después de la desconexión (Ω)



GRÁFICA G3: Relación entre la resistencia del circuito primario y los minutos posteriores a la desconexión (TABLA T13)



GRÁFICA G4: Relación entre la resistencia del circuito secundario y los minutos posteriores a la desconexión (TABLA T14)

La temperatura promedio de la bobina primaria se obtiene por medio de la ecuación (34) y los datos de las tablas T12 y T13:

$$T_P = \frac{(3.7 \Omega - 3.4 \Omega)}{(3.4 \Omega)} (234.5 \text{ }^\circ\text{C} + 22.8 \text{ }^\circ\text{C}) + 22.8 \text{ }^\circ\text{C} = 45.50 \text{ }^\circ\text{C} \quad (70)$$

Considerando la temperatura T_a como 24.4°C (temperatura en caliente) y tomando en cuenta la ecuación (35) el incremento promedio de temperatura de la bobina primaria queda definida como:

$$T_{rP} = 45.50 \text{ }^\circ\text{C} - 24.4 \text{ }^\circ\text{C} = 21.1 \text{ }^\circ\text{C} \quad (71)$$

Por lo tanto el máximo incremento de temperatura para la bobina primaria queda definido como (se considera un factor de punto caliente de $15 \text{ }^\circ\text{C}$ y la temperatura ambiente de $30 \text{ }^\circ\text{C}$):

$$T_{MP} = 21.1 \text{ }^\circ\text{C} + 15 \text{ }^\circ\text{C} + 30 \text{ }^\circ\text{C} = 66.1 \text{ }^\circ\text{C} \quad (72)$$

La temperatura promedio de la bobina secundaria se obtiene por medio de la ecuación (34) y los datos de las tablas T12 y T14:

$$T_S = \frac{(0.3 \Omega - 0.2 \Omega)}{(0.2 \Omega)} (234.5 \text{ }^\circ\text{C} + 22.8 \text{ }^\circ\text{C}) + 22.8 \text{ }^\circ\text{C} = 151.45 \text{ }^\circ\text{C} \quad (73)$$

Considerando la temperatura T_a como 24.4°C (temperatura en caliente) y tomando en cuenta la ecuación (35) el incremento promedio de temperatura de la bobina secundaria queda definida como:

$$T_{rS} = 151.45 \text{ }^\circ\text{C} - 24.4 \text{ }^\circ\text{C} = 127.05 \text{ }^\circ\text{C} \quad (74)$$

Por lo tanto el máximo incremento de temperatura para la bobina secundaria queda definido como (se considera un factor de punto caliente de $15 \text{ }^\circ\text{C}$ y la temperatura ambiente de $30 \text{ }^\circ\text{C}$):

$$T_{MS} = 127.05 \text{ }^\circ\text{C} + 15 \text{ }^\circ\text{C} + 30 \text{ }^\circ\text{C} = 172.05 \text{ }^\circ\text{C} \quad (75)$$

4.7 Comportamiento del transformador monofásico a diferentes cargas

De acuerdo a Ebert [36] es importante conocer el comportamiento del transformador fuera de sus parámetros de carga nominal, especialmente al operar en sobrecarga (de acuerdo al autor, sobrecargar el transformador es una práctica ampliamente utilizada). Algunos escenarios propuestos para la sobrecarga:

1. Cambio de voltaje en el sistema
2. Cambio en la carga (magnitud y/o factor de potencia)
3. Correcciones realizadas para regulación

Algunas consecuencias de la sobrecarga:

1. Cambio en la impedancia y regulación
2. Cambio en las pérdidas con carga
3. Cambio en las pérdidas sin carga
4. Cambio en el incremento de temperatura debido a los cambios en las pérdidas

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al prototipo final descrito en las secciones 4.4 y 4.5. Considérese que transformador se conecta únicamente a una carga resistiva.

S	S_P	P_P	Q_P	fp	V_P	I_P	V_S	I_S	P_S	RV	η
10	20.20	15.50	13.00	0.76	127	0.159	12.68	0.806	10.220	0.473	65.94
20	30.10	26.80	13.10	0.9	127	0.233	12.6	1.660	20.916	1.111	78.04
30	39.00	38.00	13.00	0.94	127.30	0.323	12.5	2.500	31.250	1.920	82.24
40	51.30	51.00	12.80	0.97	127.70	0.404	12.45	3.400	42.330	2.329	83.00
50	59.00	58.40	12.40	0.98	127	0.471	12.38	4.170	51.625	2.908	88.40
60	69.50	68.30	12.60	0.98	126.80	0.549	12.36	5.000	61.800	3.074	90.48
70	77.90	77.00	12.30	0.99	127	0.615	12.3	5.600	68.880	3.577	89.45
80	90.40	89.50	12.30	0.99	127	0.711	12.27	6.600	80.982	3.830	90.48
90	100.09	100.02	11.80	0.99	127	0.796	12.09	7.500	90.675	5.376	90.66
100	111.90	111.30	11.70	0.99	127	0.881	12.03	8.300	99.849	5.902	89.71
110	121.60	121.10	11.40	1	127	0.958	11.98	9.100	109.018	6.344	90.02
120	131.60	131.10	11.20	1	127	1.035	11.87	10.000	118.700	7.329	90.54

TABLA T12: RESULTADOS DE PRUEBAS A VARIAS CARGAS PARA EL PROTOTIPO FINAL.

Respecto a la tabla T12:

S es la potencia aparente a la que se ajusta la carga del transformador para cada prueba (*volts x amperes*)

S_p es la potencia aparente medida en el primario (*volts x amperes*)

P_p es la potencia real medida en el primario (*watts*)

Q_p es la potencia reactiva medida en el circuito primario (*volts x amperes (reactivos)*)

fp es el factor de potencia medido en el circuito primario (*p.u*)

V_p es el voltaje medido en el circuito primario (*volts*)

I_p es la corriente medida en el circuito primario (*amperes*)

V_s es el voltaje medido en el circuito secundario (*volts*)

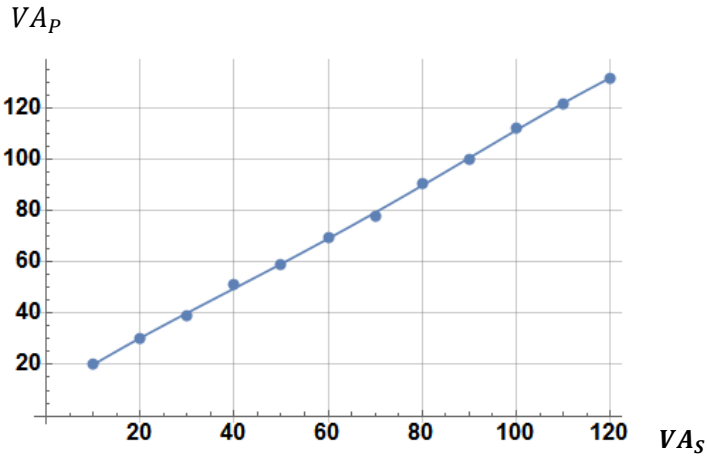
I_s es la corriente medida en el circuito secundario (*amperes*)

P_s es la potencia real medida en el circuito secundario (*watts*)

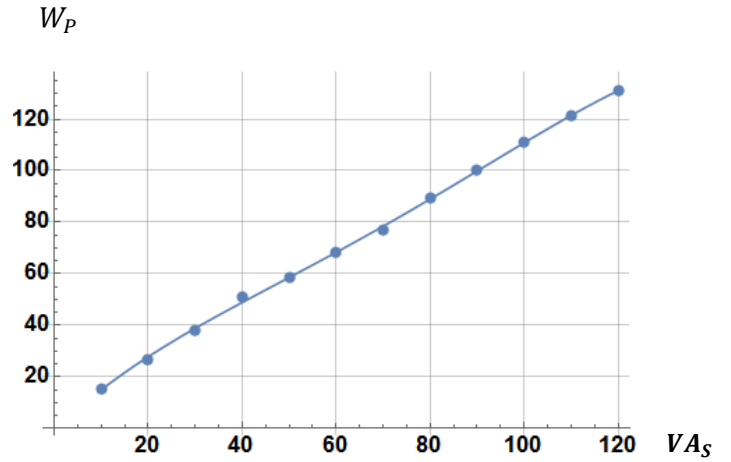
RV es la regulación de voltaje (respecto al circuito secundario) (%)

η es la eficiencia del transformador (%)

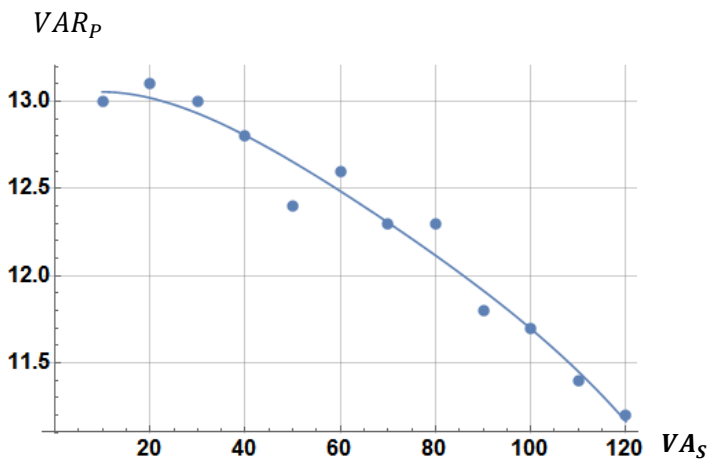
En la tabla T12 se omite el valor de la carga por cuestiones de espacio, pero puede obtenerse fácilmente dividiendo el voltaje V_s entre la corriente I_s medidos en el secundario puesto que la carga es únicamente resistiva. A continuación, se muestran algunas gráficas resumiendo los resultados obtenidos en la tabla T12. Las gráficas se realizan en Wolfram Matemática 10.0 por medio de aproximación de funciones:



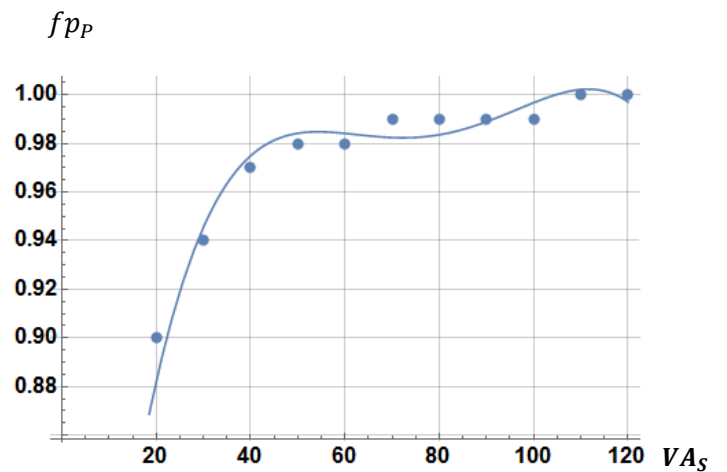
G5a) RELACIÓN ENTRE LA VARIACIÓN DE CARGA EN EL SECUNDARIO Y LA POTENCIA APARENTE PRIMARIA



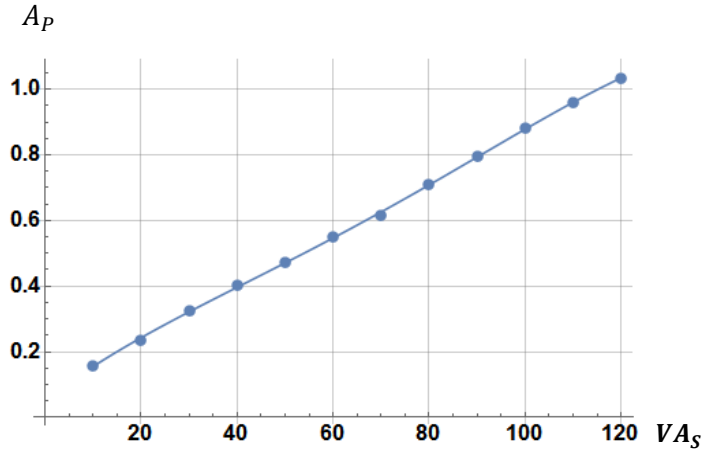
G5b) RELACIÓN ENTRE LA VARIACIÓN DE CARGA EN EL SECUNDARIO Y LA POTENCIA REAL PRIMARIA



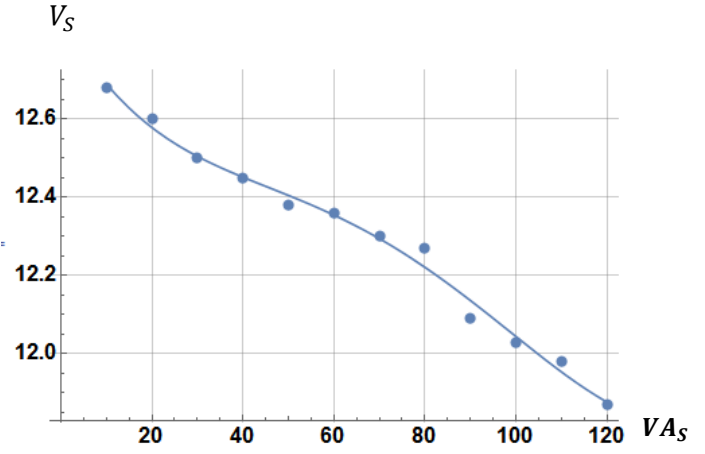
G5c) RELACIÓN ENTRE LA VARIACIÓN DE CARGA EN EL SECUNDARIO Y LA POTENCIA REACTIVA PRIMARIA



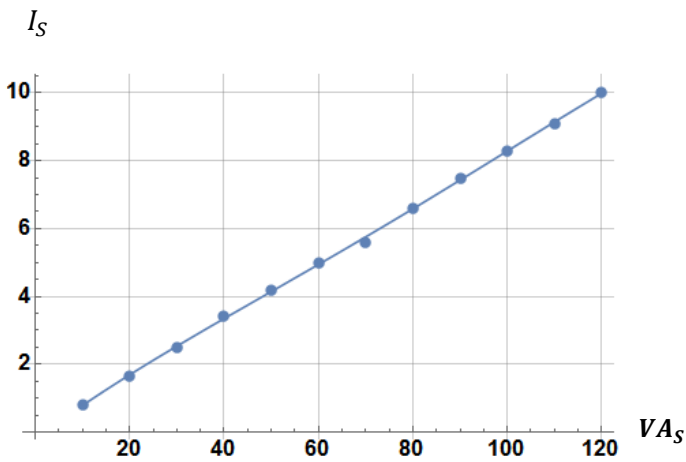
G5d) RELACIÓN ENTRE LA VARIACIÓN DE CARGA EN EL SECUNDARIO Y EL FACTOR DE POTENCIA PRIMARIO



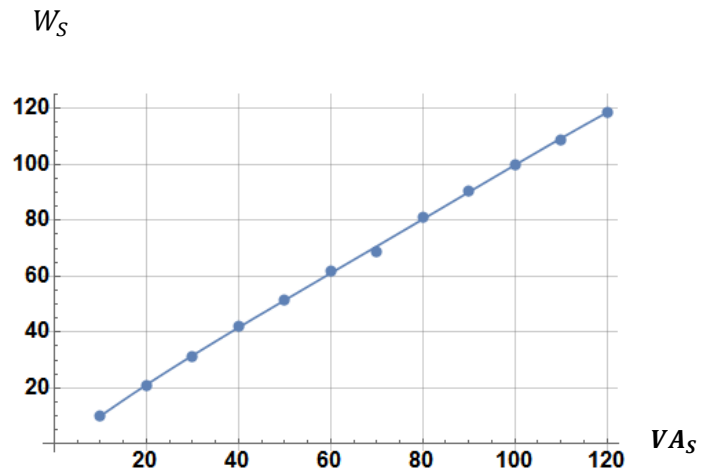
G5e) RELACIÓN ENTRE LA VARIACIÓN DE CARGA EN EL SECUNDARIO Y LA CORRIENTE PRIMARIA



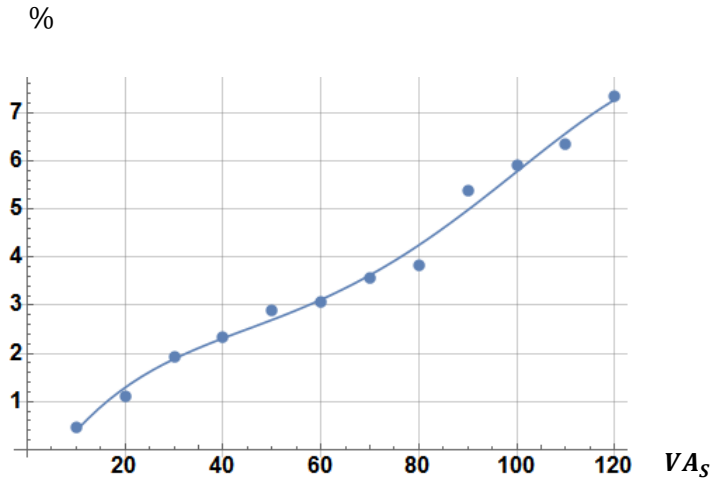
G5f) RELACIÓN ENTRE LA VARIACIÓN DE CARGA Y EL VOLTAJE EN EL SECUNDARIO



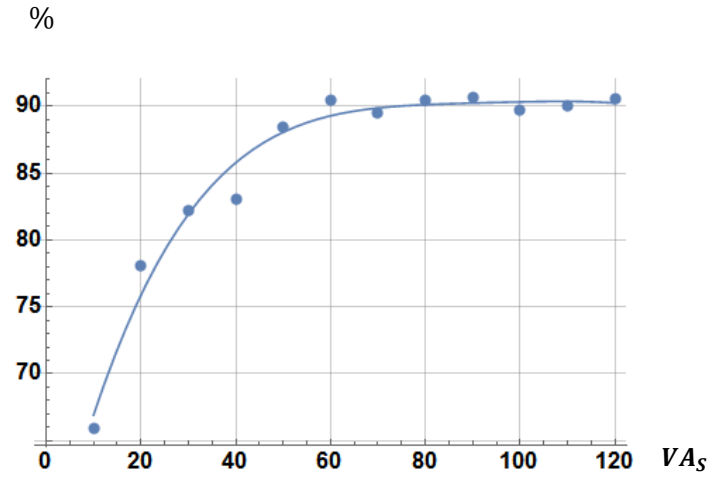
G5g) RELACIÓN ENTRE LA VARIACIÓN DE CARGA Y LA CORRIENTE EN EL SECUNDARIO



G5h) RELACIÓN ENTRE LA VARIACIÓN DE CARGA Y LA POTENCIA EN EL SECUNDARIO



G5i) RELACIÓN ENTRE LA VARIACIÓN DE CARGA Y LA REGULACIÓN DE VOLTAJE EN EL SECUNDARIO



G5j) RELACIÓN ENTRE LA VARIACIÓN DE CARGA Y LA EFICIENCIA DEL TRANSFORMADOR

GRÁFICAS G5 a)-j)

4.8 Análisis de pruebas

En la sección 3.1 se describe detalladamente el algoritmo a seguir para construir un transformador seguro y funcional. En este caso en particular se diseña y construye un transformador con las características descritas en la sección 3.9. En el capítulo 4 se realizan pruebas sobre este primer prototipo. La prueba a plena carga (sección 4.3) muestra resultados interesantes:

<i>Prueba</i>	<i>v/t</i>	<i>h</i>	<i>S_p</i>	<i>Q_p</i>	<i>P_p</i>	<i>f.p.</i>	<i>V_p</i>	<i>V_s</i>	<i>I_p</i>	<i>I_s</i>	<i>P_s</i>	<i>η</i>	<i>RV</i>
FL	0.5	3.9	102	46.4	90.8	0.89	126.2	12.08	0.807	6.66	80.4	88.5	3.39

TABLA T8: RESULTADOS DE PRUEBA A PLENA CARGA

Los elementos más importantes a notar en la tabla T8 son el hecho de que la eficiencia η y la regulación de voltaje RV cumplen con las especificaciones eléctricas de diseño propuestas inicialmente (sección 3.3). De igual forma la densidad de corriente para el circuito primario sería $2.49 \frac{A}{mm^2}$ mientras que resultaría en $2.01 \frac{A}{mm^2}$ para el circuito secundario (ambas menores que la densidad de corriente teórica propuesta de $2.5 \frac{A}{mm^2}$). La caída de tensión en el circuito primario es de 1.01% respecto al voltaje de alimentación (127 V).

Sin embargo, se decide modificar el primer prototipo, aumentando el número de vueltas de las bobinas (reduciendo la relación de $\frac{volts}{vuelta}$ y con esto aumentar la fuerza magnetomotriz del circuito [utilizar un mayor punto de densidad de flujo magnético respecto a la curva de saturación del materia]). En la sección 4.4 se realizan nuevamente las pruebas. Reconsidérese la tabla T10:

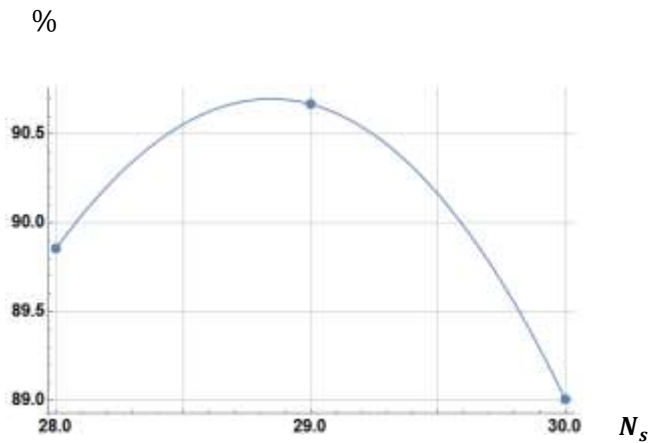
PRUEBA A PLENA CARGA

Número de vueltas	TRANSFORMADOR 80 VA, 127/12 V, 0.4 $\frac{volts}{vuelta}$											
	h	S_p	Q_p	P_p	$f \cdot p$	I_p	V_{pp}	I_s	V_s	P_s	η	RV
30	4.12	93.6	11.6	92.8	0.99	0.739	127	6.66	12.51	83.32	89.78	4.95
29	4.12	90.2	11.7	89.2	0.99	0.712	127	6.66	12.28	81.78	91.68	3.75
28	4.12	88.1	12.1	87.3	0.99	0.693	127	6.66	11.78	78.45	89.86	4.75

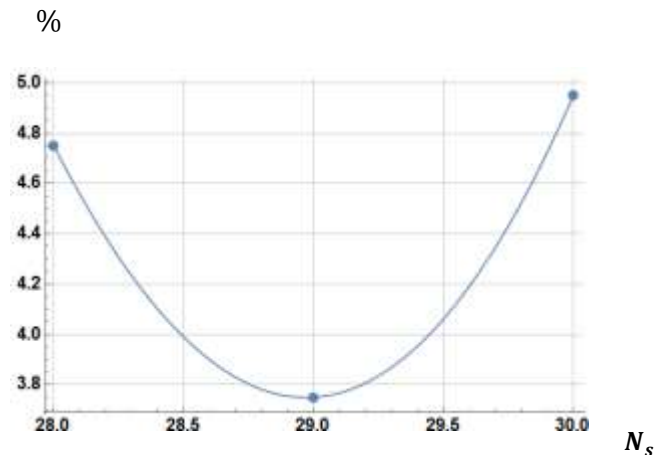
TABLA T10: RESULTADOS DE PRUEBA A PLENA CARGA PARA PROTOTIPO MODIFICADO. SE CONSIDERA UNA VARIACIÓN DE 28 A 30 VUELTAS PARA LA BOBINA SECUNDARIA

La tabla T10 muestra los resultados del segundo prototipo considerando una variación de vueltas en la bobina secundaria. Como puede observarse en los gráficos posteriores (ver sección 4.4) la potencia aparente, potencia real, corriente y voltaje aumentan con el incremento del número de vueltas (mientras que la

potencia reactiva disminuye). Sin embargo, la relación más interesante se observa en las gráficas G2)g y G2)h respecto a la regulación de voltaje y la eficiencia:



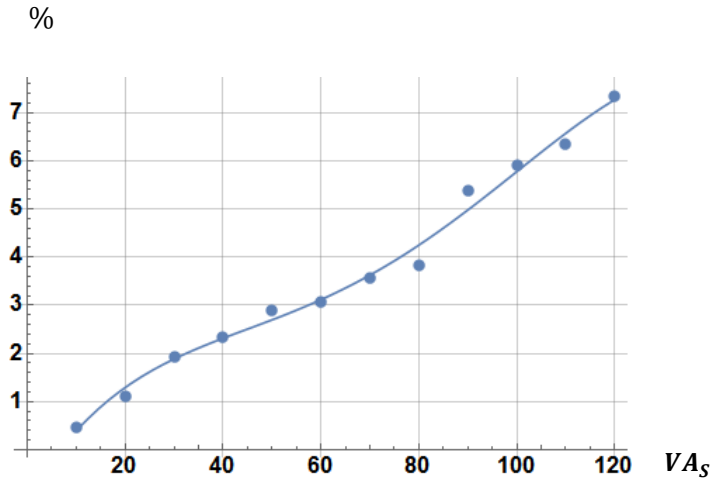
G2)g) RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL SECUNDARIO Y LA EFICIENCIA DEL TRANSFORMADOR



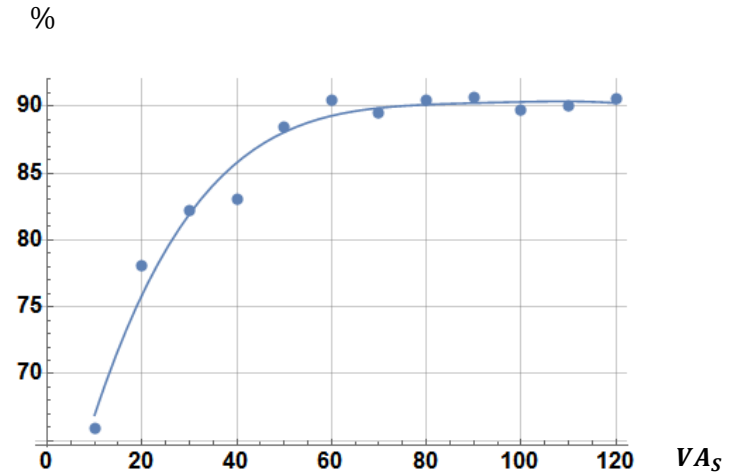
G2)h) RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL SECUNDARIO Y LA REGULACIÓN DEL VOLTAJE DEL TRANSFORMADOR

De los gráficos anteriores es fascinante notar que al considerar 29 vueltas para la bobina secundaria se visualiza una especie de “punto óptimo” tanto para la eficiencia como para la regulación de voltaje. Por lo tanto el transformador funcionará de forma más efectiva al considerar un ajuste de 29 vueltas para la bobina secundaria. Se realiza la prueba de cortocircuito para terminar de caracterizar el transformador y finalmente se presentan las características del prototipo final en la sección 4.5.

Otras pruebas que vale la pena destacar son las presentadas en la sección 4.7 en donde hace variar la carga del transformador (baja carga, plena carga y sobrecarga). En dichas pruebas como es de esperarse, la potencia aparente, la potencia real y la corriente incrementan con el aumento de la carga a la cual se conecta el transformador, contrariamente a lo que ocurre con la potencia reactiva, la cual disminuye. Al considerar una baja carga el factor de potencia permanece bajo (en el lado primario), hasta que se consideran cargas iguales o superiores 60 VA. Las relaciones más importantes en estas pruebas son las de regulación de voltaje y eficiencia mostrados en las gráficas G5)i y G5)j):



G5i) RELACIÓN ENTRE LA VARIACIÓN DE CARGA Y LA REGULACIÓN DE VOLTAJE EN EL SECUNDARIO



G5j) RELACIÓN ENTRE LA VARIACIÓN DE CARGA Y LA EFICIENCIA DEL TRANSFORMADOR

De nuevo es posible destacar una especie de punto óptimo tanto como para la regulación de voltaje como la eficiencia (el cual se encuentra en el rango de 80 VA-90 VA). Entonces, se comprueba que pese a que los transformadores pueden operar a distintas cargas, únicamente logran operar de forma óptima bajo las condiciones sobre las que se diseñan. Sin embargo, también es posible afirmar que el transformador puede operar en un estado de sobrecarga hasta los 120 VA, pues en el rango de 80 VA a 120 VA la eficiencia se mantiene casi constante (existen pocas pérdidas, por lo que es de suponer que existe bajo calentamiento), además de que el alambre de cobre magneto en la bobina primaria (calibre 22 AWG) puede soportar una corriente máxima de 3.1 A mientras que el alambre magneto de la bobina secundaria (calibre 12 AWG) puede soportar una corriente máxima de 33 A (obviamente la densidad de corriente sería mayor que la propuesta en el diseño inicial). Si se desea exponer el transformador a condiciones de sobrecarga también sería necesario considerar hacer ajustes para arreglar la regulación de voltaje (esto puede ser posible agregando algunas vueltas extras en la bobina secundaria, vigilado claro, todos los demás parámetros). De acuerdo a los resultados, el transformador parece tener más problemas operando a baja carga, pues pese a que

la regulación de voltaje está bajo control, la eficiencia tiende a disminuir demasiado lo que señala un considerable calentamiento en el dispositivo.

En la sección 4.6 se realizan las pruebas para obtener el máximo incremento de temperatura. El incremento promedio de temperatura se obtiene en las ecuaciones (70) y (73) para las bobinas primaria y secundaria respectivamente:

$$T_P = \frac{(3.7 \Omega - 3.4 \Omega)}{(3.4 \Omega)} (234.5 \text{ }^\circ\text{C} + 22.8 \text{ }^\circ\text{C}) + 22.8 \text{ }^\circ\text{C} = 45.50 \text{ }^\circ\text{C} \quad (70)$$

$$T_S = \frac{(0.3 \Omega - 0.2 \Omega)}{(0.2 \Omega)} (234.5 \text{ }^\circ\text{C} + 22.8 \text{ }^\circ\text{C}) + 22.8 \text{ }^\circ\text{C} = 151.45 \text{ }^\circ\text{C} \quad (73)$$

Reconsiderése la tabla T3 expuesta en la sección 2.12.3:

Insulation system temperature class (°C)	Winding hottest-spot temperature rise (°C)	Average winding temperature rise by resistance (°C)
130	90	75
155	115	95
180	140	115
200	160	135
220	180	150

TABLA T3: LÍMITES DE TEMPERATURA PARA BOBINAS DE TRANSFORMADORES SECOS A POTENCIA CONTINUA [17]

Considerando la tabla T3 es posible observar que considerando un aislamiento para 200 °C, no se recomienda exceder un incremento promedio de temperatura de 135 °C. El máximo incremento promedio de temperatura para la bobina primaria es de 45.50 °C (debajo del límite recomendado) mientras que el máximo incremento promedio de temperatura para la bobina secundaria es de 151.45 °C (superior al límite recomendado). Sin embargo, la norma [17] especifica que es posible exceder

los límites recomendados siempre y cuando se demuestre mediante pruebas que el aislamiento puede soportar el incremento de temperatura.

La ecuación (72) y (75) muestra el máximo incremento de temperatura para la bobina primaria y secundaria respectivamente:

$$T_{MP} = 21.1\text{ }^{\circ}\text{C} + 15\text{ }^{\circ}\text{C} + 30\text{ }^{\circ}\text{C} = 66.1\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (72)$$

$$T_{MS} = 127.05\text{ }^{\circ}\text{C} + 15\text{ }^{\circ}\text{C} + 30\text{ }^{\circ}\text{C} = 172.05\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (75)$$

Los máximos incrementos de temperatura para las bobinas se obtuvieron al asegurarse de que el transformador alcanzara una temperatura estable (su máxima temperatura de operación nominal).

El alambre de cobre utilizado para las bobinas soporta una temperatura de 200 °C por lo que es posible afirmar que el transformador soporta el máximo incremento de temperatura sin que exista un deterioro en sus conductores

Capítulo V. Conclusiones y trabajos futuros

5.1 Conclusiones

Se ha confirmado a lo largo de esta investigación que no existe un diseño fijo para la construcción de un transformador y en general para ninguna máquina eléctrica. Sin embargo existen múltiples posibilidades y caminos a seguir para lograr dicho cometido. Múltiples autores e investigadores han propuesto y participado en las ya mencionadas metodologías para el diseño, cada una varía de acuerdo a su aplicación, los materiales disponibles, los parámetros que deben cumplirse así como la experiencia y conocimientos de los mismos diseñadores.

En este trabajo de investigación se propuso una metodología para el diseño y construcción de transformadores de baja potencia, en específico un transformador de 80 VA. La metodología descrita en esta tesis sigue la llamada “metodología clásica” para el diseño de transformadores, es decir, se consideran ciertos parámetros iniciales que el prototipo debe cumplir. Se siguió la metodología propuesta (descrita de forma clara en el Capítulo 3), se construyó el transformador y se realizaron las pruebas pertinentes.

El transformador de 80 VA cumplió con todos los requisitos establecidos en la etapa de diseño, destacando la regulación de voltaje de 3.75 %, la cual es mucho menor que el límite máximo de 5 %, así como la eficiencia de 91.68 %, mucho mayor que el requisito mínimo de 85 %.

Después de la construcción y caracterización del equipo, al transformador se le realizaron pruebas para observar su comportamiento ante variación de la carga, se verificó el hecho de que los transformadores solamente operan de forma ideal dentro de los parámetros para los cuales se diseñan, aunque existe la posibilidad de hacerlos operar fuera de los mismos (por periodos cortos de preferencia) sobre todo en un estado de sobrecarga. También se observó que con una pequeña

variación de los devanados (diferente número de vueltas y calibre de conductor), el transformador podría ser fácilmente de una potencia más elevada. Entonces se puede concluir que la metodología es adecuada para el diseño y construcción de transformadores de potencias menores a 120 VA.

5.2 Trabajos futuros

En este trabajo se ha desarrollado y validado una metodología para el diseño y construcción de transformadores monofásicos menores a 120 VA, sin embargo esta metodología podría ser implementada a transformadores de mayor capacidad.

El objetivo principal del trabajo fue obtener un transformador que cumpla con los requerimientos de diseño, sin embargo existen cuestiones que no fueron incluidas en este proyecto. La más notoria es el hecho de que se busca un modelo funcional pero no un modelo optimizado del transformador, es decir no se busca el punto en el cual el transformador operará de la forma más eficiente y segura reduciendo sus costos de construcción (reducir el tamaño del núcleo, considerar otros materiales ferromagnéticos para el mismo, modificar las dimensiones de las bobinas, etc.). La metodología propuesta aquí queda abierta para futuras consideraciones y modificaciones.

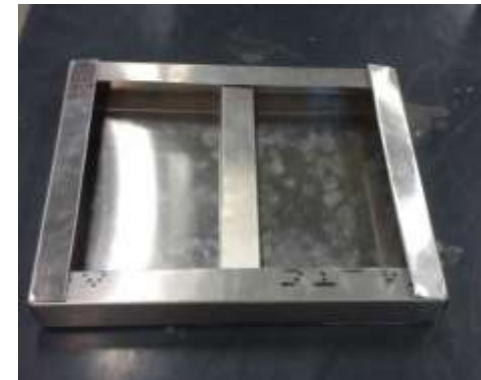
ANEXO A. Calibres de alambre magneto

A continuación se presenta una tabla con las características del material conductor de cobre utilizado en la construcción de las bobinas que conformaron los prototipos diseñados y probados en esta investigación. Recuérdese que el alambre utilizado fue marca VIAKON con una resistencia térmica de 200 °C

Calibre	Alambre Desnudo		Capa Sencilla			Capacidad de corriente (A)	
	Diámetro Nominal	Peso total aproximado	Mínimo Incremento	Máximo Diámetro	Longitud Aproximada	155 °C	200 °C
AWG	mm	kg/km	mm	mm	m/kg	155 °C	200 °C
12	2.052	29.4	-	-	-	22	33
22	0.643	2.89	0.028	0.686	341.1	2.1	3.1

ANEXO B. DISEÑO MECÁNICO

A continuación se presentan los planos utilizados para elaboración de las partes mecánicas que conforman el transformador, diseñadas para protección y presentación del mismo. Los planos fueron realizados con la ayuda de AutoCAD y Solid Works.





UABC

ECITEC

INGENIERÍA ELÉCTRICA

NOTA: TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

HZ	60	VA	80
H.V AMPS	0.712	H.V	127
L.V AMPS	6.66	L.V	12

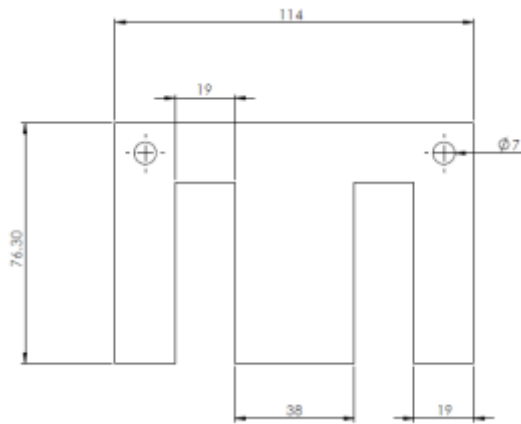


LÁMINA "E"

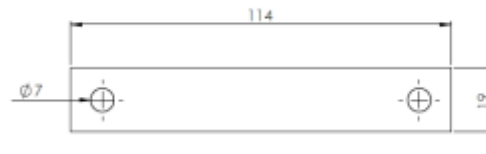
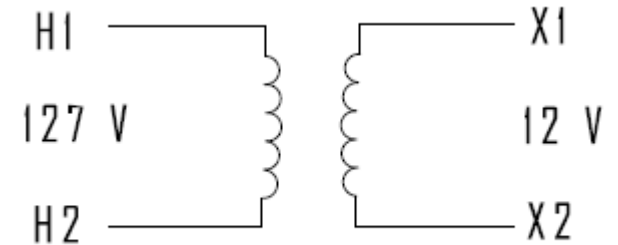


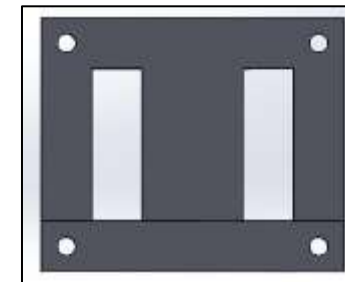
LÁMINA "I"



ANEXO B.1 - APILAMIENTO DE LÁMINAS PARA NÚCLEO



ALTURA DE APILAMIENTO: 32 MM





UABC

ECITEC

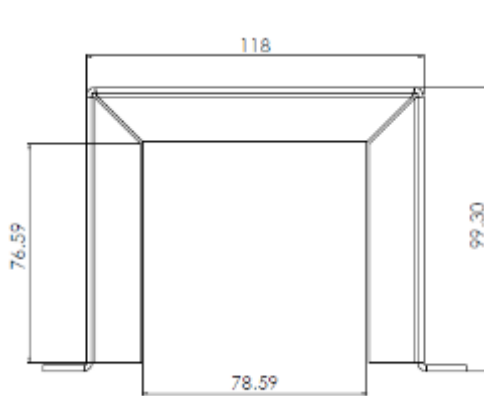
INGENIERÍA ELÉCTRICA

NOTA: TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS

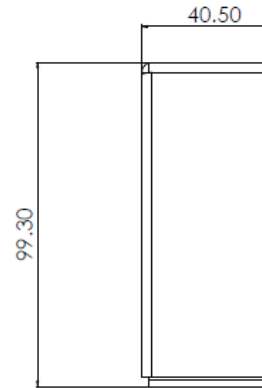
TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

HZ	60
H.V AMPS	0.712
L.V AMPS	6.66

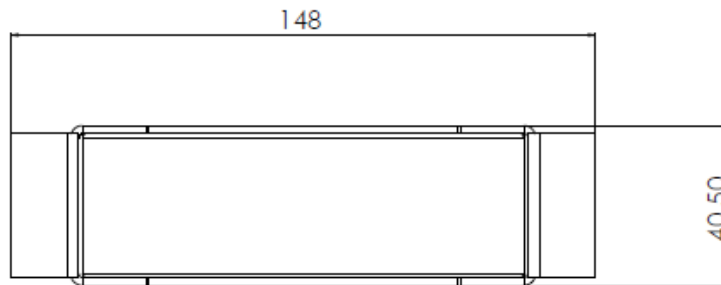
VA	80
H.V	127
L.V	12



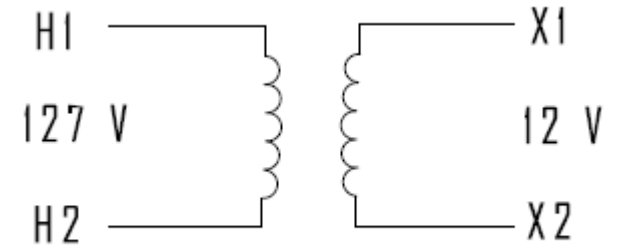
VISTA FRONTAL



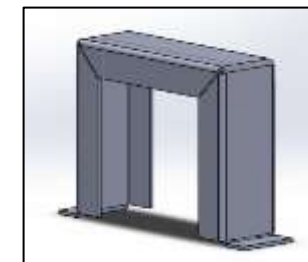
VISTA LATERAL



VISTA SUPERIOR



ANEXO B.2 COBERTURA SUPERIOR DEL TRANSFORMADOR





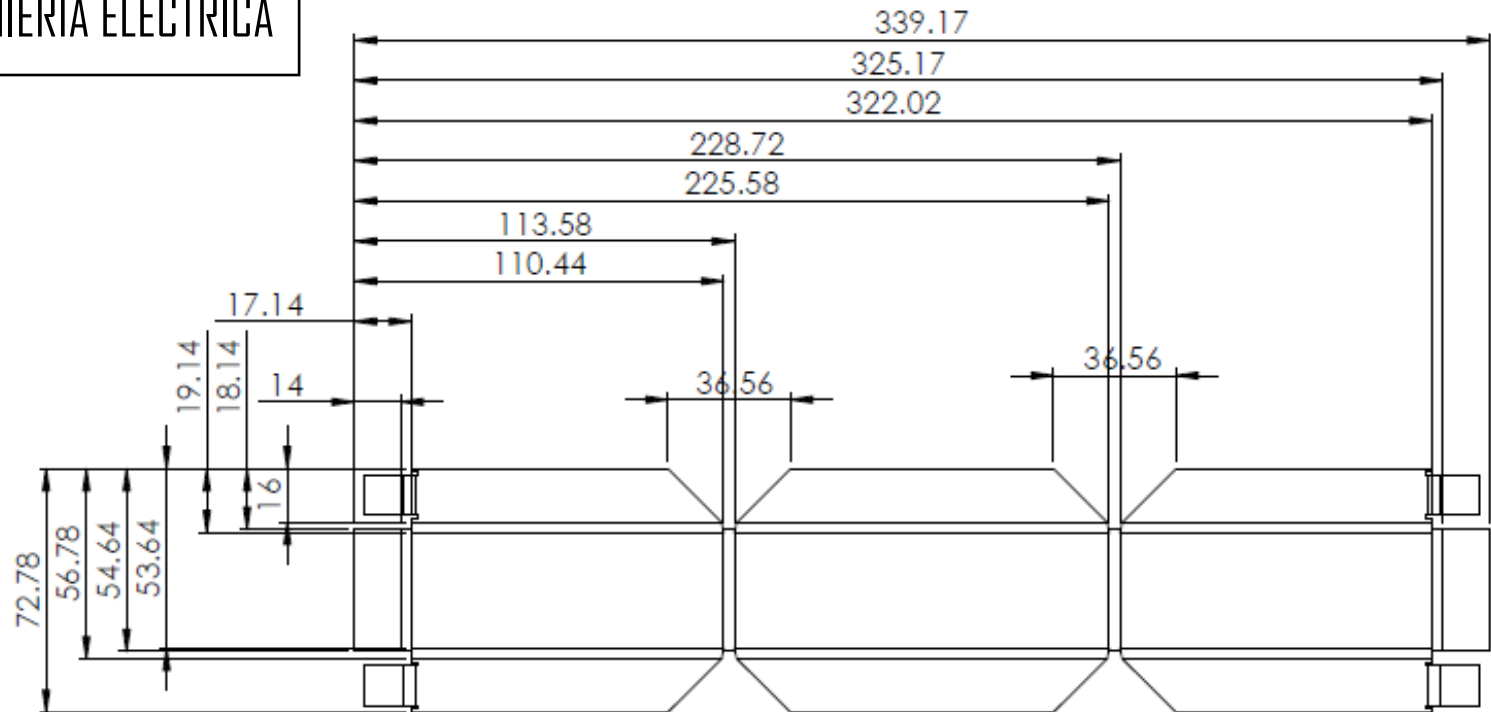
UABC

ECITEC

INGENIERÍA ELÉCTRICA

nota: TODAS LAS
MEDIDAS EN MILÍMETROS

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO



ANEXO B.3 – GEOMETRÍA DE LÁMINA PARA CONSTRUCCIÓN DE COBERTURA SUPERIOR

La cobertura superior está formada por una delgada lámina de aluminio. Para cortar dicha lámina se utilizan pinzas de corte y posteriormente con la ayuda de una dobladora industrial se moldea para formar la estructura final mostrada en el ANEXO 2.1



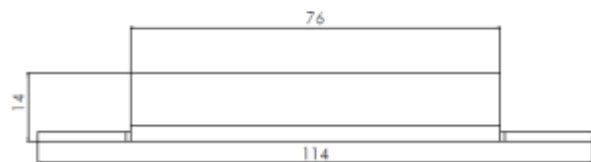
UABC
 ECITEC
 INGENIERÍA ELÉCTRICA

NOTA: TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS

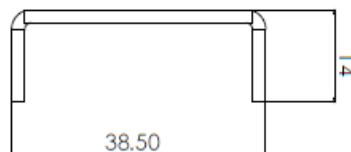
TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

HZ	60
H.V AMPS	0.712
L.V AMPS	6.66

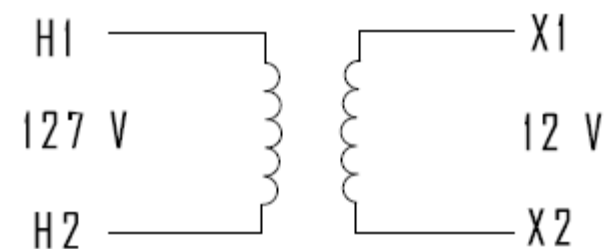
VA	80
H.V	127
L.V	12



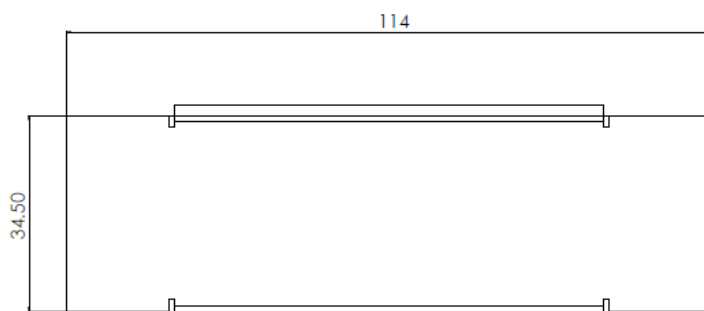
VISTA FRONTAL



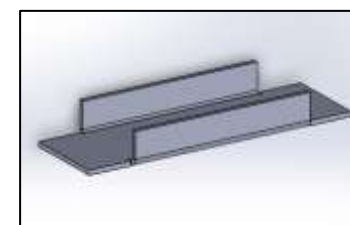
VISTA LATERAL



ANEXO B.4 COBERTURA INFERIOR DEL TRANSFORMADOR



VISTA SUPERIOR





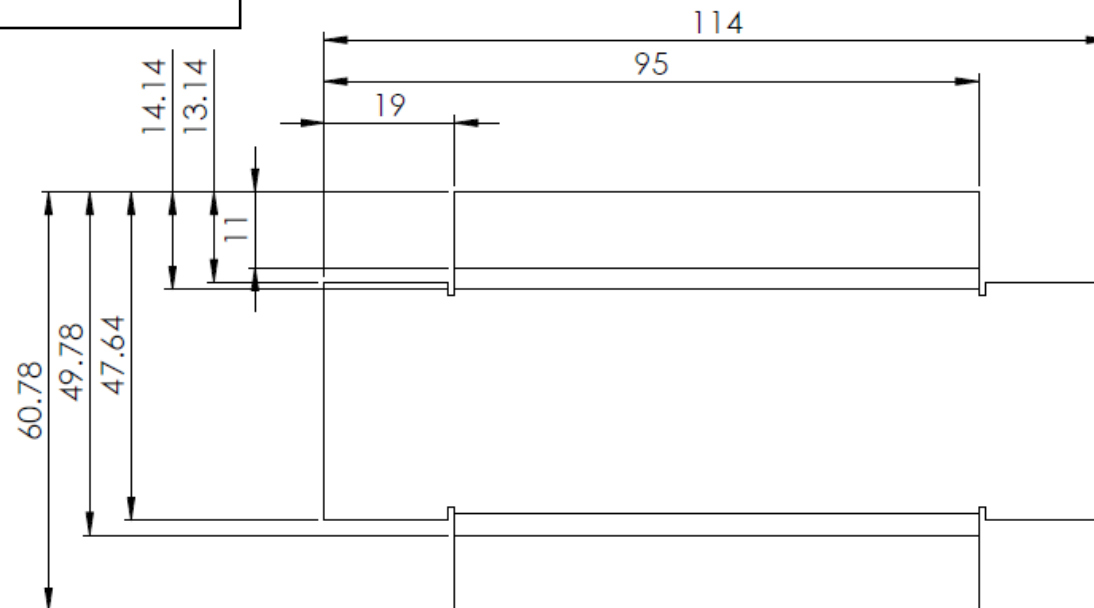
UABC

ECITEC

INGENIERÍA ELÉCTRICA

nota: TODAS LAS
MEDIDAS EN MILÍMETROS

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO



ANEXO B.5 – GEOMETRÍA DE LÁMINA PARA CONSTRUCCIÓN DE
COBERTURA INFERIOR

La cobertura inferior está formada por una delgada lámina de aluminio. Para cortar dicha lámina se utilizan pinzas de corte y posteriormente con la ayuda de una dobladora industrial se moldea para formar la estructura final mostrada en el ANEXO 2.3

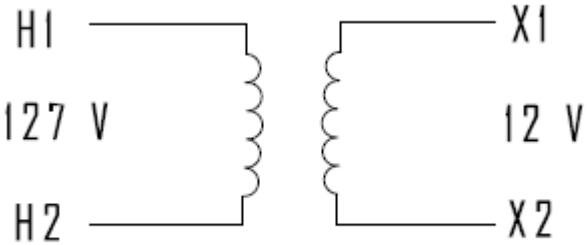


UABC
 ECITEC
 INGENIERÍA ELÉCTRICA

TODAS LA MEDIDAS EN
 MILÍMETROS


TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

HZ	60	VA	80
H.V AMPS	0.712	H.V	127
L.V AMPS	6.66	L.V	12



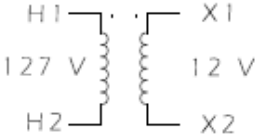
TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

VA	80	HZ	60
H.V	127	H.V AMPS	0.712
L.V	12	L.V AMPS	6.66



Z / P.U			
Rc	15.69	Xm	6.21
Req	0.046	Xeq	0.005

ECITEC
 INGENIERÍA ELÉCTRICA



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	
DR. ALLEN ALEXANDER CASTILLO BARRÓN	
HÉCTOR DAVID RAMÍREZ GONZÁLEZ	

150

ANEXO B.6 – PLACA DE
 CARACTERÍSTICAS



UABC

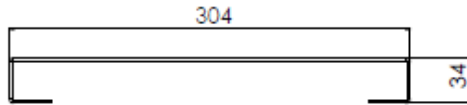
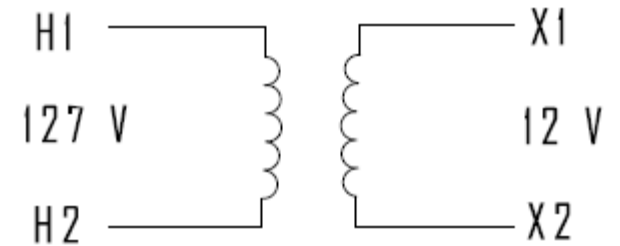
ECITEC

INGENIERÍA ELÉCTRICA

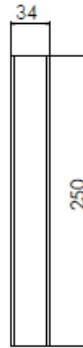
NOTA: TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

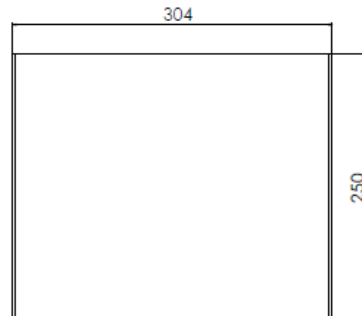
HZ	60	VA	80
H.V AMPS	0.712	H.V	127
L.V AMPS	6.66	L.V	12



VISTA FRONTAL

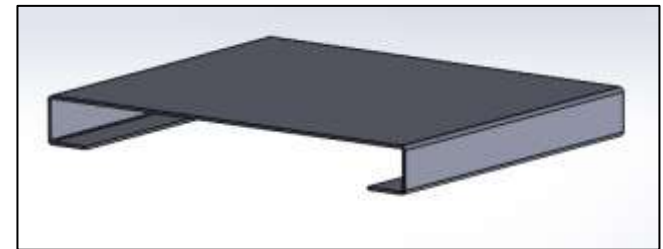


VISTA LATERAL



VISTA SUPERIOR

ANEXO B.7 BASE PRINCIPAL PARA EL TRANSFORMADOR





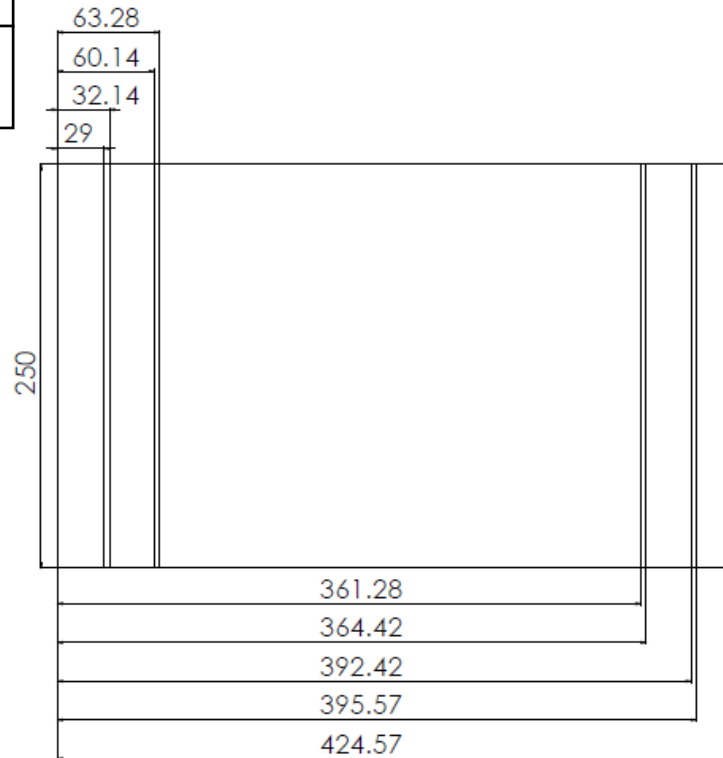
UABC

ECITEC

INGENIERÍA ELÉCTRICA

nota: TODAS LAS
MEDIDAS EN MILÍMETROS

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO



ANEXO B.8 – GEOMETRÍA DE LÁMINA PARA CONSTRUCCIÓN DE BASE

La Base está formada por una delgada lámina de aluminio. Para cortar dicha lámina se utilizan pinzas de corte y posteriormente con la ayuda de una dobladora industrial se moldea para formar la estructura final mostrada en el ANEXO 4.1.

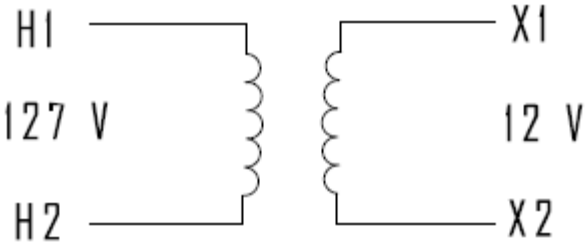


UABC
 ECITEC
 INGENIERÍA ELÉCTRICA

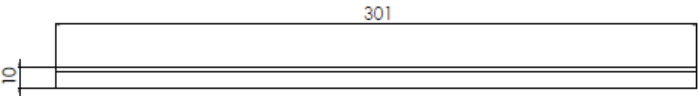
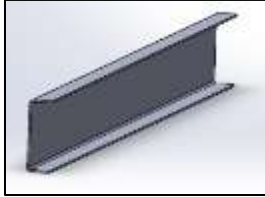
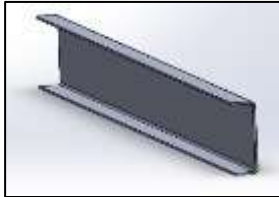
NOTA: TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

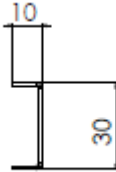
HZ	60	VA	80
H.V AMPS	0.712	H.V	127
L.V AMPS	6.66	L.V	12



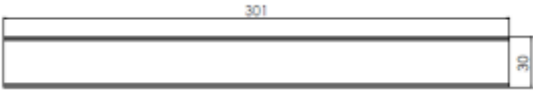
ANEXO B.9 CUBIERTAS LATERALES DE BASE



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



VISTA SUPERIOR



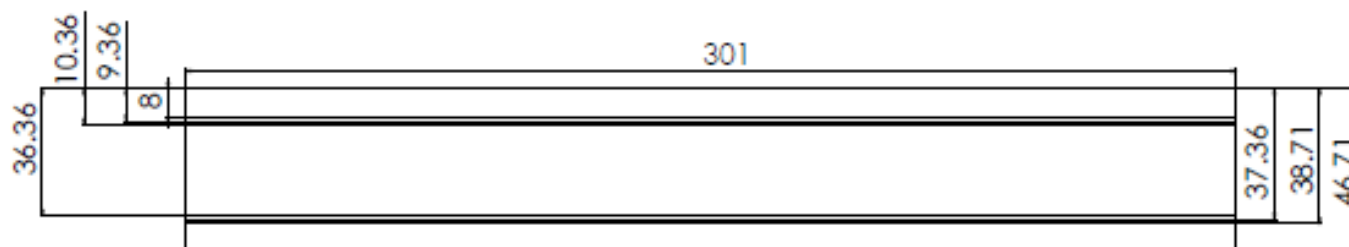
UABC

ECITEC

INGENIERÍA ELÉCTRICA

nota: TODAS LAS
MEDIDAS EN MILÍMETROS

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO



ANEXO B.10 – GEOMETRÍA DE LÁMINA PARA CONSTRUCCIÓN DE
CUBIERTAS LATERALES PARA BASE

Las cubiertas laterales están formadas por una delgada lámina de aluminio. Para cortar dicha lámina se utilizan pinzas de corte y posteriormente con la ayuda de una dobladora industrial se moldea para formar la estructura final mostrada en el ANEXO 4.3



UABC

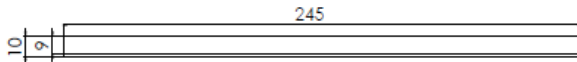
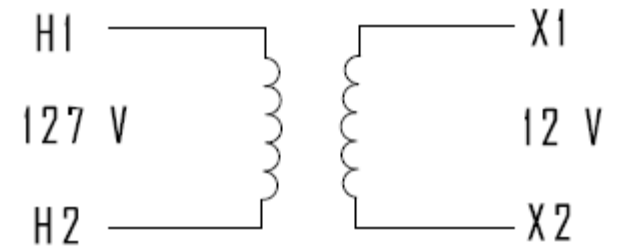
ECITEC

INGENIERÍA ELÉCTRICA

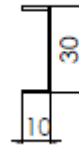
NOTA: TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

HZ	60	VA	80
H.V AMPS	0.712	H.V	127
L.V AMPS	6.66	L.V	12

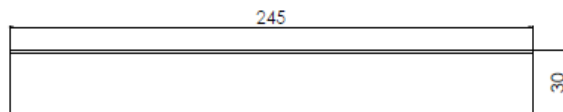
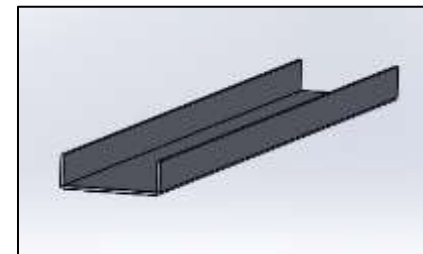


VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL

ANEXO B.11 - SOPORTE CENTRAL



VISTA SUPERIOR



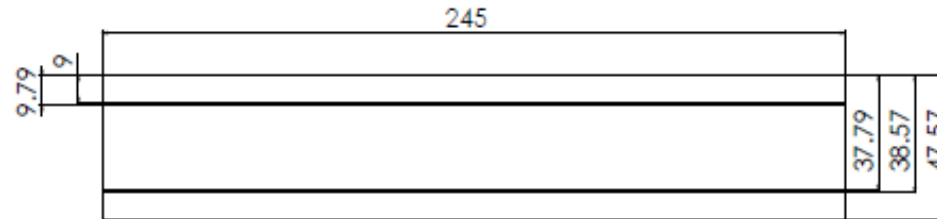
UABC

ECITEC

INGENIERÍA ELÉCTRICA

nota: TODAS LAS
MEDIDAS EN MILÍMETROS

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO



ANEXO B.12 – GEOMETRÍA DE LÁMINA PARA CONSTRUCCIÓN DE
SOPORTE CENTRAL

El soporte central está formado por una delgada lámina de aluminio. Para cortar dicha lámina se utilizan pinzas de corte y posteriormente con la ayuda de una dobladora industrial se moldea para formar la estructura final mostrada en el ANEXO 4.5



UABC

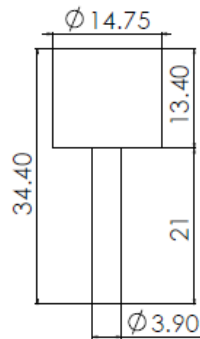
ECITEC

INGENIERÍA ELÉCTRICA

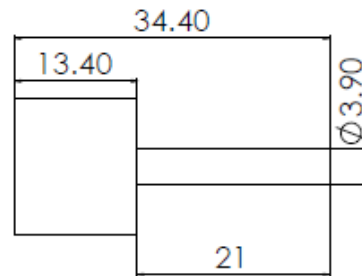
NOTA: TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

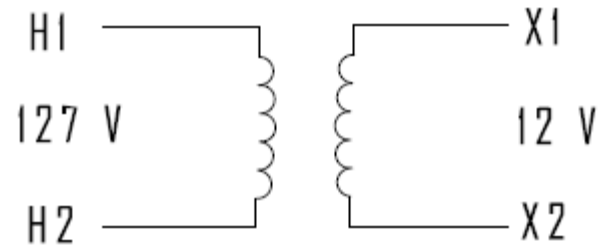
HZ	60	VA	80
H.V AMPS	0.712	H.V	127
L.V AMPS	6.66	L.V	12



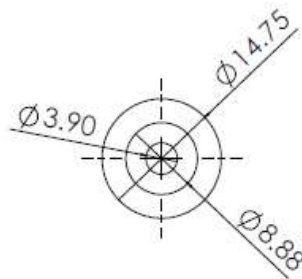
VISTA FRONTAL



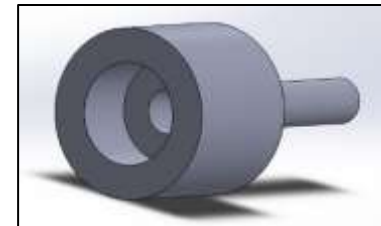
VISTA LATERAL



ANEXO B.13 CONECTORES PARA CONEXIÓN DE TERMINALES DE VOLTAJE Y DERIVACIÓN A TIERRA



VISTA SUPERIOR





UABC

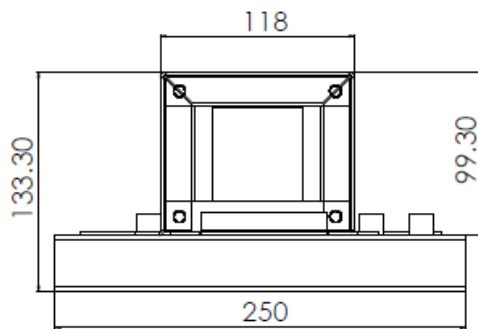
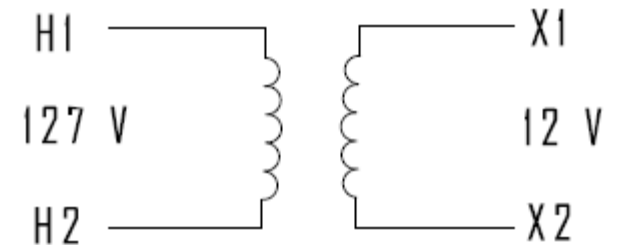
ECITEC

INGENIERÍA ELÉCTRICA

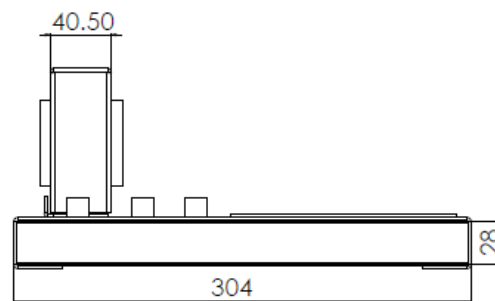
NOTA: TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

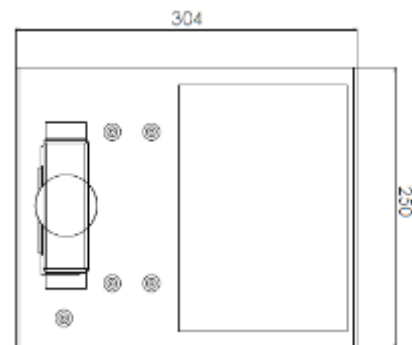
HZ	60	VA	80
H.V AMPS	0.712	H.V	127
L.V AMPS	6.66	L.V	12



VISTA FRONTAL

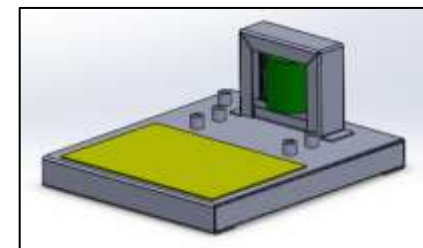


VISTA LATERAL



VISTA SUPERIOR

ANEXO B.14 - ENSAMBLAJE COMPLETO





UABC

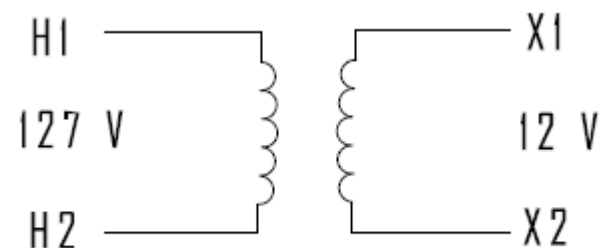
ECITEC

INGENIERÍA ELÉCTRICA

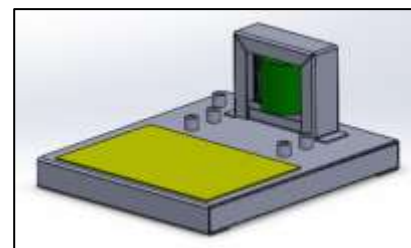
NOTA: TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

HZ	60	VA	80
H.V AMPS	0.712	H.V	127
L.V AMPS	6.66	L.V	12



ANEXO B.15 - TRANSFORMADOR CONSTRUIDO



TRANSFORMADOR CONCLUIDO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

DR. ALLEN ALEXANDER CASTILLO BARRÓN
HÉCTOR DAVID RAMÍREZ GONZÁLEZ

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. R. Lucas, "Historical Development of the transformer", The Institution of Electrical Engineers, Sri Lanka Centre, pp. 1-15, 14 de noviembre de 2000
- [2] J. W. Coltman, "The Transformer", IEEE Industry Applications Magazine, pp. 8-15, enero- febrero de 2002
- [3] R. A. Serway, *Física Para Ingeniería y Ciencias: Tomo II*, 5ta edición. D.F, México: Mc Graw Hill, 2002
- [4] S. Jeszenszky, "History of Transformers", IEEE Power Engineering Review, pp. 9-12, diciembre de 1996
- [5] J. H. Fleming, *The Alternate Current Transformer in Theory and Practice*, Londres, Inglaterra: "The Electrician" Printing and Publishing Co., 1896
- [6] M. Guarnieri, "Who Invented the Transformer", IEEE Industrial Electronics Magazine, pp. 56-59, diciembre de 2013
- [7] W. M. Flanagan, *Handbook of Transformer Design and Application*, 2da edición, USA: Mc Graw Hill, 1993
- [8] I. Dasgupta, *Design of Transformers*. New Delhi, India: Tata Mc Graw Hill, 2002
- [9] W.T. McLyman, *Transformer And Inductor Design Handbook*, 3ra edición. NY: Marcel Dekker, Inc., 2004
- [10] P.S Bodger y M.C. Liew, "Reverse As-built Transformer Design Method", Department of Electrical and Electronic Engineering, Christchurch, Nueva Zelanda
- [11] Álvarez M. Transformadores. Cálculo fácil de transformadores y autotransformadores monofásico y trifásicos de baja tensión. Barcelona, España Editorial Alfaomega, 2009
- [12] Electric Power Transformer Engineering Handbook, 2da edición, Taylor & Francis Group, Florida, 2007

- [13] S.V Kulkarni y S.A. Khaparde, *Transformer Engineering: Design and Practice*, NY: Marcel Dekker Inc., 2004
- [14] S. J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, 5ta edición. N.Y: McGraw-Hill, 2012
- [15] E. I. Amoiralis et al, "Transformer Design and Optimization a Literature Survey", IEEE Transactions on Power Deliver, Vol. 24, No.4, pp. 1999-2022, Octubre 2009.
- [16] IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants. ANSI/IEEE Std 141-1986. Octubre de 1986
- [17] IEEE Standard for General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers. IEEE Std C57.12.01™-2015. 16 de Febrero de 2015.
- [18] H. Ohanian. *Física para Ingeniería y Ciencias Tomo II*, 3ra edición. España: McGraw Hill, 2009
- [19] E. E. Staff- MIT, *Circuitos Magnéticos y Transformadores*. Editorial Reverté, pp. 14-30
- [20] L. W. Matsch. *Capacitor, Magnetic Circuits, and Transformers*, 1ra edición. Nueva Jersey: Prentice-Hall Inc., 1964
- [21] T. Wildi, *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*, 6ta edición, México: Pearson Educación, 2006
- [22] Temperature Rise. Ultra-K- UK#14. 6 de Abril de 1998
- [23] Low Temperature Rise in Transformers. Hammond Power Solutions Inc. Sin fecha
- [24] IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers. IEEE Std C.57.12.91™-2011. 13 de febrero de 2012
- [25] *Transformer Handbook*. ABB. Suiza. 2004
- [26] H. Njende et al, "Optimized Size Design of Integrated Magnetic Components Using Area Product Approach", ISBN, pp. 1-10, 2005

- [27] P. Huang et al, "Optimal Design and Implementation of High-Voltage High-Power Silicon Steel Core Medium-Frequency Transformer", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 6, pp. 4391-4401, Junio de 2017
- [28] A. A. Adly y S.K. Abd-El-Hafiz, "A performance-oriented power transformer design methodology using multi-objective evolutionary optimization", Journal of Advanced Research, pp. 417-423, 2015
- [29] G.S. Ramana y V. Ramanarayanan, "A modified area- product method for the design of inductors and transformers", J. Indian Inst. Sci., pp. 429-435, Septiembre-Octubre de 2000
- [30] Magnetic, "Ferrite cores catalog", Magnetics, Butler, PA, 1994
- [31] P. L. Dowell, "Effects of eddy currents in transformers windings", IEEE, vol. 113, no. 8, pp. 1387-1394, Agosto de 1966
- [32] Energy Efficient Transformers Technical Data. Class 7400. Schneider Electric. 7400DB0702R07/09. Julio de 2009
- [33] Dry Type Transformers for General Applications. NEMA ST 20-2014. 2014
- [34] N. Buthelezi. (2009). *Power Transformer Specification, Design, Quality, Control and Testing*. [Online]. Disponible: http://www.apua-asea.org/updea/archiv/AtelierCSDurban%202009/Communications/UPDEA%20Scientific%20Committee%20Workshop%20%20Presentation%2018_03_09.pdf
- [35] AK Steel. [Online]. Disponible: <http://www.aksteel.com/>
- [36] J. A. Ebert, "Power Transformer Operation at Over and Underexcitation, Benefits and Consequences", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.15, no.1, p.p 192-197, Enero de 2000