



La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

***Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.***

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE DOS TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS PARA SUMINISTRO TRIFÁSICO EN CONEXIÓN DELTA ABIERTA CON CONTROL DE VOLTAJE MEDIANTE TAPS FIJOS PARA EL LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**KLEBER HERNAN IZA IZA**

**kleberher@hotmail.com**

**DIRECTOR: JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph.D.**

**jesus.jativa@epn.edu.ec**

**Quito, diciembre 2018**

## **AVAL**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado Kleber Hernan Iza Iza, bajo mi supervisión.

---

**JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph.D.**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo Kleber Hernan Iza Iza, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

KLEBER HERNAN IZA IZA

## DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación, se lo dedico a todos los seres importantes y especiales de mi vida.

A Dios por bendecirme y protegerme durante todos los momentos de mi vida.

A mis padres Carlos y Piedad, por ser mi ejemplo de superación, esfuerzo, dedicación y trabajo y que gracias a su amor y apoyo incondicional durante todas las etapas de mi vida permitieron alcanzar mis metas. Los amo con toda mi vida

A mis hermanas Verónica y Lisbeth que siempre me acompañan en todo momento, gracias por su amor y decirle que las quiero con toda mi vida.

A mi abuelita María, por ser mi otro ejemplo de esfuerzo, humildad y trabajo que gracias a su amor y apoyo he logrado una nueva meta en mi vida. La quiero con toda mi vida abuelita Miche.

A mi tía Hilda, por estar en todo momento apoyándome en todas mis decisiones y metas planteadas. Te quiero tía.

A mis abuelitos, tíos, primos y demás miembros de mi familia, que gracias a su apoyo me motivan e impulsan a ser mejor ser humano y profesional con el objetivo de alcanzar siempre mis metas.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por darme una grandiosa familia y permitirme compartir momentos maravillosos cada día de mi vida.

A mis queridos padres, Carlos y Piedad por ser ambos el pilar fundamental en mi vida y mi desarrollo profesional y siempre estar junto a mí y mis hermanas. Gracias a sus esfuerzos y sacrificio permitieron alcanzar una meta más en mi vida. Este logro es para ustedes.

A mis hermanas, Verónica y Lisbeth por estar siempre junto a mí compartiendo buenos y malos momentos que se nos ha presentado y que siempre hemos podido sobrellevar de la mejor forma posible.

A mi abuelita Miche, quien es el pilar fundamental de nuestra familia y estar pendiente siempre de mí. Gracias a su esfuerzo y sacrificio nuestra familia permanece unida y fuerte. Doy gracias a Dios por tenerte y seguirte teniendo junto a nosotros.

A mi tía Hilda, por compartir grandes momentos junto a nuestra familia, por siempre cuidarme y guiarme. Gracias por esas conversaciones y apoyo en las metas cumplidas y por cumplir.

A mis abuelitos, tíos, primos y demás miembros de mi familia que siempre se encontraron muy pendientes de mi formación personal y profesional, motivándome y alentándome con sus consejos para seguir adelante cada día de mi vida.

Al Ing. Rafael Vásquez y cada miembro de su empresa, por abrirme las puertas de su fábrica RVR transformadores y extenderme una mano permitiendo desarrollar este trabajo. Gracias a sus conocimientos y experiencia impartida durante la estancia en su empresa les deseo muchos éxitos.

Al Dr. Jesús Játiva, por sus conocimientos, paciencia e infinita ayuda en la dirección y desarrollo de este proyecto de titulación.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	X
ABSTRACT .....	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos .....	1
1.1.1. Objetivo general .....	1
1.1.2. Objetivos específicos .....	1
1.2 Alcance.....	2
1.3 Problemática.....	2
1.4 Justificación.....	3
2. MARCO TEÓRICO .....	4
2.1 Transformador.....	4
2.1.1 Principio básico de funcionamiento del transformador .....	4
2.2 Partes constructivas del transformador .....	7
2.2.1 Núcleo de material magnético.....	8
2.2.2 Bobinas del transformador .....	9
2.2.3 Aislamiento y enfriamiento de los transformadores.....	10
2.2.4 Cambiador de Taps.....	11
2.2.5 Protecciones .....	13
2.3 Polaridad en un transformador .....	13
2.3.1 Polaridad Sustractiva .....	13
2.3.2 Polaridad Aditiva .....	14
2.4 Circuito Equivalente del transformador.....	14
2.5 Conexiones trifásicas especiales mediante banco de transformadores monofásicos .....	15
2.5.1 Conexión delta abierta o V – V.....	16
2.5.2 Conexión estrella abierta – delta abierta .....	22
2.5.3 Conexión T – T.....	24

2.5.4	Conexión Scott – T.....	26
2.6	Pruebas eléctricas del transformador .....	28
2.6.1	Prueba de medición de la resistencia óhmica de los devanados .....	28
2.6.2	Prueba de medición de la resistencia de aislamiento .....	28
2.6.3	Prueba de polaridad.....	28
2.6.4	Prueba de relación de transformación.....	28
2.6.5	Prueba de circuito abierto .....	28
2.6.6	Prueba de cortocircuito .....	29
2.6.7	Prueba de voltaje aplicado .....	29
2.6.8	Prueba de voltaje inducido .....	30
2.6.9	Prueba de impulso .....	30
2.7	Control de voltaje mediante transformadores con taps .....	31
2.7.1	Control directo de voltaje.....	31
2.7.2	Control inverso de voltaje.....	32
2.7.3	Modelo generalizado de transformadores con taps en las posiciones nominales.....	32
2.7.4	Modelo generalizado de transformadores con taps en diferentes posiciones con respecto a la posición nominal.....	34
3.	DISEÑO DEL TRANSFORMADOR DE NÚCLEO ARROLLADO .....	40
3.1	Método analítico de un transformador monofásico de núcleo arrollado ....	40
3.1.1	Cálculo de la relación voltio/espira.....	40
3.1.2	Cálculo del número de espiras del devanado primario.....	40
3.1.3	Cálculo del número de espiras del devanado secundario .....	41
3.1.4	Sección del núcleo .....	41
3.1.5	Espesor del núcleo.....	42
3.1.6	Corriente del devanado primario .....	44
3.1.7	Corriente del devanado secundario .....	44
3.1.8	Sección y cálculo del calibre del conductor del devanado primario .....	44
3.1.9	Sección y cálculo de calibre del conductor del devanado secundario.....	46
3.1.10	Determinación de los taps.....	46
3.1.11	Cálculo de la altura de las bobinas .....	47
3.1.12	Cálculo de aislamientos .....	49
3.1.13	Cálculo de perímetros o axiales.....	51
3.1.14	Formaleta para la bobina .....	52
3.1.15	Determinación de las dimensiones de frente de la bobina.....	53



3.1.16	Determinación de las dimensiones de los costados de la bobina .....	54
3.1.17	Cálculo de la impedancia del transformador y pérdidas en el cobre....	57
3.1.17.1	Cálculo del peso del cobre.....	57
3.1.17.2	Resistencia óhmica del transformador .....	57
3.1.17.3	Corrección de la temperatura de la resistencia del transformador .....	58
3.1.17.4	Pérdidas en el cobre .....	59
3.1.17.5	Componente resistiva del transformador .....	59
3.1.17.6	Componente reactiva del transformador .....	60
3.1.17.7	Impedancia de cortocircuito .....	60
3.1.18	Dimensiones y pérdidas en el núcleo .....	61
3.1.18.1	Determinación de las dimensiones del núcleo .....	61
3.1.18.2	Volumen del núcleo .....	62
3.1.18.3	Determinación del peso del núcleo .....	63
3.1.18.4	Determinación de las pérdidas en el hierro.....	63
3.1.19	Cálculo de la corriente de excitación .....	64
3.1.20	Corriente de pérdidas en el núcleo .....	65
3.1.21	Corriente de excitación .....	65
3.1.22	Corriente de magnetización .....	65
3.1.23	Norma NTE INEN 2114.....	65
3.2	Cálculo práctico de un transformador monofásico de núcleo arrollado para el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia .....	66
3.2.1	Voltios/espira.....	67
3.2.2	Número de espiras del primario y del secundario .....	67
3.2.3	Sección del núcleo .....	68
3.2.4	Espesor del núcleo.....	68
3.2.5	Profundidad del núcleo.....	68
3.2.6	Número de laminaciones.....	68
3.2.7	Corriente del devanado primario y secundario.....	69
3.2.8	Selección de conductores .....	69
3.2.9	Cálculo de los taps.....	71
3.2.10	Altura de las Bobinas .....	72
3.2.11	Asilamientos de la bobina .....	74
3.2.12	Peso del cobre .....	78
3.2.13	Resistencia óhmica del transformador .....	79
3.2.14	Corrección de la temperatura.....	79

3.2.15	Pérdidas en el cobre .....	80
3.2.16	Impedancia de cortocircuito .....	80
3.2.17	Dimensiones y pérdidas en el núcleo .....	81
3.2.18	Cálculo de la corriente de excitación .....	84
3.2.19	Circuito equivalente .....	86
3.2.20	Resultado de los parámetros del diseño de los transformadores monofásicos .....	93
4.	CONSTRUCCIÓN DE LOS DOS TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS	95
4.1	Proceso de corte y ensamble del núcleo arrollado .....	95
4.1.1	Corte de las dimensiones del núcleo.....	95
4.1.2	Proceso para el montaje del núcleo .....	96
4.2	Construcción de las bobinas.....	99
4.2.1	Fabricación de la formaleta .....	99
4.2.2	Bobinado del devanado de bajo voltaje.....	100
4.2.3	Aislamiento entre bobinas del devanado de alto y bajo voltaje .....	102
4.2.4	Bobinado del devanado alto voltaje .....	103
4.3	Construcción de las estructuras metálicas tanque y prensas .....	105
4.4	Acoplamiento de las bobinas al núcleo .....	105
4.5	Conexiones internas y externas de los transformadores con los cambiadores de taps .....	108
4.6	Conexión delta abierta del banco de transformadores .....	109
5.	PRUEBAS Y RESULTADOS .....	112
5.1	Prueba de relación de transformación .....	112
5.2	Prueba en vacío a los transformadores .....	113
5.3	Prueba de cortocircuito a los transformadores .....	114
5.4	Curva de histéresis y densidad de flujo magnético.....	115
5.5	Prueba de control de voltaje con el banco de transformadores monofásicos en conexión delta abierta .....	122
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	126
6.1	Conclusiones .....	126
6.2	Recomendaciones .....	128
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	129
8.	ANEXOS .....	131
	ANEXO I. Curva para estimar las pérdidas del hierro en el núcleo .....	132
	ANEXO II. Curva para estimar la potencia de excitación .....	133

ANEXO III. Ciclo térmico de recocido para el acero de grano orientado de grado M-4 .....	134
ANEXO IV. Plano eléctrico de las bobinas del transformador con las características correspondientes para su construcción .....	135
ANEXO V. Plano mecánico del tanque o cuba del transformador con las características y dimensiones pertinentes para su construcción .....	136
ANEXO VI. Plano mecánico de las prensas del transformador con las características y dimensiones pertinentes para su construcción .....	137
ANEXO VII. Hoja de pruebas de operación realizadas a los transformadores en la planta industrial RVR transformadores .....	138
ANEXO VIII. Datos para la curva de histéresis .....	139
ANEXO IX. Software para el Diseño de Transformadores Monofásicos Tipo Seco .....	146
ORDEN DE EMPASTADO .....	155

## RESUMEN

El presente estudio técnico trata sobre el diseño y construcción de un banco de dos transformadores monofásicos tipo seco con capacidad individual de 2,5 kVA, con voltajes en el devanado primario y secundario de 220 V. La relación de transformación en el tap nominal es de 1:1, para realizar la conexión en delta abierta. Mediante un mecanismo manual de conmutación de taps fijos ubicado en uno de los devanados se dispone de una variación de  $\pm 5\%$  en pasos de 2,5%. Este proyecto surge de la necesidad de tener un modelo a escala de un SEP que permita realizar prácticas de transformadores trifásicos en conexión delta abierta en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia de la Escuela Politécnica Nacional. La construcción de los transformadores monofásicos permite entender el funcionamiento y operación del banco de transformadores en conexión delta abierta para continuar con el suministro trifásico a la carga.

Los diferentes parámetros calculados en el proceso de diseño deben cumplir con los estándares de las normas establecidas en el diseño de transformadores y de los criterios tomados de la experiencia del fabricante previo a su construcción definitiva.

Además, los valores obtenidos en las diferentes pruebas eléctricas, realizadas tanto de manera individual como aquellos en conexión trifásica delta abierta, permiten verificar la construcción y el correcto funcionamiento de los transformadores a la vez que se constata que tales resultados se encuentran dentro de los valores de las normas.

**PALABRAS CLAVE:** Transformadores monofásicos de núcleo arrollado, diseño y construcción de transformadores tipo seco, banco de transformadores en conexión delta abierta, cambiador de taps, pruebas de cortocircuito y circuito abierto.

## ABSTRACT

The present technical study deals with the design and construction of a bank of two single-phase dry type transformers with an individual capacity of 2.5 kVA, with voltages in the primary and secondary winding of 220 V. The transformation ratio in the nominal tap is 1:1, to make the connection in open delta. Through a manual mechanism for switching fixed taps located in one of the windings, a variation of  $\pm 5\%$  is available in steps of 2.5%. This project arises from the need to have a scale model of a SEP that allows to practice three-phase transformers in open delta connection in the Power Electrical Systems Laboratory of the National Polytechnic School. The construction of the single-phase transformers allows to understand the operation and operation of the bank of transformers in open delta connection to continue with the three-phase supply to the load.

The different parameters calculated in the design process must comply with the standards of the standards established in the design of transformers and the criteria taken from the manufacturer's experience prior to its final construction.

In addition, the values obtained in the different electrical tests, carried out both individually and those in three-phase delta open connection, allow to verify the construction and correct operation of the transformers while at the same time confirming that such results are within the values of the rules.

**KEYWORDS:** Single-phase winding transformers, design and construction of dry type transformers, bank of transformers in open delta connection, tap changer, short circuit and open circuit tests.

# 1. INTRODUCCIÓN

Los transformadores son equipos empleados para la transmisión y distribución de energía eléctrica, los cuales por medio de la inducción electromagnética producida por los devanados arrollados alrededor de un núcleo magnético transforman un sistema monofásico o un sistema trifásico en otro sistema monofásico o trifásico, generalmente con valores diferentes de voltaje y corriente, pero a la misma frecuencia, con la finalidad de entregar la energía eléctrica a las diferentes cargas a voltajes deseados.

Al no disponer muchas veces en los sectores rurales de una tercera fase para la conexión trifásica de un banco de transformadores monofásicos, o por motivo de la desconexión de un transformador sea por mantenimiento o por daño de uno de los transformadores monofásicos en sectores industriales, es necesario continuar con el suministro trifásico hacia la carga trifásica sin interrupción alguna. Mediante la construcción de un banco de dos transformadores monofásicos se dispone de una alternativa trifásica de transformación a ser utilizada en la modelación de un SEP a escala en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia.

Una vez terminada la construcción de los transformadores monofásicos se realiza las pertinentes pruebas de fabricación con el objetivo de corroborar su correcto funcionamiento y de igual manera las correspondientes pruebas de operación de cada transformador monofásico y como banco trifásico en conexión delta abierta para el correspondiente análisis técnico en el presente trabajo de titulación.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1. Objetivo general

Diseñar y construir un banco de dos transformadores monofásicos que permita el suministro trifásico en conexión delta abierta con control de voltaje mediante taps fijos en el lado primario para el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Desarrollar una guía metodológica de diseño de transformadores monofásicos a partir de la disponibilidad de núcleos de acero.
- Utilizar los criterios de diseño de transformadores tipo seco establecidos en las normas IEEE y NTC.

- Construir el devanado primario, secundario y taps en el lado primario, con los respectivos aislamientos entre capas, bobinas y núcleo.
- Efectuar las pruebas de capacidad, niveles y caídas de voltaje, relación de transformación, regulación de voltaje y eficiencia del transformador operando en conexión delta abierta.
- Presentar un reporte completo de pruebas operativas

## 1.2 Alcance

El presente tema cubre un estudio específico de la teoría de los transformadores, por lo que se centra en el principio de funcionamiento y en base a las características requeridas por las dimensiones de los equipos disponibles en el Laboratorio, tales como potencia, voltaje, tipo de conexión, rango de control de voltaje y tamaño de los taps fijos, se diseña un transformador monofásico tipo seco.

En el desarrollo se analiza los correspondientes materiales con los que se construye el transformador: láminas de acero del núcleo, conductores de los devanados, material de aislamiento de los devanados y entre los devanados y el núcleo, los elementos de aislamiento de los taps y su operación fuera de línea, materiales de conexión y sujeción.

En mención a lo que corresponde al devanado primario se dispone de un cambiador de taps en el rango de  $\pm 5\%$ , con pasos de 2,5%, para lo cual se realiza el diseño necesario del número de espiras por tap y un mecanismo de cambio manual sin carga.

La evaluación del transformador para fines de comprobación y verificación de las diferentes especificaciones del diseño propiamente propuesto se efectúa mediante pruebas de relación de cortocircuito y circuito abierto, con la finalidad de obtener el modelo  $\pi$  del transformador monofásico.

## 1.3 Problemática

En el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia se requiere contar con un equipo de transformación para realizar la operación en conexión delta abierta. Cuando se produce la falla de uno de los transformadores monofásicos que componen un banco, se puede continuar con el suministro trifásico hacia la carga utilizando únicamente los dos transformadores monofásicos restantes en conexión delta abierta.

El conocimiento por parte de los estudiantes de las ventajas y desventajas de este tipo de suministro demandan la disponibilidad de dos transformadores monofásicos en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia. En este proyecto se plantea la

construcción de estos dispositivos a partir de dos núcleos tipo arrollados, mediante el diseño de las bobinas correspondientes a los devanados primario y secundario.

En un sistema eléctrico de potencia a escala se debe contar con una etapa de transformación de voltaje entre la etapa de transmisión y la carga eléctrica, que permita al estudiante poder verificar las características de un suministro trifásico con solo dos transformadores monofásicos; así como, evaluar los voltajes entre fases, la potencia total entregada y su eficiencia.

## **1.4 Justificación**

En este estudio técnico se aplicarán las especificaciones para el diseño y construcción de transformadores, con las características correspondientes a los niveles de voltaje y potencia del Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia, que permita implementar prácticas con dos transformadores monofásicos para suministrar una carga eléctrica trifásica.

Para la construcción se utiliza normas IEEE y NTC de diseño de transformadores monofásicos tipo seco. El banco de dos transformadores construidos sobre dos núcleos arrollados permite comprobar que los voltajes fase-fase corresponden a una alimentación trifásica normalizada de 220 V y que la potencia total equivale al 57,74% de un transformador trifásico completo, gracias a la conexión delta abierta.

A fin de proveer control de voltaje hacia la carga, se construye taps fijos dentro de un rango y pasos especificados que, conjuntamente, con un mecanismo permite el cambio de la relación de transformación con el equipo desenergizado.

El desarrollo del estudio técnico propuesto permite que el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia disponga de un banco de dos transformadores monofásicos para realizar la conexión en delta abierta, el cual ayudará al conocimiento de la ingeniería eléctrica, en lo referente a este tipo de suministro trifásico a través de la ejecución de prácticas de modelación y simulación de sistemas eléctricos de potencia a escala, posibilitando así brindar al estudiante una mejor comprensión en el uso y funcionamiento de la transmisión y transformación de energía desde la generación hacia la carga eléctrica.



## **2. MARCO TEÓRICO**

En esta sección se desarrollan los conceptos, formulas, demostraciones y ecuaciones relevantes para el diseño y construcción de transformadores. Se presenta el principio de funcionamiento, partes constructivas, circuito equivalente y pruebas eléctricas de transformadores. Se ha realizado la revisión de las diferentes fuentes bibliográficas citadas con respecto a la teoría, diseño y construcción de los transformadores.

### **2.1 Transformador**

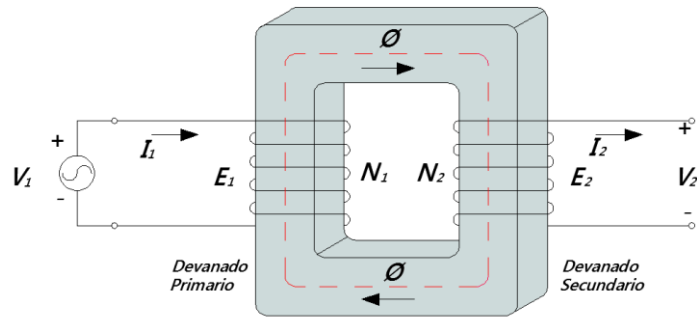
El transformador es un equipo estático que dispone de dos o más devanados vinculados entre sí por medio de un flujo magnético fuerte. Están diseñados para cumplir funciones específicas, como modificar tanto el voltaje como la corriente, y en alto transferir energía eléctrica desde la generación hacia la carga. Los requisitos de diseño de los transformadores dependen de la importancia de su aplicación en la parte de transmisión y distribución de la energía eléctrica. En los transformadores de instrumentación, la cantidad medida debe transferirse desde el circuito primario al secundario lo más exactamente posible, mientras que, en los transformadores de señal, las variables deben transferirse con un mínimo de distorsión.

El transformador en si al ser una máquina estática, no posee pérdidas mecánicas, sino más bien tiene perdidas en el hierro (núcleo) y en el cobre (bobinas), por estos motivos el transformador puede alcanzar rendimientos muy altos [21].

El transformador está constituido principalmente por los circuitos eléctrico y magnético. El circuito eléctrico se conforma de dos o más devanados y el circuito magnético por el núcleo, así como por el aislamiento, la refrigeración y las protecciones.

#### **2.1.1 Principio básico de funcionamiento del transformador**

El principio de funcionamiento del transformador se basa fundamentalmente en la inducción magnética en dos devanados al acoplarlos mediante un núcleo de hierro o cualquier otro material ferromagnético [18]. Se alimenta el devanado primario con una fuente alterna, esto ocasiona que circule una corriente alterna, que da origen a un flujo magnético en el núcleo generando una inducción de voltaje en el devanado secundario. El principio de funcionamiento del transformador se muestra en la Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Principio de funcionamiento del transformador

El voltaje inducido en el devanado secundario depende del número de vueltas que se presente en el devanado primario con respecto al devanado secundario, obteniendo así la relación de transformación. La relación de transformación se presenta en la Ecuación 2.1.

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

**Ecuación 2.1.** Relación de transformación [22]

Donde:

- $N_1$ : Número de vueltas del devanado primario
- $N_2$ : Número de vueltas del devanado secundario
- $V_1$ : Voltaje aplicado en el devanado primario
- $V_2$ : Voltaje aplicado en el devanado secundario
- $E_1$ : Voltaje inducido en el devanado primario
- $E_2$ : Voltaje inducido en el devanado secundario
- $I_1$ : Corriente del devanado primario
- $I_2$ : Corriente del devanado secundario
- $a$ : Relación de transformación

Por lo tanto, la relación de transformación indica que el número de vueltas del devanado primario y del devanado secundario son directamente proporcionales a los voltajes de los devanados primario y secundario e inversamente proporcionales a las corrientes de dichos devanados.

En un transformador ideal, la resistencia de cada devanado es despreciable, el flujo se limita al núcleo enlazando tanto al devanado primario como al secundario, una permeabilidad del núcleo relativamente alta o infinita, se necesita solamente una fuerza magnetomotriz ( $fmm$ ) de excitación muy pequeña para establecer el flujo [19].

Por lo tanto, los voltajes de los devanados inducidos por la variación del flujo son los mismos que los voltajes aplicados. Entonces, de acuerdo a la ley de Faraday, al aplicar un voltaje variante en el tiempo a los terminales del devanado primario, se establece un flujo magnético en el núcleo  $\phi$ , tal que induce una  $fem e_1$  en el devanado primario, que es igual al voltaje aplicado [18].

En cambio, el flujo instantáneo del núcleo producido por la corriente sinusoidal está dado por la Ecuación 2.2.

$$\phi = \phi_m \cdot \text{sen } \omega t$$

**Ecuación 2.2.** Flujo instantáneo en el núcleo [18]

Donde:

- $\phi$ : Flujo instantáneo en el núcleo en Weber
- $\phi_m$ : Flujo máximo en Weber

Entonces, por medio de la ley de Faraday se tiene el voltaje inducido dado por la Ecuación 2.3.

$$e_1 = -N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

**Ecuación 2.3.** Voltaje inducido [20]

Debido a que se considera un transformador ideal, se tiene que el voltaje aplicado es igual al voltaje inducido dado por la Ecuación 2.4.

$$v_1 = -e_1$$

**Ecuación 2.4.** Voltaje aplicado e inducido en el transformador [22]

Donde:

- $e_1$ : Voltaje inducido en el devanado del primario en V
- $v_1$ : Voltaje aplicado a los terminales del devanado primario en V

De esta manera, reemplazando la Ecuación 2.2 en la Ecuación 2.3 se tiene la siguiente expresión.

$$e_1 = -\omega \cdot N_1 \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t \cdot (10^{-8})$$

De esta forma, reemplazando la frecuencia angular  $\omega = 2\pi f$  en la expresión anterior, el voltaje inducido eficaz o rms está dado por la Ecuación 2.5.

$$e_1 = -2\pi \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t \cdot (10^{-8})$$

Donde el valor del voltaje máximo inducido es:

$$E_1 = 2\pi \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8}$$

Y el valor rms del voltaje inducido es el siguiente:

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8}$$

#### **Ecuación 2.5.** Voltaje eficaz inducido [20]

A partir del valor máximo del flujo magnético  $\Phi_m = \beta_m \cdot A_{Fe}$ , se tiene el voltaje inducido utilizado para el diseño de los transformadores dado por la Ecuación 2.6.

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \beta_m \cdot A_{Fe} \cdot 10^{-8}$$

#### **Ecuación 2.6.** Voltaje inducido de diseño del transformador [20]

Donde:

- $\Phi_m$ : Flujo máximo en Weber
- $\omega$ : Frecuencia angular en rad/s
- $\beta_m$ : Densidad máxima de flujo magnético en Gauss o Teslas
- $A_{Fe}$ : Sección transversal del núcleo en m<sup>2</sup>

## **2.2 Partes constructivas del transformador**

El transformador se encuentra conformado por distintas partes y cada una de estas tiene características específicas:

- Núcleo de material magnético
- Bobinas
- Aislamiento

- Refrigeración o enfriamiento
- Cambiador de taps
- Protecciones

### **2.2.1 Núcleo de material magnético**

El núcleo es la parte magnética del transformador en donde se enrollan los devanados en cada una de sus piernas laterales y en donde se origina el flujo magnético. El núcleo está conformado principalmente de láminas de acero al silicio, cuya función principal es reducir considerablemente las pérdidas por histéresis y reducir las corrientes parásitas o corrientes de Foucault.

De acuerdo con el número de espiras que conforma la bobina del transformador se especifican las dimensiones del núcleo. Si una bobina fuera diseñada con pocas espiras las dimensiones del núcleo serían grandes; en cambio, si una bobina estuviera formada por varias espiras, las dimensiones del núcleo serían más bien pequeñas, con la finalidad de tener un equilibrio entre pérdidas en el hierro y pérdidas en el cobre.

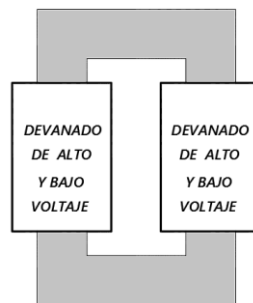
Las pérdidas por histéresis presentes en el núcleo están íntimamente relacionados al fenómeno por el cual una región atravesada por un campo magnético absorbe energía, la energía se convierte en calor a causa de la orientación cíclica de los dipolos magnéticos del material.

En cambio, las pérdidas de Foucault se originan debido a las corrientes inducidas en las caras de las láminas del núcleo. Para minimizar estas pérdidas, el núcleo se construye con capas delgadas de láminas de material ferromagnético debidamente aisladas entre sí, de este modo se aumenta la resistencia eléctrica ante eventuales trayectorias que podría tener las corrientes parásitas.

Los dos tipos de estructuras de núcleos de transformadores son: tipo columna y tipo acorazado. Las formas constructivas del núcleo pueden ser cuadrada, rectangular, toroidal, cruciformes y tipo C, I, E o tipo arrollado. Este último tipo es muy utilizado debido a que tiene una gran capacidad de resistir esfuerzos de cortocircuito y mayor nivel de reducción de pérdidas.

El núcleo tipo columna está constituido por piernas laterales y yugos, en el cual las bobinas recubren sus piernas laterales casi en su totalidad, en cambio, los yugos unen a las columnas una con otra y cierran el circuito magnético. Esto permite tener mejor facilidad para el montaje y desmontaje de las bobinas de igual modo para sustituir cualquier bobina

cuando deba ser cambiado por daño o mantenimiento. En la Figura 2.2 se presenta la conformación del núcleo con las bobinas [20].



**Figura 2.2.** Núcleo tipo columnas

En cambio, el núcleo tipo acorazado se distingue porque los devanados de alto y bajo voltaje están enrollados en la pierna central, cuya configuración se muestra en la Figura 2.3.



**Figura 2.3.** Núcleo tipo acorazado

### **2.2.2 Bobinas del transformador**

El circuito eléctrico del transformador está formado por los devanados de alto y bajo voltaje, conocidos comúnmente como bobinas. Las bobinas son construidas con conductores de alambre esmaltado, las cuales al enrollarse en el núcleo generan un flujo magnético producido por una corriente eléctrica alterna. Se utilizan conductores redondos o rectangulares para transformadores de potencias pequeñas o potencias grandes, respectivamente, las que están separadas por un material aislante.

La bobina completa que se monta sobre el núcleo se construye de varias capas aisladas entre sí, a fin de evitar la formación de cortocircuitos entre devanados [22].

El transformador se encuentra compuesto por un devanado de alto voltaje y un devanado de bajo voltaje. El devanado de bajo voltaje va enrollado principalmente sobre el núcleo, en razón de la mayor sección o calibre del conductor, en cambio el devanado de alto voltaje se enrolla sobre el devanado de bajo voltaje, porque generalmente su conductor es de

menor calibre. Además, el devanado de alto voltaje permite determinar el aislamiento correcto durante el diseño.

### **2.2.3 Aislamiento y enfriamiento de los transformadores**

El aislamiento utilizado generalmente en los transformadores está conformado por diferentes materiales aislantes dependiendo de que el transformador sea sumergido en aceite o se encuentre seco. Los materiales más utilizados son: cartón prensado, papel diamantado, papel Nomex, papel corrugado, ductos, madera, hilo, cintas, esmalte, barniz y carlite.

El aislamiento del transformador debe ser diseñado para soportar el voltaje nominal de operación, sobrevoltajes originados por descargas atmosféricas, malas maniobras o fallas, y así evitar que sufran daño las bobinas o el núcleo del transformador [22]. Los aislamientos internos y las distancias que debe tener el transformador son tanto el aislamiento entre núcleo y el devanado de bajo voltaje, entre capas de espiras, aislamiento entre espiras, aislamiento entre devanado del primario y secundario, además de la distancia entre el devanado primario y el secundario, así como la distancia entre la bobina y el yugo.

En cambio, dependiendo del enfriamiento, se tiene los siguientes tipos: sumergidos en aceite y tipo seco.

Los transformadores sumergidos en aceite tienen los siguientes tipos de enfriamiento:

- Tipo ONAN (Oil Natural circulation Air Natural circulation): Transformador sumergido en aceite con refrigeración natural de aceite dentro del tanque y circulación natural de aire en los radiadores [22].
- Tipo ONAF (Oil Natural circulation Air Forced circulation): Transformador con refrigeración natural en aceite y aire forzado por medio de ventiladores [22]. Esta refrigeración tipo ONAF es el enfriamiento del tipo ONAN más la colocación de ventiladores para forzar la ventilación con aire y disipar rápidamente el calor.
- Tipo OFAF (Oil Forced circulation Air Forced circulation): Transformador sumergido en aceite, con enfriamiento de aceite forzado y aire forzado mediante ventiladores [22]. El enfriamiento forzado del aceite se realiza mediante radiadores de aire y aceite fuera del tanque en bombas. Estos dos tipos de refrigeración actúan conjuntamente.

- Tipo ODAF (Oil Forced circulation Directed Air Forced): Transformador sumergido en aceite con circulación forzada en base a la circulación forzada del aire por medio de los radiadores y ventiladores [22].
- Tipo ONWF (Oil Natural circulation Water Forced circulation): Transformador sumergido en aceite con refrigeración forzada de agua [20]. El transformador con enfriamiento tipo ONWF consta de un cambiador de calor del tipo tubular que se encuentra ubicado en la parte exterior del tanque, por el cual el agua fluye a través de los tubos y se drena mediante una bomba independiente.
- Tipo OFWF (Oil Forced circulation Water Forced circulation): Transformador sumergido en aceite con refrigeración de aceite forzado y enfriadores de agua forzada [20]. Este tipo de enfriamiento se realiza por medio de un cambiador de calor cuyo intercambiador es de agua – aceite y así la refrigeración del aceite se realiza sin necesidad de ventiladores mediante agua.

En cambio, para el tipo de refrigeración o enfriamiento de transformadores en seco se tiene:

- Tipo AA (Air Air): Transformador tipo seco con enfriamiento natural de aire [20]. El aire actúa como aislamiento ya que recubre a las bobinas y al núcleo, al no contener aceite como aislante y ni agua como medio de enfriamiento.
- Tipo AFA (Air Forced Air): Transformador tipo seco con enfriamiento por aire forzado [20]. Este tipo de enfriamiento se adiciona a los del tipo AA, insertándoles ventiladores para su refrigeración y aumentar la capacidad de potencia.
- Tipo AA/FA (Air Air /Forced Air): Transformador tipo seco con refrigeración natural de aire y aire forzado [20]. Como en el caso anterior es un transformador con enfriamiento tipo AA más ventiladores para mejorar la disipación de calor.

#### **2.2.4 Cambiador de Taps**

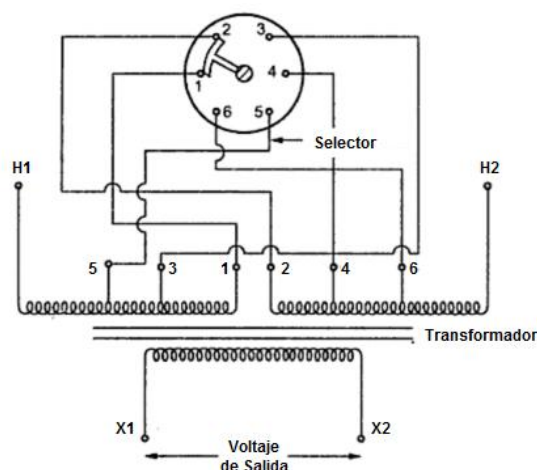
El cambiador de derivaciones o taps del transformador permite elevar o reducir el nivel de voltaje, generalmente entre un rango de  $\pm 5\%$  con pasos de  $\pm 2,5\%$ . El cambiador ajusta el voltaje del primario o del secundario dependiendo de la ubicación del conmutador ya sea que se ubique en el lado del primario, en el lado del secundario o en ambos lados.

El conmutador varía el nivel voltaje del transformador mediante la relación de transformación al aumentar o disminuir el número de espiras de los devanados [22].

Generalmente los transformadores constan de dos tipos de cambiador de taps que se clasifica en [14]:



- Intercambiador de taps sin carga o taps fijos: el cambiador de taps se opera manualmente cuando el transformador se encuentre desenergizado variando la posición del tap. El conmutador generalmente dispone de cinco posiciones para variar el voltaje. Usualmente se utiliza en transformadores de baja potencia. El conmutador se usa normalmente para obtener una variación de  $\pm 5\%$  en pasos de  $\pm 2,5\%$ . La operación del conmutador se basa en cortocircuitar un número de espiras necesarias, que permita aumentar o disminuir el número de espiras dependiendo de la posición en la que se coloque el tap. En la Figura 2.4 se indica la operación interna que realiza el conmutador, para ello en los terminales H1 y H2 se energiza el transformador, en cambio los terminales X1 y X2 son los terminales por donde se obtiene el voltaje de salida o por donde se alimenta a la carga. En el caso del transformador monofásico, el mecanismo de conmutación tendrá seis derivaciones para obtener el total de cinco posiciones. La operación interna de las derivaciones que se obtiene de las bobinas empieza en la posición 1, al que se cortocircuita las derivaciones de 5 y 6 obteniendo el menor número de espiras, de igual manera en la posición 2 se cortocircuita las derivaciones 4 y 5 en el cual se reduce un número de espiras. En cambio, al cortocircuitar las derivaciones 3 y 4 se obtiene el tap nominal. Para la posición 4 del conmutador se cortocircuita las derivaciones de 2 y 3, aumentando el número de espiras a partir de la posición nominal y permitiendo aumentar el nivel de voltaje. para la última posición del tap y tener el máximo nivel de voltaje se debe cortocircuitar las derivaciones 1 y 2, obteniendo el número total de espiras.



**Figura 2.4.** Cambiador de derivaciones o taps sin carga [22]

- Intercambiadores de taps con carga u OLTC: Este tipo de cambiador de taps es accionado bajo carga, es decir con el transformador energizado. Se utiliza

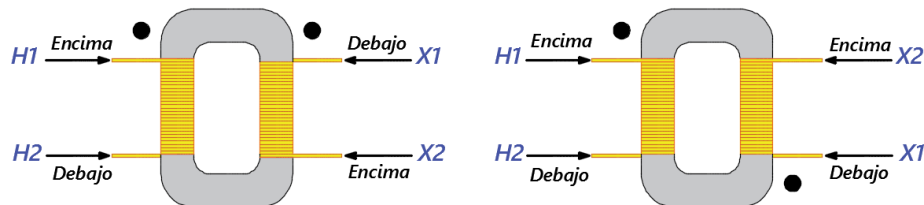
generalmente en transformadores instalados en subestaciones de distribución o subtransmisión, con la desventaja de que si este tipo de control es automático y no manual puede provocar un colapso de voltaje [14].

### 2.2.5 Protecciones

Las protecciones de un transformador cuenta con dispositivos cuya función principal permite detectar cualquier falla o daño, interrumpiendo el servicio o emitiendo señales.

## 2.3 Polaridad en un transformador

La polaridad depende de la dirección de arrollamiento de los devanados sobre el núcleo. En la Figura 2.5 se indica el arrollamiento de las bobinas sobre el núcleo.



**Figura 2.5.** Sentido del arrollamiento de las bobinas sobre el núcleo

Los dos tipos de polaridad que existen son:

- Polaridad Sustractiva
- Polaridad Aditiva

La polaridad en los transformadores se representa a través de los puntos negros e indica la dirección del arrollamiento de los devanados, es decir el comienzo y final de las espiras al momento de arrollar el conductor alrededor del núcleo.

### 2.3.1 Polaridad Sustractiva

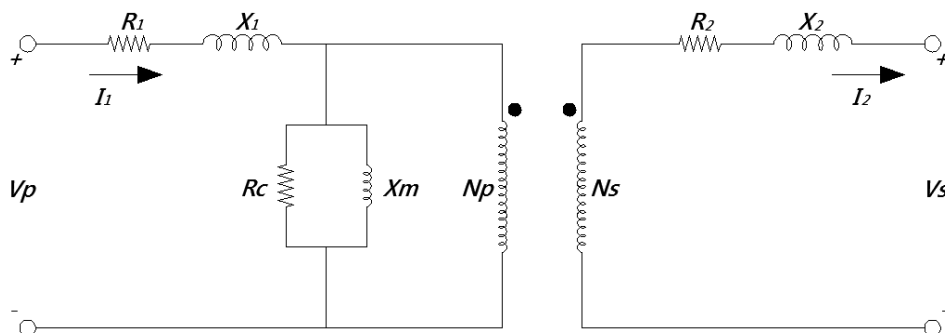
En el primer grafico de la izquierda los voltajes de los devanados primario y secundario están en fase, por lo tanto, el transformador se encuentra en fase por lo que no importaría si los dos puntos de polaridad se encuentren arriba o abajo del transformador es decir si el terminal del devanado primario H1 se encuentra ubicado de manera adyacente al terminal X1 del devanado secundario. El transformador se encuentra en fase debido a que el valor pico de voltaje del devanado primario coincide con el valor pico de voltaje del devanado secundario, al estar opuesto el arrollamiento del primario con respecto al secundario ocasiona que los flujos generados en los devanados se presenten en sentidos opuestos haciendo que se resten los voltajes.

### 2.3.2 Polaridad Aditiva

En cambio, en la gráfica de la derecha se observa que las bobinas tienen diferente sentido de polaridad, es decir que el terminal del devanado primario H1 se encuentra de manera diagonal al terminal X1 del secundario debido a que el arrollamiento del devanado primario es opuesto al arrollamiento del devanado secundario, por lo que el valor pico de voltaje del devanado primario se encuentra desfasado en  $180^\circ$  con respecto al valor pico de voltaje del devanado secundario. Al tener el arrollamiento del primario con respecto al secundario en la misma dirección ocasiona que los flujos en los devanados tomen el mismo sentido provocando que los voltajes se sumen.

## 2.4 Circuito Equivalente del transformador

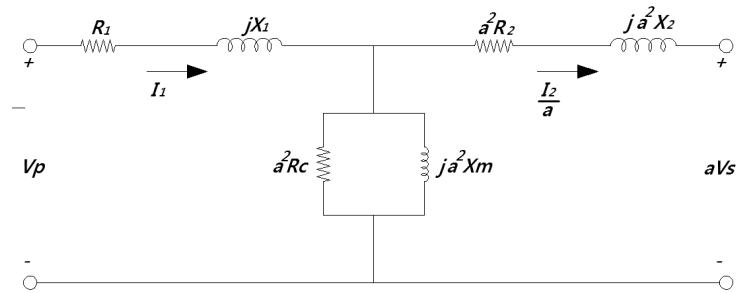
Para comprender el comportamiento y funcionamiento del transformador se realiza el modelamiento del circuito equivalente del transformador real. Se presenta el circuito equivalente teniendo en consideración las características principales, tales como pérdidas de potencia activa y flujo de dispersión presentes en los transformadores reales, como se muestran en la Figura 2.6.



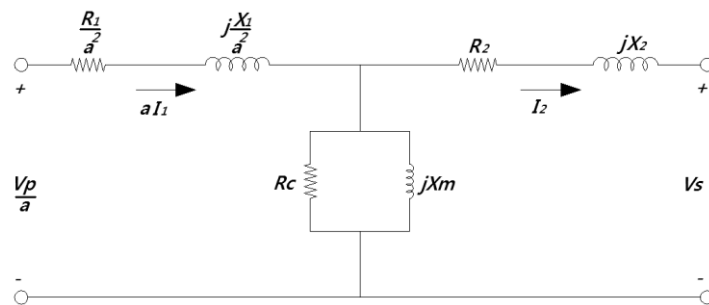
**Figura 2.6.** Circuito equivalente de un transformador monofásico [24]

En el circuito equivalente de la Figura 2.6 se muestran las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  que representan las pérdidas en el cobre de los devanados primario y secundario. En tanto que, el flujo de dispersión está representado por las reactancias  $X_1$  y  $X_2$  de los devanados primario y secundario. Además, la corriente de magnetización y las pérdidas en el hierro están modeladas por la impedancia, la reactancia de magnetización  $X_m$  y la resistencia del núcleo  $R_c$ .

Para analizar mejor los transformadores es necesario expresar el circuito equivalente en por unidad refiriendo todas las cantidades a uno de los lados, como se indica en las Figuras 2.7 y 2.8.



**Figura 2.7.** Circuito equivalente referido al lado primario



**Figura 2.8.** Circuito equivalente referido al lado secundario

En la Figura 2.7 se muestran los parámetros referidos al lado primario. La impedancia serie vista desde el lado primario toma en cuenta la reactancia y resistencia del devanado primario junto con la reactancia y resistencia del devanado secundario multiplicado por la relación de transformación al cuadrado [22]. La impedancia en paralelo está referida al lado primario mediante el producto por la relación de espiras al cuadrado.

En cambio, en la Figura 2.8 del circuito equivalente referido al lado secundario se tiene que la impedancia en paralelo vista desde el lado secundario toma en cuenta la reactancia de magnetización y la resistencia del núcleo [22]. La impedancia serie del primario está referida al lado secundario mediante la división para la relación de espiras al cuadrado.

## 2.5 Conexiones trifásicas especiales mediante banco de transformadores monofásicos

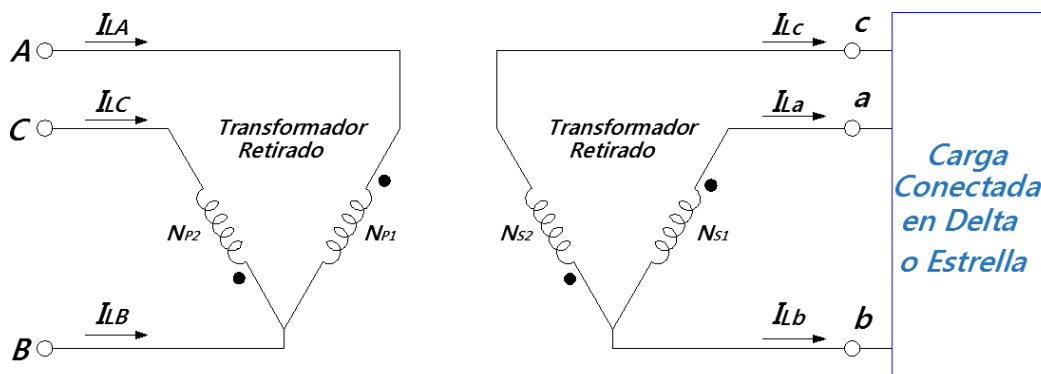
Mediante dos transformadores monofásicos se puede continuar con el suministro trifásico hacia la carga realizando conexiones especiales entre los dos transformadores que permitirá tener potencia trifásica, pero con una capacidad inferior a la de un banco de transformadores monofásicos normal. Estas conexiones especiales que emplean solamente un banco de dos transformadores monofásicos son las siguientes:

- Conexión delta abierta o V – V

- Conexión estrella abierta – delta abierta
- Conexión T – T
- Conexión Scott – T

### 2.5.1 Conexión delta abierta o V – V

La conexión delta – delta dispone de una gran ventaja porque al tener uno de los transformadores monofásicos en mantenimiento o reparación ya sea por daño en las bobinas o conexiones internas de uno de los tres transformadores del banco trifásico, los dos disponibles seguirán funcionando en conexión trifásica, de manera que se continúe suministrando energía a una carga trifásica conectada en delta o estrella. De esta manera se realiza la conexión en delta abierta (V – V) del banco de transformadores, reduciendo su capacidad de potencia trifásica, pero sin tener variación alguna de los voltajes de línea en los devanados primario y secundario [20]. En la Figura 2.9 se muestra la conexión delta abierta del banco de dos transformadores monofásicos.



**Figura 2.9.** Transformador removido genera un banco de transformadores en delta abierta [20]

Retirado el transformador y efectuando la conexión en delta abierta, los voltajes son  $V_{ab} = V\angle 0^\circ$  y  $V_{bc} = V\angle -120^\circ$ , por lo que, el voltaje presente en el espacio dejado por el transformador retirado se detalla en la Ecuación 2.7 [24].

$$V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0$$

$$V_{ca} = -V_{ab} - V_{bc}$$

$$V_{ca} = -V\angle 0^\circ - V\angle -120^\circ$$

$$V_{ca} = -V - (-0,5 - j0,866)V$$

$$V_{ca} = -0,5V + j0,866V$$

Por lo tanto:

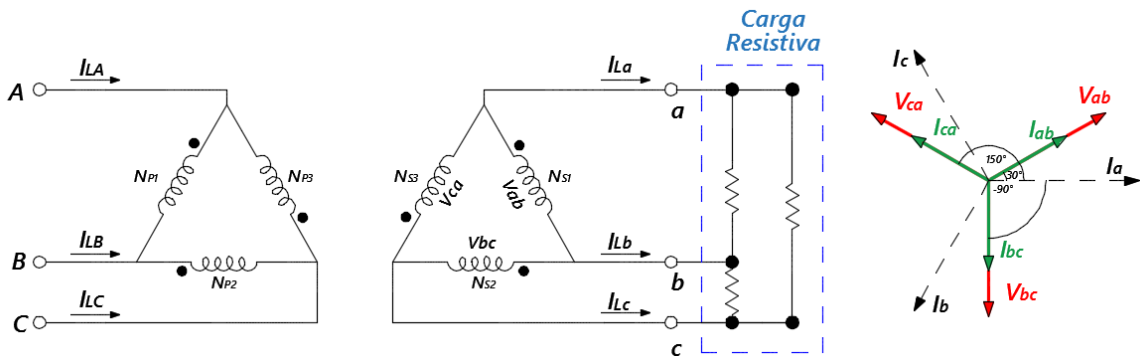
$$V_{ca} = V \angle 120^\circ$$

**Ecuación 2.7.** Voltaje secundario de línea [24]

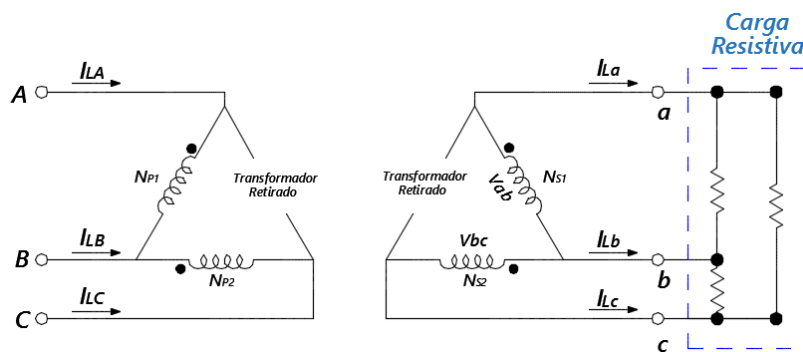
Obtenida la fórmula de voltaje de la fase retirada  $V_{ab} = V \angle 120^\circ$ , en conexión en delta abierta, se tiene que es igual al voltaje con el banco completo de transformadores monofásicos.

Una vez retirada la unidad averiada o una de las fases a la que se conecta los transformadores que conforma el banco de transformadores monofásicos, se pensaría que la capacidad de potencia que pueden suministrar los dos transformadores en conexión delta abierta deberá ser los dos tercios de la capacidad trifásica de potencia aparente.

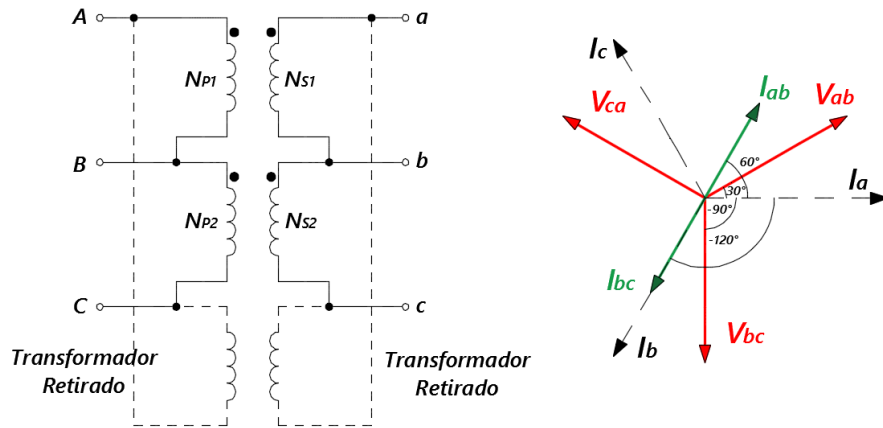
Para lo cual, mediante el análisis de las Figuras 2.10, 2.11 y 2.12 de los transformadores en conexión delta – delta y delta abierta, se determina la capacidad real que suministrara el banco en conexión en delta abierta y la relación que tienen ambas configuraciones.



**Figura 2.10.** Circuito y diagrama fasorial de un banco en conexión delta – delta [24]



**Figura 2.11.** Circuito de un banco de dos transformadores en conexión delta abierta [24]



**Figura 2.12.** Conexión y diagrama fasorial de un banco en delta abierta

En la Figura 2.10 se presentan los voltajes y corrientes de un banco de transformadores en conexión delta – delta alimentando una carga resistiva trifásica. Si el voltaje de línea es igual al voltaje de fase  $V_F$ , la corriente de línea es  $\sqrt{3} \cdot I_F$ ; sin embargo, la capacidad máxima de potencia que se puede suministrar está dada por la Ecuación 2.8.

$$P_{3\phi} = 3V_F I_F \cos \theta$$

**Ecuación 2.8.** Potencia trifásica [24]

Donde:

- $V_F$ : Voltaje de fase en V
- $I_F$ : Corriente de fase en A

La potencia trifásica en conexión delta – delta es:

$$P_{3\phi} = 3V_F I_F \cos(\theta_{V_F} - \theta_{I_F})$$

$$P_{3\phi} = 3V_F I_F \cos(30^\circ - 30^\circ)$$

$$P_{3\phi} = 3V_F I_F \cos(0^\circ)$$

Dado que el voltaje  $V_F$  y la corriente  $I_F$  se encuentran en fase, se tiene detalla el proceso para obtener la Ecuación 2.9.

Donde:

$$P_{3\phi} = 3V_F I_F$$

Sin embargo, si se conocen el voltaje y la corriente de línea se tiene que:

$$P_{3\phi} = 3V_L \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}}$$

Por lo tanto:

$$P_{3\phi} = \sqrt{3}V_L I_L$$

$$S_{3\phi} = \sqrt{3}V_L I_L$$

**Ecuación 2.9.** Potencia trifásica total en conexión delta – delta [24]

Con respecto a la Figura 2.12, los ángulos del voltaje no varían, en cambio los de las corrientes en conexión delta abierta presentan un desfase, obteniendo que la corriente de línea es igual a la corriente de fase presente en cada uno de los dos transformadores. En cambio, el ángulo de los voltajes y corrientes presentes en el banco de dos transformadores monofásicos difiere en  $30^\circ$  y  $-30^\circ$  debido a que permite tener un sistema trifásico mediante dos transformadores monofásicos, por lo que el análisis para encontrar su potencia total se realiza en cada uno de los transformadores, obteniendo así las Ecuaciones 2.10 y 2.11 [24].

Para la Ecuación 2.10, el voltaje de fase del primer transformador tiene un ángulo de desfase de  $30^\circ$ , en cambio la corriente de fase tiene un ángulo de  $60^\circ$ , debido a que se desfasa  $30^\circ$  respecto al voltaje de fase, por lo tanto, la potencia entregada por el primer transformador es la siguiente [24]:

$$P_1 = V_F I_F \cos(\theta_V - \theta_I)$$

$$P_1 = V_F I_F \cos(30^\circ - 60^\circ)$$

$$P_1 = V_F I_F \cos(-30^\circ)$$

Donde se tiene:

$$P_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} V_F I_F$$

**Ecuación 2.10.** Potencia del primer transformador en conexión delta abierta [24]

En cambio, para el segundo transformador el ángulo de desfase del voltaje es  $-90^\circ$  y el ángulo de desfase de la corriente es  $-120^\circ$ , por lo que la potencia del segundo transformador es:

$$P_2 = V_F I_F \cos(\theta_V - \theta_I)$$

$$P_2 = V_F I_F \cos(-90^\circ - (-120^\circ))$$



$$P_2 = V_F I_F \cos(30^\circ)$$

Donde se tiene:

$$P_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} V_F I_F$$

**Ecuación 2.11.** Potencia del segundo transformador en conexión delta abierta [24]

Entonces, la potencia total en conexión delta abierta es la siguiente Ecuación 2.12.

Donde:

$$P_{\Delta-abierta} = P_1 + P_2$$

$$P_{\Delta-abierta} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_F I_F + \frac{\sqrt{3}}{2} V_F I_F$$

$$P_{\Delta-abierta} = 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} V_F I_F$$

$$P_{\Delta-abierta} = \sqrt{3} V_F I_F$$

Sin embargo, como cada transformador en conexión delta abierta entrega corriente de línea y ya no corriente de fase se tiene lo siguiente:

$$P_{\Delta-abierta} = \sqrt{3} V_L \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

$$P_{\Delta-abierta} = V_L I_L$$

$$P_{\Delta-abierta} = V_L I_L$$

**Ecuación 2.12.** Potencia activa total del banco en conexión delta abierta [24]

La potencia total que puede suministrar los dos transformadores es de dos tercios del valor nominal del banco completo, pero no así la potencia que puede entregar el banco de transformadores en conexión V-V, la potencia reactiva del banco en conexión delta abierta se analiza para entender la capacidad de potencia que suministra el banco en delta abierta.

Para el primer transformador del banco en delta abierta se tiene que la potencia reactiva es la Ecuación 2.13.

$$Q_1 = V_F I_F \sin(\theta_V - \theta_I)$$

$$Q_1 = V_F I_F \sin(30^\circ - 60^\circ)$$

$$Q_1 = V_F I_F \sin(-30^\circ)$$

Por lo tanto:

$$Q_1 = -\frac{1}{2}V_F I_F$$

**Ecuación 2.13.** Potencia reactiva del transformador 1 del banco en delta abierta [24]

Para el segundo transformador, se tiene también la siguiente Ecuación 2.14.

$$Q_2 = V_F I_F \text{ sen}(\theta_V - \theta_I)$$

$$Q_2 = V_F I_F \text{ sen}(-90^\circ - (-120^\circ))$$

$$Q_2 = V_F I_F \text{ sen}(30^\circ)$$

Por lo tanto:

$$Q_2 = \frac{1}{2}V_F I_F$$

**Ecuación 2.14.** Potencia reactiva del transformador 2 del banco en delta abierta [24]

Entonces, la potencia reactiva total en conexión delta abierta es la siguiente Ecuación 2.15.

Donde:

$$Q_{\Delta\text{-abierta}} = P_1 + P_2$$

$$Q_{\Delta\text{-abierta}} = -\frac{1}{2}V_F I_F + \frac{1}{2}V_F I_F$$

$$Q_{\Delta\text{-abierta}} = 0$$

**Ecuación 2.15.** Potencia reactiva total del banco en conexión delta abierta [24]

Por lo que la potencia total en delta abierta es:

$$S^2_{\Delta\text{-abierta}} = P^2_{\Delta\text{-abierta}} + Q^2_{\Delta\text{-abierta}}$$

$$S^2_{\Delta\text{-abierta}} = (V_L I_L)^2 + 0$$

$$S_{\Delta\text{-abierta}} = V_L I_L$$

**Ecuación 2.16.** Potencia total del banco de dos transformadores en delta abierta

La capacidad de la potencia en conexión delta abierta que suministra el banco de dos transformadores en relación con la potencia total del banco completo se expresa en la Ecuación 2.17.

$$\frac{S_{\Delta-abierta}}{S_{3\phi}} = \frac{\sqrt{3}V_F I_F}{3V_F I_F} = \frac{V_L I_L}{\sqrt{3}V_L I_L}$$

$$\frac{S_{\Delta-abierta}}{S_{3\phi}} = 0,5774$$

**Ecuación 2.17.** Capacidad de potencia disponible banco en conexión delta abierta [24]

La potencia disponible que suministra el banco de transformadores en un sistema de conexión delta abierta es del 57,74% del valor nominal del banco trifásico original y no es ni la mitad ni los dos tercios del valor nominal del banco trifásico.

Se obtiene la relación de capacidad del banco en delta abierta con respecto a lo que puede suministrar cada uno de los transformadores monofásicos a la carga si ambos se encuentren conectados a una sola fase con la Ecuación 2.18.

$$\frac{S_{\Delta-abierta}}{2 \cdot S_{\phi}} = \frac{\sqrt{3}V_F I_F}{2V_F I_F} = \frac{V_L I_L}{\frac{2}{\sqrt{3}}V_L I_L} = \frac{\sqrt{3}V_L I_L}{2V_L I_L}$$

$$\frac{S_{\Delta-abierta}}{2 \cdot S_{\phi}} = 0,866$$

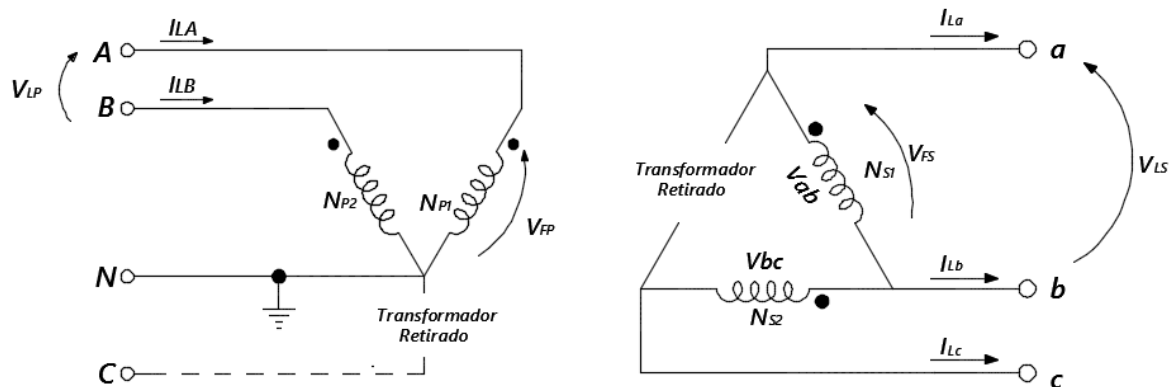
**Ecuación 2.18.** Relación de potencia de los transformadores que conforman el banco en conexión delta abierta [24]

Por lo que la capacidad del banco de transformadores en delta abierta corresponde al 86,6% del valor nominal de dos transformadores individuales.

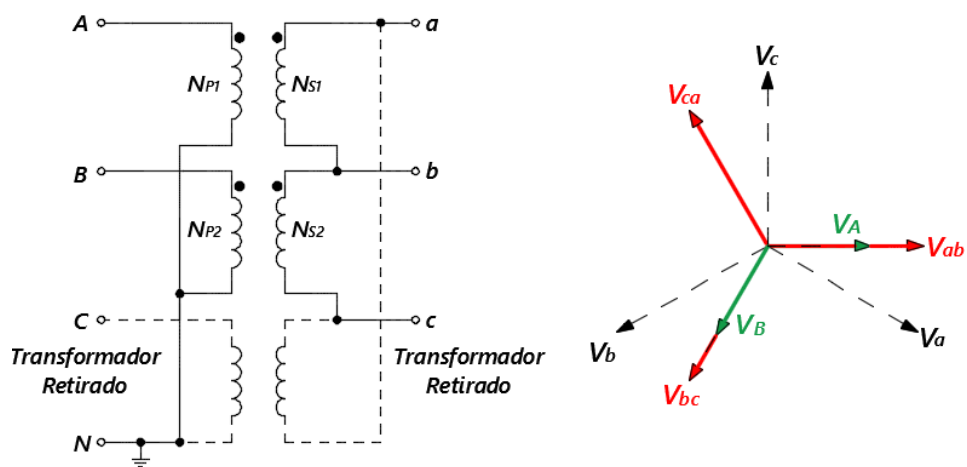
### 2.5.2 Conexión estrella abierta – delta abierta

La conexión estrella abierta – delta abierta es una conexión similar a la utilizada en conexión en delta abierta, ya que utiliza solamente dos transformadores para la transformación trifásica excepto que los voltajes primarios se obtienen de dos de las fases de la red y del neutro [24]. Este tipo de conexión se utiliza para brindar servicio a pequeños clientes que necesiten del servicio trifásico en zonas rurales, donde no se encuentre disponible las tres fases. Generalmente, esta conexión estrella abierta – delta abierta se utiliza cuando en el banco de transformadores se retira un transformador o una de las fases por daño o mantenimiento y se requiere seguir con alimentación trifásica a la carga. Esta conexión pierde la misma capacidad que en conexión delta abierta, por tal razón la potencia total que suministra el banco de dos transformadores en estrella abierta – delta abierta es del 57,74 % de la potencia nominal, por lo que el factor de utilización de los transformadores en operación se reduce al 86,6 %.

Debido a los desfases existentes en las conexiones de estrella – delta, ocurre lo mismo en la conexión estrella abierta – delta abierta, con desfases entre las variables del primario y secundario de  $30^\circ$ . Además, de tener el mismo desfase que en conexión estrella – delta, se presentan desfases de  $30^\circ$  y  $-30^\circ$  para obtener su capacidad de potencia. A continuación, se presenta la conexión y su correspondiente diagrama fasorial en las Figuras 2.13 y 2.14.



**Figura 2.13.** Circuito del banco en conexión estrella abierta – delta abierta [24]



**Figura 2.14.** Conexión y diagrama fasorial de la conexión estrella abierta – delta abierta

La ventaja de este tipo de conexión es que solamente se necesitan dos transformadores para su operación, cuyo propósito es incluir un transformador adicional cuando la demanda aumenta en una zona rural. Sin embargo, la desventaja de este tipo de conexión es que debe circular una corriente de retorno demasiado grande por el neutro del circuito primario [24].

### 2.5.3 Conexión T – T

Otra conexión que se puede realizar empleando únicamente dos transformadores es la T-T, mediante la cual es posible realizar una transformación trifásica y obtener potencia trifásica con otro nivel de voltaje. A diferencia de la conexión delta abierta, el sistema T-T requiere específicamente dos tipos especiales de transformadores [20]. En las Figuras 2.15 y 2.16 se muestran la configuración y el diagrama fasorial de la conexión T-T.

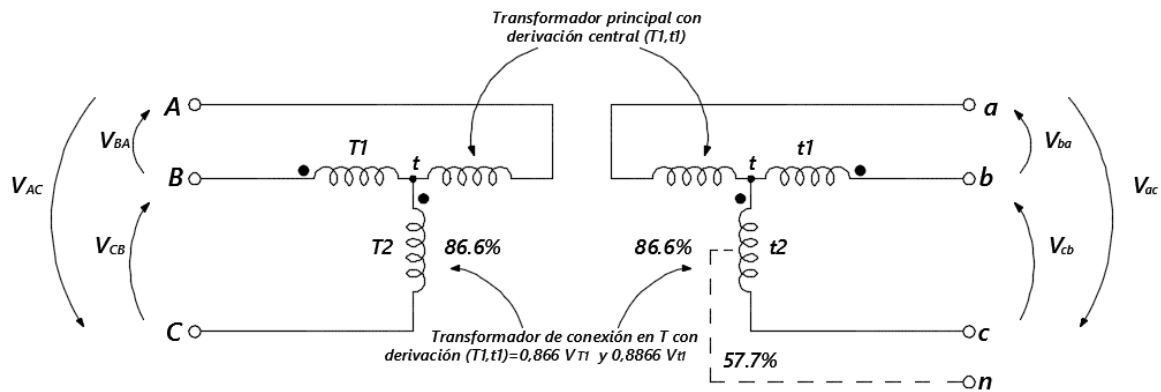


Figura 2.15. Conexión trifásica T – T del banco de transformadores [20]

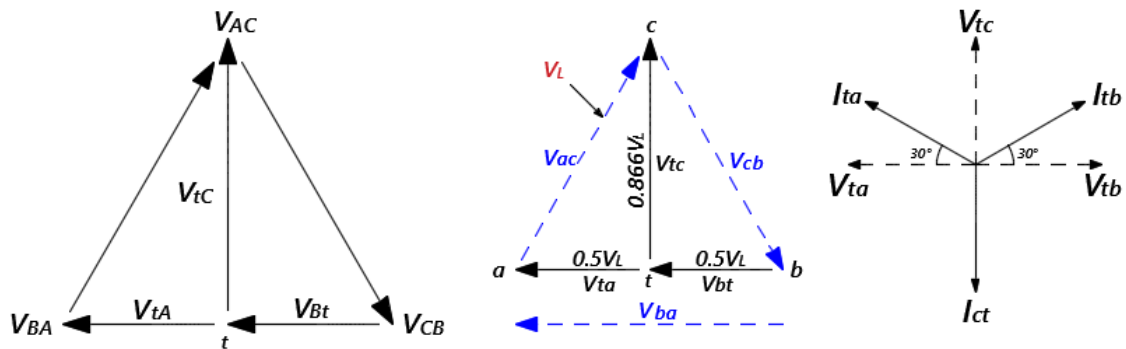


Figura 2.16. Diagrama fasorial y relación de las fases en conexión T - T [20]

Para esta conexión trifásica especial se tiene en el primario y secundario del transformador 2 una derivación del 86,6%, la cual se conecta a las derivaciones centrales del transformador 1 con toma central. En este tipo de conexión se conoce como transformador principal a T1 o transformador largo con toma central, en cambio a T2 se lo denomina transformador de conexión en T o transformador corto [24].

La conexión T – T en particular permite que la entrada tenga dos voltajes que se encuentren desfasados  $90^\circ$  en las bobinas primarias de los transformadores, además los que producen voltajes secundarios desfasados  $90^\circ$  y conforman una salida trifásica [24].

Analizando el diagrama central de la Figura 2.16 se tiene el voltaje de línea lo que se presenta en la Ecuación 2.19.

$$V_{bc} = V_{bt} + V_{tc} = V_L$$

$$V_{bc} = V_L = 0,5V_L + j0,866V_L$$

**Ecuación 2.19.** Voltaje de línea del secundario [20]

Donde,  $V_L$  es el voltaje de línea del secundario, en cambio  $V_{tc}$  es el voltaje nominal del devanado secundario del transformador corto [20].

En cambio, el voltaje de línea del devanado secundario  $V_{ac}$  se describe en la Ecuación 2.20.

$$V_{ac} = V_{at} + V_{tc} = V_L$$

$$V_{ac} = 0,5V_L + j0,866V_L$$

**Ecuación 2.20.** Voltaje de línea del secundario [20]

Mientras tanto el voltaje de línea del secundario  $V_{ba}$  se presenta en la Ecuación 2.21.

$$V_{ba} = V_{bt} + V_{ta} = V_L$$

$$V_{ba} = 0,5V_L + 0,5V_L$$

**Ecuación 2.21.** Voltaje de línea del secundario [20]

La corriente  $I_{tc}$  presente en el transformador de conexión T se encuentra en fase con el voltaje  $V_{tc}$ , en cambio las corrientes en el transformador largo o principal se encuentran desfasada o atrasadas a razón de  $30^\circ$  con respecto a los voltajes de fase. Por lo que la capacidad del transformador principal de suministrar una carga trifásica se indica en la Ecuación 2.22 [20].

$$S_{Principal\_T1} = V_{ta}I_{ta} \cos 30^\circ + V_{tb}I_{tb} \cos 30^\circ$$

$$S_{Principal\_T1} = 0,5V_L I_L \cos 30^\circ + 0,5V_L I_L \cos 30^\circ$$

$$S_{Principal\_T1} = 0,866V_L I_L$$

**Ecuación 2.22.** Potencia total del transformador largo [20]

En el transformador corto se tiene que la corriente de línea y de fase se encuentra en fase con respecto al voltaje de línea, por lo tanto, la potencia del transformador corto disminuye como se indica en la Ecuación 2.23.

$$S_{Corto\_T2} = V_{ct}I_{ct} = 0,866V_L \cdot I_L$$

$$S_{Corto\_T2} = 0,866V_L I_L$$

**Ecuación 2.23.** Potencia total del transformador corto [20]

Sin embargo, el transformador principal y el transformador corto suministran cada uno la mitad de su capacidad trifásica, como se detalla en la Ecuación 2.24.

$$S_{T-T} = S_{Principal\_T1} + S_{Corto\_T2}$$

$$S_{T-T} = \frac{\sqrt{3}}{2}V_L I_L + \frac{\sqrt{3}}{2}V_L I_L$$

$$S_{T-T} = \sqrt{3}V_L I_L$$

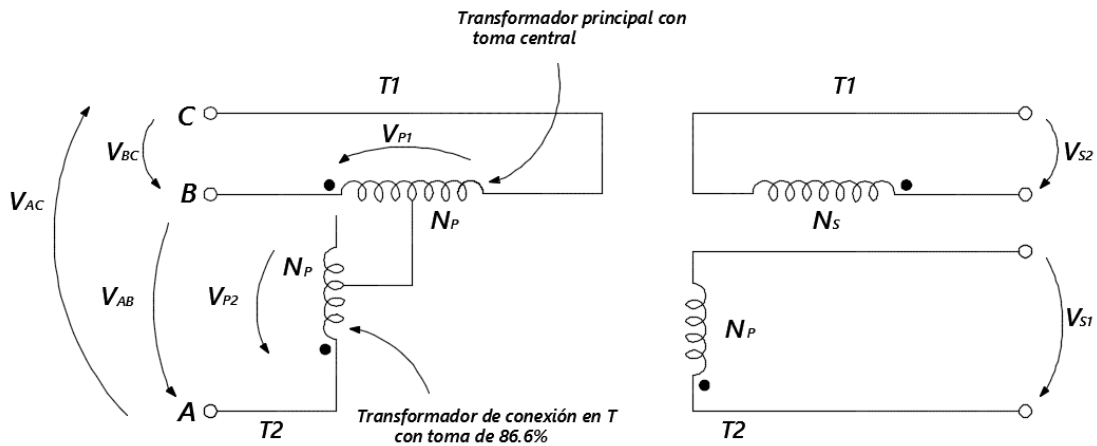
**Ecuación 2.24.** Potencia total del transformador [20]

Por lo que el factor de capacidad de suministro del banco en conexión T – T, que cada transformador puede dar es del 86,6%, es decir tiene la misma relación que la conexión en delta abierta.

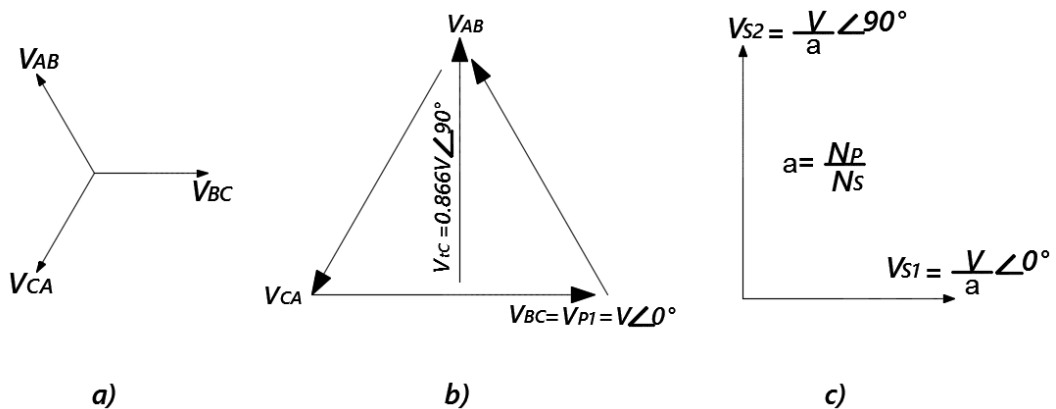
Una de las ventajas de este tipo de conexión, a diferencia de las conexiones en delta abierta o estrella abierta – delta abierta, es el que se puede conectar un neutro sea al lado del primario como al secundario del banco de dos transformadores [24].

#### 2.5.4 Conexión Scott – T

La conexión Scott – T es una manera de acoplar circuitos trifásicos con circuitos bifásicos y viceversa. Esta conexión permite suministrar dos voltajes monofásicos mediante un sistema trifásico, teniendo los dos transformadores monofásicos de la misma capacidad, el uno con una toma central y el otro con una toma de 86,6% de las espiras totales. Se encuentran conectados como se muestran en las Figuras 2.17 y 2.18, donde se indican los voltajes aplicados y resultantes de la conexión Scott – T con dos fases separadas 90° desde un circuito trifásico.



**Figura 2.17.** Banco de transformadores monofásicos en conexión Scott-T [24]



**Figura 2.18.** a) Diagrama fasorial de los voltajes de entrada del sistema trifásico b) voltajes en los devanados primarios del transformador c) voltajes secundarios bifásicos en conexión Scott - T [24]

Analizando la Figura 2.17 se indica la conexión de sus devanados, donde la toma del 86,6% del transformador corto se conecta a la toma central del transformador principal obteniendo los siguientes voltajes de línea. En las siguientes Ecuaciones 2.25, 2.26 y 2.27 se indican tales voltajes.

$$V_{AB} = V \angle 120^\circ$$

**Ecuación 2.25.** Voltaje de línea AB [24]

$$V_{BC} = V \angle 0^\circ$$

**Ecuación 2.26.** Voltaje de línea BC [24]

$$V_{Ca} = V \angle -120^\circ$$

**Ecuación 2.27.** Voltaje de línea CA [24]



## **2.6 Pruebas eléctricas del transformador**

Los diferentes tipos de pruebas eléctricas que se realiza a los transformadores se las efectúan con el fin de verificar las condiciones en que se encuentran, así como determinar sus parámetros eléctricos de la forma establecida por la norma IEEE Std C57.12.91-2011.

### **2.6.1 Prueba de medición de la resistencia óhmica de los devanados**

Esta prueba sirve para verificar que las conexiones internas de los devanados se encuentren conectados correctamente y para determinar los valores de resistencia de ambos devanados. Para realizar esta prueba simplemente se aplica una corriente de 10% menor a la nominal, para el cual se debe conectar al devanado a una fuente de voltaje en corriente continua y medir la resistencia mediante un milihómetro [25].

### **2.6.2 Prueba de medición de la resistencia de aislamiento**

Se realiza esta prueba de medición de resistencia de aislamiento del transformador para constatar el estado de los aislamientos. La prueba se realiza mediante un equipo llamado medidor de resistencia de aislamiento o megaóhmmetro y conocido comúnmente como MEGGER a un nivel de voltaje de 1000 V en corriente continua [22].

### **2.6.3 Prueba de polaridad**

Se realiza esta prueba a los transformadores para determinar el desplazamiento angular e identificar la polaridad sus, aun si están conectados en bancos trifásicos o en paralelo. De igual manera la prueba de polaridad se la puede realizar en conjunto con la medición de relación de transformación mediante el equipo Transformer Turns Ratio (T.T.R).

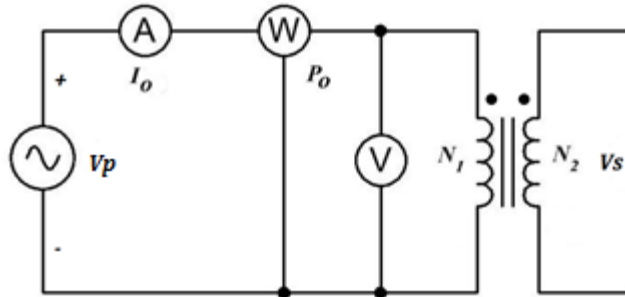
### **2.6.4 Prueba de relación de transformación**

Se realiza esta prueba para determinar la relación entre el número de vueltas del devanado primario y del secundario, y verificar que las diferentes relaciones de transformación de cada una de las posiciones del tap se encuentren dentro del rango tolerable de medición de  $\pm 0,5\%$ . Además de determinar si el voltaje suministrado se transforma al voltaje de salida deseado.

### **2.6.5 Prueba de circuito abierto**

El objetivo de esta prueba es determinar los parámetros de la rama paralelo del circuito equivalente, es decir la reactancia de magnetización y la resistencia del núcleo, a través de la corriente en vacío y las pérdidas en el hierro del núcleo. Esta prueba se realiza a voltaje y frecuencia nominal, para lo cual se aplica un voltaje al devanado primario mientras que el devanado secundario se encuentra en circuito abierto. La conexión de los equipos

de medida se muestra en la Figura 2.19. Para esta prueba se puede utilizar cualquiera de los dos devanados, aunque generalmente es más conveniente utilizar el devanado de bajo voltaje para alimentar el transformador.

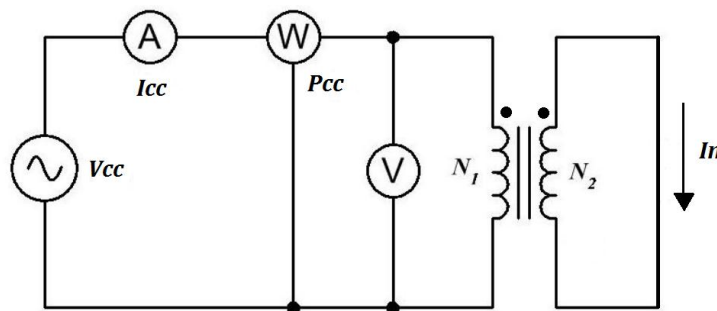


**Figura 2.19.** Diagrama para la prueba de circuito abierto

Al aplicar voltaje nominal al lado del primario del transformador, se mide la corriente  $I_o$ , la potencia  $P_o$  y el voltaje  $V_p$ .

### 2.6.6 Prueba de cortocircuito

El objetivo de esta prueba es determinar los parámetros de la impedancia serie del circuito equivalente del transformador, es decir la reactancia equivalente de dispersión y la resistencia equivalente, referidas al lado primario, mediante el voltaje de cortocircuito y las pérdidas en el cobre. En la Figura 2.20 se muestra la ubicación de los equipos de medición.



**Figura 2.20.** Diagrama para la prueba de circuito abierto

Con el devanado de bajo voltaje cortocircuitado se aplica un voltaje por medio de una fuente regulable hasta llegar al valor de la corriente nominal en el lado de alto voltaje.

### 2.6.7 Prueba de voltaje aplicado

Esta prueba tiene como objetivo verificar la adecuada calidad y cantidad del material aislante colocado en los devanados en el transformador a fin de que pueda soportar los esfuerzos eléctricos a los que se encuentra sometido en operación [22]. La prueba se debe realizar según lo dispuesto en la norma IEEE Std C57.12.91 [2].

Esta prueba se efectúa aplicando un voltaje no mayor a la cuarta parte del voltaje de prueba establecido según la norma IEEE Std C57.12.91, posteriormente se irá incrementando de manera progresiva hasta alcanzar el voltaje requerido durante 60 segundos. Luego de alcanzar el valor deseado de voltaje se deberá reducirlo de manera continua, ya que, si es disminuido repentinamente, los aislamientos del transformador pueden sufrir daños debido a los transitorios que se originan [22].

### 2.6.8 Prueba de voltaje inducido

Se efectúa esta prueba con la finalidad de verificar que el aislamiento entre espiras, entre capas y entre devanados y bobinas sea el adecuado. La prueba se realiza aplicando un voltaje al doble del voltaje nominal y a frecuencia al doble de la frecuencia nominal con una duración de 60 segundos. De la misma manera que la prueba de voltaje aplicado, el voltaje tiene que ser aumentado gradualmente y disminuido progresivamente a un valor menor del valor de prueba [25].

En el caso de que se produzca una falla en el aislamiento en el transcurso de la prueba, se producirá un crecimiento inesperado de corriente, humo y ruido, para lo cual el tiempo que debe someterse el transformador a dicha prueba se muestra en la Tabla 2.1 [22].

**Tabla 2.1.** Tiempos para la prueba de voltaje inducido [25]

Frecuencia [Hz]	Tiempo de la prueba [s]
120	60
180	40
240	30
360	20
400	18
440	15

### 2.6.9 Prueba de impulso

La finalidad de esta prueba es verificar si el aislamiento del transformador es apto para tolerar fallas transitorias, como las causadas por descargas atmosféricas que ocurren cuando se encuentra en condición de operación.

Sin embargo, la prueba se efectúa por medio de un generador de impulso de tiempos de duración de 1.2  $\mu$ s a 50  $\mu$ s que produce tres tipos de ondas que son: de onda completa, onda cortada y frente de onda, pero generalmente la prueba se realiza solo con la onda completa y la onda cortada, en cambio la de frente de onda se omite.

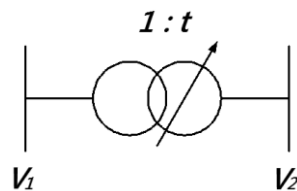
## 2.7 Control de voltaje mediante transformadores con taps

Durante la operación de sistemas eléctricos de potencia el control de voltaje se efectúa ajustando todos los voltajes del sistema para tener niveles dentro de los límites permitidos por las normas. Por lo que para poder controlar el voltaje generalmente se cambia la relación de transformación y así modificar o regular el voltaje de los terminales conectados a la carga. Al variar la relación de transformación se cambia el número de espiras y con ello regula el voltaje en valores de la barra.

Sin embargo, los taps en el transformador para la regulación de voltaje, se pueden colocar ya sea en el devanado de alto voltaje o en el devanado de bajo voltaje, pero por lo general, se los instala en el lado de alto voltaje. El control de voltaje mediante taps puede ser directo o inverso.

### 2.7.1 Control directo de voltaje

El control directo consiste en la variación del voltaje secundario con el cambio de la posición del tap la cual conforme se aumenta o disminuye, es decir incrementa o decrementa el número de espiras del devanado secundario, también se incrementa o decrementa el voltaje secundario [22]. En la Figura 2.21 se muestra el control directo del voltaje.



**Figura 2.21.** Ubicación del tap en el devanado secundario [22]

Luego de la Figura 2.21 se tiene la relación dada por la Ecuación 2.28:

Donde:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{t}$$

$$\uparrow V_2 = \uparrow t \cdot V_1$$

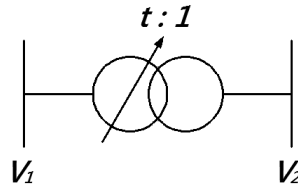
Por lo tanto, se tiene:

$$V_2 = t \cdot V_1$$

**Ecuación 2.28.** Voltaje del devanado secundario [22]

### 2.7.2 Control inverso de voltaje

En cambio, el control inverso consiste en una disminución en el secundario ante un cambio positivo del tap en relación con la posición nominal del tap, es decir, al aumento del número de espiras en el devanado primario [22]. Por lo que en la Figura 2.22 se muestra la ubicación del tap en el transformador.



**Figura 2.22.** Ubicación del tap en el devanado primario [22]

Por lo que en la Figura 2.22 se tiene la relación dada por la Ecuación 2.29:

En donde:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{t}{1}$$

$$\uparrow V_2 = \frac{V_1}{\downarrow t}$$

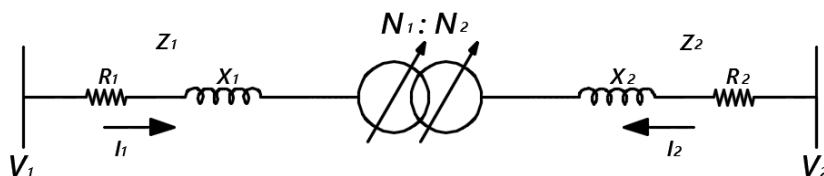
Por lo tanto, se tiene:

$$V_2 = \frac{V_1}{t}$$

**Ecuación 2.29.** Voltaje del devanado secundario [22]

### 2.7.3 Modelo generalizado de transformadores con taps en las posiciones nominales

El modelo generalizado de transformadores en las posiciones nominales se modela con los taps en los dos lados, empleando la Figura 2.23.



**Figura 2.23.** Modelo generalizado de los transformadores con taps en los lados primario y secundario [22]

La relación de voltajes del transformador ideal está dada por la Ecuación 2.30.

$$\frac{V_1 - Z_1 I_1}{N_1} = \frac{V_2 - Z_2 I_2}{N_2}$$

**Ecuación 2.30.** Relación de voltaje [22]

En cambio, la relación de las corrientes está dada por la Ecuación 2.31.

$$\frac{I_1}{N_2} = -\frac{I_2}{N_1}$$

**Ecuación 2.31.** Relación de corrientes [22]

Reemplazando la Ecuación 2.31 en la Ecuación 2.30 se obtiene la Ecuación 2.32.

$$N_2 \cdot V_1 - N_2 \cdot Z_1 \cdot I_1 = N_1 \cdot V_2 - N_1 \cdot Z_2 \left( -\frac{N_1}{N_2} \cdot I_1 \right)$$

$$N_2^2 \cdot V_1 - N_1 \cdot N_2 \cdot V_2 = (N_2^2 \cdot Z_1 + N_1^2 \cdot Z_2) \cdot I_1$$

$$I_1 = \frac{1}{N_1^2 \cdot Z_2 + N_2^2 \cdot Z_1} \cdot (N_2^2 \cdot V_1 - N_1 \cdot N_2 \cdot V_2)$$

**Ecuación 2.32.** Corrientes del modelo generalizado del lado primario [22]

La admitancia del modelo generalizado está dada por la Ecuación 2.33.

$$Y = \frac{1}{N_1^2 \cdot Z_2 + N_2^2 \cdot Z_1}$$

**Ecuación 2.33.** Admitancia del modelo generalizado [22]

Reemplazando la Ecuación 2.33 en la Ecuación 2.32 se obtiene la corriente total del modelo generalizado y está dada por la Ecuación 2.34.

$$I_1 = Y \cdot N_2^2 \cdot V_1 - Y \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot V_2 + Y \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot V_1 - Y \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot V_1$$

Por lo tanto, la Ecuación 2.34 es:

$$I_1 = (V_1 - V_2) \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot Y + N_2 \cdot (N_2 - N_1) \cdot Y \cdot V_1$$

**Ecuación 2.34.** Corriente del lado primario del modelo generalizado [22]

A partir de la Ecuación 2.31 se desarrolla el análisis para obtener la corriente del lado secundario.

$$I_1 = -\frac{N_2 \cdot I_2}{N_1}$$

Reemplazando  $I_1$  en la Ecuación 2.30 se tiene la Ecuación 2.35.

$$N_2 \cdot V_1 - N_2 \cdot Z_1 \left( -\frac{N_2 \cdot I_2}{N_1} \right) = N_1 \cdot V_2 - N_1 \cdot Z_2 \cdot I_2$$

$$N_1 \cdot N_2 \cdot V_1 + N_2^2 \cdot Z_1 \cdot I_2 = N_1^2 \cdot V_2 - N_1^2 \cdot Z_2 \cdot I_2$$

$$I_2 = \frac{N_1}{N_1^2 \cdot Z_2 + N_2^2 \cdot Z_1} \cdot (N_1 \cdot V_2 - N_2 \cdot V_1)$$

**Ecuación 2.35.** Corrientes del modelo generalizado del lado secundario [22]

Reemplazando la Ecuación 2.33 en la Ecuación 2.35 se obtiene la corriente total del modelo generalizado y está dada por la Ecuación 2.36.

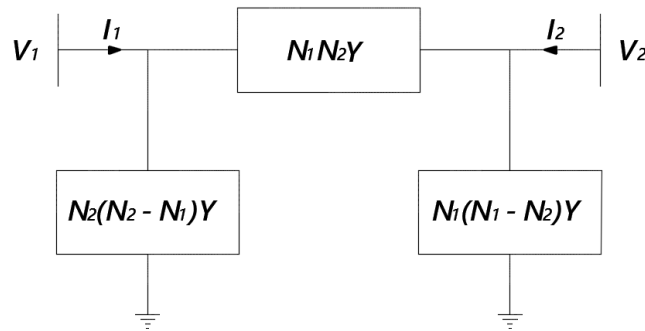
$$I_2 = Y \cdot N_1^2 \cdot V_2 - Y \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot V_1 + Y \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot V_2 - Y \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot V_2$$

Por lo tanto, la Ecuación 2.36 es:

$$I_2 = (V_2 - V_1) \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot Y + N_1 \cdot (N_1 - N_2) \cdot Y \cdot V_2$$

**Ecuación 2.36.** Corriente del lado secundario del modelo generalizado [22]

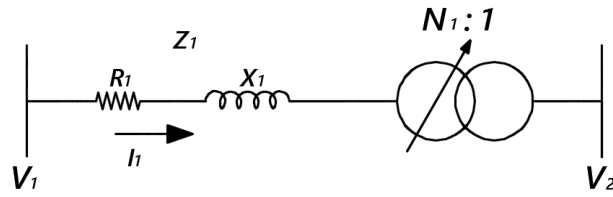
Obtenidas las expresiones de  $I_1$  e  $I_2$  se emplea el modelo  $\pi$  del transformador con taps en ambos lados, como se muestra en la Figura 2.24.



**Figura 2.24.** Modelo  $\pi$  de los transformadores con taps en ambos lados [22]

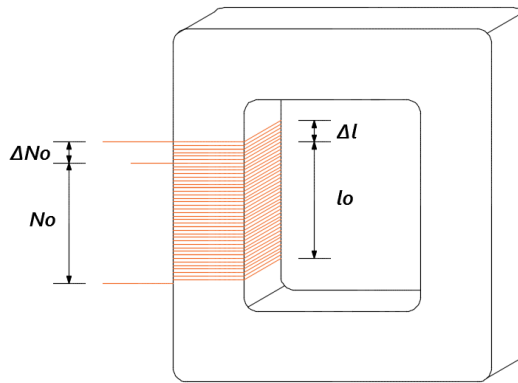
#### 2.7.4 Modelo generalizado de transformadores con taps en diferentes posiciones con respecto a la posición nominal

El modelo generalizado de transformadores con taps en uno de los lados, y la impedancia serie vista del lado de alto voltaje, desde donde se realiza la prueba de cortocircuito se muestra en la Figura 2.25 [22].



**Figura 2.25.** Modelo generalizado de transformadores con taps en el lado del primario [22]

De acuerdo con la Figura 2.25, la variación de la posición del tap en el lado primario ocasiona que se modifique la inductancia por medio del cambio del número de espiras, al realizar el cambio de posición del tap, como se puede apreciar Figura 2.26.



**Figura 2.26.** Relación entre la inductancia y el número de espiras [22]

La inductancia del devanado en condiciones nominales se expresa Ecuación 2.37.

$$L_0 = \frac{N_0^2 \cdot \mu_0 \cdot A_0}{l_0}$$

**Ecuación 2.37.** Inductancia del devanado en condiciones nominales [24]

Donde:

- $L_0$ : Inductancia del devanado en condición nominal
- $N_0$ : Número de espiras sobre el núcleo en la posición nominal
- $\mu_0$ : Permeabilidad magnética del núcleo
- $A_0$ : Área de la sección transversal de la bobina
- $l_0$ : Altura en la posición nominal de la bobina

Sin embargo, para una posición diferente a la posición nominal del tap se tiene la Ecuación 2.38.



$$L_1 = \frac{N_1^2 \cdot \mu_0 \cdot A_0}{l_0 + \Delta l}$$

**Ecuación 2.38.** Inductancia del devanado en una posición diferente a la nominal [22]

Donde:

- $L_1$ : Inductancia del devanado en una posición distinta a la posición nominal
- $N_1$ : Numero de espiras con el tap en una posición distinta a la posición nominal
- $\Delta l$ : Variación de la altura de la bobina

Por lo tanto, la relación entre las Ecuaciones 2.38 y 2.37 está dada por la Ecuación 2.39.

Donde:

$$\frac{L_1}{L_0} = \frac{\frac{N_1^2 \cdot \mu_0 \cdot A_0}{l_0 + \Delta l}}{\frac{N_0^2 \cdot \mu_0 \cdot A_0}{l_0}}$$

Sin embargo, dado que el cambio de altura de la bobina es muy pequeño,  $\Delta l$  se considera despreciable en relación con la altura de la posición nominal del tap.

$$\frac{L_1}{L_0} = \frac{\frac{N_1^2 \cdot \mu_0 \cdot A_0}{l_0}}{\frac{N_0^2 \cdot \mu_0 \cdot A_0}{l_0}}$$

En el cual simplificando se tiene como resultado:

$$\frac{L_1}{L_0} = \frac{N_1^2}{N_0^2}$$

Además, como  $N_0$  es el número de espiras en la posición nominal, se tiene un valor de 1,0 en unidad.

Entonces, la expresión final reemplazando el valor por unidad en la expresión anterior se tiene la Ecuación 2.39.

$$L_1 = N_1^2 \cdot L_0$$

**Ecuación 2.39.** Inductancia de la bobina para una posición diferente a la posición nominal [22]

Para la reactancia se tiene la Ecuación 2.40.

$$X_1 = N_1^2 \cdot X_0$$

**Ecuación 2.40.** Reactancia de la bobina para una posición diferente del tap [22]

Para la resistencia se tiene la Ecuación 2.41.

$$R_0 = \rho \cdot \frac{PM}{A_0} \cdot N_0$$

**Ecuación 2.41.** Resistencia de la bobina en condiciones nominales [22]

Donde:

$R_0$ : Resistencia de la bobina en condiciones nominales

$\rho$ : Resistividad del metal

$PM$ : Perímetro medio de la bobina

La resistencia al incrementar el número de espiras se tiene en la Ecuación 2.42.

$$R_1 = \rho \cdot \frac{PM}{A_0} \cdot N_1$$

**Ecuación 2.42.** Resistencia de la bobina para una posición diferente del tap [22]

Por lo tanto, la relación entre las Ecuaciones 2.42 y 2.41 está dada por la Ecuación 2.43.

Donde:

$$\frac{R_1}{R_0} = \frac{\rho \cdot \frac{PM}{A_0} \cdot N_1}{\rho \cdot \frac{PM}{A_0} \cdot N_0}$$

La simplificación da como resultado:

$$\frac{R_1}{R_0} = \frac{N_1}{N_0}$$

Además, como  $N_0$  es de 1,0 en unidad, se tiene la Ecuación 2.43.

$$R_1 = N_1 \cdot R_0$$

**Ecuación 2.43.** Resistencia de la bobina en una posición diferente del tap [22]

Entonces, a partir de la Figura 2.25 y la Ecuación 2.33, de la admitancia.

$$Y = \frac{1}{N_1^2 \cdot 0 + N_2^2 \cdot Z_1}$$

Sustituyendo la impedancia serie  $Z_1$  se tiene:

$$Y = \frac{1}{N_2^2 \cdot (R_1 + jX_1)}$$

Reemplazando las Ecuaciones 2.40 y 2.43 en la expresión anterior se tiene:

$$Y = \frac{1}{N_2^2 \cdot (N_1 \cdot R_0 + jN_1^2 \cdot X_0)}$$

Desarrollando la expresión se tiene la Ecuación 2.44.

$$Y = \frac{1}{N_2^2 \cdot N_1 \cdot R_0 + jN_2^2 \cdot N_1^2 \cdot X_0}$$

**Ecuación 2.44.** Admitancia de la bobina [22]

Por lo tanto, a partir de la Ecuación 2.44 se determina los valores del modelo  $\pi$  del transformador en las diferentes posiciones del tap.

$$N_1 \cdot N_2 \cdot Y = \frac{N_1 \cdot N_2}{N_2^2 \cdot N_1 \cdot R_0 + jN_2^2 \cdot N_1^2 \cdot X_0}$$

Resolviendo la expresión se tiene la Ecuación 2.45:

$$N_1 \cdot N_2 \cdot Y = \frac{1}{N_2 \cdot R_0 + jN_1 \cdot N_2 \cdot X_0}$$

**Ecuación 2.45.** Parámetro serie del modelo  $\pi$  del transformador [22]

El desarrollo de los demás parámetros está dado por las Ecuaciones 2.46 y 2.47.

$$N_2 \cdot (N_2 - N_1) \cdot Y = \frac{N_2 \cdot (N_2 - N_1)}{N_2^2 \cdot N_1 \cdot R_0 + jN_2^2 \cdot N_1^2 \cdot X_0}$$

$$N_2 \cdot (N_2 - N_1) \cdot Y = \frac{(N_2 - N_1)}{N_2 \cdot N_1 \cdot R_0 + jN_2 \cdot N_1^2 \cdot X_0}$$

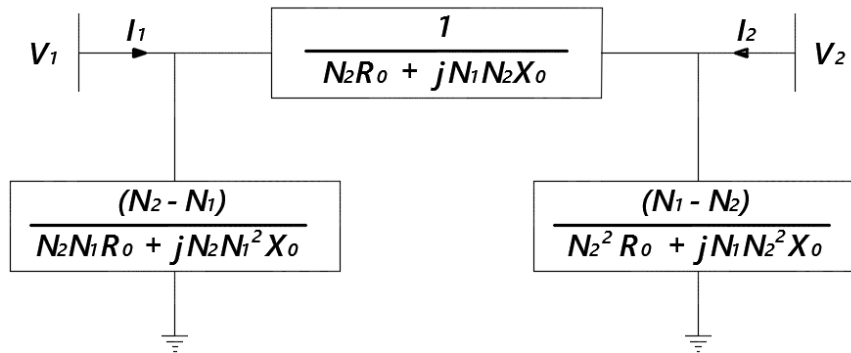
**Ecuación 2.46.** Parámetro serie del modelo  $\pi$  del transformador [22]

$$N_1 \cdot (N_1 - N_2) \cdot Y = \frac{N_1 \cdot (N_1 - N_2)}{N_2^2 \cdot N_1 \cdot R_0 + jN_2^2 \cdot N_1^2 \cdot X_0}$$

$$N_1 \cdot (N_1 - N_2) \cdot Y = \frac{N_1 \cdot (N_1 - N_2)}{N_2^2 \cdot R_0 + jN_2^2 \cdot N_1 \cdot X_0}$$

**Ecuación 2.47.** Parámetro serie del modelo  $\pi$  del transformador [22]

Por medio de las Ecuaciones 2.45, 2.46 y 2.47 se construye el modelo  $\pi$  del transformador con taps para las diferentes posiciones, como se indica en la Figura 2.27 [22].



**Figura 2.27.** Modelo  $\pi$  del transformador con taps para las diferentes posiciones [22]

### 3. DISEÑO DEL TRANSFORMADOR DE NÚCLEO ARROLLADO

El diseño de un transformador monofásico se enfoca a la aplicación de las normas técnicas que debe cumplir un transformador tipo seco.

#### 3.1 Método analítico de un transformador monofásico de núcleo arrollado

Para diseñar un determinado transformador se requiere partir de los datos proporcionados por la aplicación.

- Potencia del transformador
- Voltaje del devanado primario
- Voltaje del devanado secundario
- Frecuencia de la red
- Rango y tamaño de los taps

##### 3.1.1 Cálculo de la relación voltio/espira

Para determinar el número de espiras, se debe calcular el voltaje que le corresponde a cada espira, mediante la Ecuación 3.1.

$$V/_{Esp} = k\sqrt{S_{1\phi}}$$

**Ecuación 3.1.** Voltios por espira [1]

Donde:

- $V/_{Esp}$ : Voltios que le corresponde a cada espira
- $k$ : Constante que se encuentra entre  $0,6 \leq k \leq 1,25$
- $S_{1\phi}$ : Potencia monofásica en kVA

##### 3.1.2 Cálculo del número de espiras del devanado primario

El cálculo del número de espiras del devanado primario resulta dividiendo el voltaje del devanado primario por cada voltio/espira, mediante la Ecuación 3.2.

$$N_1 = \frac{V_1}{V/EsP}$$

**Ecuación 3.2.** Número de espiras del devanado primario [1]

### 3.1.3 Cálculo del número de espiras del devanado secundario

El cálculo del número de espiras del devanado secundario se determina dividiendo el voltaje del devanado secundario para cada voltio/espira, dada por la Ecuación 3.3.

$$N_2 = \frac{V_2}{V/EsP}$$

**Ecuación 3.3.** Número de espiras del devanado secundario [1]

### 3.1.4 Sección del núcleo

La sección del núcleo magnético depende de la densidad de flujo magnético  $\beta$  en Gauss, tomando en cuenta que los núcleos son del tipo arrollado, es recomendable utilizar densidades de flujo entre 15000 a 17000 Gauss considerando la utilización de núcleos nuevos. En cambio, para los núcleos del tipo apilado se utiliza densidades en el rango de los 13000 a 15000 Gauss [20]. Para determinar la sección transversal del núcleo magnético se realiza mediante la Ecuación 3.4.

$$A_{Fe} = \frac{V/EsP \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot \beta_m}$$

**Ecuación 3.4.** Sección transversal del núcleo [20]

Donde:

- $A_{Fe}$ : Área física del núcleo en  $\text{cm}^2$
- $\beta_m$ : Densidad de flujo magnético en Gauss
- $\frac{V}{EsP}$ : Voltaje por cada espira en V/espira

El diseño de transformadores de núcleo arrollado utiliza el acero eléctrico de categoría M-4 que pertenece al tipo de acero al silicio de grano orientado, de un espesor de 0,28mm. En la Tabla 3.1 se muestran los tipos de lámina de acero utilizados en el diseño por sus características constructivas [20].

**Tabla 3.1.** Valores de las pérdidas en acero al silicio a 60 Hz [20]

Tipo de grado de orientación	Espesor		Vatios por lb		Vatios por kg	
	pulgada	milímetros	15000 Gauss	17000 Gauss	15000 Gauss	17000 Gauss
M-2	0,007	0,18	0,42	-	0,93	-
M-3	0,009	0,23	0,46	-	1,01	-
M-4	0,011	0,28	0,51	0,74	1,12	1,63
M-6	0,014	0,35	0,66	0,94	1,46	2,07

### 3.1.5 Espesor del núcleo

El acero al silicio de tipo M-4, es comúnmente utilizado en la construcción de los transformadores; además, se establece el factor de apilamiento ( $f_e$ ) entre 0,95 y 1, para transformadores de núcleo tipo arrollado y para núcleos apilados está entre 0,93 y 0,95 [20].

Los núcleos tipo arrollado disponen de secciones transversales en forma rectangular, cuya profundidad de la lámina ( $LN$ ) debe de ser de 2 a 4 veces el espesor de la laminación ( $E$ ); en cambio, para núcleos de tipo columna se considera que la profundidad de la lámina debe ser de 1,4 a 2 veces el espesor de laminación, dada por la Ecuación 3.5 [20]

$$LN = 4E$$

#### **Ecuación 3.5.** Profundidad del núcleo [20]

El factor de apilamiento de 0,98 se aplica en la expresión:

$$A_{Fe} = f_e \cdot LN \cdot E$$

Reemplazando la Ecuación 3.5 en la anterior expresión se tiene:

$$A_{Fe} = f_e \cdot 4 \cdot E \cdot E$$

Por lo tanto, el cálculo del espesor del núcleo se determina mediante la Ecuación 3.6.

$$E = \sqrt{\frac{A_{Fe}}{4 \cdot f_e}}$$

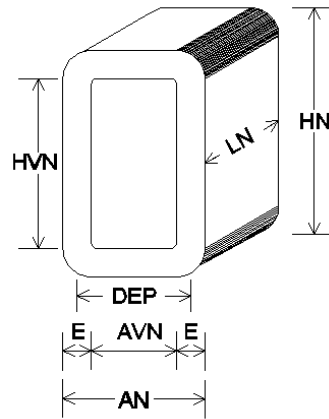
#### **Ecuación 3.6** Espesor del núcleo [22]

Donde:

- $LN$ : Profundidad del núcleo en cm o mm
- $f_e$ : Factor de apilamiento de las laminas

- $E$ : Espesor del núcleo en cm o mm

La Figura 3.1 presenta el modelo de núcleo tipo arrollado con sus respectivas características y especificaciones.



**Figura 3.1.** Sección transversal del núcleo tipo arrollado [20]

Donde:

- $HVN$ : Altura de la ventana del núcleo
- $HN$ : Altura del núcleo
- $DEP$ : Distancia entre piernas
- $AVN$ : Ancho de la ventana del núcleo
- $AN$ : Ancho del núcleo

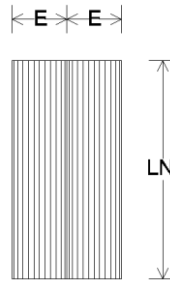
La Ecuación 3.7 determina el número total de laminaciones, luego se debe seleccionar la lámina con su respectivo espesor. La lámina de grado M-4 posee un espesor de 0,28 mm [20].

$$No. laminaciones = \frac{2E}{Espesor\ de\ la\ lámina}$$

**Ecuación 3.7.** Número de láminas que conforma el espesor del núcleo [20]

En la Figura 3.2 se muestra el acoplamiento de las láminas y la formación de la sección transversal del núcleo con las dimensiones del espesor del núcleo y ancho de la lámina a enrollar.





**Figura 3.2.** Corte de la sección transversal del núcleo tipo arrollado [20]

### 3.1.6 Corriente del devanado primario

La corriente nominal que circula por el devanado primario se determina de la división entre la potencia del transformador y el voltaje del devanado primario, Ecuación 3.8.

$$I_1 = \frac{S_{1\phi}}{V_1}$$

**Ecuación 3.8.** Corriente nominal del devanado primario

### 3.1.7 Corriente del devanado secundario

La corriente nominal que circula por el devanado secundario se determina dividiendo la potencia por el voltaje del devanado secundario, la Ecuación 3.9.

$$I_2 = \frac{S_{1\phi}}{V_2}$$

**Ecuación 3.9.** Corriente nominal del devanado secundario

### 3.1.8 Sección y cálculo del calibre del conductor del devanado primario

Para determinar el calibre del conductor en el devanado primario se elige un valor de densidad de corriente disponible dentro de los valores establecidos para el tipo de transformador a diseñar, como se muestra en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Valores de densidades de corriente [20]

Tipo de Transformador	Densidad de corriente ( $\delta$ ) [A/mm <sup>2</sup> ]
Seco	1,5 a 2,5
En aceite	2,5 a 3,5

La sección del devanado primario del conductor se obtiene en base a la relación de la densidad de corriente y la corriente que circula por el conductor con la Ecuación 3.10.

$$S_1 = \frac{I_1}{\delta}$$

**Ecuación 3.10.** Sección de calibre del conductor

Donde:

- $S_1$ : Sección del conductor del devanado primario en  $\text{mm}^2$
- $\delta$ : Densidad de corriente en  $\text{A}/\text{mm}^2$

Determinada la sección del conductor se utiliza la información correspondiente al calibre del conductor seleccionado de la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Resistencia y medidas de alambre de cobre redondo [22]

AWG	DIÁMETRO MÁXIMO [mm]	ÁREA [ $\text{mm}^2$ ]	RESISTENCIA		PESO
			20°C	60°C	g/m
			$\Omega/\text{g}$	$\Omega/\text{g}$	
4	5,29	21,156	0,00078	0,00085	188,000
5	4,74	16,760	0,0008	0,0009	149,000
6	4,21	13,300	0,0011	0,0012	118,200
7	3,78	10,550	0,0015	0,0017	93,7800
8	3,36	8,3360	0,0020	0,0023	74,4000
9	3	6,6320	0,0026	0,0030	59,0000
10	2,68	5,2610	0,0033	0,0038	46,8000
11	2,39	4,1680	0,0041	0,0047	37,1000
12	2,13	3,3080	0,0052	0,0060	29,4000
13	1,91	2,6270	0,0065	0,0075	23,4000
14	1,7	2,0820	0,0082	0,0095	18,5000
15	1,52	1,6520	0,0104	0,0120	14,7000
16	1,36	1,3080	0,0132	0,0153	11,6000
17	1,21	1,0400	0,0166	0,0192	9,2400
18	1,08	0,8229	0,0210	0,0243	7,3200
19	0,97	0,6530	0,0264	0,0306	5,8100
20	0,866	0,5189	0,0332	0,0384	4,6100
21	0,775	0,4116	0,0419	0,0485	3,6600
22	0,693	0,3243	0,0532	0,0616	2,8800

23	0,62	0,2588	0,0666	0,0771	2,3000
24	0,554	0,2047	0,0842	0,0974	1,8200
25	0,495	0,1624	0,1060	0,1227	1,4400
26	0,442	0,1281	0,1350	0,1562	1,1400
27	0,396	0,1022	0,1690	0,1956	0,9080
28	0,353	0,0804	0,2140	0,2476	0,7150
29	0,32	0,0647	0,2660	0,3079	0,5750
30	0,284	0,0506	0,3400	0,3934	0,4500
31	0,257	0,0401	0,4300	0,4976	0,3570
32	0,231	0,3224	0,5320	0,6156	0,2880
33	0,208	0,0256	0,6750	0,7811	0,2700

### 3.1.9 Sección y cálculo de calibre del conductor del devanado secundario

El calibre del conductor del devanado secundario se determina en función de la densidad de corriente y la corriente nominal por medio de la Ecuación 3.11.

$$S_2 = \frac{I_2}{\delta}$$

**Ecuación 3.11.** Sección del conductor para el devanado secundario

Donde:

- $S_2$ : Sección del conductor del devanado secundario en mm<sup>2</sup>

### 3.1.10 Determinación de los taps

El número de taps se determina dividiendo el rango total para el tamaño del paso del taps. En cambio, el número de espiras por tap se determina multiplicando el paso entre cada tap para el número de espiras del tap nominal, lo cual se determina mediante las Ecuaciones 3.12 y 3.13.

$$\#Taps = \frac{r_{TAP}}{p_{TAP}}$$

**Ecuación 3.12.** Número de taps

$$N_{TAP} = p_{TAP}[\%] \cdot N_0$$

**Ecuación 3.13.** Número de espiras por tap [22]

Donde:

- $r_{TAP}$ : Rango total de tap
- $p_{TAP}$ : Pasos entre taps en %
- $N_0$ : Número de espiras en el tap nominal

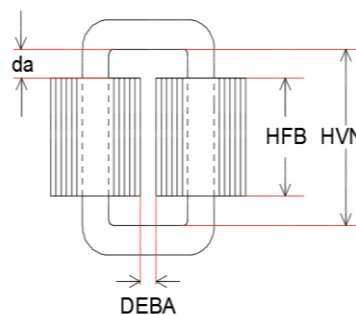
Por lo tanto, el número total de espiras con los taps en el primario y secundario está dado por la Ecuación 3.14.

$$N_{Total} = N_0 + 2 \cdot N_{TAP}$$

**Ecuación 3.14.** Número total de espiras de cada devanado [22]

### 3.1.11 Cálculo de la altura de las bobinas

La altura de las bobinas se calcula de acuerdo al número de capas que se dispone colocar, aprovechando la altura de la ventana del núcleo y considerando la altura física del arrollamiento de ambos devanados. Los devanados primario y secundario deben tener similitud en sus alturas, además se debe considerar un límite de separación entre la altura eléctrica de la bobina y la ventana del núcleo. Los aspectos constructivos se muestran en la Figura 3.3.



**Figura 3.3.** Corte transversal de la altura eléctrica de la bobina [20]

Donde:

- $HFB$ : Altura física de la bobina (Altura eléctrica de la bobina + collarín)
- $da$ : distancia de aislamiento axial
- $DEBA$ : distancia entre bobinas de alto voltaje

La altura de las bobinas se obtiene determinando el número de espiras por capa del devanado secundario mediante la Ecuación 3.15.

$$Esp/Capa_{B2} = \frac{N_2}{No. Capas_{B2}}$$

**Ecuación 3.15.** Espiras por capa del devanado secundario [22]

Donde:

- $Esp/Capa_{B2}$ : Espiras por capa del devanado secundario
- $No. Capas_{B2}$ : Número de capas totales del devanado secundario
- $N_2$ : Número de espiras del devanado secundario

La altura eléctrica del devanado secundario se determina mediante la Ecuación 3.16.

$$HEB2 = [Esp/Capa_{B2} + 1] \cdot L2 \cdot c2 \cdot Tol$$

**Ecuación 3.16.** Altura eléctrica de la bobina del devanado secundario [22]

Donde:

- $HEB2$ : Altura eléctrica de la bobina del devanado secundario en mm
- $L2$ : longitud del conductor en mm
- $c2$ : Cantidad de conductores que se requiere para tener el área de la sección necesaria
- $Tol$ : Tolerancia necesaria, usualmente de 5%

El collarín se determina de acuerdo al voltaje del devanado secundario, puesto que se necesita un aislamiento mayor para mayores voltajes. Las dimensiones del collarín y la distancia de aislamiento axial se obtienen de la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Distancia de los aislamientos [20]

Clase Aislamiento [kV]	Collarín [mm]	Aislamiento Yugo [mm]
≤1,2	6,5	1,5
5	6,5	2,0
8,7	10	2,0
15	13	2,0
15	20	3,0
25	32	4,5
34,5	51	4,5

La distancia de los collarines depende mucho de la altura de la ventana del núcleo y del número de espiras por capa que se ubica en ambas bobinas. Además de que al modificar los collarines se busca tener semejanza entre sus alturas físicas.

El cálculo de la altura física del devanado secundario está dado por la Ecuación 3.17.

$$HFB2 = HEB2 + 2 \cdot AC_{B2}$$

**Ecuación 3.17.** Altura física de la bobina del devanado secundario [22]

Donde:

- $HFB2$ : Altura física de la bobina del devanado secundario en mm
- $AC_{B2}$ : Distancia del collarín del devanado secundario en mm

El cálculo del número de espiras por capas del devanado primario se determina por medio de la Ecuación 3.18.

$$Esp/Capa_{B1} = \frac{HFB1 - 2 \cdot AC_{B1}}{L1 \cdot c1 \cdot Tol} - 1$$

**Ecuación 3.18.** Espiras por capa del devanado primario

En cambio, el número de capas del devanado primario está dada por la Ecuación 3.19.

$$No. Capas_{B1} = \frac{N_{1\_Total}}{Esp/Capa_{B1}}$$

**Ecuación 3.19.** Número de capas del devanado primario

Mediante la Ecuación 3.20 se calcula la distancia del collarín del devanado primario.

$$AC_{B1} = \frac{HFB1 - HEB1}{2}$$

**Ecuación 3.20.** Distancia del collarín de la bobina primaria

### 3.1.12 Cálculo de aislamientos

Los aislamientos por determinar son los siguientes:

- Aislamiento entre espiras
- Aislamiento entre bobinas
- Aislamiento entre núcleo y bobina

La determinación del aislamiento está dada por la Ecuación 3.21.

$$VR = \frac{3 \cdot FO}{No. capas}$$

**Ecuación 3.21.** Voltaje de ruptura del aislamiento [22]

Donde:

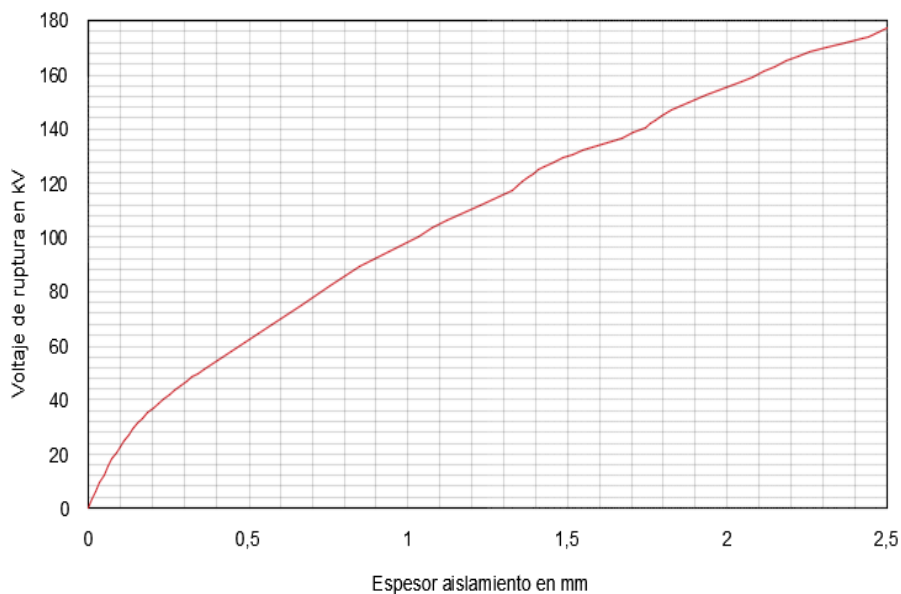
- $VR$ : Voltaje de ruptura del aislamiento empleado en kV
- $FO$ : Frente de onda de impulso en kV

De acuerdo a la norma std IEEE57.12.01 se obtienen los valores del frente de onda con el nivel de aislamiento requerido por medio de la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5.** Valores del frente de onda [3]

Clase Aislamiento [kV]	BIL [kV]	Frente de onda [kV]
1,2	30	75
5	60	125
8,7	75	165
15	95	165

Determinado el voltaje de ruptura del aislamiento, se obtiene el aislamiento adecuado entre espiras y entre el núcleo y el devanado primario, mediante la Figura 3.4.



**Figura 3.4.** Resultado de la resistencia a la ruptura del aislamiento [22]

Generalmente, el aislamiento entre el núcleo y devanado secundario se establece entre 1,5 a 2 mm de grosor de material aislante.

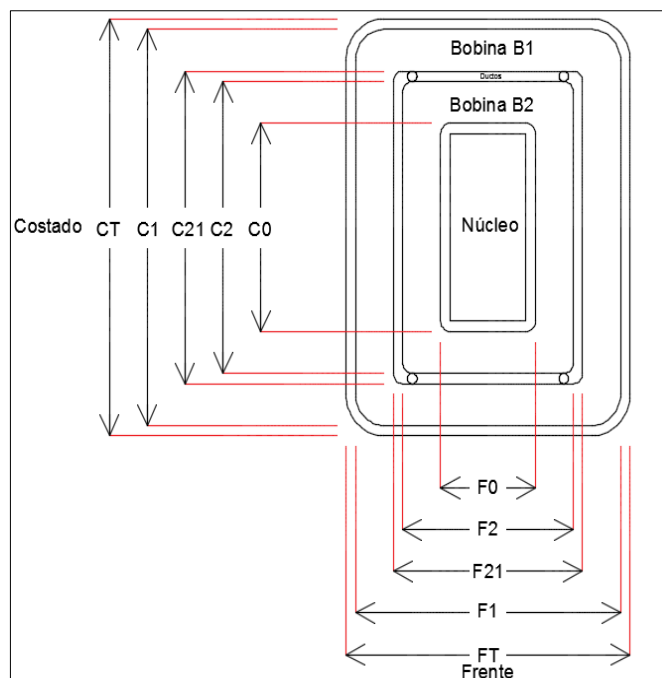
El aislamiento entre los devanados primario y secundario se determina mediante el valor de voltaje de la clase de aislamiento, como se muestra en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6.** Aislamiento entre los devanados de alto y bajo voltaje [20]

Clase de Aislamiento [kV]	Aislamiento [mm]
1,2	1,7
5	4,5
8,7	4,9
15	5,5

### 3.1.13 Cálculo de perímetros o axiales

El cálculo de los axiales permite conocer la cantidad de alambre de cobre esmaltado necesario para la construcción de ambas bobinas, de alto y bajo voltaje. Además, con la sección del núcleo se obtienen los axiales totales de la bobina como se muestra en la Figura 3.5.



**Figura 3.5.** Vista superior de la ubicación de las bobinas con los aislamientos [22]

Se determinan los espesores de las capas que conforman las bobinas, previo a la obtención de los axiales, mediante las Ecuaciones 3.22, 3.23, 3.24 y 3.25.



$$EC2C = [(No\_Capas_{B2} \cdot A2) + (No\_Capas_{B2} - 1) \cdot Ais\_capas_{B2}] \cdot Tol + (DC2 \cdot No\_DC2)$$

**Ecuación 3.22.** Espesor de costado de la bobina secundaria [22]

$$EC1C = [(No\_Capas_{B1} \cdot A1) + (No\_Capas_{B1} - 1) \cdot Ais\_capas_{B1}] \cdot Tol + (DC1 \cdot No\_DC1)$$

**Ecuación 3.23.** Espesor de costado de la bobina del primario [22]

$$EC2F = [(No\_Capas_{B2} \cdot A2) + (No\_Capas_{B2} - 1) \cdot Ais\_capas_{B2}] \cdot Tol + (DF2 \cdot No\_DF2)$$

**Ecuación 3.24.** Espesor de frente de la bobina secundaria [22]

$$EC1F = [(No\_Capas_{B1} \cdot A1) + (No\_Capas_{B1} - 1) \cdot Ais\_capas_{B1}] \cdot Tol + (DF1 \cdot No\_DF1)$$

**Ecuación 3.25.** Espesor de frente de la bobina del primario [22]

Donde:

- $EC2C$ : Espesor de costado de la bobina secundaria en mm
- $EC1C$ : Espesor de costado de la bobina primaria en mm
- $EC2F$ : Espesor de frente de la bobina secundaria en mm
- $EC1F$ : Espesor de frente de la bobina primaria en mm
- $A2$ : Ancho del conductor de la bobina secundaria en mm
- $Ais\_capas_{B2}$ : Aislamiento entre capas de la bobina secundaria en mm
- $DC2$ : Espesor de los ductos de costado de la bobina secundaria en mm
- $No\_DC2$ : Número de los ductos de costado de la bobina secundaria
- $DF2$ : Espesor de los ductos de frente de la bobina secundaria en mm
- $No\_DF2$ : Número de los ductos frente a la bobina secundaria

Determinado los espesores de las capas, se calculan los axiales de los frentes y costados de cada capa de la bobina.

### 3.1.14 Formaleta para la bobina

Las dimensiones de la formaleta para la construcción de la bobina, se hace mediante el espesor y profundidad del núcleo, con las Ecuaciones 3.26 y 3.27.

$$Af = E + 5mm$$

**Ecuación 3.26.** Ancho de la formaleta para la bobina

$$La = LN + 5mm$$

**Ecuación 3.27.** Profundidad de la formaleta para la bobina

La altura de la formaleta ( $Fl$ ) debe ser mayor a la altura física que tiene la bobina ( $HFB$ ) y está dada por la Ecuación 3.28.

$$Fl = HFB + 5mm$$

**Ecuación 3.28.** Altura de la formaleta para la bobina

Donde:

- $Af$ : Ancho de la formaleta en cm o mm
- $La$ : Profundidad de la formaleta en cm o mm
- $Fl$ : Altura de la formaleta en cm o mm

### 3.1.15 Determinación de las dimensiones de frente de la bobina

Las dimensiones de los frentes de ambas bobinas del núcleo se determinan mediante las Ecuaciones 3.29, 3.30, 3.31, 3.32 y 3.33.

$$F0 = Af + 2 \cdot Ais_0$$

**Ecuación 3.29.** Distancia del frente del núcleo [22]

$$F2 = F0 + 2 \cdot EC2F$$

**Ecuación 3.30.** Distancia del frente de la bobina B2 [22]

$$F21 = F2 + (DC_{2-1} + Ais_{2-1}) \cdot 2$$

**Ecuación 3.31.** Distancia del frente de la capa entre bobinas [22]

$$F1 = F21 + 2 \cdot EC1C$$

**Ecuación 3.32.** Distancia del frente de la bobina B1 [22]

$$FT = F1 \cdot K_f$$

**Ecuación 3.33.** Distancia del frente total de la bobina [22]

Donde:

- $F0$ : Distancia de frente del núcleo sumado el espesor de aislamiento inicial que recubre al núcleo en mm
- $F2$ : Distancia de  $F0$  sumado el espesor de la bobina del devanado secundario y su aislamiento correspondiente en mm
- $F21$ : Distancia de  $F2$  sumado el espesor de los costados de aislamiento entre bobinas en mm
- $F1$ : Distancia de  $F21$  sumado el espesor de la bobina del devanado primario en mm
- $FT$ : Distancia  $F1$  sumado el aislamiento final a la bobina del devanado primario en mm
- $Af$ : Ancho de la formaleta en mm
- $Ais_0$ : Aislamiento inicial entre el núcleo y la bobina en mm
- $DC_{2-1}$ : Distancia de los ductos de costado en mm
- $k_f$ : Factor de tolerancia de frente del 5%

### 3.1.16 Determinación de las dimensiones de los costados de la bobina

Las dimensiones de los costados de ambas bobinas se determinan mediante las Ecuaciones 3.34, 3.35, 3.36, 3.37 y 3.38.

$$C0 = La + 2 \cdot Ais_0$$

**Ecuación 3.34.** Distancia de los costados del núcleo [22]

$$C2 = C0 + 2 \cdot EC2C$$

**Ecuación 3.35.** Distancia de los costados de la bobina B2 [22]

$$C21 = C2 + (DF_{2-1} + Ais_{2-1}) \cdot 2$$

**Ecuación 3.36.** Distancia de los costados de la capa entre bobinas [22]

$$C1 = C21 + 2 \cdot EC1F$$

**Ecuación 3.37.** Distancia de los costados de la bobina B1 [22]

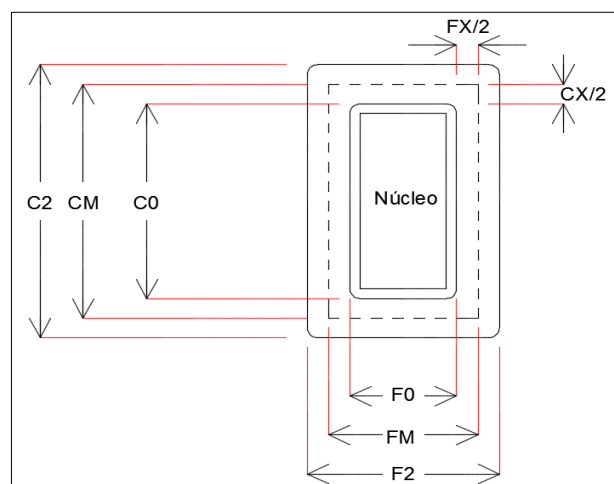
$$CT = C1 \cdot K_C$$

**Ecuación 3.38.** Distancia de los costados de la bobina total [22]

Donde:

- $C0$ : Distancia de costado del núcleo sumado el espesor de aislamiento inicial que recubre al núcleo en mm
- $C2$ : Distancia de  $C0$  sumado el espesor de la bobina del devanado secundario y su aislamiento correspondiente en mm
- $C21$ : Distancia de  $C2$  sumado el espesor de los costados de aislamiento entre bobinas en mm
- $C1$ : Distancia de  $C21$  sumado el espesor de la bobina del devanado primario en mm
- $CT$ : Distancia  $C1$  sumado el aislamiento final a la bobina del devanado primario en mm
- $La$ : Ancho de la formaleta en mm
- $DF_{2-1}$ : Distancia de los ductos de frente en mm
- $k_C$ : Factor de tolerancia de costado del 10%

Los factores de tolerancia de frente y de costado de la bobina tienen el rango del 5% y 10% respectivamente, por la forma de construcción ovalada en ambas partes de la bobina, por tal razón el factor de tolerancia de los costados es algo mayor con respecto a los frentes. La configuración de los perímetros medios se muestra en la Figura 3.6.



**Figura 3.6.** Configuración de los perímetros medios [22]

Los perímetros medios de la bobina se determinan con las Ecuaciones 3.39, 3.40 y 3.41.

$$PM2 = 2 \cdot FM2 + 2 \cdot CM2$$

$$CX = \frac{C2 - C0}{2}$$

$$FX = \frac{F2 - F0}{2}$$

$$CM2 = C0 + CX = C0 + \frac{C2 - C0}{2}$$

$$FM2 = F0 + FX$$

Por lo tanto:

$$PM2 = 2 \cdot \left( F0 + \frac{F2 - F0}{2} \right) + 2 \cdot \left( C0 + \frac{C2 - C0}{2} \right)$$

$$PM2 = 2 \cdot F0 + F2 - F0 + 2 \cdot C0 + C2 - C0$$

De donde se obtiene los perímetros medios:

$$PM2 = F2 + C2 + F0 + C0$$

**Ecuación 3.39.** Perímetro medio del devanado secundario [22]

$$PM1 = F21 + F1 + C21 + C1$$

**Ecuación 3.40.** Perímetro medio del devanado primario [22]

$$PMT = \frac{PM1 + PM2}{2 \cdot (10)}$$

**Ecuación 3.41.** Perímetro medio total [22]

Donde:

- *CX*: Distancia que se encuentra entre el C0 y CM en mm
- *FX*: Distancia que se encuentra entre el F0 y FM en mm
- *CM*: Costado medio dado en mm
- *FM*: Frente medio dado en mm
- *PM1*: Perímetro medio primario en mm
- *PM2*: Perímetro medio secundario en mm
- *PMT*: Frente medio total dado en cm

### 3.1.17 Cálculo de la impedancia del transformador y pérdidas en el cobre

#### 3.1.17.1 Cálculo del peso del cobre

El peso del cobre se determina mediante la cantidad de alambre esmaltado que se utiliza en la construcción de las bobinas. El peso del cobre de los devanados se calcula mediante las Ecuaciones 3.42, 3.43 y 3.44 [22].

$$Peso_{B1} = 0,0000089 \cdot PM1 \cdot N_{1\_Total} \cdot S_1$$

**Ecuación 3.42.** Peso de la bobina del devanado primario [22]

$$Peso_{B2} = 0,0000089 \cdot PM2 \cdot N_2 \cdot S_2$$

**Ecuación 3.43.** Peso de la bobina del devanado secundario [22]

$$Peso_{total} = Peso_{B1} + Peso_{B2}$$

**Ecuación 3.44.** Peso total de la bobina [22]

Donde:

- $Peso_{B1}$ : Peso total de la bobina de alto voltaje en kg
- $Peso_{B2}$ : Peso total de la bobina de bajo voltaje en kg
- $Peso_{total}$ : Peso en cobre de la bobina total en kg
- $N_{1\_Total}$ : Número total de espiras de la bobina de alto voltaje
- $N_2$ : Número total de espiras de la bobina de bajo voltaje

#### 3.1.17.2 Resistencia óhmica del transformador

La componente resistiva del transformador permite obtener las pérdidas presentes en el cobre y está dada por las Ecuaciones 3.45, 3.46 y 3.47.

$$R_1 = \frac{\rho \cdot PM1 \cdot N_1}{S_1}$$

**Ecuación 3.45.** Resistencia de la bobina del primario [22]

$$R_2 = \frac{\rho \cdot PM2 \cdot N_2}{S_2}$$

**Ecuación 3.46.** Resistencia de la bobina del secundario [22]

$$R_{serie} = R_1 + a^2 \cdot R_2$$

**Ecuación 3.47.** Resistencia serie de la bobina referido al primario [22]

Donde:

- $R_1$ : Resistencia óhmica del devanado primario en  $\Omega$
- $R_2$ : Resistencia óhmica del devanado secundario en  $\Omega$
- $R_{serie}$ : Resistencia serie del circuito referido al primario en  $\Omega$
- $\rho$ : Resistividad del cobre de  $1,78 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{mm}$

### 3.1.17.3 Corrección de la temperatura de la resistencia del transformador

La corrección de temperatura de la resistencia a 85°C se realiza para determinar las pérdidas mediante la Ecuación 3.48, de acuerdo a la norma NTE INEN 2114.

Donde:

$$R_f = R \left( \frac{T_{Cu} + T_f}{T_{Cu} + T} \right)$$

$$R_f = R \left( \frac{234,5 + 85}{234,5 + 20} \right)$$

Por lo tanto:

$$R_f = R \cdot 1,25$$

**Ecuación 3.48.** Resistencia final del transformador [20]

Donde:

- $R_f$ : Resistencia final corregida a 85°C en  $\Omega$
- $R$ : Resistencia inicial a temperatura ambiente en  $\Omega$
- $T_{Cu}$ : Temperatura de 234,5 para el cobre en °C
- $T$ : Temperatura ambiente por corregir de 20°C
- $T_f$ : Temperatura final a 85°C

#### 3.1.17.4 Pérdidas en el cobre

Las pérdidas en el cobre se determinan en condiciones normales de operación y con carga nominal. Además, dependen de la corriente que circula por los devanados primario y secundario y de la resistencia del cobre de los bobinados [22].

Las pérdidas en el cobre se determinan mediante las Ecuaciones 3.49, 3.50 y 3.51.

$$W_{cu1} = R_1 \cdot I_1^2$$

**Ecuación 3.49.** Pérdidas en el cobre de la bobina del primario [22]

$$W_{cu2} = R_2 \cdot I_2^2$$

**Ecuación 3.50.** Pérdidas en el cobre de la bobina del secundario [22]

$$WT_{Cu} = W_{cu1} + W_{cu2}$$

**Ecuación 3.51.** Pérdidas totales de los bobinados [22]

Donde:

- $W_{cu1}$ : Pérdidas en el cobre del lado de alto voltaje en W
- $W_{cu2}$ : Pérdidas en el cobre del lado de bajo voltaje en W
- $WT_{Cu}$ : Pérdidas totales en el cobre de los devanados en W

#### 3.1.17.5 Componente resistiva del transformador

La determinación de la componente resistiva del está dada por la Ecuación 3.52.

$$R = \frac{R_{cc}}{Z_B}$$

$$R = \frac{\frac{WT_{Cu}}{In^2}}{\frac{S}{In^2}} \cdot 100$$

Por lo tanto:

$$R = \frac{WT_{Cu}}{S_{1\phi}} \cdot 100$$

**Ecuación 3.52.** Resistencia del transformador [22]

Donde:

- $R$ : Resistencia del transformador en %



- $R_{cc}$ : Resistencia de cortocircuito en  $\Omega$
- $Z_B$ : Impedancia base dada en  $\Omega$
- $I_n$ : Corriente nominal dada en A

### 3.1.17.6 Componente reactiva del transformador

La reactancia del transformador se determina mediante la Ecuación 3.53. El desarrollo para encontrar la reactancia del transformador es el siguiente.

$$a = \frac{EC2C + EC2F}{2 \cdot (10)}$$

$$b = \frac{ais12}{10}$$

$$c = \frac{EC1C + EC1F}{2 \cdot (10)}$$

$$Fc = b + \frac{a + c}{3}$$

$$HEB = \frac{HEB1 + HEB2}{2 \cdot (10)}$$

$$\alpha = HEB + \frac{a + b + c}{3}$$

Por lo tanto:

$$X = \frac{0,756 \cdot f \cdot N_1^2 \cdot I_1 \cdot PM1 \cdot Fc}{V_1 \cdot \alpha \cdot 10^5}$$

**Ecuación 3.53.** Reactancia inductiva del transformador [22]

Donde:

- $X$ : Reactancia del transformador en %
- $\alpha$ : Distancia del curso del flujo disperso en mm

### 3.1.17.7 Impedancia de cortocircuito

La impedancia del transformador se calcula con la reactancia y la resistencia como se muestra en la Ecuación 3.54.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

**Ecuación 3.54.** Impedancia del transformador [22]

Donde:

- $Z$ : Impedancia del transformador dada en %

### 3.1.18 Dimensiones y pérdidas en el núcleo

#### 3.1.18.1 Determinación de las dimensiones del núcleo

Se determina las dimensiones del núcleo con una pequeña tolerancia, debido a errores por construcción, aplicando la Ecuación 3.55.

$$HVN = HFB + 10$$

**Ecuación 3.55.** Altura de la ventana del núcleo [22]

El cálculo de la distancia entre piernas considera la distancia entre bobinas y está dada por la Ecuación 3.56.

$$DEP = DEBA + FT$$

**Ecuación 3.56.** Distancia entre piernas [22]

La distancia entre las bobinas de alto voltaje (DEBA) se asume de 10 mm. Además, se determina el ancho de la ventana del núcleo con la distancia entre piernas y el ancho del núcleo, mediante la Ecuación 3.57.

$$AVN = DEP - E$$

**Ecuación 3.57.** Ancho de la ventana del núcleo [22]

Por medio de la Ecuación 3.58 se determina el ancho total del núcleo.

$$AN = DEP + E$$

**Ecuación 3.58.** Ancho total del núcleo [22]

La altura total del núcleo se calcula mediante la Ecuación 3.59.

$$HN = HVN + 2 \cdot E$$

**Ecuación 3.59.** Altura total del núcleo [22]

Las dimensiones obtenidas del núcleo se determinan en milímetros para facilidad de los cálculos posteriores.

### 3.1.18.2 Volumen del núcleo

La determinación del volumen del núcleo se realiza mediante la división por secciones del núcleo, lo cual permite conocer el volumen total mediante las Ecuaciones 3.60, 3.61, 3.62 y 3.63.

$$VP = 2HVN \cdot LN \cdot E$$

**Ecuación 3.60.** Volumen de las piernas del núcleo [22]

$$VY = 2AVN \cdot LN \cdot E$$

**Ecuación 3.61.** Volumen de los yugos del núcleo [22]

$$VE = 4 \cdot E \cdot E \cdot LN$$

**Ecuación 3.62.** Volumen de las esquinas del núcleo [22]

$$VT = VP + VY + VE$$

**Ecuación 3.63.** Volumen total del núcleo [22]

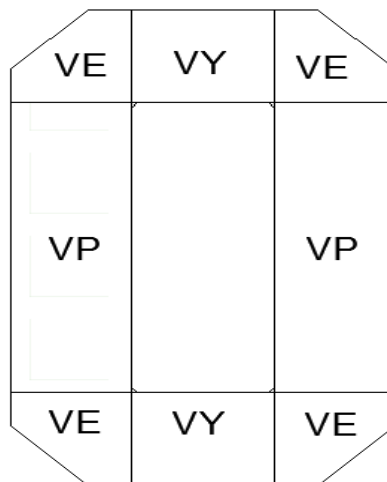
Donde:

$VP$ : Volumen de las piernas del núcleo en  $\text{cm}^3$

$VY$ : Volumen de los yugos del núcleo en  $\text{cm}^3$

$VE$ : Volumen de las esquinas del núcleo en  $\text{cm}^3$

La configuración de las secciones de los volúmenes se muestra en la Figura 3.7.



**Figura 3.7.** Configuración del núcleo para el cálculo del volumen [22]

### 3.1.18.3 Determinación del peso del núcleo

Con la configuración del núcleo y su división por secciones, se determina el peso mediante la densidad del hierro, con las Ecuaciones 3.64, 3.65, 3.66 y 3.67.

$$PP = \rho_{Fe} \cdot VP \cdot 0,98$$

**Ecuación 3.64.** Peso de las piernas del núcleo [22]

$$PY = \rho_{Fe} \cdot VY \cdot 0,98$$

**Ecuación 3.65.** Peso de los yugos del núcleo [22]

$$PE = \rho_{Fe} \cdot VE \cdot 0,98$$

**Ecuación 3.66.** Peso de las esquinas del núcleo [22]

$$PT = PP + PY + PE$$

**Ecuación 3.67.** Peso total del núcleo [22]

El factor de apilamiento de las láminas de 0,98 se multiplica a cada una de las secciones del peso del núcleo.

Donde:

- $\rho_{Fe}$ : Densidad del hierro de 0,00765 en kg/cm<sup>3</sup> [20]

### 3.1.18.4 Determinación de las pérdidas en el hierro

En base al material utilizado en la construcción del núcleo se determinan las pérdidas en el hierro, para lo cual se procede a dividir nuevamente en secciones.

De acuerdo a la densidad de flujo y dependiendo de la frecuencia, se seleccionan los valores de las pérdidas en el hierro, en W/kg, obtenidas de las curvas mostradas en el Anexo I [22].

Las pérdidas en el hierro de cada una de las secciones se determinan mediante las Ecuaciones 3.68, 3.69, 3.70 y 3.71.

$$WP = P_{Fe} \cdot PP$$

**Ecuación 3.68.** Pérdidas de las piernas del núcleo [22]

$$WY = P_{Fe} \cdot PY$$

**Ecuación 3.69.** Pérdidas de los yugos del núcleo [22]

$$WE = P_{Fe} \cdot PE$$

**Ecuación 3.70.** Pérdidas de las esquinas del núcleo [22]

$$WT_{Fe} = WP + WY + WE$$

**Ecuación 3.71.** Pérdidas totales del núcleo [22]

Las pérdidas en el hierro están dadas en W.

Donde:

- $P_{Fe}$ : Pérdidas unitarias en la lámina magnética obtenidas del Anexo I en W/kg [22]

### 3.1.19 Cálculo de la corriente de excitación

La corriente de excitación define si el diseño y construcción del transformador son los adecuados. La corriente de excitación se encuentra compuesta por la componente magnetizante y la de pérdidas [12].

La magnitud de la corriente de excitación se determina mediante las curvas del tipo de material utilizado en la construcción del núcleo. Estas tablas generalmente son facilitadas por las compañías y fábricas que elaboran las láminas y muchas veces se estiman las curvas por un material similar utilizado en las construcciones de núcleos. En la mayoría de los casos se utiliza la lámina tipo M-4 por sus características eléctricas.

Las curvas de cada tipo de lámina tienen sus propias características, por lo que la corriente de excitación se encuentra en función del flujo aplicado y la frecuencia a la que se trabaja. Las pérdidas en el hierro del material se obtienen de las curvas mostradas en el Anexo II, dadas en VA/kg [22].

Por medio de las Ecuaciones 3.72, 3.73, 3.74 y 3.75, se determinan las potencias de pérdidas asociadas a la corriente de excitación.

$$VAP = S_{Fe} \cdot PP$$

**Ecuación 3.72.** Potencia aparente de las piernas [22]

$$VAY = S_{Fe} \cdot PY$$

**Ecuación 3.73.** Potencia aparente de los yugos [22]

$$VAE = S_{Fe} \cdot PE$$

**Ecuación 3.74.** Potencia aparente de las esquinas [22]

$$VAT_{Fe} = VAP + VAY + VAE$$

**Ecuación 3.75.** Potencia aparente total [22]

Los valores de potencia aparente de cada una de las secciones son expresados en VA.

Donde:

- $S_{Fe}$ : Pérdidas unitarias de la lámina magnética en VA/kg [22]

### 3.1.20 Corriente de pérdidas en el núcleo

La corriente de pérdidas en el núcleo necesaria para compensar las pérdidas por histéresis y por corrientes parasitas se determina mediante la Ecuación 3.76.

$$I_c = \frac{WT_{Fe}}{V_2}$$

**Ecuación 3.76.** Corriente de pérdidas en el núcleo [22]

### 3.1.21 Corriente de excitación

La corriente de excitación, conocida también como corriente en vacío, se determina por medio de la Ecuación 3.77.

$$I_o = \frac{VAT_{Fe}}{V_2}$$

**Ecuación 3.77.** Corriente de excitación [22]

La corriente en porcentaje está dada por la Ecuación 3.78.

$$I_o\% = \frac{I_o}{I_2} \cdot 100\%$$

**Ecuación 3.78.** Corriente de excitación en porcentaje [22]

### 3.1.22 Corriente de magnetización

La corriente de magnetización se determina mediante la Ecuación 3.79.

$$I_m = \sqrt{I_o^2 - I_c^2}$$

**Ecuación 3.79.** Corriente de magnetización [22]

### 3.1.23 Norma NTE INEN 2114

La norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2114 está enfocada en transformadores monofásicos sumergidos en aceite y tipo secos lo cual proporciona valores de corriente sin

carga ( $I_0$ ), pérdidas sin carga ( $P_0$ ), pérdidas con carga a 85° C ( $P_c$ ), pérdidas totales ( $P_t$ ) y la impedancia de cortocircuito ( $Z$ ) a 85° C [23]. Los cálculos del diseño se comparan y verifican con los valores establecidos en la Tabla 3.7, si los parámetros del diseño no cumplen con la norma, se rediseña hasta que los parámetros estén dentro del rango de los valores estandarizados.

**Tabla 3.7.** Valores máximos permisibles de los transformadores monofásicos [23]

Potencia nominal [kVA]	$I_0$ [% $I_n$ ]	$P_0$ [W]	$P_c$ [W]	$P_t$ [W]	$Z$ [%]
2,5	2,5	19	65	84	3,0
3	2,5	21	70	91	3,0
5	2,5	31	91	122	3,0
10	2,5	52	142	194	3,0
15	2,4	68	192	260	3,0
25	2,0	98	289	387	3,0
37,5	2,0	130	403	533	3,0
50	1,9	160	512	672	3,0
75	1,7	214	713	927	3,0
100	1,6	263	897	1160	3,0
167	1,5	379	1360	1739	3,0

### 3.2 Cálculo práctico de un transformador monofásico de núcleo arrollado para el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia

El cálculo práctico trata del diseño del transformador monofásico del tipo arrollado y las consideraciones a tener para la construcción, para lo cual se diseña a partir de los datos iniciales.

#### Datos Iniciales

$$S_{1\phi} = 2,5 \text{ kVA}$$

$$V_1 = 220 \text{ V}$$

$$V_2 = 220 \text{ V}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$k = 1,24$$

$$\beta = 14300 \text{ Gauss}$$

### 3.2.1 Voltios/espira

Para el voltaje por espira se considera una constante  $k = 1,24$ .

$$V/_{Esp} = k \cdot \sqrt{S_{1\phi}}$$

$$V/_{Esp} = 1,24 \cdot \sqrt{2,5}$$

$$V/_{Esp} = 1,96 \text{ voltios / espira}$$

### 3.2.2 Número de espiras del primario y del secundario

En base al voltaje de alimentación de 220 Voltios se determina el número de espiras de ambos devanados:

$$N_1 = \frac{V_1}{V/_{Esp}}$$

$$N_1 = \frac{220V}{1,961 \text{ voltios / espira}}$$

$$N_1 = 112,188 \text{ espiras}$$

$$N_1 \approx 112 \text{ espiras}$$

En cambio, en el caso de tener un voltaje de alimentación de 127 Voltios se tiene:

$$N_1 = \frac{V_1}{V/_{Esp}}$$

$$N_1 = \frac{127V}{1,961 \text{ voltios / espira}}$$

$$N_1 = 64,76 \text{ espiras}$$

$$N_1 \approx 65 \text{ espiras}$$

Para el voltaje de salida se tiene el número de espiras del devanado de bajo voltaje.

$$N_2 = \frac{V_2}{V/_{Esp}}$$

$$N_2 = \frac{220V}{1,961 \text{ voltios / espira}}$$



$$N_2 = 112,188 \text{ espiras}$$

$$N_2 \approx 112 \text{ espiras}$$

### 3.2.3 Sección del núcleo

La sección del núcleo está dada por:

$$A_{Fe} = \frac{V/Esp \cdot 10^8}{4.44 \cdot f \cdot \beta_m}$$

$$A_{Fe} = \frac{1,961 \frac{\text{voltios}}{\text{espira}} \cdot 10^8}{4,44 \cdot 60 \text{ Hz} \cdot 14300 \text{ Gauss}}$$

$$A_{Fe} = 51,48 \text{ cm}^2$$

### 3.2.4 Espesor del núcleo

Obtenido el área del núcleo se determinar el espesor mediante la expresión.

$$E = \sqrt{\frac{A_{Fe}}{4 \cdot f_e}}$$

$$E = \sqrt{\frac{51,48 \text{ cm}^2}{4 \cdot 0,98}}$$

$$E = 3,6 \text{ cm}$$

### 3.2.5 Profundidad del núcleo

La profundidad del núcleo es:

$$LN = 4 \cdot E$$

$$LN = 4 \cdot 3,6$$

$$LN = 14,4 \text{ cm}$$

### 3.2.6 Número de laminaciones

El número de laminaciones se calcula con la expresión.

$$\text{No. laminaciones} = \frac{2E}{\text{Espesor del acero eléctrico}}$$

$$\text{No. laminaciones} = \frac{2 \cdot 3,6}{0,28}$$

*No. laminaciones = 25,71 vueltas*

*No. laminaciones ≈ 26 vueltas*

### 3.2.7 Corriente del devanado primario y secundario

- Corriente que circula por el devanado primario con el voltaje de 220 voltios.

$$I_1 = \frac{S_{1\phi}}{V_1}$$

$$I_1 = \frac{2,5kVA}{220V}$$

$$I_1 = 11,36 A$$

- Corriente que circula por el devanado primario con el voltaje de 127 voltios.

$$I_1 = \frac{S_{1\phi}}{V_1}$$

$$I_1 = \frac{2,5kVA}{127V}$$

$$I_1 = 19,69 A$$

- Corriente que circula por el devanado secundario.

$$I_2 = \frac{S_{1\phi}}{V_2}$$

$$I_2 = \frac{2,5kVA}{220V}$$

$$I_2 = 11,36 A$$

### 3.2.8 Selección de conductores

De acuerdo al diseño de un transformador monofásico tipo seco se considera una densidad de corriente aproximada de 2 A/mm<sup>2</sup> que permita seleccionar el conductor adecuado.

$$S_1 = \frac{I_1}{\delta}$$

$$S_1 = \frac{11,36}{2 \frac{A}{mm^2}}$$

$$S_1 = 5,68 mm^2$$

El conductor que se selecciona para el devanado primario es el mismo para ambos casos de voltaje de entrada ya que de alimentación de 127 voltios es para una conexión particular y la construcción se desarrolló para un voltaje de alimentación de 220 voltios.

Para el devanado secundario la sección del conductor es el siguiente:

$$S_2 = \frac{I_2}{\delta}$$

$$S_2 = \frac{11,36}{2 \frac{A}{mm^2}}$$

$$S_2 = 5,68 \text{ mm}^2$$

Conociendo la sección del conductor y por medio de la tabla 3.3 que presenta la resistencia y medidas de alambre de cobre redondo se selecciona el calibre del conductor.

Conductor a utilizar en el devanado primario y secundario es el siguiente.

Devanado Primario:

Calibre: 10 AWG

Área: 5,2610 mm<sup>2</sup>

Diámetro: 2,68 mm

Resistencia a 20 °C: 0,0033 Ω/g

Peso: 46,8 g/m

Devanados Secundario:

Calibre: 10 AWG

Área: 5,2610 mm<sup>2</sup>

Diámetro: 2,68 mm

Resistencia a 20 °C: 0,0033 Ω/g

Peso: 46,8 g/m

### 3.2.9 Cálculo de los taps

Para el cálculo del número total de los taps se establece el rango y el tamaño del paso del tap.

$$\#Taps = \frac{r_{TAP}}{p_{TAP}}$$

$$\#Taps = \frac{+/-5}{2,5}$$

$$\#Taps = +/-2$$

El rango total de los tap es de 5, por lo tanto, se tiene dos taps por encima y dos por debajo del tap nominal. Y para conocer el número de espiras por cada tap se calcula con la siguiente expresión.

$$N_{TAP} = p_{TAP}[\%] \cdot N_0$$

$$N_{TAP} = 2,5[\%] \cdot 112 \text{ espiras}$$

$$N_{TAP} = 3 \text{ espiras} \cdot Tap$$

El número de espiras por cada paso del tap se aumenta y disminuye a razón de 3 y 6 espiras con respecto al tap nominal. Por lo tanto, el número total de espiras en el devanado primario es:

$$N_{1\_Total} = N_1 + N_{TAP} \cdot 2$$

$$N_{1\_Total} = 112 + 3 \cdot 2$$

$$N_{1\_Total} = 118 \text{ espiras}$$

El rango y pasos de los taps determinados dan como resultado los voltajes requeridos para el devanado primario mostrados en la Tabla 3.8.

**Tabla 3.8.** Valores de los voltajes regulados con cada tap

Posición del tap	Número de espiras	Relación de trans. teórico	Relación de trans. real	Voltaje del primario teórico [V]	Voltaje del primario real [V]	Variación constructiva [%]
1	106	0,951	0,946	209,2	208,2	-0,47
2	109	0,975	0,973	214,5	214,1	-0,18
3	112	1	1	220	220	0
4	115	1,025	1,027	225,5	225,9	0,18
5	118	1,051	1,054	231,2	231,8	0,26

### 3.2.10 Altura de las Bobinas

El cálculo de la altura de las bobinas se determina mediante el número de espiras por capa que se coloca en el devanado primario y secundario.

- Devanado primario

$$Esp/Capa_{B1} = \frac{N_{1\_Total}}{No\_Capas_{B1}}$$

$$Esp/Capa_{B1} = \frac{118 \text{ espiras}}{4}$$

$$\frac{Esp}{Capa_{B1}} = 29,5 \text{ espiras/capa}$$

Aproximando el valor se tiene:

$$\frac{Esp}{Capa_{B1}} = 30 \text{ espiras/capa}$$

- Devanado secundario:

$$Esp/Capa_{B2} = \frac{N_2}{No\_Capas_{B2}}$$

$$Esp/Capa_{B2} = \frac{112 \text{ espiras}}{4}$$

$$\frac{Esp}{Capa_{B2}} = 28 \text{ espiras/capa}$$

- Altura eléctrica de la bobina del devanado primario y secundario

$$HEB1 = [Esp/Cap_{B1} + 1] \cdot L1 \cdot c1 \cdot Tol$$

$$HEB1 = [30 + 1] \cdot 2,68 \cdot 1 \cdot 1$$

$$HEB1 = 83,08 \text{ mm}$$

$$HEB2 = [Esp/Cap_2 + 1] \cdot L2 \cdot c2 \cdot Tol$$

$$HEB2 = [28 + 1] \cdot 2,68 \cdot 1 \cdot 1$$

$$HEB2 = 77,72 \text{ mm}$$

- Dimensionamiento del collarín

La distancia de los dos collarines del devanado de alto y bajo voltaje dependen de los voltajes de alimentación y de salida que son 220 V y 220 V respectivamente, para lo cual por medio de la Tabla 3.4 se obtiene la clase de aislamiento. Por lo que si los voltajes son menores a 1,2 kV se tiene la distancia de aislamiento del collarín por lado de la bobina de 8 mm. En cambio, si la distancia del collarín es pequeña se puede asumir valores dependiendo de la altura de la ventana del núcleo, del mismo modo depende del número de espiras por capa que se ubique en la bobina. Por tal razón las distancias de aislamiento de los collarines en el devanado primario no necesariamente es 8 mm, sino de 23 mm.

En cambio, la distancia de los collarines del devanado de bajo voltaje es de 26 mm por lado de la bobina.

- Altura física de la bobina del devanado primario y secundario

$$HFB1 = HEB1 + 2 \cdot AC_{B1}$$

$$HFB1 = 83,08 + 2 \cdot 23$$

$$HFB1 = 129,08 \text{ mm}$$

Por lo tanto, se tiene:

$$HFB1 = 129 \text{ mm}$$

$$HFB2 = HEB2 + 2 \cdot AC_{B2}$$

$$HFB2 = 77,72 + 2 \cdot 26$$

$$HFB2 = 129,72 \text{ mm}$$

En cambio, la altura física definitiva de la bobina es:

$$HFB = 130 \text{ mm}$$

Comprobación del collarín del devanado del primario.

$$AC_{B1} = \frac{HFB - HEB1}{2}$$

$$AC_{B1} = \frac{130 - 83,08}{2}$$

$$AC_{B1} = 23,46 \text{ mm}$$

Por medio de la determinación del collarín del devanado de alto voltaje se verificar si la distancia de aislamiento es la correcta, por lo que si las alturas físicas de los devanados son similares ya no se tiene que modificar la distancia de los collarines.

### 3.2.11 Asilamientos de la bobina

Para el aislamiento entre capas, espiras y entre bobinas con el núcleo. Se obtiene primero el voltaje de ruptura para el cálculo de los aislamientos de acuerdo a la Tabla 3.5 y Figura 3.4.

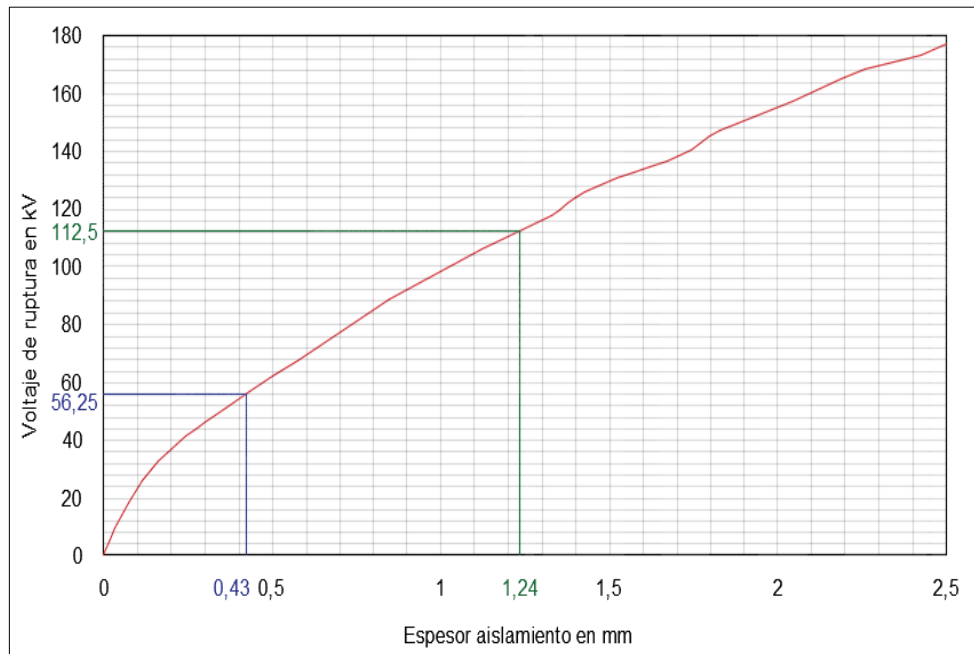
$$VR = \frac{3 \cdot FO}{No\_capas}$$

$$VR0 = \frac{3 \cdot 75kV}{2} = 112,5kV$$

$$VR1 = \frac{3 \cdot 75kV}{4} = 56,25kV$$

$$VR2 = \frac{3 \cdot 75kV}{4} = 56,25kV$$

De acuerdo a los voltajes de ruptura determinados y de la Figura 3.4, se determina los espesores de cada uno de los aislamientos a utilizar en la construcción del transformador por medio de la Figura 3.8.



**Figura 3.8.** Resultados del aislamiento

Los aislamientos entre capas del devanado primario y secundario que se necesitan son los siguientes:

$$Ais\_capas_{B1} = 0,43 \text{ mm}$$

$$Ais\_capas_{B2} = 0,43 \text{ mm}$$

En cambio, el aislamiento entre núcleo y bobina es el siguiente:

$$Ais\_capas_0 = 1,24 \text{ mm}$$

La distancia de aislamiento entre la bobina de alto voltaje con la bobina de bajo voltaje se procede a encontrar mediante la clase de aislamiento detallada en la Tabla 3.6. Para voltajes menores de 1,2 kV el aislamiento utilizado entre ambos devanados es el siguiente:

$$Ais_{2-1} = 1,7 \text{ mm}$$

- Espesores de las capas

$$EC1C = [(No\_Capas_{B1} \cdot A1) + (No\_Capas_{B1} - 1) \cdot Ais\_capas_{B1}] \cdot Tol + (DC1 \cdot No\_DC1)$$

$$EC1C = [(4 \cdot 2,68) + (4 - 1) \cdot 0,43] \cdot 1,05 + (0 \cdot 0)$$

$$EC1C = 12,61 \text{ mm}$$

$$EC2C = [(No\_Capas_{B2} \cdot A2) + (No\_Capas_{B2} - 1) \cdot Ais\_capas_{B2}] \cdot Tol + (DC2 \cdot No\_DC2)$$

$$EC2C = [(4 \cdot 2,68) + (4 - 1) \cdot 0,43] \cdot 1,05 + (0 \cdot 0)$$

$$EC2C = 12,61 \text{ mm}$$

$$EC1F = [(No\_Capas_{B1} \cdot A1) + (No\_Capas_{B1} - 1) \cdot Ais\_capas_{B1}] \cdot Tol + (DF1 \cdot No\_DF1)$$

$$EC1F = [(4 \cdot 2,68) + (4 - 1) \cdot 0,43] \cdot 1,05 + (0 \cdot 0)$$

$$EC1F = 12,61 \text{ mm}$$

$$EC2F = [(No\_Capas_{B2} \cdot A2) + (No\_Capas_{B2} - 1) \cdot Ais\_capas_{B2}] \cdot Tol + (DF2 \cdot No\_DF2)$$

$$EC2F = [(4 \cdot 2,68) + (4 - 1) \cdot 0,43] \cdot 1,056 + (0 \cdot 0)$$

$$EC2F = 12,61 \text{ mm}$$

- Formaleta para la bobina

Las dimensiones de la formaleta se determinan mediante las siguientes expresiones.



Ancho de la formaleta:

$$Af = E + 5 \text{ mm}$$

$$Af = 3,6 \cdot 10 + 5$$

$$Af = 41 \text{ mm}$$

Profundidad de la formaleta:

$$La = LN + 5 \text{ mm}$$

$$La = 143 + 5 \text{ mm}$$

$$La = 148 \text{ mm}$$

Altura de la formaleta

$$Fl = HFB + 5 \text{ mm}$$

$$Fl = 130 + 5$$

$$Fl = 135 \text{ mm}$$

- Axiales de la bobina

Con los espesores calculados se procede a obtener los axiales de los frentes y de los costados de la bobina.

- Frente de la bobina:

$$F0 = Af + 2 \cdot Ais_0$$

$$F0 = 41 + 2 \cdot 1,24$$

$$F0 = 43,48 \text{ mm}$$

$$F2 = F0 + 2 \cdot EC2F$$

$$F2 = 43,48 + 2 \cdot 12,61$$

$$F2 = 68,7 \text{ mm}$$

$$F21 = F2 + (DC_{2-1} + Ais_{2-1}) \cdot 2$$

$$F21 = 68,7 + (0 + 1,7) \cdot 2$$

$$F21 = 72,1 \text{ mm}$$

$$F1 = F21 + 2 \cdot EC1C$$

$$F1 = 72,1 + 2 \cdot 12,61$$

$$F1 = 97,32 \text{ mm}$$

$$FT = F1 \cdot K_f$$

$$FT = 97,32 \cdot 1,05$$

$$FT = 102,19 \text{ mm}$$

- Costado de la bobina:

$$C0 = La + 2 \cdot Ais_0$$

$$C0 = 148 + 2 \cdot 1,24$$

$$C0 = 150,48 \text{ mm}$$

$$C2 = C0 + 2 \cdot EC2C$$

$$C2 = 150,48 + 2 \cdot 12,61$$

$$C2 = 175,7 \text{ mm}$$

$$C21 = C2 + (DF_{2-1} + Ais_{2-1}) \cdot 2$$

$$C21 = 175,7 + (6 + 1,7) \cdot 2$$

$$C21 = 191,1 \text{ mm}$$

$$C1 = C21 + 2 \cdot EC1F$$

$$C1 = 191,1 + 2 \cdot 12,61$$

$$C1 = 216,32 \text{ mm}$$

$$CT = C1 \cdot K_c$$

$$CT = 216,32 \cdot 1,1$$

$$CT = 237,95 \text{ mm}$$

- Perímetros medios

Obtenidos tanto las dimensiones de frente y costado de las bobinas, se determinan las dimensiones de los perímetros medios.

$$PM2 = F2 + C2 + F0 + C0$$

$$PM2 = 68,7 + 175,7 + 43,48 + 150,48$$

$$PM2 = 438,36 \text{ mm}$$

$$PM1 = F21 + F1 + C21 + C1$$

$$PM1 = 72,1 + 97,32 + 191,1 + 216,32$$

$$PM1 = 576,84 \text{ mm}$$

$$PMT = \frac{PM1 + PM2}{2 \cdot (10)}$$

$$PMT = \frac{576,84 + 438,36}{2 \cdot (10)}$$

$$PMT = 50,76 \text{ cm}$$

### 3.2.12 Peso del cobre

$$Peso_{B1} = 0,0000089 \cdot PM1 \cdot N_{1\_Total} \cdot S_1$$

$$Peso_{B1} = 0,0000089 \cdot 576,84 \cdot 118 \cdot 5,261$$

$$Peso_{B1} = 3,2 \text{ kg}$$

$$Peso_{B2} = 0,0000089 \cdot PM2 \cdot N_2 \cdot S_2$$

$$Peso_{B2} = 0,0000089 \cdot 438,36 \cdot 112 \cdot 5,261$$

$$Peso_{B2} = 2,3 \text{ kg}$$

$$Peso_{total} = Peso_{B1} + Peso_{B2}$$

$$Peso_{total} = 3,2 + 2,3$$

$$Peso_{total} = 5,5 \text{ kg}$$

### 3.2.13 Resistencia óhmica del transformador

Resistencia óhmica del transformador para los devanados primario y secundario:

$$R_1 = \frac{\rho \cdot PM1 \cdot N_1}{S_1}$$

$$R_1 = \frac{1,78 \cdot 10^{-5} \cdot 576,84 \cdot 112}{5,68}$$

$$R_1 = 0,202 \Omega$$

$$R_2 = \frac{\rho \cdot PM2 \cdot N_2}{S_2}$$

$$R_2 = \frac{1,78 \cdot 10^{-5} \cdot 438,36 \cdot 112}{5,68}$$

$$R_2 = 0,154 \Omega$$

$$R_{serie} = R_1 + a^2 \cdot R_2$$

$$R_{serie} = 0,202 + 1^2 \cdot 0,154$$

$$R_{serie} = 0,356 \Omega$$

### 3.2.14 Corrección de la temperatura

Corrección de la resistencia a temperatura de 85 °C para ambos devanados.

$$R_{1,85^\circ C} = R_1 \cdot 1,25$$

$$R_{1,85^\circ C} = 0,202 \cdot 1,25$$

$$R_{1,85^\circ C} = 0,2525 \Omega$$

$$R_{2,85^\circ C} = R_2 \cdot 1,25$$

$$R_{2_{85^{\circ}C}} = 0,154 \cdot 1,25$$

$$R_{2_{85^{\circ}C}} = 0,1925 \Omega$$

$$R_{serie_{85^{\circ}C}} = R_{serie} \cdot 1,25$$

$$R_{serie_{85^{\circ}C}} = 0,356 \cdot 1,25$$

$$R_{serie_{85^{\circ}C}} = 0,445 \Omega$$

### 3.2.15 Pérdidas en el cobre

Las pérdidas en el cobre se calculan con la siguiente expresión.

$$W_{cu1} = R_1 \cdot I_1^2$$

$$W_{cu1} = 0,2525 \cdot 11,36^2$$

$$W_{cu1} = 32,6 W$$

$$W_{cu2} = R_2 \cdot I_2^2$$

$$W_{cu2} = 0,1925 \cdot 11,36^2$$

$$W_{cu2} = 24,8 W$$

$$W_{T_{Cu}} = W_{cu1} + W_{cu2}$$

$$W_{T_{Cu}} = 32,6 + 24,8$$

$$W_{T_{Cu}} = 57,4 W$$

### 3.2.16 Impedancia de cortocircuito

- Resistencia del transformador

$$R = \frac{W_{cuT}}{S_{1\emptyset}} \cdot 100$$

$$R = \frac{57,4}{2,5k} \cdot 100$$

$$R = 2,296 \%$$

- Reactancia inductiva del transformador

$$a = \frac{EC2C + EC2F}{2 \cdot (10)} = \frac{12,61 + 12,61}{2 \cdot (10)} = 1,261 \text{ cm}$$

$$b = \frac{ais12}{10} = \frac{1,7}{10} = 0,17 \text{ cm}$$

$$c = \frac{EC1C + EC1F}{2 \cdot (10)} = \frac{12,61 + 12,61}{20} = 1,261 \text{ cm}$$

$$Fc = b + \frac{a + c}{3} = 0,17 + \frac{1,261 + 1,261}{3} = 1,01 \text{ cm}$$

$$HEB = \frac{HEB1 + HEB2}{2 \cdot (10)} = \frac{83,08 + 77,72}{20} = 8,04 \text{ cm}$$

$$\alpha = HEB + \frac{a + b + c}{3} = 8,04 + \frac{1,261 + 0,17 + 1,261}{3} = 8,94$$

$$X = \frac{0,756 \cdot f \cdot N1^2 \cdot I_1 \cdot PM1 \cdot Fc}{V_1 \cdot \alpha \cdot 10^5 \cdot n}$$

$$X = \frac{0,756 \cdot 60 \cdot 112^2 \cdot 11,36 \cdot \left(\frac{576,84}{10}\right) \cdot 1,01}{220 \cdot 8,94 \cdot 10^5 \cdot 1}$$

$$X = 1,915 \%$$

- Impedancia del transformador

$$Z = \sqrt{Ur^2 + Ux^2}$$

$$Z = \sqrt{2,296^2 + 1,915^2}$$

$$Z = 2,99 \%$$

Por lo tanto, la impedancia del transformador es

$$Z = 3 \%$$

### 3.2.17 Dimensiones y pérdidas en el núcleo

- Dimensiones del núcleo

$$HVN = HFB + 10$$

$$HVN = 130 + 10$$

$$HVN = 140 \text{ mm}$$

Se estima un DEBA de 10 milímetros.

$$DEP = DEBA + FT$$

$$DEP = 10 + 102,19$$

$$DEP = 112,19 \text{ mm}$$

$$AVN = DEP - E$$

$$AVN = 112,19 - 3,6 \cdot (10)$$

$$AVN = 76,19 \text{ mm}$$

$$AN = DEP + E$$

$$AN = 112,19 + (3,6 \cdot 10)$$

$$AN = 148,19 \text{ mm}$$

$$HN = HVN + 2 \cdot E$$

$$HN = 140 + 2 \cdot 3,6 \cdot 10$$

$$HN = 212 \text{ mm}$$

- Volumen del núcleo

$$VP = 2 \cdot HVN \cdot LN \cdot E$$

$$VP = 2 \cdot \frac{140}{10} \cdot 14,3 \cdot 3,6$$

$$VP = 1441,44 \text{ cm}^3$$

$$VY = 2 \cdot AVN \cdot LN \cdot E$$

$$VY = 2 \cdot \frac{76,19}{10} \cdot 14,3 \cdot 3,6$$

$$VY = 784,45 \text{ cm}^3$$

$$VE = 4 \cdot E \cdot E \cdot LN$$

$$VE = 4 \cdot 3,6 \cdot 3,6 \cdot 14,3$$

$$VE = 741,31 \text{ cm}^3$$

$$VT = VP + VY + VE$$

$$VT = 1441,44 + 784,45 + 741,31$$

$$VT = 2967,2 \text{ cm}^3$$

- Peso del núcleo

$$PP = \rho_{Fe} \cdot VP \cdot 0,98$$

$$PP = 0,00765 \cdot 1441,44 \cdot 0,98$$

$$PP = 10,81 \text{ kg}$$

$$PY = \rho_{Fe} \cdot VY \cdot 0,98$$

$$PY = 0,00765 \cdot 784,45 \cdot 0,98$$

$$PY = 5,88 \text{ kg}$$

$$PE = \rho_{Fe} \cdot VE \cdot 0,98$$

$$PE = 0,00765 \cdot 741,31 \cdot 0,98$$

$$PE = 5,56 \text{ kg}$$

$$PT = PP + PY + PE$$

$$PT = 10,81 + 5,88 + 5,56$$

$$PT = 22,25 \text{ kg}$$



- Pérdidas en el hierro

Las pérdidas en el hierro se determinan en base a la curva presentada en el grafico del Anexo I, para una inducción magnética de 14300 Gauss, por ello se obtiene los siguientes resultados:

$$WP = P_{Fe} \cdot PP$$

$$WP = 0,85 \cdot 10,81$$

$$WP = 9,19 W$$

$$WY = P_{Fe} \cdot PY$$

$$WY = 0,85 \cdot 5,88$$

$$WY = 5 W$$

$$WE = P_{Fe} \cdot PE$$

$$WE = 0,85 \cdot 5,56$$

$$WE = 4,73 W$$

$$WT_{Fe} = WP + WY + WE$$

$$WT_{Fe} = 9,19 + 5 + 4,73$$

$$WT_{Fe} = 18,92 W$$

### 3.2.18 Cálculo de la corriente de excitación

En el cálculo de la corriente de excitación, se determina inicialmente las pérdidas en el hierro en base a la curva de la gráfica del Anexo II, para una inducción magnética de 14300 Gauss.

$$VAP = S_{Fe} \cdot PP$$

$$VAP = 1,1 \cdot 10,81$$

$$VAP = 11,89 VA$$

$$VAY = S_{Fe} \cdot PY$$

$$VAY = 1,1 \cdot 5,88$$

$$VAY = 6,47 \text{ VA}$$

$$VAE = S_{Fe} \cdot PE$$

$$VAE = 1,1 \cdot 5,56$$

$$VAE = 6,12 \text{ VA}$$

$$VAT_{Fe} = VAP + VAY + VAE$$

$$VAT_{Fe} = 11,89 + 6,47 + 6,12$$

$$VAT_{Fe} = 24,48 \text{ VA}$$

- Corriente de pérdidas en el núcleo

$$I_c = \frac{WT_{Fe}}{V_2}$$

$$I_c = \frac{18,92 \text{ W}}{220 \text{ V}}$$

$$I_c = 0,086 \text{ A}$$

- Corriente de excitación

$$I_o = \frac{VAT_{Fe}}{V_2}$$

$$I_o = \frac{24,48 \text{ VA}}{220 \text{ V}}$$

$$I_o = 0,1113 \text{ A}$$

$$I_o\% = \frac{I_o}{I_2} \cdot 100\%$$

$$I_o\% = \frac{0,1113}{11,36} \cdot 100\%$$

$$I_o\% = 0,9797 \%$$

- Corriente de magnetización

$$I_m = \sqrt{I_o^2 - I_c^2}$$

$$I_m = \sqrt{0,1113^2 - 0,086^2}$$

$$I_m = 0,0707 \text{ A}$$

- Análisis y verificación de los resultados del diseño

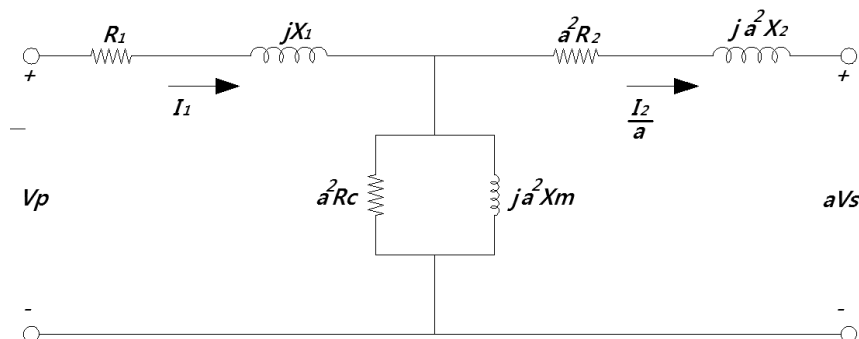
Los resultados obtenidos de cada uno de los parámetros del diseño se comparan con los parámetros de las normas NTE INEN 2114 y NTE INEN 2120 para verificar que el diseño cumpla con los valores estándares de las normas, los valores obtenidos se muestra en la Tabla 3.9.

**Tabla 3.9.** Comparación de los valores del diseño con la norma NTE INEN 2114

Parámetros	Resultados del diseño	Norma INEN 2114
$I_o$	0,9797 %	2,5%
$WT_{Fe}$	18,92 W	19 W
$WT_{Cu}$	57,4 W	65 W
Z	2,99 %	3 %

### 3.2.19 Circuito equivalente

El circuito equivalente de modelo  $\pi$  para el transformador se debe referir al lado primario como se muestra en la Figura 3.9.



**Figura 3.9.** Circuito equivalente  $\pi$  referido a su lado primario

Se debe tener una impedancia base en la cual debe trabajar el sistema y estos parámetros se los determina con los siguientes datos:

$$V_B = 220 \text{ V}$$

$$S_B = 2,5 \text{ kVA}$$

Donde:

- $V_B$ : Voltaje base en V
- $S_B$ : Potencia base en VA

La impedancia base es la siguiente:

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B}$$

$$Z_B = \frac{220^2}{2500}$$

$$Z_B = 19,36 \Omega$$

En cambio, la corriente base es la siguiente:

$$I_B = \frac{S_B}{V_B}$$

$$I_B = \frac{2500}{220}$$

$$I_B = 11,36 \text{ A}$$

Se determinan los parámetros de R y X de la impedancia del transformador por medio de la prueba de corto circuito. Generalmente la impedancia se la mide entre los terminales del devanado de alto voltaje cuando el devanado de bajo voltaje se encuentra cortocircuitado. De esta manera se calcula los siguientes parámetros de cortocircuito en valores por unidad.

- Cálculo de la resistencia del devanado primario en p.u.

$$R_{1_{pu}} = \frac{R_1}{Z_B}$$

$$R_{1_{pu}} = \frac{0,2525}{19,36}$$

$$R_{1_{pu}} = 0,013 \text{ p.u.}$$

- Calculo de la resistencia del devanado secundario en p.u.

$$R_{2\_pu} = \frac{R_2}{Z_B}$$

$$R_{2\_pu} = \frac{0,1925}{19,36}$$

$$R_{2\_pu} = 0,0099 \text{ p.u.}$$

- Calculo de la resistencia serie en p.u.

$$R_{serie\_pu} = \frac{R_{serie}}{Z_B}$$

$$R_{serie\_pu} = \frac{0,445}{19,36}$$

$$R_{serie\_pu} = 0,0229 \text{ p.u.}$$

- Calculo en valores reales de la reactancia serie

$$X = X_{pu} \cdot Z_B$$

$$X = \frac{1,915}{100} \cdot 19,36$$

$$X = 0,3707 \Omega$$

- Calculo de la reactancia magnetizante

$$X_m = \frac{V_2}{I_m}$$

$$X_m = \frac{220}{0,0707}$$

$$X_m = 3111,739 \Omega$$

- Calculo de la resistencia magnetizante o resistencia de pérdidas del núcleo

$$R_c = \frac{V_2}{I_c}$$

$$R_c = \frac{220}{0,086}$$

$$R_c = 2558,139 \Omega$$

- Calculo de la impedancia de cortocircuito en valores reales

$$Z_{real} = Z \cdot Z_B$$

$$Z_{real} = 3\% \cdot 19,36$$

$$Z_{real} = 0.03 \cdot 19,36$$

$$Z_{real} = 0.5808 \Omega$$

El circuito equivalente se debe referir al lado primario, por lo que, si la resistencia de pérdidas en el núcleo y reactancia magnetizante se encuentran referidas al lado secundario, se debe cambiar la referencia para tener estos parámetros referidos al lado primario.

Para lo cual se multiplica a cada parámetro de la rama que se encuentra en paralelo la relación de transformación al cuadrado, como la relación de transformación es de uno tanto para el lado primario como para el secundario los parámetros de  $R_c$  y  $X_m$  no se ven afectados por el cambio de referencia.

Entonces los parámetros en valor real y por unidad son los siguientes:

$$R_c = R_c \cdot a^2$$

$$R_c = 2558,139 \cdot 1^2$$

$$R_c = 2558,139 \Omega$$

$$R_{c_{pu}} = \frac{R_c}{Z_B}$$

$$R_{c_{pu}} = \frac{2558,139}{19,36}$$

$$R_{c_{pu}} = 132,135 \text{ p. u.}$$

$$X_m = X_m \cdot a^2$$

$$X_m = 3111,739 \cdot 1^2$$

$$X_m = 3111,739 \Omega$$

$$Xm_{pu} = \frac{Xm}{Z_B}$$

$$Xm_{pu} = \frac{3111,739}{19,36}$$

$$Xm_{pu} = 160,73 \text{ p. u.}$$

Además, otros parámetros en valores por unidad son los siguientes:

- Corriente de magnetización ( $I_m$ )

$$Im_{pu} = \frac{Im}{I_B}$$

$$Im_{pu} = \frac{0,0707}{11,36}$$

$$Im_{pu} = 0,006224 \text{ p. u.}$$

- Corriente de pérdidas ( $I_c$ )

$$Ic_{pu} = \frac{Ic}{I_B}$$

$$Ic_{pu} = \frac{0,086}{11,36}$$

$$Ic_{pu} = 0,007570 \text{ p. u.}$$

- Corriente sin carga ( $I_o$ )

$$Io_{pu} = \frac{Io}{I_B}$$

$$Io_{pu} = \frac{0,1113}{11,36}$$

$$Io_{pu} = 0,009798 \text{ p. u.}$$

- Pérdidas en el Cobre

$$WTcu_{pu} = \frac{WTcu}{S_B}$$

$$WTcu_{pu} = \frac{57,4}{2500}$$

$$WTcu_{pu} = 0,02296 \text{ p. u.}$$

- Pérdidas en el hierro

$$WT_{Fe_{real}} = \frac{WT_{Fe}}{S_B}$$

$$WT_{Fe_{real}} = \frac{18,92}{2500}$$

$$WT_{Fe_{real}} = 0,007568 \text{ p. u.}$$

Obtenido tanto  $R_c$  y  $X_m$  en unidades reales y en sistema por unidad se plantea determinar los parámetros del circuito equivalente por medio de la rama en paralelo entre la conductancia  $G_c$  y la susceptancia de magnetización  $B_m$ , dada por la Ecuaciones 3.79, 3.80, 3.81 y 3.82.

$$Z_\varphi = R_c + jX_m$$

**Ecuación 3.79.** Impedancia de excitación [18]

Además, se tiene la siguiente expresión de la admitancia:

$$Y = \frac{1}{R_c + jX_m}$$

$$Y = \frac{1}{R_c} - j \frac{1}{X_m}$$

Donde se tiene lo siguiente:

$$Y = \frac{1}{R_c} - j \frac{1}{X_m}$$

Por lo tanto:

$$Y = G_c - jB_m$$

**Ecuación 3.80.** Admitancia de excitación [24]

Se conoce que  $G_c$  y  $B_m$  están expresadas en las siguientes Ecuaciones 3.81 y 3.82.

$$G_c = \frac{1}{R_c}$$

**Ecuación 3.81.** Conductancia en paralelo [24]

$$B_m = \frac{1}{X_m}$$

**Ecuación 3.82.** Susceptancia en paralelo [24]



Las unidades de la conductancia y susceptancia se encuentran medidas en siemens (S).

Los cálculos de conductancia y susceptancia se obtienen en unidades reales y valores por unidad para lo cual se tiene los siguientes cálculos:

$$Gc = \frac{1}{2558,139}$$

$$Gc = 3,9091 \cdot 10^{-4} S$$

$$Gc_{pu} = Gc \cdot Z_B$$

$$Gc_{pu} = 3,9091 \cdot 10^{-4} \cdot 19,36$$

$$Gc_{pu} = 7,5680 \cdot 10^{-3} p. u.$$

$$Bm = \frac{1}{3111,739}$$

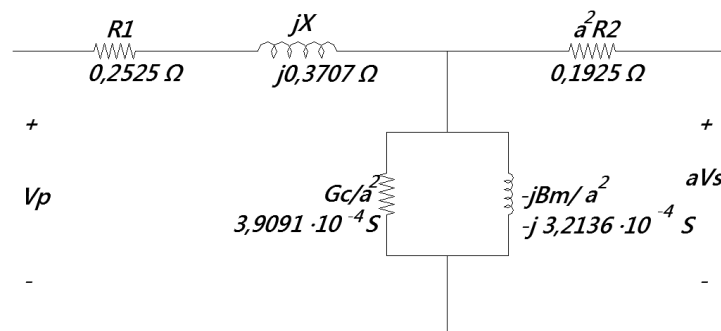
$$Bm = 3,2136 \cdot 10^{-4} S$$

$$Bm_{pu} = Bm \cdot Z_B$$

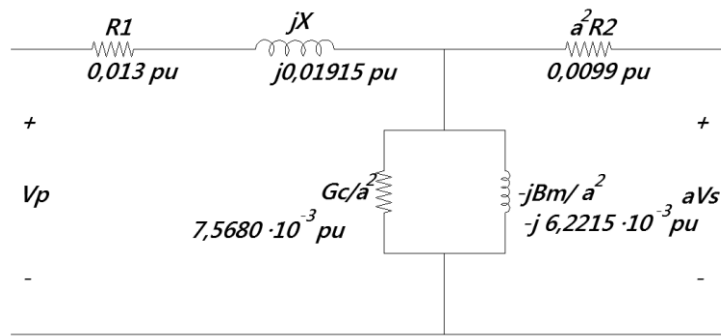
$$Bm_{pu} = 3,2136 \cdot 10^{-4} \cdot 19,36$$

$$Bm_{pu} = 6,2215 \cdot 10^{-3} p. u.$$

El circuito equivalente modelo  $\pi$  correspondiente con los parámetros obtenidos en unidades reales y en el sistema por unidad y se muestra en la Figura 3.10 y 3.11.



**Figura 3.10.** Circuito equivalente  $\pi$  en unidades reales



**Figura 3.11.** Circuito equivalente  $\pi$  en el sistema por unidad

### 3.2.20 Resultado de los parámetros del diseño de los transformadores monofásicos

Los parámetros finales obtenidos en el desarrollo del diseño del transformador demuestran el correcto procedimiento lo cual se presentan los resultados finales en las Tablas 3.10, 3.11 y 3.12. Estos parámetros permiten posteriormente proceder con la construcción pertinente de los transformadores.

**Tabla 3.10.** Resultados finales de los parámetros del núcleo

Parámetros	Resultados del diseño
Espesor (E)	3,6 [cm]
Profundidad del núcleo (LN)	14,4 [cm]
Sección del núcleo ( $A_{Fe}$ )	51,48 [cm <sup>2</sup> ]
Altura del núcleo (HN)	212 [mm]
Ancho del núcleo (AN)	148,19 [mm]
Ancho de la ventana (AVN)	76,19 [mm]
Altura de la ventana (HVN)	140 [mm]
Distancia entre piernas (DEP)	112,19 [mm]
Peso total (PT)	22,25 [kg]
Pérdidas del hierro ( $WT_{Fe}$ )	18,92 [W]

**Tabla 3.11.** Resultados finales de los parámetros de las bobinas

Parámetros	Resultados del Primario	Resultados del Secundario
Número total de espiras	118	112
Corriente a plena carga	11,36 [A]	11,36 [A]
Sección del conductor	5,68 [mm <sup>2</sup> ]	5,68 [mm <sup>2</sup> ]
Calibre del conductor	10AWG	10AWG
Numero de espiras por capa	30	28
Numero de capas	4	4
Distancia del collarín	23 [mm]	26 [mm]
Altura física de la bobina (HFB)	129 [mm]	130 [mm]

Aislamiento entre capas	0,43 [mm]	0,43 [mm]
Aislamiento entre núcleo - bobina	1,24 [mm]	1,24 [mm]
Aislamiento entre el devanado primario y secundario	1,7 [mm]	1,7 [mm]
Peso del Cobre	3,2 [kg]	2,3 [kg]
Perdidas en el cobre (WT <sub>Cu</sub> )	32,6 [W]	24,8 [W]

**Tabla 3.12.** Resultados finales de los parámetros del circuito equivalente [22]

<b>Parámetros</b>	<b>Resultados en valor real</b>	<b>Resultados valor por unidad</b>
Resistencia del primario (R <sub>1</sub> )	0,2525 [Ω]	0,013 [p.u.]
Resistencia del secundario (R <sub>2</sub> )	0,1925 [Ω]	0,0099 [p.u.]
Resistencia serie (R <sub>serie</sub> )	0,445 [Ω]	0,0229 [p.u.]
Resistencia pérdidas del núcleo (R <sub>c</sub> )	2558,139 [Ω]	132,135 [p.u.]
Reactancia serie (X)	0,3707 [Ω]	0,01915 [p.u.]
Reactancia magnetizante (X <sub>m</sub> )	3111,739 [Ω]	160,73 [p.u.]
Impedancia de cortocircuito (Z)	0,5808 [Ω]	0,03 [p.u.]
Conductancia en paralelo (G <sub>c</sub> )	3,9091·10 <sup>-4</sup> [S]	7,5680·10 <sup>-3</sup> [p.u.]
Susceptancia en paralelo (B <sub>m</sub> )	3,2136·10 <sup>-4</sup> [S]	6,2215·10 <sup>-3</sup> [p.u.]
Corriente de pérdidas (I <sub>c</sub> )	0,086 [A]	0,007570 [p.u.]
Corriente de magnetización (I <sub>m</sub> )	0,0707 [A]	0,006224 [p.u.]
Corriente de excitación (I <sub>o</sub> )	0,1113 [A]	0,009798 [p.u.]
Pérdidas en el Cobre (WT <sub>Cu</sub> )	57,4 [W]	0,02296 [p.u.]
Pérdidas en el hierro (WT <sub>Fe</sub> )	18,92 [W]	0,007568 [p.u.]

## 4. CONSTRUCCIÓN DE LOS DOS TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Los fundamentos teóricos y la metodología de diseño de transformadores monofásicos tipo seco de núcleo arrollado se procede a establecer las diferentes fases a seguir para el proceso de construcción de los diferentes elementos que conforman el transformador por lo que toda la información que se necesita se detalla en la cada una de las fases de construcción. Las etapas de construcción de cada una de las partes que constituye al transformador detallan la obtención de los materiales que se utiliza y por su puesto la cantidad que se requiere de cada elemento del transformador, específicamente para los de núcleo arrollado.

### 4.1 Proceso de corte y ensamble del núcleo arrollado

La producción de los núcleos del tipo apilado requiere de una cizalla para realizar el corte de la lámina de acero al silicio dependiendo de las especificaciones del diseño, que luego se los monta un sobre otro para su correspondiente ensamble. En cambio, la producción del núcleo arrollado es de mayor dificultad porque para realizar el corte y el arco o dobles en sus esquinas requiere de equipos de mayor infraestructura para su producción, es así que el tener este tipo de núcleo se tiene bajas pérdidas en el hierro. A continuación, se indica el proceso con el cual se realiza el corte y armado del núcleo arrollado.

#### 4.1.1 Corte de las dimensiones del núcleo

En la fase del diseño se determina las dimensiones que debe tener el núcleo, además se especifica el ancho con el que se debe realizar el corte de la lámina y el espesor que va a tener el núcleo al momento de armar las láminas uno sobre otro. Para lo cual se adquiere rollos de lámina de acero al silicio, el cual se corta al ancho que se requiere en el diseño y como se detalla en el plano del núcleo. El acero al silicio cortado se muestra en la Figura 4.1.



**Figura 4.1.** Acero al silicio de grado M-4 [20]

#### 4.1.2 Proceso para el montaje del núcleo

Después de realizar el primer corte para obtener el ancho y largo de la lámina que se va a utilizar, se procede a ubicar todo el paquete de la lámina en la máquina devanadora, la cual por medio de ella se corta las diferentes secciones de la lámina con la respectiva forma de toroide o chaflán a sus esquinas, para ello se realiza todos los ajustes pertinentes en el panel digital de la máquina devanadora que se encargará de realizar todo el proceso de corte.

De acuerdo con el cálculo del número de laminaciones determinado en la fase de diseño y en base al espesor encontrado se digita y programa en la maquina el número total de vueltas que tendrá el núcleo para que la maquina realice el corte de cada una de las láminas que tendrá el núcleo al momento de armarlo. A continuación, se presenta el proceso de corte de cada una de las láminas con las respectivas formas de sus esquinas como se muestra en la Figura 4.2.



**Figura 4.2.** Proceso de conformación del núcleo dependiendo el número de láminas

Finalizado el corte de cada una de las láminas que conforma el núcleo se procede a realizar el ensamblaje hasta comprobar que se llega a tener la dimensión del espesor del núcleo que se determina en el diseño, para poder realizar el montaje correspondiente se debe colocar todas las láminas sobre una superficie plana para poder traslapar todas las láminas una por una, además de tener compactadas y uniforme cada una de ellas. Al final debe quedar en una posición escalonada y montada por paquetes para poder montar y desmontar las bobinas de una manera mucho más fácil.

El ubicar por paquetes y en forma escalonada las láminas es por motivo de tener el mismo sentido con el flujo magnético, además que tenga la menor oposición durante la circulación por el núcleo, además de tener bajas pérdidas originadas por contraflujos, esto se muestra en las Figuras 4.3 y 4.4.



**Figura 4.3.** Presentación de las láminas



**Figura 4.4.** Presentación del núcleo arrollado ordenado por bloques y de forma escalonada

Al finalizar el proceso de ensamble del núcleo se procede a pesar el núcleo para comprobar si el peso del hierro coincide con el peso calculado en la fase de diseño y verificar si todas las dimensiones del núcleo diseñado son las correctas, como se muestra en la Figura 4.5.



**Figura 4.5.** Presentación del núcleo arrollado

Además, se procede a prensar por el momento el núcleo para evitar que las láminas no se despeguen y así permanezcan compactas hasta colocar las bobinas en las piernas laterales y realizar el prensado final.

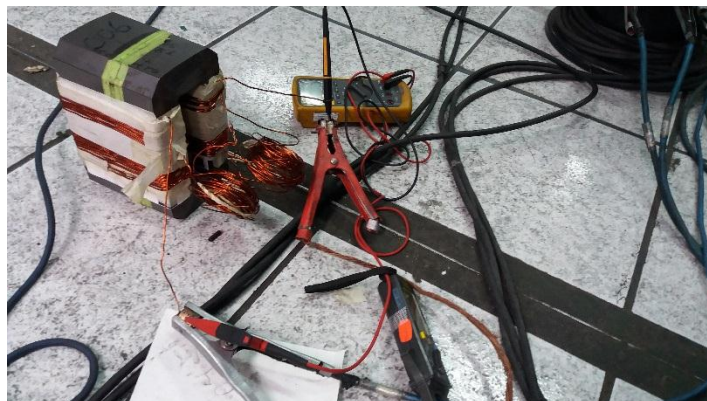
Se debe prensar los núcleos para proceder a recocer los núcleos y así eliminar toda humedad presente, la temperatura adecuada a recocer los núcleos es de  $775\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , todo este recocido de los núcleos se los realiza en el horno eléctrico. El periodo de recocido de los núcleos es aproximadamente de 20 horas que es lo que indica el ciclo térmico en el Anexo III [20].

Culminado el armado y recocido del núcleo se realiza las pruebas pertinentes para conocer si el recocido del núcleo es la adecuada para lo cual en base a las pérdidas del núcleo en W/kg nos debe mostrar si las pérdidas son elevadas o no, siendo el caso de que las pérdidas sean elevadas el ciclo térmico no fue el apropiado y como conclusión se debe repetir el proceso.

Al verificar si el recocido es el correcto se debe realizar la prueba preliminar en vacío para comprobar cuáles son las pérdidas del hierro. Mediante arrollamiento con el mismo número de espiras del conductor esmaltado en las dos piernas laterales o simplemente en una sola, con el respectivo aislante inicial entre el núcleo y el arrollamiento de las espiras. Se procede

a obtener las pérdidas del hierro, asumiendo desde un principio un flujo magnético que dependerá de la calidad de la lámina de acero al silicio y la potencia a la que se diseñe el transformador.

La prueba de circuito abierto realizado en el laboratorio de alto voltaje de RVR transformadores al núcleo para obtener las pérdidas del hierro preliminares se muestra en la Figura 4.6.



**Figura 4.6.** Pruebas preliminares del núcleo en el laboratorio de Alto Voltaje de RVR

## **4.2 Construcción de las bobinas**

El proceso de construcción de las bobinas empieza con el cálculo de la bobina donde se requiere de los valores iniciales de potencia, frecuencia y voltaje del primario y secundario, lo cual con estos datos se parte para determinar cuántas espiras deben ir en cada uno de los devanados tanto de alto y bajo voltaje, de igual manera se establece cuantas capas va en cada devanado y del mismo modo el dimensionamiento de los aislamientos para cada parte de la construcción de la bobina es indispensable e importante porque permite que el transformador no se destruya por algún cortocircuito producido por el aislamiento inadecuado, sino también evita que otros equipos dependientes del transformador sufran daños. Por tal razón en el proceso de construcción de las bobinas se debe seguir con exactitud a los planos eléctricos donde especifica todos los detalles de los valores determinados en el diseño de las bobinas. En el Anexo IV se presenta el plano eléctrico para la construcción de las bobinas de alto y bajo voltaje.

### **4.2.1 Fabricación de la formaleta**

Para empezar con el bobinado correspondiente de cada una de las bobinas de alto y bajo voltaje se debe fabricar un molde con las dimensiones que se establezcan en el plano en base a cada una de las piernas laterales del núcleo y dicho molde se lo conoce como formaleta. Esta formaleta es fabricada de madera con un corte que lo divide en dos, ya que



es fácil de desmontar al momento de terminar la bobina y además de que la bobina no sufre daño alguno al momento de retirar la formaleta. Este proceso se muestra en la Figura 4.7.



**Figura 4.7.** Formaleta para la construcción de las bobinas

Construida la formaleta se la ubica en la bobinadora, máquina la cual permite construir las bobinas, la formaleta debe estar colocada en forma horizontal, sujeta y centrada a la maquina bobinadora, para iniciar el bobinado. Como se indica en la Figura 4.8.



**Figura 4.8.** Montaje de la formaleta para la construcción de las bobinas

#### **4.2.2 Bobinado del devanado de bajo voltaje**

Ubicada la formaleta en la bobinadora se le coloca el aislante inicial que permite separar el núcleo con la bobina de bajo voltaje, para ello el aislante que recubre a la formaleta es de láminas de cartón que dependiendo de la potencia y voltaje de transformador se va a decidir el grosor del aislante todo lo que se realice es con la finalidad de proteger a la bobina y al núcleo de algún esfuerzo mecánico que se presente al instante de colocar la bobina en el núcleo y así evitar que el aislante sufra daño alguno.

Los carretes de los conductores que se necesitan para el bobinado correspondiente son colocados en una estructura metálica para templar el conductor y poder enrollar

adecuadamente los conductores en la formaleta. De esta manera se evita que la altura eléctrica de la bobina no aumente debido a que no se encuentre templado y compacto el conductor en la formaleta.

Entre las bobinas de alto y bajo voltaje debe existir el aislamiento adecuado y la distancia pertinente del collarín que se toma desde el filo de la bobina física hasta el punto donde se empieza a bobinar, esta distancia evita que el conductor se desplace y realice contacto con el yugo y la pierna lateral del núcleo, además, debe ser la necesaria para soportar las tensiones mecánicas originadas al momento de templar el conductor cuando se esté bobinando.

La colocación de la formaleta, el aislamiento cero y el inicio del bobinado se aprecia en la Figura 4.9.



**Figura 4.9.** Bobinado de los devanados de alto y bajo voltaje

En cambio, la finalización de la primera capa de la bobina se muestra en la Figura 4.10.



**Figura 4.10.** Primera capa del bobinado de las bobinas

Con el arrollamiento de la primera capa se debe colocar el barniz líquido con la finalidad de tener aislamiento entre espiras debido a que se encuentran asociadas las espiras entre sí, al tener una espira con algún daño en el aislante propio del conductor, el barniz se encarga de aislar y evitar que se origine un cortocircuito. Después de coloca el barniz se procede a cubrir la primera capa de espiras con papel aislante Nomex o papel diamantado de acuerdo al diseño. Todo este proceso se muestra en la Figura 2.11.



**Figura 4.11.** Aislamiento de la primera capa

La segunda capa de espiras debe ir montado sobre la primera capa con el respectivo aislante, luego se procede a seguir el mismo mecanismo hasta terminar con el número total de capas que necesita la bobina del devanado de bajo voltaje.

Se realizar primero el bobinado del devanado de bajo voltaje porque en la mayoría de los casos es por este que circula mayor corriente, por tal razón el calibre del conductor es mayor con respecto al devanado de alto voltaje.

#### **4.2.3 Aislamiento entre bobinas del devanado de alto y bajo voltaje**

El aislamiento entre las bobinas de alto y bajo voltaje, se forma de capas de papel Nomex o papel diamantado y además de ductos de enfriamiento que se colocan encima de la capa de aislamiento de la bobina de bajo voltaje para obtener la distancia dieléctrica necesaria, luego de ubicar los ductos se coloca otra capa de papel aislante que permite continuar con el bobinado del devanado de alto voltaje. El aislamiento entre las bobinas se muestra en la Figura 4.12.



**Figura 4.12.** Aislamiento entre las bobinas de alto y bajo voltaje

#### **4.2.4 Bobinado del devanado alto voltaje**

El bobinado correspondiente al devanado de alto voltaje se realiza después de colocar los ductos de enfriamiento y el papel aislante necesario que aísla el lado de bajo voltaje con la de alto voltaje. Además, se debe considerar que las alturas eléctricas y las distancias de los collarines pueden ser diferentes debido a que en uno de los devanados puede ir taps.

En este caso el tener los taps en el lado de alto voltaje el proceso de bobinado se lo realiza de igual forma como se realiza el bobinado del lado de bajo voltaje con la diferencia de que se obtiene las derivaciones para cada taps para colocarlos en un mecanismo mecánico que permita realizar las conmutaciones de los taps, las derivaciones son del mismo conductor o un conductor más flexible. De acuerdo al número de espiras obtenidas en el diseño se obtiene cada uno de los taps y de este se sueldan las derivaciones de alambre en la espira correspondiente del taps. Además, de aislar con un material conocido comúnmente como reata que es una especie de cinta de tela de fibra de vidrio que permite cubrir la zona donde se suelda la derivación, para así evitar que al momento de soldarlo quede alguna zona expuesta a que se produzca un cortocircuito.

Teniendo todas las derivaciones de los taps se procede a soldar en el mecanismo de manipulación de los taps.

Las derivaciones de cada uno de los taps se muestran en la Figura 4.13.



**Figura 4.13.** Terminales de cada uno de los taps

El no disponer o requerir del mecanismo de manipulación, las salidas de los tap se los obtiene de la espira correspondiente, pero solamente con una placa de cobre soldado con platina y de igual manera se aísla para evitar algún cortocircuito.

La bobina completa con el devanado primario y secundario se muestra en la Figura 4.14.



**Figura 4.14.** Bobinas terminadas y horneadas

### **4.3 Construcción de las estructuras metálicas tanque y prensas**

En los transformadores tipo seco la construcción del tanque puede o no ser necesaria debido a que si el usuario requiere de mayor estética del transformador se lo monta el transformador en el tanque. El medio de refrigeración es el aire por eso en algunos casos no se lo coloca el transformador sobre el tanque, ya que el calor que se genera por las pérdidas del núcleo y de la bobina se disipa o se la enfría por el aire, pero si se lo puede montar para una mayor estética con el diseño adecuado que permita tener la ventilación necesaria del transformador.

Otra parte metálica de la que dispone el transformador son las prensas, estos son los soportes que se colocaran en el núcleo para ajustarlo y que se encuentren bien compactas para que luego se pueda montar fácilmente sobre la estructura metálica. El plano correspondiente al diseño de la caja y de las prensas del transformador se muestra en el Anexo V y VI.

Los transformadores en seco no necesitan de tantas protecciones como si se las necesita en los transformadores sumergidos en aceite.

### **4.4 Acoplamiento de las bobinas al núcleo**

El acoplamiento de las bobinas al núcleo se la realiza una vez culminada las bobinas para ello se descompone al núcleo por partes o por bloques para no perder la secuencia de armado del núcleo se debe colocar de inicio la parte del bloque de la zona interior del núcleo hacia su parte exterior, después de tener desmontado el núcleo se debe tomar de los extremos de la lámina para lograr abrazar el núcleo con las bobinas. Los dos extremos de la primera lámina deben quedar bien pegada para que los siguientes bloques de láminas que se coloquen no queden abiertos y separados.

Al colocar cada uno de los bloques de las láminas que conforman el núcleo se debe estar muy pendiente de no lastimar el aislante inicial o verificar que los esfuerzos mecánicos realizados no dañen el aislante cero ni cualquier otro aislante de las bobinas. Luego de tener completamente acoplado las bobinas en el núcleo se procede a colocar el fleje o cinta de fibra de vidrio para sujetar el núcleo y así asegurar que no exista algún espacio o lámina abierta.

La colocación de las bobinas en el núcleo se aprecia en la Figura 4.15.



**Figura 4.15.** Ensamble de las bobinas al núcleo

El siguiente proceso es prensar los transformadores para que se encuentren compactados y firmes los núcleos con las bobinas, luego de realizar este proceso se coloca una capa de barniz en el núcleo para que se diluya por todos los espacios que queden. El prensado del núcleo y bobinas consta de colocar de dos placas metálicas aisladas correctamente, estas placas se ubican en la parte superior e inferior del núcleo, además que permitirá sujetar adecuadamente al núcleo y bobinas.

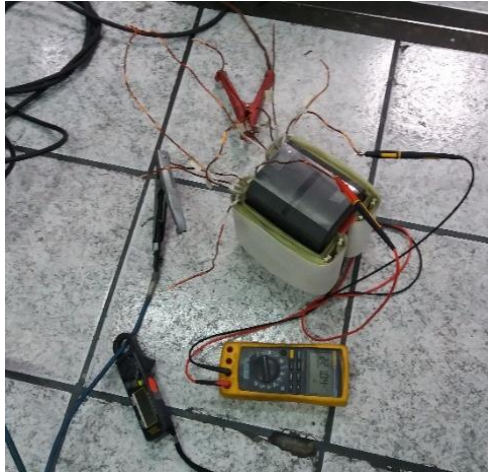
De este modo se tiene una fácil manipulación del núcleo sin que se desmonte o mueva alguna de sus partes. Una vez prensado se coloca nuevamente al horno para secar y eliminar toda humedad en el núcleo y bobinas cuyo tiempo de secado puede ser de un par de horas.

Después de retirar del horno se realiza la prueba preliminar de relación de transformación con la ayuda del equipo TTR (Transformer Turn Ratio), esta prueba nos permite conocer y asegurar que el número de espiras que tiene las bobinas del transformador posea las vueltas necesarias para poder obtener los niveles de voltaje correctos y así continuar con los siguientes pasos de la construcción. Esta prueba se muestra en la Figura 4.16.



**Figura 4.16.** Prueba de relación de transformación mediante el equipo TTR

La prueba final de vacío se realiza una vez más, con la finalidad de conocer si las pérdidas se encuentran en el rango que establece las normas, ya que en los transformadores si existe alguna falla durante la construcción como mal bobinado, aislamiento o conexión de los puntos de soldadura afecta en todas las pruebas, la prueba realizada se muestra en la Figura 4.17.



**Figura 4.17.** Prueba de vacío en el laboratorio de alto voltaje de RVR transformadores

Mediante la Figura 4.18 se puede observar al transformador totalmente prensado y colocado en la estructura metálica.



**Figura 4.18.** Transformador prensado y montado en el tanque



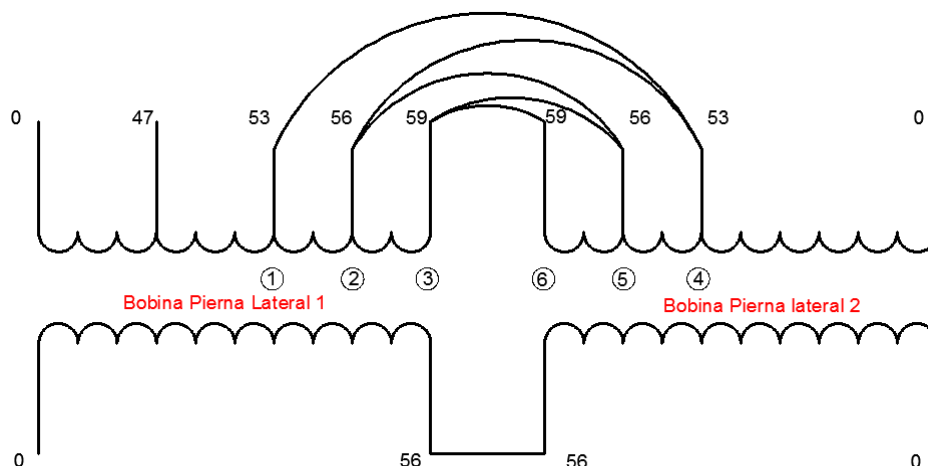
## 4.5 Conexiones internas y externas de los transformadores con los cambiadores de taps

Las conexiones internas y externas de la parte activa del transformador se realizan al núcleo y bobinas para el correcto funcionamiento del equipo. Para lo cual en los transformadores monofásicos de núcleo arrollado con de taps en uno de los devanados y el cual es controlado mediante un mecanismo de conmutación de cinco posiciones permite el cambio de los taps solo cuando se encuentre desenergizado o sin voltaje.

Para la conexión de las derivaciones de las bobinas con el conmutador de taps se debe tener seis terminales en total para obtener las cinco posiciones de los taps, por lo que al tener la bobina del devanado de alto y bajo voltaje finalizado, estas son colocadas en cada una de las piernas laterales. Entonces del devanado de alto voltaje se toma los tres primeros terminales de la bobina de la primera pierna y los otros tres terminales de la bobina de la segunda pierna para conectarlos y soldarlos a los pines del conmutador.

En cambio, para la bobina del devanado de bajo voltaje se suelda internamente sus terminales finales de las bobinas de las dos piernas para tener el número completo de espiras obtenidas del diseño. Cada uno de los terminales que salen de la bobina de alto voltaje y de bajo voltaje se las aísla con un aislante de tela conocido como espaguete.

El orden de conmutación de los taps para obtener los voltajes de cada una de las posiciones mediante el cambio de taps se muestra en la Figura 4.19.



**Figura 4.19.** Conmutación de los taps

En cada uno de los taps se tiene el número de espiras determinadas en el proceso de diseño y por medio de la Tabla 4.1 se presenta como queda conformada cada uno de los taps al momento que el conmutador manual se cambia de posición.

**Tabla 4.1.** Resultados de las pruebas realizadas

Posición del tap	Conmutación del tap	Número de espiras	Voltaje [V]
1	1 – 4	106	208,2
2	4 – 2	109	2154,1
3	2 – 5	112	220
4	5 – 3	115	225,9
5	3 – 6	118	231,8

La operación interna del conmutador o cambiador de taps se realiza una vez que se gira la manilla de manipulación, este acciona un mecanismo tipo anillo que efectúa los contactos y por medio de un resorte interno se queda asegurado el anillo, además que mediante un tornillo externo de la palanca de manipulación se asegura un correcto contacto.

La sujeción de los taps al conmutador de manipulación se muestra en la Figura 4.20.



**Figura 4.20.** Sujeción de los taps al conmutador

#### **4.6 Conexión delta abierta del banco de transformadores**

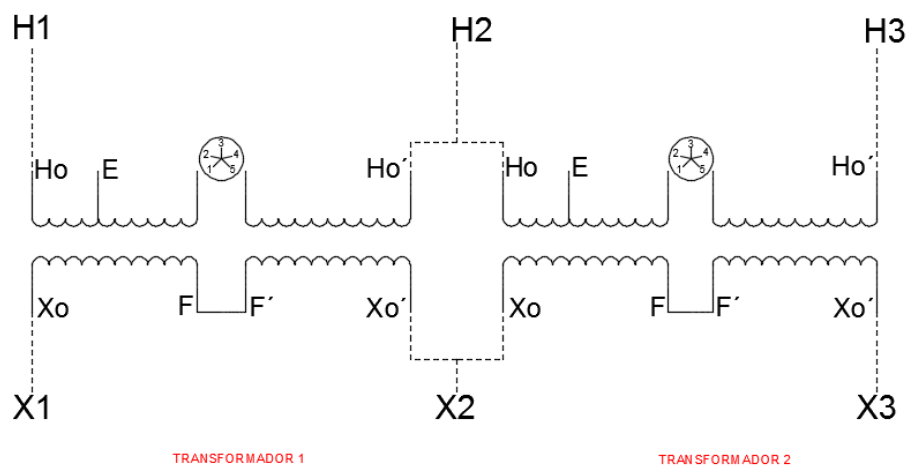
La conexión delta abierta se realiza mediante los terminales de alimentación y de salida de cada uno de los transformadores independientes con sus correspondientes taps en el lado de alto voltaje. Para lo cual las conexiones externas que permite tener la conexión en delta abierta se realizar con el fin de que permita continuar con el suministro trifásico. Y para ello se realiza los siguientes pasos:

- Primero se colocar el tap de ambos transformadores en la misma posición nominal para no tener distintos voltajes de alimentación de las tres fases.
- Luego para un voltaje de alimentación de 220 V el terminal de inicio  $H_0$  del primer transformador es conectado una de las fases de la red  $H1$ . En cambio, si se alimenta

con un voltaje entre fase neutro de 127 V en vez de conectar a  $H_0$  se debe conectar al terminal  $E$  el cual se conectará a la fase  $H1$  de la red.

- Si se alimenta con un voltaje de 220 V se debe cortocircuitar el terminal final  $H_0'$  del primer transformador con el terminal de inicio  $H_0$  del segundo transformador y así tener el terminal que alimenta otra de las fases de la red  $H2$ . En cambio, sí se alimenta con el voltaje fase neutro de 127 V se debe cortocircuitar el terminal  $H_0'$  del primer transformador con el terminal  $E$  del segundo transformador para así conectar a la fase  $H2$  de la red.
- Si se alimenta ya sea con un voltaje de línea – línea de 220 V o un voltaje fase neutro de 127 V, el terminal final  $H_0'$  del segundo transformador es el terminal por donde alimenta la otra fase de la red  $H3$ .
- En cambio, el terminal inicial  $X_0$  del primer transformador es el terminal  $X1$  que se conecta a la carga.
- Después se cortocircuita el terminal final del primer transformador con el terminal de inicio  $X_0$  del segundo transformador, para obtener el terminal  $X2$  que se conecta a la carga.
- Finalmente, el terminal final  $X_0'$  del segundo transformador es el terminal  $X3$  que se le debe conectar a la carga y así se tiene la conexión delta abierta que permite continuar con el suministro trifásico sin la necesidad de tener los tres transformadores que conforman el banco completo.

Para ello se debe conectar los transformadores con la siguiente configuración mostrada en la Figura 4.21.



**Figura 4.21.** Configuración de la conexión en delta abierta

En la Figura 4.22 se presenta como queda conformada cada una de las conexiones de cada transformador para la conexión en delta abierta.



**Figura 4.22.** Conexión delta abierta conectado a una carga RL en el laboratorio de máquinas eléctricas

## 5. PRUEBAS Y RESULTADOS

Las pruebas finales de operación de los transformadores monofásicos se realizan con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento de los transformadores. Además de corroborar el adecuado diseño y construcción previo a su utilización total.

### 5.1 Prueba de relación de transformación

La prueba de relación de transformación que se realiza a cada uno de los transformadores monofásicos y al banco en conexión delta abierta con la finalidad de verificar la relación que existe entre las espiras del devanado de bajo y alto voltaje, en esta se constata el correcto diseño y construcción, además se determina si el voltaje de alimentación se puede transformar al voltaje requerido para la salida.

Los valores de voltajes con los que se suministra o alimenta a los transformadores monofásicos se indican en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1.** Valores de los voltajes de la prueba de relación

Posición del tap	Voltaje de entrada [V]	Voltaje de salida [V]
1	208,4	219,6
2	214,3	219,8
3	220,2	220,1
4	226,1	220,3
5	232,1	220,7

A partir de los valores de voltajes se continúa con el cálculo de la relación de transformación que presentan cada uno de los transformadores, como se muestra en la Tabla 5.2. Se presenta el porcentaje de error determinado entre el valor real y el valor teórico obtenido del diseño y las pruebas. En lo dispuesto por la norma IEEE Std C57.12.91-2011 el máximo valor de error permitido de la relación de transformación es del 0,5% [22].

**Tabla 5.2.** Resultados de las pruebas de relación de transformación

Posición del tap	Relación de transformación teórico	Relación de transformación real	Error [%]
1	0,951	0,948	0,315
2	0,975	0,974	0,123
3	1	1	0
4	1,025	1,026	0,097
5	1,051	1,052	0,095

Los resultados finales obtenidos, nos dan un valor máximo de error del 0,315%, estos son errores permisibles y no excede el valor establecido en las normas IEEE Std C57.12.91-2011.

## 5.2 Prueba en vacío a los transformadores

La prueba en vacío se realiza a cada uno de los transformadores monofásicos con el fin de obtener las pérdidas en el hierro y verificar los resultados obtenidos de potencia y de corriente en vacío con lo dispuesto en las normas NTE INEN 2120 y NTE INEN 2114 que se encuentran vigentes. Para tal prueba en vacío la posición del tap se debe encontrar en la posición nominal.

Los resultados de la prueba en vacío se obtuvieron mediante el uso del equipo Ward Leonard y del sistema computarizado FESTO, como se presentan en la Tablas 5.3 y 5.4.

**Tabla 5.3.** Resultados de la prueba en vacío del transformador 1

Potencia nominal [kVA]	Vo [V]	Io [A]	Po [W]	Qo [Var]	Norma INEN 2114	
					Po [W]	Io [%]
2,5	219,7	0,142	23,26	18,43	19	2,5
	220	0,142	23,34	18,46		
	219,9	0,142	23,29	18,42		
	126,9	0,239	22,87	17,88		
	127	0,24	22,92	17,99		
	127	0,24	22,92	17,98		

**Tabla 5.4.** Resultados de la prueba en vacío del transformador 2

Potencia nominal [kVA]	Vo [V]	Io [A]	Po [W]	Qo [Var]	Norma INEN 2114	
					Po [W]	Io [%]
2,5	220,1	0,136	21,23	17,97	19	2,5
	220	0,136	21,18	17,89		
	220	0,136	21,03	17,87		
	127	0,23	20,74	17,45		
	127,1	0,231	20,81	17,51		
	127	0,23	20,76	17,52		

En cambio, la prueba en vacío realizada al banco de transformadores en conexión delta abierta por el método de los dos vatímetros desplego resultados indicados en la Tabla 5.5.

**Tabla 5.5.** Resultados de la prueba en vacío en conexión delta abierta

Potencia nominal [kVA]	$V_{RS}$ [V]	$V_{ST}$ [V]	$I_{RS}$ [A]	$I_{ST}$ [A]	$P_o$ [W]	$Q_o$ [Var]
4,3	217,5	218	0,165	0,154	24,84	17,12

### 5.3 Prueba de cortocircuito a los transformadores

La prueba de corto circuito se realiza a cada uno de los transformadores para obtener las pérdidas en el cobre y de igual forma constatar los resultados obtenidos de potencia en cortocircuito con lo dispuesto en las normas NTE INEN 2114. Para esta prueba en cortocircuito la posición del tap se debe encontrar en el tap nominal.

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en cortocircuito se la indican en las Tablas 5.6 y 5.7.

**Tabla 5.6.** Resultados de la prueba en cortocircuito del transformador 1

Potencia nominal [kVA]	$V_{cc}$ [V]	$I_{cc}$ [A]	$P_{cc}$ [W]	$Q_{cc}$ [Var]	Norma INEN 2114
					$P_c$ [W]
2,5	4,621	10,9	48,59	12,92	65
	4,533	10,68	46,72	12,39	
	4,645	10,96	49,16	13,08	
	9,77	19,56	131,8	138,2	
	9,838	19,73	133,9	140,4	
	9,808	19,66	133	139,5	

**Tabla 5.7.** Resultados de la prueba en cortocircuito del transformador 2

Potencia nominal [kVA]	$V_{cc}$ [V]	$I_{cc}$ [A]	$P_{cc}$ [W]	$Q_{cc}$ [Var]	Norma INEN 2114
					$P_c$ [W]
2,5	4,343	10,23	42,77	11,78	65
	4,663	11	49,4	13,59	
	4,396	10,64	43,25	12,33	
	9,063	19,86	125,6	128,8	
	9,008	19,72	123,9	127,1	
	9,003	19,68	123,5	126,9	

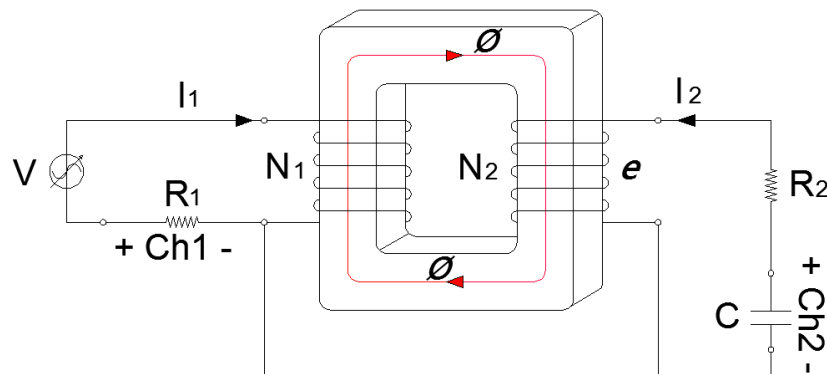
La prueba de cortocircuito para el banco de transformadores en conexión delta abierta se realiza de la misma forma como se lo hace para los transformadores monofásicos. Esto es cortocircuitando el lado de bajo voltaje y alimentando por el devanado de alto voltaje. Para lo cual los resultados obtenidos en la prueba se presentan en la Tabla 5.8.

**Tabla 5.8.** Resultados de la prueba en cortocircuito en conexión delta abierta

Potencia nominal [kVA]	$V_{RS}$ [V]	$V_{ST}$ [V]	$I_{RS}$ [A]	$I_{ST}$ [A]	Pcc [W]	Qcc [Var]
4,3	4,584	4,207	12,07	11,31	53,19	14,44

## 5.4 Curva de histéresis y densidad de flujo magnético

La curva o lazo de histéresis del transformador se obtiene mediante la implementación de un circuito electrónico conectado al bobinado del transformador, como se muestra en la Figura 5.1.



**Figura 5.1.** Circuito de conexión del equipo para la adquisición del lazo de histéresis [22]

Para obtener la gráfica de lazo de histéresis se coloca el pertinente arrollamiento que conforma la bobina en cada una de las piernas laterales del núcleo monofásico y se conecta al circuito electrónico implementado en un protoboard para proceder a conectar el circuito del protoboard con los terminales de cada una de las bobinas. Los elementos del circuito a armar son los siguientes:

$$R_1 = 1 \Omega$$

$$R_2 = 390 \text{ k}\Omega$$

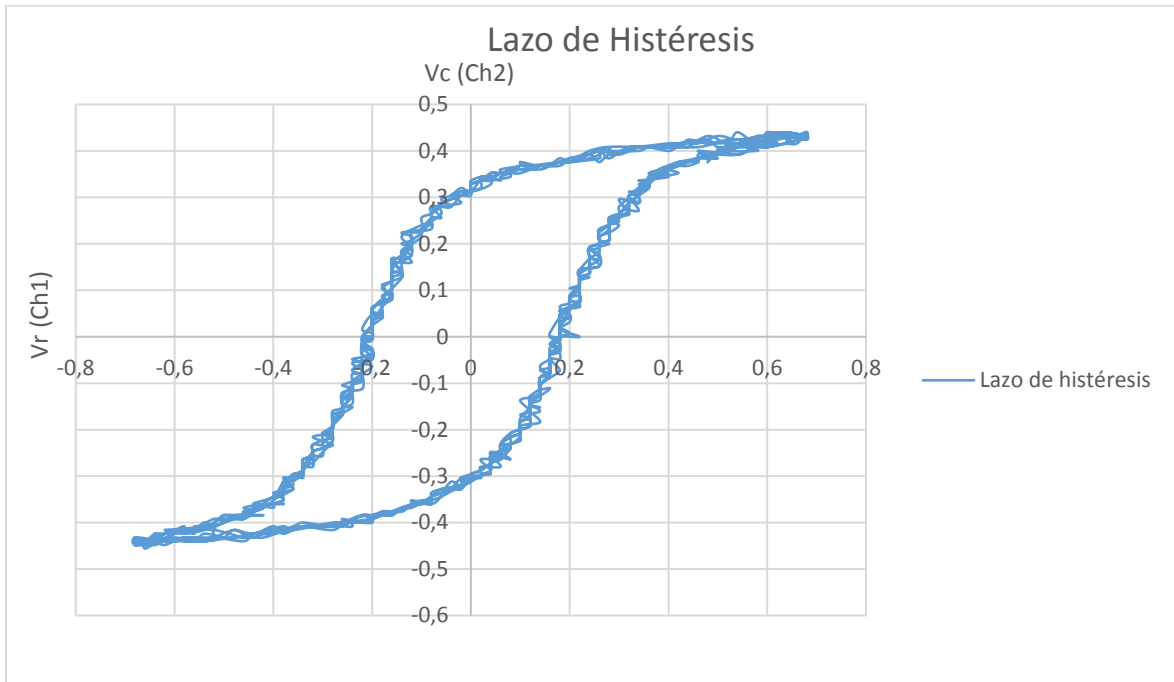
$$C = 1 \mu F$$

$$N_1 = N_2 = 54 \text{ espiras}$$

La resistencia  $R_1$  conectado a la bobina de la primera pierna lateral permite adquirir los datos de la corriente  $I_1$  y registrados en el Ch1, en cambio el capacitor  $C$  conectado en la segunda pierna lateral se encarga de adquirir los datos del voltaje  $e$ , que se presentan en el Ch2. La intersección de ambos canales muestra la curva de histéresis cuyos datos finales de la prueba obtenida de cada canal se indica en el Anexo VIII.



Los resultados obtenidos de voltaje del canal uno y canal dos presentes en el osciloscopio se muestra en la Figura 5.2.



**Figura 5.2.** Lazo de histéresis mostrada en el osciloscopio

El correspondiente análisis permite tener las unidades de Teslas y A/m que deberá tener el lazo de histéresis para lo cual se utiliza las leyes de Ampere y Faraday que permite el análisis sobre las bobinas colocadas en cada una de las piernas laterales del núcleo [22]. El análisis parte de la siguiente expresión:

$$N_1 \cdot I_1 = \oint H dl$$

$$N_1 \cdot I_1 = H \oint dl$$

Resolviendo la integral de línea obtenemos lo siguiente:

$$N_1 \cdot I_1 = H \cdot l$$

Despejando la intensidad del campo magnético se tiene la siguiente expresión:

$$H = \frac{N_1 \cdot I_1}{l}$$

Se tiene que la corriente está dada por:

$$I_1 = \frac{V_{R_1}}{R_1}$$

Por lo tanto, reemplazando la expresión de la corriente en la expresión anterior de la intensidad del campo magnético se tiene la Ecuación 5.1.

$$H = \frac{N_1 \cdot V_{R_1}}{l \cdot R_1}$$

**Ecuación 5.1.** Intensidad de campo magnético [19]

En cambio, el voltaje que se induce en la bobina 2 se presenta en a continuación en la ecuación 5.2 [18].

$$e = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

**Ecuación 5.2.** Voltaje inducido en la bobina [19]

Continuando con el voltaje que se induce en la bobina se tiene la siguiente expresión:

$$e = N_2 \cdot A \cdot \frac{dB}{dt}$$

Aplicando la integral lineal y despejando la densidad del flujo magnético obtenemos lo siguiente:

$$B = \frac{1}{N_2 \cdot A} \cdot \int e dt$$

En cambio, para la corriente que circula por el capacitor se tiene dicha expresión:

$$I_2 = C \frac{dV_c}{dt}$$

Aplicando la integral lineal a la expresión anterior se tiene el voltaje en el capacitor.

$$V_c = \frac{1}{C} \int I_2 dt$$

Conociendo que la resistencia  $R_2$  colocada en los terminales de la segunda bobina es mayor al capacitor  $C$ , el capacitor se desprecia y por ende se tiene la expresión [22]:

$$I_2 = \frac{e}{R_2}$$

Obteniendo la expresión de corriente de  $I_2$ , se reemplaza en la expresión anterior del voltaje en el capacitor para lo cual se tiene:

$$V_c = \frac{1}{C \cdot R_2} \int e dt$$

Despejando la integral lineal del voltaje que se induce a la bobina se tiene:

$$\int e dt = C \cdot R_2 \cdot Vc$$

Por lo tanto, reemplazando  $\int e \cdot dt$ , en la expresión de la densidad de flujo magnético se tiene la Ecuación 5.3.

$$B = \frac{C \cdot R_2 \cdot Vc}{N_2 \cdot A}$$

**Ecuación 5.3.** Densidad del flujo magnético en el núcleo [22]

Donde:

$H$ : Intensidad de campo magnético en Teslas (T)

$V_{R_1}$ : Voltaje en la resistencia uno expresado en voltios (V)

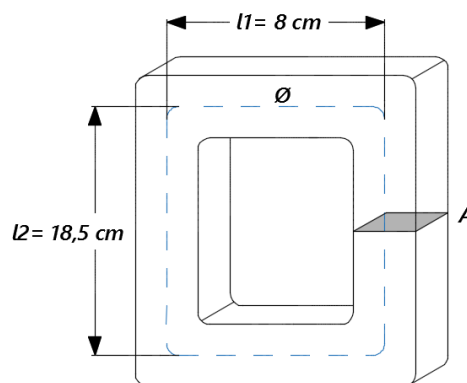
$l$ : Longitud media del núcleo de la trayectoria del flujo en metros (m)

$B$ : Densidad de flujo magnético en el núcleo en amperios por metro (A/m)

$Vc$ : Voltaje en el capacitor en voltios (V)

$A$ : Área del núcleo en metros cuadrados (m<sup>2</sup>)

De esta manera, se tiene la longitud media del núcleo por donde circula el flujo magnético y como se muestra en la Figura 5.3.



**Figura 5.3.** Longitud media del núcleo [19]

Los parámetros por calcular para obtener la densidad de flujo magnético, la intensidad de campo magnético y posterior la curva B-H son las siguientes:

Área de sección del núcleo:

$$A = E \cdot AN$$

$$A = 3,6 \text{ cm} \cdot 14,4 \text{ cm}$$

$$A = 51,84 \text{ cm}^2$$

Longitud media del núcleo:

$$l = 2 \cdot l_1 + 2 \cdot l_2$$

$$l = 2 \cdot 8 + 2 \cdot 18,5$$

$$l = 53 \text{ cm}$$

Los valores obtenidos se los reemplaza en las ecuaciones de B y H.

Densidad de flujo magnético:

$$B = \frac{C \cdot R_2 \cdot V_c}{N_2 \cdot A}$$

$$B = \frac{0,000001 \cdot 390000 \cdot V_c}{54 \cdot 0,005184}$$

$$B = 1,393 \cdot V_c$$

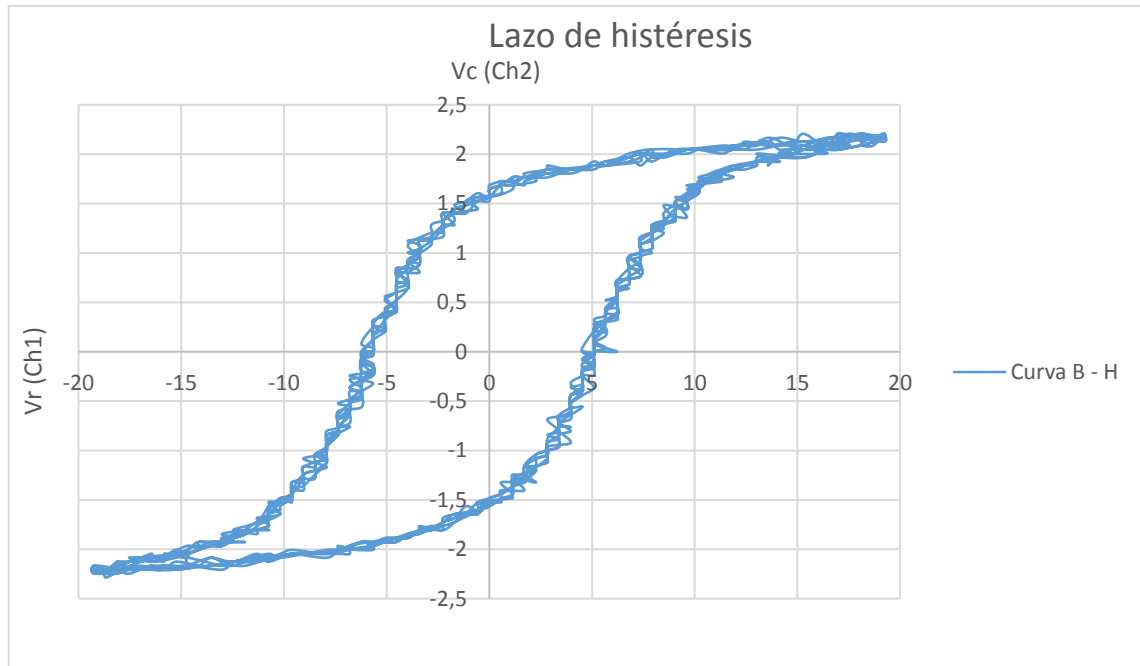
Intensidad de campo magnético:

$$H = \frac{N_1 \cdot V_{R1}}{l \cdot R1}$$

$$H = \frac{54 \cdot V_{R1}}{0,53 \cdot 1}$$

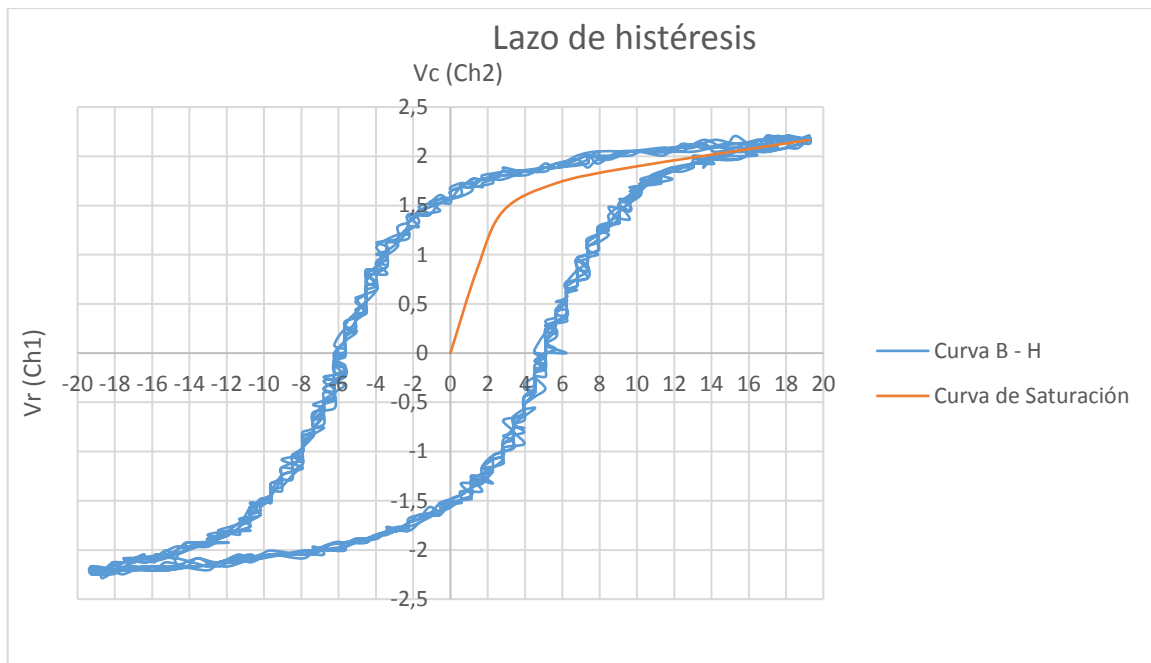
$$H = 101,887 \cdot V_{R1}$$

Por medio de las expresiones determinadas de B y H, se realiza el reemplazo de los valores de las señales de  $V_c$  y  $V_{R1}$  obtenidos de la gráfica mostrada en el osciloscopio se obtiene la gráfica de la curva de B – H o lazo de histéresis como se muestra en la Figura 5.4.



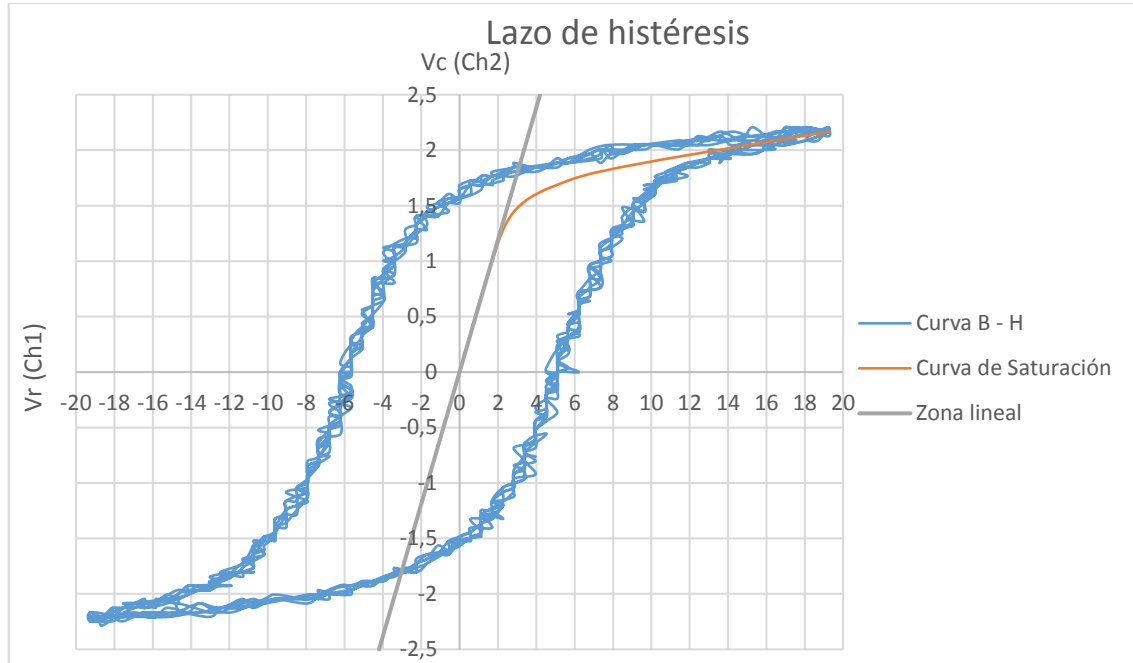
**Figura 5.4.** Lazo de histéresis

La densidad del flujo magnético se determina de acuerdo con la curva de saturación. Y para obtener la curva de saturación se determina los puntos medios de los datos obtenidos para la intensidad de campo magnético H [22]. Donde se presenta a continuación la curva de saturación que tiene el núcleo en la Figura 5.5.



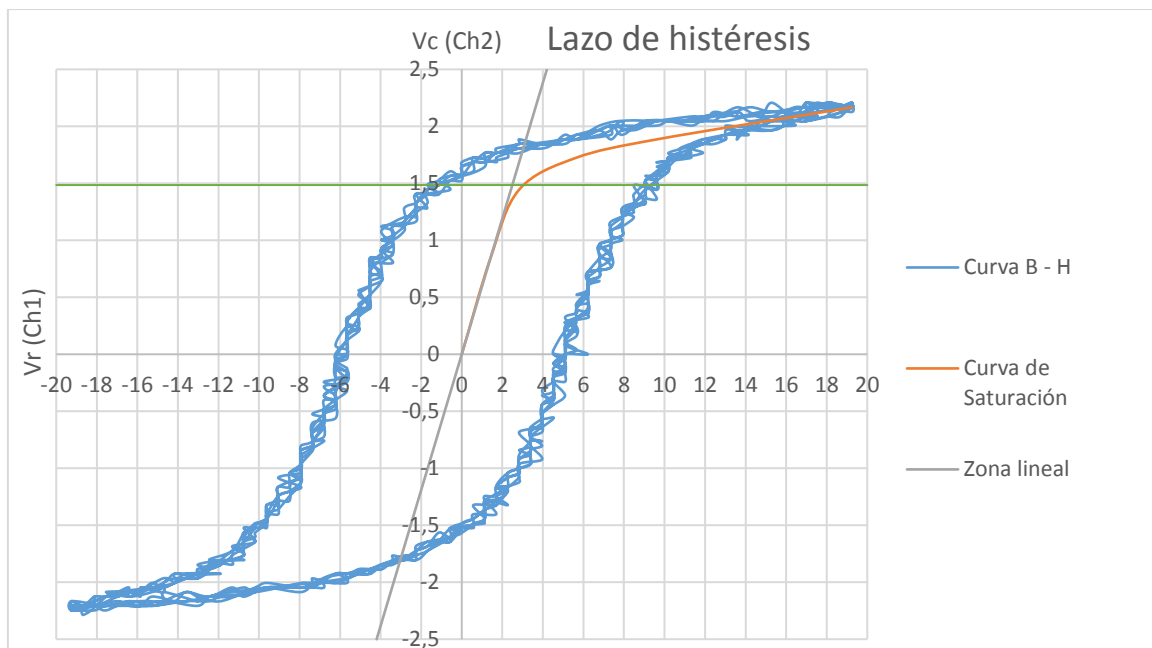
**Figura 5.5.** Curva de saturación

La curva de saturación se divide de 3 zonas y estas son la zona lineal, la zona intermedia y la zona saturada, para lo cual en la Figura 5.6 se muestra las zonas de operación del transformador con la finalidad de tener la densidad de flujo magnético.



**Figura 5.6.** Zona lineal de la curva de saturación

Para la intensidad de campo magnético de 3 A/m se tiene que la densidad del flujo magnético máxima mostrada en la Figura 5.7.



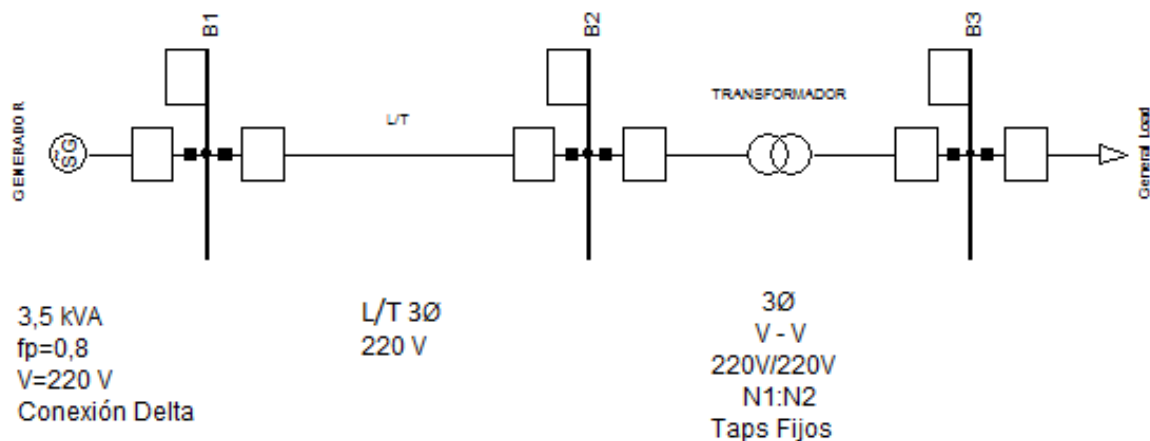
**Figura 5.7.** Zona lineal de la curva de saturación

El valor de la densidad de flujo magnético  $B$  se encuentra dentro de la zona lineal y no entra en la zona de saturación, este valor es el siguiente:

$$B = 1,48 T$$

## 5.5 Prueba de control de voltaje con el banco de transformadores monofásicos en conexión delta abierta

La realización de la prueba de control de voltaje por medio del banco de transformadores monofásicos en conexión en delta abierta para alimentar una carga trifásica se la realiza implementando el circuito del sistema eléctrico de potencia de la Figura 5.8.



**Figura 5.8.** Diagrama unifilar del SEP en el laboratorio [22]

Con el sistema eléctrico de potencia a escala como generador, línea de transmisión y carga, y con la información obtenida de estos equipos se tiene las características específicas del transformador trifásico que debe tolerar y estos son:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V}$$

**Ecuación 5.4.** Corriente del generador [22]

$$I = \frac{3,5 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 220V} = 9,18 A$$

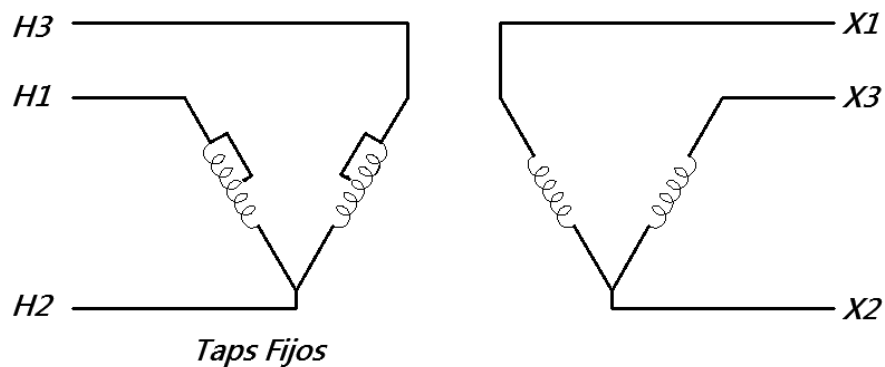
Debido a que la corriente del generador se encuentre sobrecargado a 12A y su relación de transformación es de 1 [22]. El transformador en conexión delta abierta debe soportar dicha corriente, por lo que la potencia del transformador debe ser:

$$S = \sqrt{3} \cdot 12 \cdot 220 = 4,57 \text{ kVA}$$

Por lo tanto, el banco de transformadores monofásicos en conexión en delta abierta tiene las siguientes características:

- Potencia: 4,3 kVA
- Voltajes: 220V/220V
- Conexión: Delta Abierta o (V-V)
- Taps en el Devanado Primario: +/-5% con variación de 2,5% de 5 posiciones

En la Figura 5.9 se muestra la configuración de los taps fijos en conexión delta abierta.



**Figura 5.9.** Configuración de los taps en el lado del primario en conexión delta abierta

La prueba final de funcionamiento en conexión en delta abierta permite efectuar el análisis bajo carga tanto con carga resistiva, así como también con carga RL, de tal manera de obtener los valores en cada una de las posiciones de los taps fijos, los resultados de la prueba de control de voltaje se muestran en las Tablas 5.9 y 5.10.

**Tabla 5.9.** Resultados de la prueba de control de voltaje con carga R

Posición de los taps	Paso de carga	V <sub>RS</sub> [V]	V <sub>ST</sub> [V]	f [Hz]	I <sub>RS</sub> [A]	I <sub>ST</sub> [A]	P [W]	Q [Var]	S [VA]
1	0	204	206	60,02	3,591	1,966	641,7	197,8	732,6
	1	205,1	206,9	60,03	6,08	4,049	1099	504	1201
	2	206,9	208,6	60,01	8,61	6,815	1695	455,7	1782
	3	208,1	210,1	60,02	10,5	9,007	2152	128,1	2185
	4	210,5	211,8	60,03	14,93	13,58	3045	700	3144
2	0	208,9	210,9	60,02	1,439	1,744	155,9	34,41	300,6



	1	210,3	212,5	59,99	4,295	2,301	800,5	305,3	903,1
	2	212	213,8	60,01	6,625	4,629	1299	443,3	1405
	3	214,1	215,7	60,02	10,44	8,558	2175	442,6	2242
	4	216,3	217,5	60,06	13,64	11,95	2860	634,9	2950
3	0	214,5	215,9	60,02	1,445	1,685	217,5	74,26	309,9
	1	218,3	220,2	60,01	4,424	3,558	877,9	275,1	965,8
	2	221,6	223,7	59,96	7,149	8,382	1491	297,9	1584
	3	224,4	225,9	60,03	11,24	9,585	2337	556,8	2522
	4	227,8	229,2	60,05	13,76	11,56	3045	618,7	3134
4	0	219,9	221,5	60,02	1,481	1,673	146	109,6	325,7
	1	222,5	224,1	59,99	4,706	2,687	969,1	237,8	1047
	2	225,2	226,5	60,03	9,282	6,831	2001	493,1	2091
	3	227,5	228,5	59,96	11,61	9,566	2591	367,9	2641
	4	229,3	230,3	60,07	13,91	11,83	3134	458,8	3189
5	0	226,5	228,3	60,02	1,929	1,623	260,8	40,8	436,8
	1	228,7	230,4	60,02	5,673	3,645	1159	443,1	1297
	2	229,8	231,3	59,95	8,183	5,841	1644	841,4	1880
	3	232,2	233,2	60,00	10,57	8,466	2271	810,3	2454
	4	234	235	60,02	13,65	11,74	2973	1048	3193

**Tabla 5.10.** Resultados de la prueba de control de voltaje con carga RL

Pos. taps	Paso de carga	$V_{RS}$ [V]	$V_{ST}$ [V]	f [Hz]	$\Theta_{RS}$ [°]	$\Theta_{ST}$ [°]	$I_{RS}$ [A]	$I_{ST}$ [A]	P [W]	Q [Var]	S [VA]
1	0	199,3	201,4	60,01	-41,73	-118,1	2,724	1,409	551,7	135,1	568
	1	200,2	202,5	60,03	2,814	-14,03	4,841	3,17	1420	357	1455
	2	202,7	204,7	60,04	5,625	-30,93	7,57	5,889	2490	601,6	2561
	3	204,2	206,5	59,99	5,625	-30,96	10,61	9,083	3715	795,6	3800
	4	205,5	208,1	59,96	0	-36,52	13,82	11,82	4799	1339	4982
2	0	204,9	207,1	60,00	-28,13	-25,31	3,057	1,452	467	316,8	564,3
	1	206,4	208,4	60,02	-11,26	-39,42	4,908	3,059	1455	451,5	1523
	2	207,6	209,4	59,99	-16,793	-53,39	7,387	5,364	2076	1274	2435
	3	209,6	211,5	60,05	-8,446	-44,56	9,999	8,108	3219	1514	3557
	4	211,7	213,6	60,04	-5,623	-45,03	13,22	11,69	4613	1814	4957
3	0	210,7	212,7	59,99	-16,73	-61,88	3,554	1,493	759	420,7	867,8
	1	212	214,1	59,95	2,809	-22,47	5,519	3,365	1719	330,2	1750

	2	213,6	215,4	60,00	-11,25	-45,01	7,691	5,438	2495	835,6	2631
	3	216	217,9	60,06	-2,815	-39,43	10,7	8,701	3801	1085	3953
	4	216,5	218,2	60,02	-2,816	-39,39	12,42	10,66	4491	1404	4705
4	0	216	218	59,97	-39,37	-154,8	2,607	1,216	328	261,8	419,7
	1	217,2	219,2	60,03	2,789	-25,32	4,76	2,503	1345	452,6	1419
	2	218,2	220,2	59,99	-8,429	-47,81	6,505	4	1974	723,5	2102
	3	220,6	222,4	60,01	-8,434	-42,16	10,63	7,949	3394	1747	3817
	4	222,9	224,5	60,03	-11,24	-47,82	12,67	10,4	4396	1955	4811
5	0	222,5	224,5	59,95	-5,614	-28,1	3,909	2,179	1093	399,3	1164
	1	224,6	226,5	60,01	11,24	-5,603	5,235	3,661	1765	429,2	1816
	2	225,8	227,7	60,04	-14,08	-47,32	7,359	5,691	2622	859,4	2759
	3	227	228,6	60,03	-2,815	-36,28	9,491	7,835	3346	1551	3688
	4	228,3	230,3	59,99	0	-33,76	12,6	11,13	4852	1636	5120

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

- La implementación de un banco de dos transformadores monofásicos para la conexión en delta abierta en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia permite conocer la ventaja de esta conexión al no disponer de un tercer transformador, ya sea la desconexión por mantenimiento o daño. La conexión en delta abierta permite continuar con el suministro trifásico a la carga, pero a razón de una capacidad del 57,74% del banco trifásico total, teniendo pérdidas de capacidad de suministro del 42,26%.
- La conexión de los dos transformadores monofásicos en delta abierta permite comprobar que, al no disponer del tercer transformador, las corrientes de línea en conexión delta abierta son iguales a las corrientes de fase en cada uno de los transformadores, debido a que los voltajes y corrientes del banco en delta abierta se desfasan a razón de  $30^\circ$  y  $-30^\circ$ , para tener los 57,74% de la potencia nominal.
- De acuerdo a los resultados obtenidos de la prueba del lazo de histéresis de cada uno de los transformadores se obtiene que el valor de la densidad del flujo magnético es de 14800 Gauss, comprobando de esta manera que no entra en la zona de saturación y que permanece dentro de la zona lineal. De esta manera se constata que el tipo de material ferromagnético del núcleo es de buena calidad para la construcción de los transformadores. Además, se verifica que la densidad magnética de 14300 Gauss utilizada en el diseño de los transformadores es muy parecida a la obtenida en la prueba.
- El control de voltaje permite únicamente realizar el cambio de posición cuando se encuentre desenergizado el transformador.
- Las pérdidas en el hierro y cobre del transformador 1, obtenidas de las pruebas de circuito abierto y cortocircuito, tienen valores de 23,34 W y 49,16 W respectivamente. Para el transformador 2 se tienen pérdidas de 21,23 W y 49,4 W en el hierro y en el cobre respectivamente.
- El estudio de la conexión en delta abierta permite considerar diferentes escenarios de operación del banco de dos transformadores, puesto que en conexión delta abierta es necesario tener las tres fases de la red, pero ya que no solamente puede

fallar un transformador sino también se puede desconectar una de las líneas de la red, ya no se podrá realizar la conexión en delta abierta sino una conexión en estrella abierta – delta abierta, ya que solamente necesita dos fases y el neutro para la alimentación.

- Es importante recalcar que el aislamiento del transformador es del tipo AA, enfriamiento natural de aire y no del tipo AFA. Al tener por motivo de fines didácticos el único aislamiento que recubre el núcleo y las bobinas es el aire de forma natural.

## 6.2 Recomendaciones

- Se recomienda verificar siempre que el transformador se encuentre desenergizado al momento de realizar un cambio de posición del tap para evitar un cortocircuito al cambiar de posición el tap.
- Cuando se desee realizar pruebas para la obtención de parámetros, se recomienda utilizar el equipo Ward Leonard, que permite mantener el voltaje y la frecuencia en valores estables.
- Con el fin de entender que se puede alimentar una carga trifásica con dos transformadores monofásicos, se recomienda utilizar la conexión en delta abierta y verificar que la capacidad de potencia es al 57,74% con respecto a la potencia nominal del banco de transformadores completo.
- Se recomienda analizar y comparar los tipos de conexiones trifásicas especiales que se pueden realizar mediante dos transformadores para continuar con el suministro trifásico.
- En la construcción de bobinas para transformadores se recomienda utilizar una estructura de madera (formaleta) para evitar que origine alguna alteración en el campo magnético, además de colocar todos los aislantes necesarios entre capas, espiras y núcleo – bobina, de acuerdo con las normas y así evitar la ocurrencia de un cortocircuito que dañe a las bobinas durante la operación del transformador.
- Se recomienda aislar adecuadamente los puntos de soldadura de los taps y conexiones internas para evitar que exista algún cortocircuito que dañe al transformador durante la energización del equipo.
- Se recomienda sujetar y acoplar bien las bobinas, con el aislamiento adecuado en la fase de montaje de las bobinas sobre el núcleo, a fin de evitar la resonancia del transformador durante la energización y operación. De la misma manera, las láminas del núcleo deben estar bien compactas para evitar ruido al momento de energizar el transformador.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. H. Yáñez Salazar, "Elaborar un Manual de Procedimientos para el Diseño y Construcción de Transformadores", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2010.
- [2] IEEE, Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers, IEEE C57.12.91, New York, 2011, pp. 1-94.
- [3] IEEE, Standard General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers, Including Those with Solid-Cast and/or Resin Encapsulated Windings, IEEE C57.12.01, New York, 2005, p. 11.
- [4] N. T. Colombiana, "NTC 3445 Electrotecnia. Transformadores Trifásicos Autorefrigerados, Tipo Seco Abierto y Encapsulado en Recina, Corriente Sin Carga, Pérdidas y Tensión de Cortocircuito", Bogotá, 1992.
- [5] G. Solar Corral, "Construcción y Pruebas de un Transformador de 100 kV ", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1982.
- [6] D. Espinosa Salazar, "Construcción y Pruebas de un Transformador de 100 kV ", Segunda Parte, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1987.
- [7] R. Rodríguez Rojas, "Cálculo y Diseño de un Transformador Monofásico de Distribución", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1976.
- [8] A. Ayala, "Análisis y Evaluación del Dimensionamiento de los Transformadores para Servicio del Hospital San Francisco", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2014.
- [9] F. Valdivieso, "Protección para Devanados de Transformadores", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1979
- [10] N. Dávila, "Diseño y Construcción de un Transformador con Bobina Flotante", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1995.
- [11] I. Sandoval, "Diseño de Transformador de Distribución por Computador ", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2000.
- [12] R. Álvarez, "Diseño y Construcción de un Transformador Monofásico de Distribución", Aulas de las Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, 1978.

- [13] R. V.R Transformadores, "Diseño y Construcción de Transformadores", Entrevista, Quito, Octubre 2017.
- [14] J. Chancusig y J. Játiva , "Sintonización de Taps de los Transformadores del SNI para operación en el año 2011", Aulas de las Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, 2011.
- [15] H. Peña y J. Prentice, "Normas de Transformadores de Distribución", Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2010.
- [16] A. Aldás, "Proyecto de Norma para Pruebas de Transformadores", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1974.
- [17] P. Camarena, "Transformadores Eléctricos Industriales", México, 1974.
- [18] A. Fitzgerald, C. Kingsley y S Umans, "Máquinas Eléctricas", México, 2004.
- [19] B. Guru y H. Hiziroglu, "Máquinas Eléctricas y Transformadores", México, 2003.
- [20] P. Avelino, "Transformadores de Distribucion: Teoría, cálculo, construcción y pruebas", Tercera Edición, México, 2001.
- [21] M. Álvarez Pulido, "Transformadores: Cálculo fácil de transformadores y autotransformadores, monofásicos y trifásicos de baja tensión",Primera Edición, México, 2009.
- [22] P. Maldonado y V. Mena, "Diseño y Construcción de un Transformador Trifásico para Control de Voltaje en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2017.
- [23] N.T. Ecuatoriana, NTE INEN 2114:2004. Transformadores de distribución nuevos monofásicos. Valores de corriente sin carga, pérdidas y voltaje de cortocircuito, Quito, 2004.
- [24] S.J. Chapman, "Máquinas Eléctricas", Mc Graw Hill, Quinta Edición, México, 2012, pp. 98-105.
- [25] A. Acevedo, R. Ledesma, E. Perera, "Manual de Pruebas a Transformadores de Distribución", México,2007, pg 1 - 81

## **8. ANEXOS**

En la siguiente sección del documento se establece los anexos pertinentes con la información relevante del proyecto donde se presenta toda la información de las tablas y gráficos correspondientes al diseño de los transformadores.

Los siguientes anexos corresponden al presente estudio técnico y son:

ANEXO I. Curva para estimar las pérdidas del hierro en el núcleo.

ANEXO II. Curva para estimar la potencia de excitación.

ANEXO III. Ciclo térmico de recocido para el acero de grano orientado de grado M-4.

ANEXO IV. Plano eléctrico de las bobinas del transformador con las características correspondientes para su construcción.

ANEXO V. Plano mecánico del tanque o cuba del transformador con las características y dimensiones pertinentes para su construcción.

ANEXO VI. Plano mecánico de las prensas del transformador con las características y dimensiones pertinentes para su construcción.

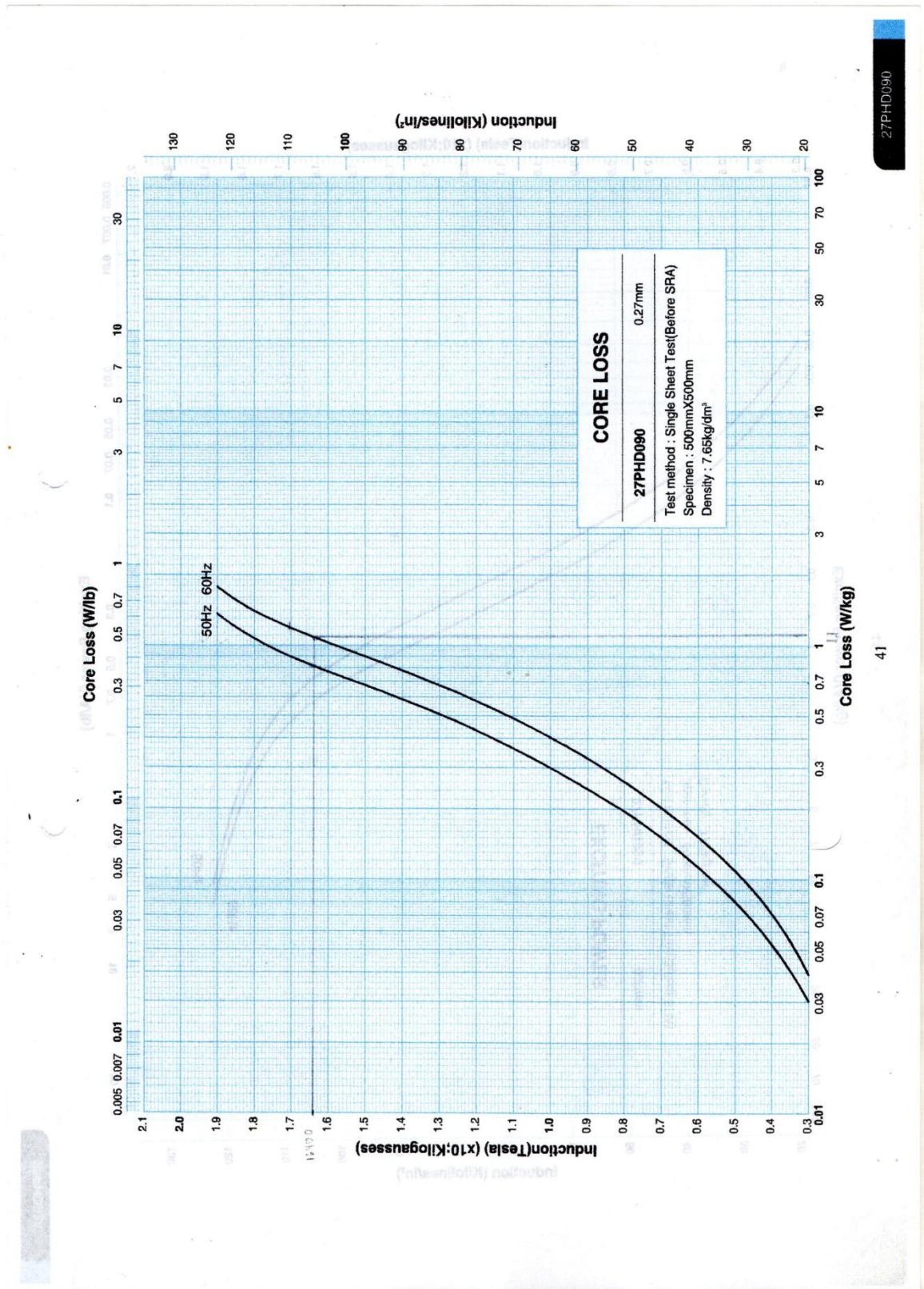
ANEXO VII. Hoja de pruebas de operación realizadas a los transformadores en la planta industrial RVR transformadores.

ANEXO VIII. Datos para la curva de histéresis

ANEXO IX. Software para el diseño de transformadores monofásicos tipo seco

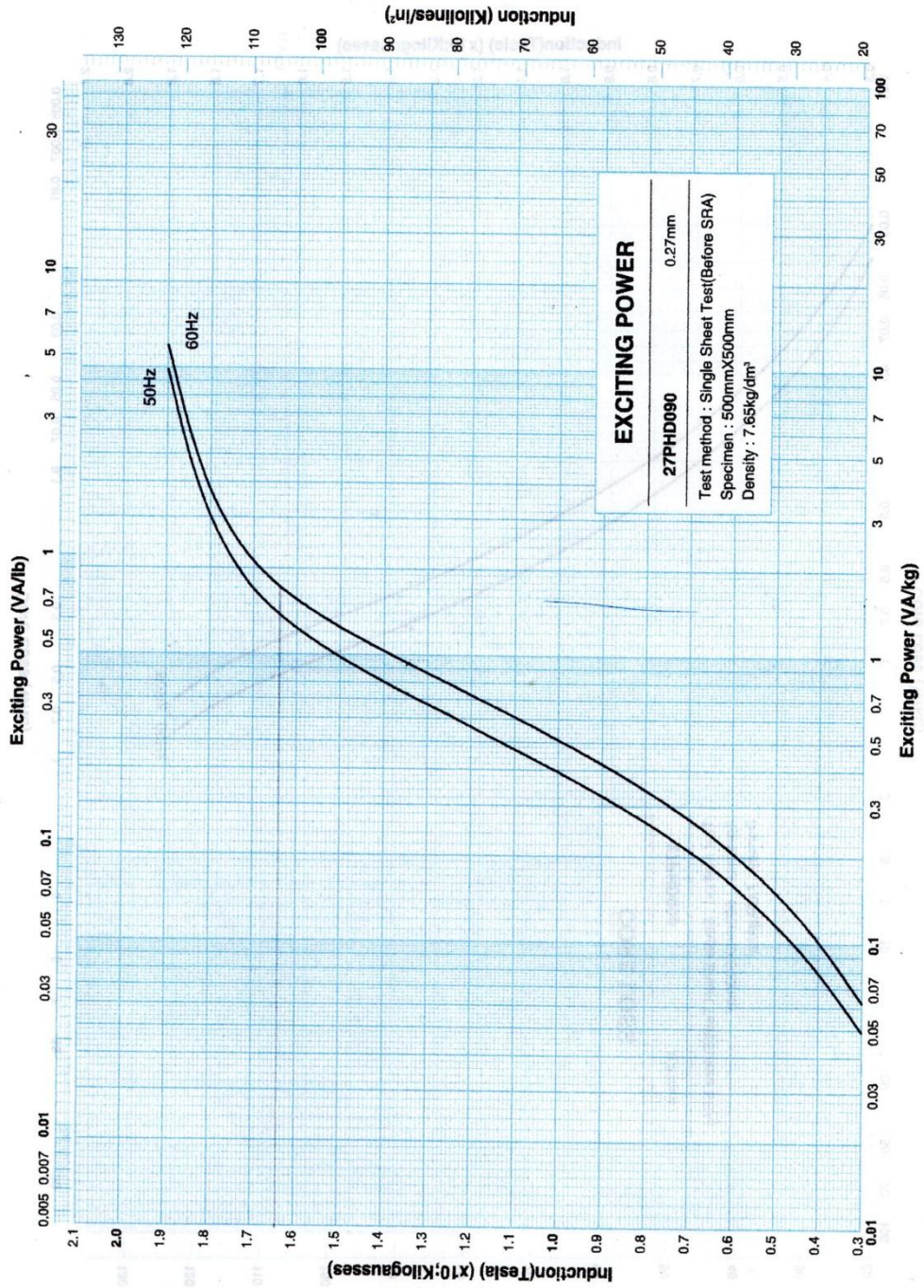


# ANEXO I. Curva para estimar las pérdidas del hierro en el núcleo



## ANEXO II. Curva para estimar la potencia de excitación

27PHD090



## ANEXO III. Ciclo térmico de recocido para el acero de grano orienta de grado M-4

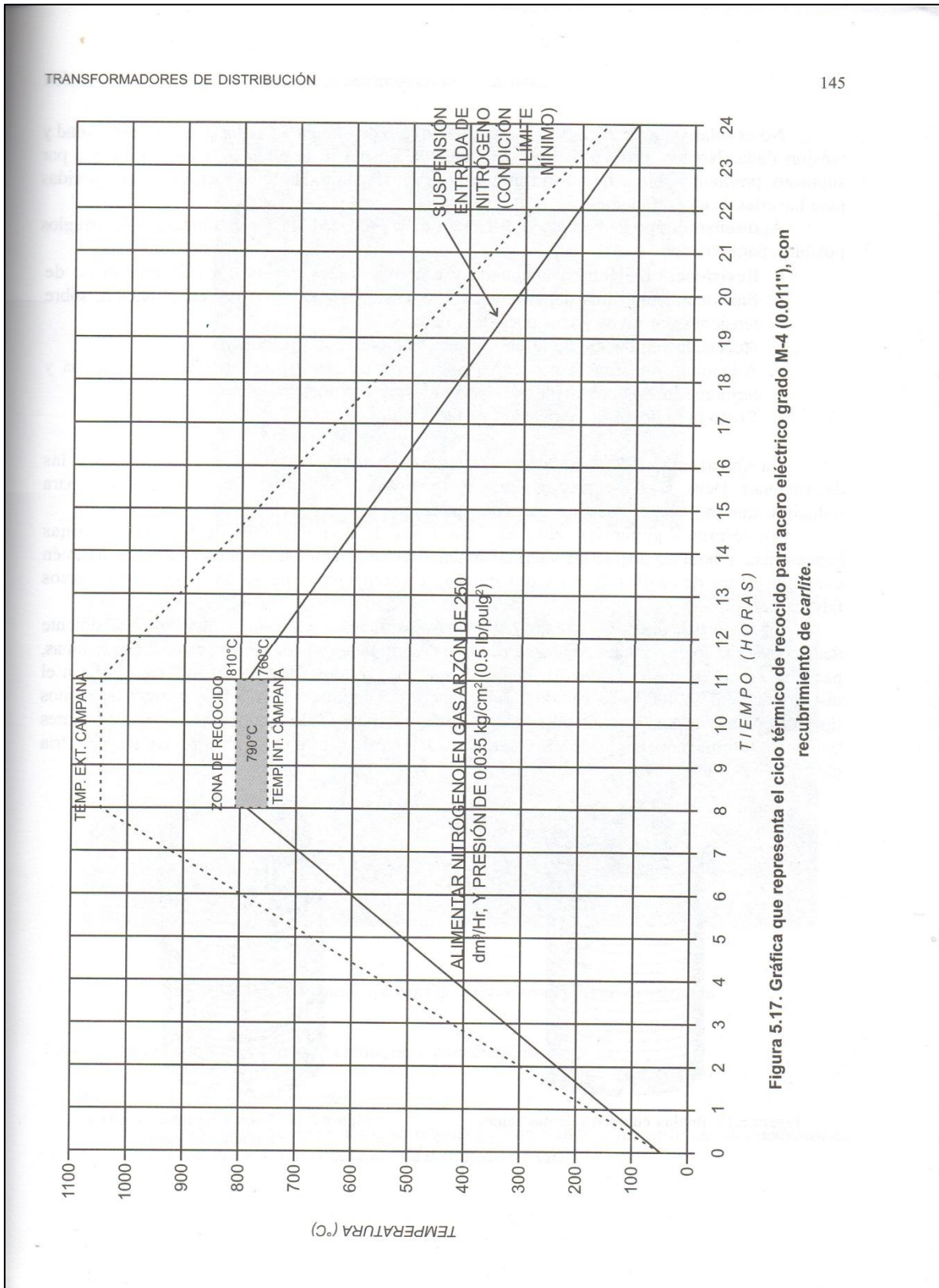


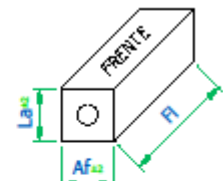
Figura 5.17. Gráfica que representa el ciclo térmico de recocido para acero eléctrico grado M-4 (0.011"), con recubrimiento de carlite.

## ANEXO IV. Plano eléctrico de las bobinas del transformador con las características correspondientes para su construcción

AISLAMIENTOS			tol.
AIS 0	1,5	mm	---
DUCTOS FRENTE 2-1	6	mm	---
AIS 2-1 NOMEX	3x0,3	mm	---
AIS ENTRE CAPAS NOMEX	0,3	mm	---
HB	130	mm	±5

FORMALETA #1	
Af	39 mm
La	148 mm
Fl	MAYOR A HB

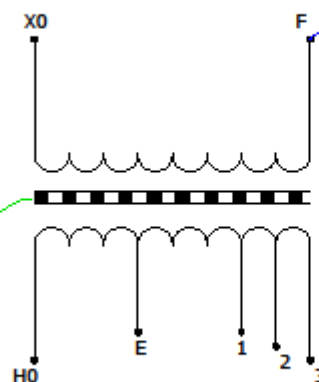
  

  

	ESPIRAS	CAPAS	ESP/CAPA	ESP/SEC.1	ESP/SEC.2	CALIBRE	PESO
X0-F / X0'-F'	112	2	28	56	56	1(10AWG)	2 kg
HO-3 / HO'-3'	118	2	30	59	59	1(10AWG)	3 kg

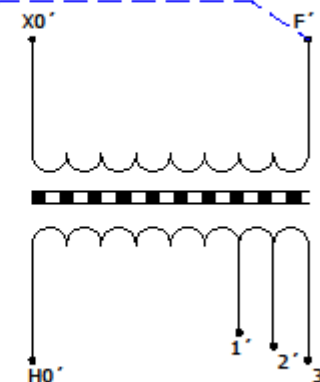
  

**COLLARIN 26 mm (±5mm)**

**SECCIÓN 1**



**SECCIÓN 2**



DUCTOS FRENTE 6mm

**COLLARIN 23 mm(± mm)**

SALIDAS		
E	47	---
1	53	1'
2	56	2'
3	59	3'

Medida de Verificación en Bobina		
NOMBRE	Medida (mm)	Tolerancia
Diferencia Radial	200	±5
Esp. Radial de bobina	20	±5

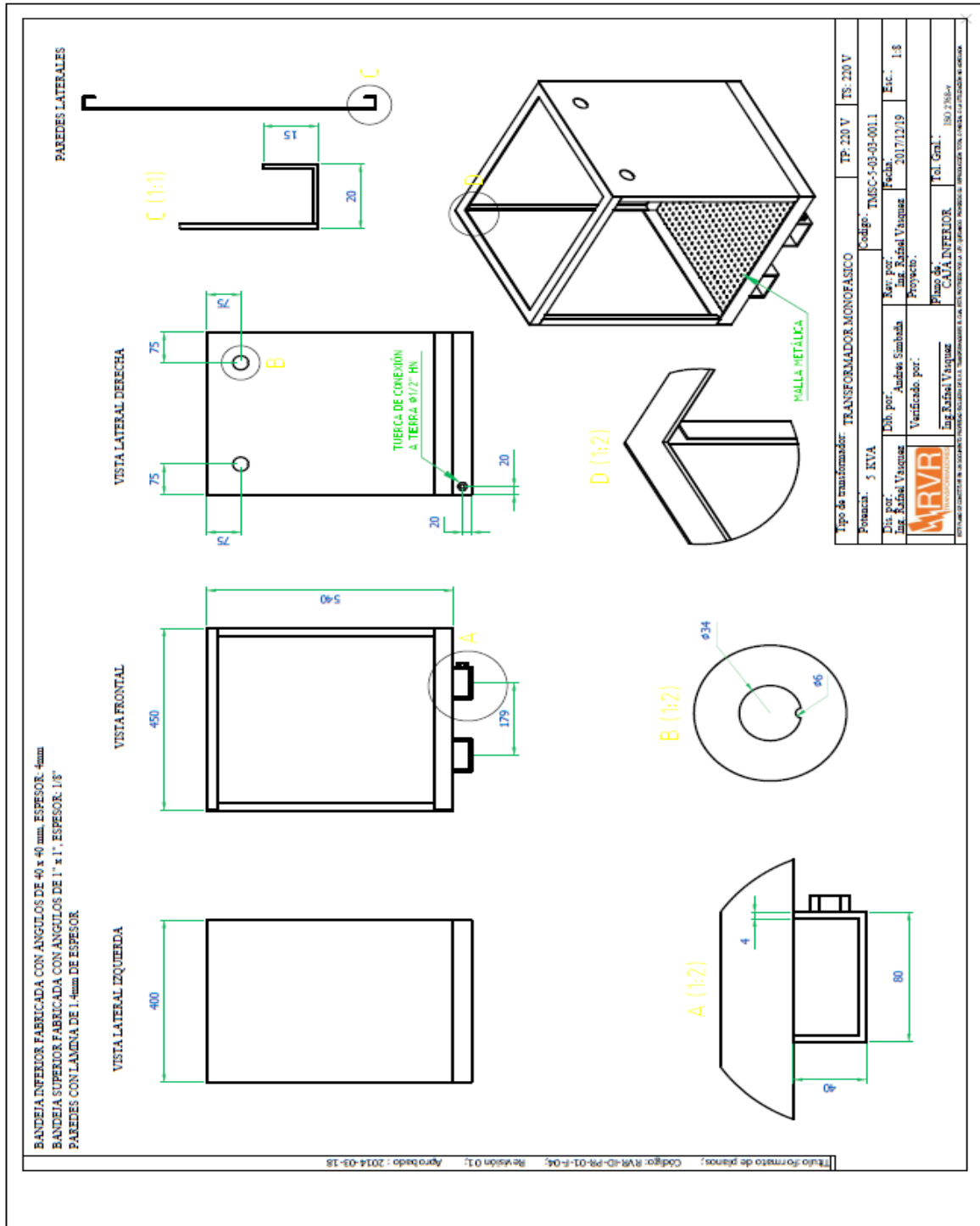
**Salidas en cable #10 AWG**

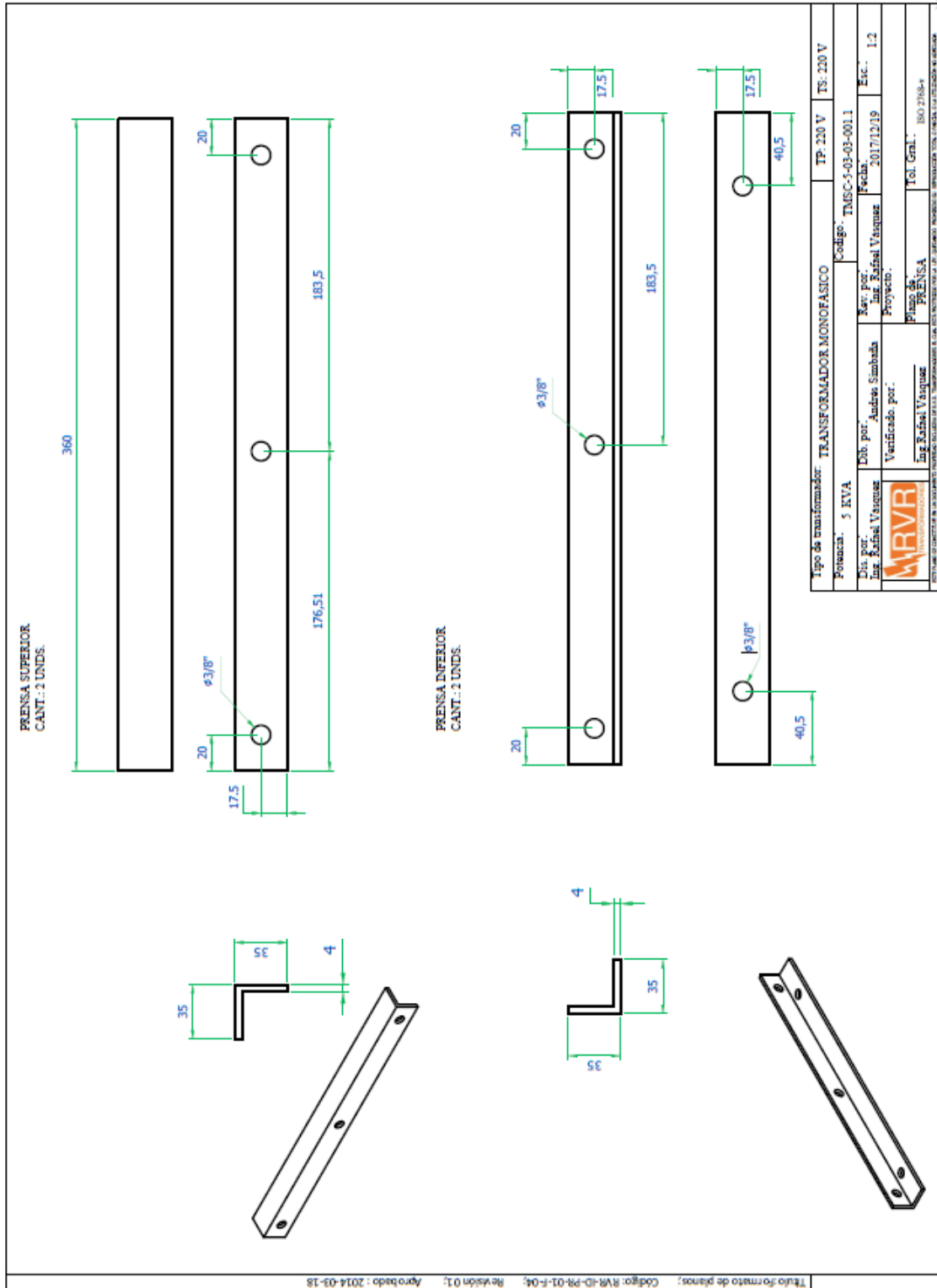
Tipo: <b>TRANSFORMADOR</b>	TP: 220 V	TS: 220 V
Potencia: <b>2,5 kVA</b>	Codigo: <b>MNS-2,5-03-03-001.1</b>	
Dis. por: <b>Ing. Rafael Vásquez</b>	Dib. por: <b>Andrés Simbaña</b>	Rev. por: <b>Ing. Rafael Vásquez</b>
Verificado por: <b>Ing. Rafael Vásquez</b>	Fecha: <b>2017/12/15</b>	Proyecto:
Plano de: <b>BOBINA</b>		Tol. Gral.: <b>Especificadas en el plano</b>

ESTE PLANO SE CONSTITUYE EN UN DOCUMENTO PROPIEDAD INTELECTUAL DE R.V.R. TRANSFORMADORES EL CUAL ESTÁ PROTEGIDO POR LA LEY, QUEDANDO PROHIBIDO SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL O LA UTILIZACIÓN NO ADECUADA


## ANEXO V. Plano mecánico del tanque o cuba del transformador con las características y dimensiones pertinentes para su construcción



## ANEXO VI. Plano mecánico de las prensas del transformador con las características y dimensiones pertinentes para su construcción




## ANEXO VII. Hoja de pruebas de operación realizadas a los transformadores en la planta industrial RVR transformadores

	Título: PRUEBAS EQUIPOS SECOS		
	Código: RVR-CC-PR-04-F-01	Revisión: 7	
	Aprobado: 2016-06-28	Página: 1 de 1	

Nº DE O.P.	NÚMERO DE REGISTRO: <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 80px; height: 20px;"></span>
POTENCIA: <u>2.5 KVA / 4.3 KVA</u>	Nº DE SERIE: _____
T. PRIMARIO: <u>220 V</u>	CLIENTE: _____
T. SECUNDARIO: <u>220 V</u>	FECHA INICIO PRUEBA: <u>08 DE ENERO DEL 2018</u>
CONEXIÓN: <u>V - V</u>	

Equipo Nuevo <input checked="" type="checkbox"/>	Mantenimiento <input type="checkbox"/>	Reparación <input type="checkbox"/>	Garantía <input type="checkbox"/>
Transformador <input checked="" type="checkbox"/>	Autótransformador <input type="checkbox"/>	Monofásico <input checked="" type="checkbox"/>	Trifásico <input type="checkbox"/>
Sin Caja <input type="checkbox"/>	Con Caja <input checked="" type="checkbox"/>	Tipo de Caja <span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 100px; height: 15px;"></span>	

3.-RESISTENCIAS ÓHMICAS				1.-RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN			
COD. Equipo: CCLAB 001		Tº <u>20</u>	COD. Equipo: CCLAB 028				
TERMINALES	VALORES	TAPS	FASE1	FASE2	FASE3		
Ho - Ho'	156.8 mΩ	V1= 231 V	1.0542				
Ho - E	67.2 mΩ	V2= 225.5V	1.0273				
E - Ho'	93.8 mΩ	V3= 220 V	1.0006				
		V4= 214.5 V	0.9938				
Xo - Xo'	176.3 mΩ	V5= 209 V	0.9470				
		V6=					
		V7=					
4.- PRUEBAS DE VACÍO				2.-RESISTENCIA DE AISLAMIENTO			
Tensión	<u>220 V</u>	Perd: <u>24.132 W</u>	Tº Equipo: <u>20 °</u>	AT-BT	AT-T	BT-T	
I1	I2	I3	COD. Eq :CCLAB 019	1383 6Ω	7288 6Ω	162,2 6Ω	
0.137 A	0.137 A	0.137 A	V. Prueba: 1000 V				

OBSERVACIONES			(únicamente) CONTROL DE CALIDAD	
			Documentación del equipo.	OK <input checked="" type="checkbox"/>
			Prensas pintadas correctamente.	<input checked="" type="checkbox"/>
			Marquillas de voltajes colocadas.	<input checked="" type="checkbox"/>
			Buen aspecto Físico.	<input checked="" type="checkbox"/>
			Pasa pruebas de Lab.	<input checked="" type="checkbox"/>
			Equipo completamente barnizado.	<input checked="" type="checkbox"/>
			Eq. Con placa o identificado.	<input checked="" type="checkbox"/>
			Diagrama de conexiones colocado (SI APLICA).	<input checked="" type="checkbox"/>
			Caja pintada e instalada (SI APLICA).	<input checked="" type="checkbox"/>
			Terminal de tierra instalado	<input checked="" type="checkbox"/>
			Peso total del equipo	kg
Prueba de Ensamblador	RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN			
	Fase1	Fase2	Fase3	
	1.0544			
	1.0273			
	1.0006			
	0.9738			
	0.9470			
Firma: 				
Nombre: <u>KLEBER JEN</u>				
Fecha: <u>8/01/2018</u>				

Pruebas eléctricas realizadas por:
Nombre y Firma
Personal de Laboratorio

APROBADO Y LIBERADO

Nombre y Firma (Control de Calidad)
FECHA: <u>2018-01-08</u>

## ANEXO VIII. Datos para la curva de histéresis

Ch1 Vr	Ch2 Vc
0,16	-0,032
0,16	-0,024
0,18	-0,008
0,18	-0,008
0,18	0
0,18	0,024
0,18	0,048
0,2	0,064
0,22	0,072
0,22	0,088
0,2	0,088
0,22	0,112
0,22	0,12
0,22	0,136
0,22	0,144
0,24	0,168
0,24	0,168
0,26	0,184
0,26	0,2
0,28	0,208
0,28	0,224
0,28	0,24
0,28	0,256
0,3	0,256
0,3	0,272
0,3	0,28
0,32	0,296
0,34	0,288
0,34	0,312
0,36	0,328
0,34	0,328
0,36	0,336
0,38	0,352
0,38	0,36
0,4	0,368
0,42	0,368
0,44	0,368
0,46	0,376
0,46	0,384

Ch1 Vr	Ch2 Vc
0,5	0,392
0,54	0,408
0,56	0,416
0,6	0,424
0,6	0,416
0,62	0,424
0,62	0,432
0,64	0,432
0,68	0,424
0,68	0,44
0,68	0,432
0,62	0,432
0,64	0,432
0,6	0,432
0,56	0,424
0,54	0,424
0,48	0,416
0,48	0,424
0,42	0,416
0,38	0,408
0,34	0,408
0,3	0,392
0,26	0,4
0,26	0,384
0,2	0,376
0,18	0,376
0,14	0,368
0,1	0,376
0,1	0,368
0,06	0,36
0,06	0,352
0,04	0,352
0,04	0,328
0	0,312
-0,02	0,32
-0,04	0,304
-0,06	0,296
-0,04	0,28
-0,08	0,28

Ch1 Vr	Ch2 Vc
-0,08	0,264
-0,08	0,256
-0,1	0,232
-0,1	0,224
-0,12	0,224
-0,12	0,208
-0,12	0,176
-0,14	0,168
-0,16	0,168
-0,16	0,152
-0,16	0,136
-0,16	0,136
-0,16	0,112
-0,16	0,104
-0,18	0,08
-0,18	0,072
-0,18	0,064
-0,18	0,048
-0,2	0,032
-0,2	0,016
-0,2	0,008
-0,2	-0,008
-0,22	-0,016
-0,22	-0,04
-0,2	-0,04
-0,22	-0,064
-0,22	-0,08
-0,22	-0,08
-0,22	-0,112
-0,26	-0,12
-0,26	-0,152
-0,26	-0,16
-0,28	-0,168
-0,28	-0,184
-0,28	-0,2
-0,3	-0,208
-0,28	-0,224
-0,3	-0,248
-0,3	-0,248

Ch1 Vr	Ch2 Vc
-0,32	-0,272
-0,32	-0,272
-0,34	-0,28
-0,34	-0,304
-0,36	-0,296
-0,38	-0,32
-0,38	-0,32
-0,36	-0,328
-0,4	-0,352
-0,4	-0,368
-0,44	-0,36
-0,42	-0,368
-0,46	-0,384
-0,46	-0,392
-0,5	-0,384
-0,52	-0,4
-0,58	-0,424
-0,58	-0,408
-0,6	-0,416
-0,64	-0,432
-0,64	-0,44
-0,68	-0,448
-0,68	-0,432
-0,64	-0,44
-0,66	-0,456
-0,66	-0,44
-0,64	-0,44
-0,62	-0,448
-0,58	-0,432
-0,54	-0,44
-0,52	-0,432
-0,48	-0,416
-0,46	-0,424
-0,42	-0,432
-0,36	-0,408
-0,34	-0,4
-0,28	-0,408
-0,24	-0,4
-0,2	-0,4



Ch1 Vr	Ch2 Vc
-0,2	-0,384
-0,16	-0,376
-0,16	-0,384
-0,14	-0,368
-0,1	-0,36
-0,08	-0,36
-0,08	-0,344
-0,06	-0,336
-0,04	-0,312
-0,02	-0,32
0	-0,304
0	-0,304
0,04	-0,288
0,04	-0,256
0,08	-0,264
0,06	-0,248
0,08	-0,24
0,06	-0,232
0,08	-0,208
0,12	-0,192
0,12	-0,184
0,12	-0,176
0,12	-0,16
0,12	-0,152
0,12	-0,136
0,14	-0,12
0,14	-0,112
0,14	-0,088
0,16	-0,08
0,14	-0,072
0,16	-0,064
0,16	-0,032
0,18	-0,032
0,16	-0,016
0,18	-0,008
0,18	0,008
0,18	0,024
0,18	0,024
0,2	0,048
0,18	0,056
0,22	0,064
0,22	0,072

Ch1 Vr	Ch2 Vc
0,22	0,112
0,22	0,112
0,22	0,128
0,24	0,136
0,24	0,144
0,24	0,152
0,26	0,168
0,24	0,192
0,26	0,2
0,26	0,216
0,28	0,224
0,3	0,24
0,28	0,248
0,3	0,256
0,32	0,272
0,32	0,28
0,32	0,288
0,32	0,288
0,34	0,304
0,36	0,32
0,36	0,336
0,36	0,344
0,38	0,344
0,42	0,352
0,4	0,36
0,42	0,368
0,44	0,376
0,46	0,384
0,48	0,392
0,5	0,392
0,54	0,408
0,52	0,408
0,56	0,408
0,58	0,416
0,6	0,424
0,62	0,416
0,58	0,416
0,66	0,432
0,66	0,432
0,64	0,432
0,68	0,432
0,66	0,432

Ch1 Vr	Ch2 Vc
0,68	0,432
0,64	0,416
0,64	0,424
0,62	0,44
0,58	0,416
0,54	0,44
0,52	0,416
0,48	0,432
0,44	0,408
0,44	0,408
0,38	0,408
0,32	0,408
0,28	0,384
0,26	0,4
0,22	0,384
0,2	0,384
0,18	0,368
0,14	0,368
0,14	0,368
0,1	0,36
0,06	0,352
0,04	0,352
0,02	0,336
0	0,328
0	0,32
0	0,312
-0,02	0,304
-0,04	0,28
-0,06	0,28
-0,08	0,28
-0,06	0,256
-0,08	0,256
-0,08	0,232
-0,12	0,224
-0,12	0,208
-0,12	0,2
-0,14	0,184
-0,12	0,176
-0,14	0,16
-0,14	0,152
-0,14	0,128
-0,16	0,104

Ch1 Vr	Ch2 Vc
-0,18	0,088
-0,18	0,088
-0,18	0,072
-0,2	0,064
-0,2	0,048
-0,2	0,04
-0,2	0,032
-0,2	0
-0,22	-0,008
-0,22	-0,008
-0,22	-0,024
-0,2	-0,032
-0,22	-0,056
-0,24	-0,072
-0,22	-0,088
-0,26	-0,104
-0,24	-0,112
-0,26	-0,136
-0,26	-0,152
-0,26	-0,16
-0,28	-0,168
-0,28	-0,176
-0,28	-0,208
-0,28	-0,224
-0,3	-0,24
-0,3	-0,24
-0,32	-0,248
-0,32	-0,264
-0,32	-0,28
-0,34	-0,28
-0,34	-0,296
-0,36	-0,312
-0,36	-0,32
-0,38	-0,328
-0,38	-0,336
-0,4	-0,344
-0,4	-0,344
-0,42	-0,36
-0,42	-0,368
-0,46	-0,384
-0,42	-0,384
-0,48	-0,384

Ch1 Vr	Ch2 Vc
-0,5	-0,4
-0,5	-0,4
-0,54	-0,416
-0,58	-0,424
-0,62	-0,416
-0,58	-0,416
-0,6	-0,424
-0,64	-0,44
-0,64	-0,424
-0,66	-0,44
-0,68	-0,432
-0,68	-0,448
-0,68	-0,44
-0,64	-0,44
-0,6	-0,44
-0,58	-0,44
-0,56	-0,44
-0,52	-0,432
-0,46	-0,44
-0,44	-0,424
-0,4	-0,416
-0,4	-0,416
-0,34	-0,408
-0,3	-0,408
-0,26	-0,408
-0,24	-0,408
-0,24	-0,392
-0,2	-0,384
-0,16	-0,384
-0,14	-0,368
-0,12	-0,36
-0,12	-0,352
-0,08	-0,36
-0,06	-0,344
-0,06	-0,344
-0,02	-0,32
-0,02	-0,304
0,02	-0,304
0,02	-0,296
0,04	-0,288
0,02	-0,264
0,06	-0,264
0,06	-0,248

Ch1 Vr	Ch2 Vc
0,06	-0,232
0,08	-0,232
0,1	-0,216
0,1	-0,216
0,1	-0,192
0,14	-0,184
0,12	-0,16
0,12	-0,144
0,12	-0,144
0,12	-0,128
0,14	-0,112
0,14	-0,104
0,16	-0,088
0,16	-0,088
0,14	-0,064
0,16	-0,048
0,16	-0,04
0,18	-0,016
0,16	0
0,18	0
0,18	0,032
0,18	0,04
0,2	0,064
0,2	0,064
0,2	0,08
0,22	0,104
0,2	0,104
0,22	0,112
0,22	0,128
0,24	0,136
0,24	0,16
0,24	0,168
0,26	0,168
0,26	0,192
0,28	0,2
0,26	0,208
0,26	0,224
0,28	0,24
0,28	0,248
0,3	0,264
0,32	0,288
0,34	0,288
0,32	0,296

Ch1 Vr	Ch2 Vc
0,32	0,304
0,34	0,32
0,36	0,328
0,38	0,352
0,36	0,344
0,4	0,352
0,4	0,352
0,4	0,36
0,44	0,376
0,46	0,384
0,5	0,384
0,46	0,4
0,54	0,392
0,56	0,4
0,56	0,416
0,6	0,416
0,6	0,416
0,6	0,416
0,6	0,408
0,64	0,416
0,64	0,416
0,66	0,416
0,68	0,44
0,66	0,432
0,66	0,432
0,66	0,432
0,66	0,432
0,62	0,432
0,6	0,44
0,58	0,416
0,54	0,416
0,5	0,416
0,46	0,408
0,42	0,408
0,4	0,4
0,36	0,408
0,34	0,408
0,28	0,392
0,26	0,376
0,24	0,392
0,2	0,384
0,18	0,376
0,16	0,368
0,12	0,368
0,1	0,368

Ch1 Vr	Ch2 Vc
0,08	0,36
0,04	0,344
0,02	0,344
0	0,336
0	0,328
0	0,304
-0,02	0,304
-0,04	0,296
-0,06	0,288
-0,08	0,264
-0,08	0,264
-0,08	0,256
-0,1	0,232
-0,1	0,216
-0,12	0,2
-0,14	0,2
-0,12	0,192
-0,14	0,176
-0,16	0,16
-0,16	0,152
-0,16	0,136
-0,16	0,128
-0,16	0,112
-0,16	0,096
-0,16	0,08
-0,18	0,08
-0,2	0,056
-0,18	0,048
-0,18	0,04
-0,2	0,024
-0,22	0
-0,2	0
-0,22	-0,016
-0,22	-0,024
-0,2	-0,048
-0,24	-0,056
-0,22	-0,072
-0,22	-0,08
-0,22	-0,096
-0,24	-0,104
-0,24	-0,12
-0,24	-0,12
-0,26	-0,152

Ch1 Vr	Ch2 Vc
-0,28	-0,16
-0,28	-0,176
-0,28	-0,192
-0,3	-0,208
-0,28	-0,216
-0,3	-0,224
-0,3	-0,224
-0,3	-0,256
-0,32	-0,256
-0,34	-0,264
-0,34	-0,272
-0,34	-0,296
-0,36	-0,304
-0,38	-0,304
-0,36	-0,328
-0,4	-0,336
-0,38	-0,352
-0,44	-0,368
-0,42	-0,368
-0,44	-0,376
-0,46	-0,376
-0,46	-0,384
-0,5	-0,4
-0,5	-0,4
-0,52	-0,392
-0,56	-0,416
-0,56	-0,424
-0,58	-0,416
-0,6	-0,416
-0,64	-0,432
-0,64	-0,432
-0,66	-0,448
-0,66	-0,448
-0,68	-0,448
-0,64	-0,448
-0,62	-0,44
-0,56	-0,432
-0,52	-0,432
-0,52	-0,416
-0,46	-0,432
-0,46	-0,424
-0,4	-0,424
-0,34	-0,408

Ch1 Vr	Ch2 Vc
-0,32	-0,408
-0,26	-0,4
-0,26	-0,408
-0,22	-0,384
-0,2	-0,384
-0,16	-0,384
-0,16	-0,376
-0,1	-0,36
-0,08	-0,352
-0,06	-0,344
-0,04	-0,328
-0,02	-0,328
0	-0,304
0	-0,312
0,02	-0,296
0,02	-0,28
0,06	-0,28
0,04	-0,256
0,04	-0,248
0,06	-0,248
0,08	-0,232
0,08	-0,208
0,1	-0,2
0,12	-0,192
0,12	-0,168
0,14	-0,16
0,12	-0,144
0,12	-0,128
0,14	-0,128
0,14	-0,104
0,16	-0,088
0,16	-0,088
0,18	-0,072
0,16	-0,048
0,18	-0,048
0,18	-0,032
0,18	-0,016
0,18	0
0,22	0
0,18	0,016
0,2	0,032
0,2	0,048
0,18	0,056

Ch1 Vr	Ch2 Vc
0,22	0,072
0,2	0,08
0,22	0,104
0,22	0,104
0,22	0,128
0,22	0,136
0,22	0,144
0,26	0,152
0,24	0,176
0,24	0,192
0,28	0,208
0,28	0,216
0,28	0,232
0,28	0,24
0,3	0,256
0,32	0,264
0,32	0,272
0,34	0,272
0,32	0,304
0,34	0,304
0,32	0,312
0,34	0,312
0,36	0,32
0,36	0,344
0,38	0,344
0,4	0,36
0,4	0,368
0,42	0,376
0,44	0,376
0,46	0,384
0,5	0,392
0,52	0,408
0,5	0,4
0,58	0,4
0,56	0,408
0,58	0,408
0,62	0,424
0,62	0,432
0,64	0,44
0,64	0,424
0,66	0,432
0,68	0,44
0,68	0,44

Ch1 Vr	Ch2 Vc
0,66	0,432
0,66	0,432
0,64	0,44
0,6	0,424
0,6	0,432
0,54	0,424
0,52	0,424
0,48	0,416
0,44	0,424
0,42	0,408
0,36	0,408
0,34	0,408
0,28	0,408
0,26	0,392
0,24	0,384
0,2	0,376
0,18	0,384
0,16	0,368
0,14	0,36
0,1	0,36
0,08	0,352
0,06	0,344
0,06	0,336
0,02	0,344
0,02	0,32
-0,02	0,312
-0,04	0,304
-0,02	0,288
-0,06	0,28
-0,06	0,264
-0,08	0,248
-0,08	0,248
-0,08	0,24
-0,1	0,24
-0,14	0,216
-0,12	0,192
-0,14	0,184
-0,14	0,176
-0,14	0,168
-0,16	0,144
-0,14	0,136
-0,16	0,128
-0,16	0,12

Ch1 Vr	Ch2 Vc
-0,16	0,096
-0,16	0,088
-0,18	0,072
-0,18	0,08
-0,2	0,056
-0,2	0,024
-0,2	0,024
-0,2	0,024
-0,22	-0,008
-0,2	-0,024
-0,2	-0,024
-0,2	-0,04
-0,24	-0,048
-0,22	-0,056
-0,22	-0,072
-0,22	-0,088
-0,24	-0,104
-0,26	-0,128
-0,26	-0,144
-0,26	-0,144
-0,26	-0,152
-0,26	-0,168
-0,28	-0,184
-0,28	-0,208
-0,28	-0,208
-0,32	-0,216
-0,28	-0,232
-0,3	-0,24
-0,32	-0,248
-0,34	-0,28
-0,34	-0,288
-0,34	-0,296
-0,34	-0,288
-0,38	-0,312
-0,38	-0,32
-0,38	-0,328
-0,4	-0,344
-0,4	-0,344
-0,4	-0,352
-0,42	-0,368
-0,44	-0,368
-0,46	-0,384
-0,5	-0,384

Ch1 Vr	Ch2 Vc
-0,5	-0,4
-0,54	-0,408
-0,52	-0,408
-0,58	-0,416
-0,58	-0,424
-0,6	-0,416
-0,62	-0,424
-0,64	-0,432
-0,66	-0,44
-0,68	-0,448
-0,68	-0,448
-0,66	-0,44
-0,62	-0,44
-0,58	-0,432
-0,58	-0,44
-0,54	-0,44
-0,5	-0,432
-0,48	-0,416
-0,44	-0,424
-0,4	-0,408
-0,38	-0,424
-0,34	-0,408
-0,28	-0,408
-0,26	-0,4
-0,22	-0,384
-0,2	-0,392
-0,18	-0,376
-0,14	-0,376
-0,12	-0,36
-0,1	-0,352
-0,08	-0,352
-0,08	-0,336
-0,06	-0,328
-0,02	-0,32
0	-0,312
-0,02	-0,304
0,04	-0,296
0,04	-0,296
0,04	-0,264
0,06	-0,256
0,08	-0,24
0,06	-0,232
0,08	-0,216

Ch1 Vr	Ch2 Vc
0,1	-0,208
0,1	-0,184
0,12	-0,176
0,1	-0,168
0,12	-0,16
0,1	-0,136
0,14	-0,128
0,14	-0,12
0,14	-0,104
0,16	-0,08
0,16	-0,072
0,16	-0,064
0,16	-0,056
0,16	-0,04
0,18	-0,024
0,16	-0,016
0,18	0
0,2	0,008
0,18	0,024
0,2	0,056
0,18	0,048
0,2	0,064
0,22	0,08
0,22	0,096
0,22	0,12
0,24	0,128
0,22	0,128
0,22	0,144
0,26	0,152
0,26	0,176
0,24	0,192
0,26	0,2
0,26	0,216
0,26	0,216
0,28	0,232
0,28	0,256
0,3	0,264
0,32	0,264
0,3	0,296
0,34	0,288
0,34	0,304
0,34	0,32
0,36	0,336

Ch1 Vr	Ch2 Vc
0,34	0,336
0,4	0,344
0,36	0,352
0,42	0,368
0,4	0,36
0,44	0,376
0,46	0,376
0,46	0,392
0,48	0,392
0,5	0,392
0,54	0,392
0,58	0,408
0,58	0,408
0,56	0,416
0,6	0,424
0,62	0,432
0,62	0,432
0,66	0,432
0,68	0,432
0,68	0,432
0,68	0,432
0,66	0,432
0,66	0,432
0,64	0,432
0,6	0,44
0,6	0,424
0,54	0,424
0,5	0,432
0,46	0,416
0,44	0,416
0,4	0,408
0,36	0,408
0,34	0,4
0,28	0,4
0,26	0,4
0,24	0,392
0,2	0,376
0,18	0,376
0,18	0,376
0,12	0,368
0,1	0,368
0,08	0,352
0,06	0,352

Ch1 Vr	Ch2 Vc
0,04	0,336
0,02	0,336
0	0,328
0	0,312
-0,02	0,312
-0,04	0,296
-0,06	0,288
-0,06	0,28
-0,08	0,264
-0,08	0,256
-0,08	0,248
-0,1	0,224
-0,12	0,208
-0,14	0,2
-0,12	0,2
-0,14	0,184
-0,14	0,168
-0,16	0,168
-0,14	0,136
-0,14	0,128
-0,18	0,112
-0,18	0,112
-0,16	0,08
-0,16	0,08
-0,18	0,064
-0,18	0,04
-0,2	0,048
-0,22	0,016
-0,2	0,008
-0,2	0
-0,22	-0,016
-0,2	-0,032
-0,2	-0,048
-0,24	-0,072
-0,22	-0,08
-0,24	-0,08
-0,24	-0,096
-0,24	-0,12
-0,26	-0,136
-0,24	-0,128
-0,26	-0,152
-0,26	-0,152
-0,26	-0,168

Ch1 Vr	Ch2 Vc
-0,28	-0,192
-0,28	-0,2
-0,3	-0,208
-0,3	-0,232
-0,32	-0,232
-0,32	-0,248
-0,32	-0,256
-0,32	-0,256
-0,34	-0,288
-0,36	-0,296
-0,36	-0,304
-0,36	-0,304
-0,38	-0,328
-0,38	-0,32
-0,38	-0,344
-0,38	-0,352
-0,4	-0,36
-0,42	-0,36
-0,46	-0,368
-0,44	-0,376
-0,46	-0,392
-0,5	-0,392
-0,52	-0,4
-0,52	-0,416
-0,56	-0,408
-0,56	-0,408
-0,54	-0,408
-0,6	-0,416
-0,62	-0,424
-0,62	-0,424
-0,64	-0,44
-0,66	-0,44
-0,68	-0,432
-0,68	-0,44
-0,68	-0,44
-0,68	-0,44
-0,64	-0,44
-0,6	-0,432
-0,56	-0,44
-0,54	-0,424
-0,5	-0,432
-0,48	-0,432
-0,44	-0,424

Ch1 Vr	Ch2 Vc
-0,38	-0,408
-0,36	-0,416
-0,28	-0,4
-0,26	-0,4
-0,2	-0,392
-0,2	-0,392
-0,16	-0,376
-0,14	-0,368
-0,12	-0,368
-0,08	-0,344
-0,08	-0,344
-0,04	-0,328
-0,04	-0,328
-0,04	-0,328
-0,04	-0,328
-0,02	-0,304
0	-0,296
0,02	-0,288
0,04	-0,272
0,06	-0,264
0,08	-0,24
0,08	-0,232
0,1	-0,224
0,1	-0,216
0,1	-0,2
0,1	-0,2
0,1	-0,176
0,12	-0,152
0,12	-0,144
0,14	-0,136
0,14	-0,12
0,14	-0,104
0,14	-0,104
0,14	-0,088
0,16	-0,08
0,16	-0,056
0,16	-0,04
0,18	-0,032
0,18	-0,008
0,18	-0,008
0,16	0
0,16	0,008
0,18	0,04
0,2	0,04

Ch1 Vr	Ch2 Vc
0,18	0,064
0,2	0,072
0,2	0,08
0,2	0,088
0,22	0,104
0,22	0,112
0,22	0,144
0,22	0,136
0,24	0,152
0,24	0,168
0,24	0,184
0,26	0,192
0,26	0,2
0,26	0,216
0,26	0,232
0,3	0,248
0,3	0,248
0,3	0,264
0,32	0,28
0,32	0,288
0,34	0,304
0,34	0,304
0,34	0,32
0,36	0,32
0,36	0,344
0,38	0,344
0,38	0,352
0,4	0,36
0,42	0,376
0,42	0,376
0,46	0,384
0,48	0,384
0,48	0,376
0,5	0,4
0,54	0,416
0,56	0,408
0,58	0,408
0,6	0,408
0,62	0,424
0,6	0,408
0,68	0,432
0,6	0,44
0,66	0,432

Ch1 Vr	Ch2 Vc
0,68	0,432
0,68	0,44
0,68	0,432
0,64	0,44
0,6	0,432
0,58	0,432
0,54	0,416
0,5	0,408
0,48	0,424
0,42	0,416
0,4	0,416
0,34	0,408
0,32	0,4
0,28	0,392
0,28	0,408
0,24	0,4
0,2	0,376
0,18	0,376
0,14	0,368
0,14	0,368
0,1	0,352
0,08	0,352
0,08	0,344
0,04	0,336
0,02	0,336
0	0,312
-0,02	0,304
-0,04	0,296
-0,06	0,288
-0,06	0,288
-0,08	0,264
-0,08	0,264
-0,1	0,256
-0,1	0,232
-0,14	0,224
-0,12	0,216
-0,12	0,2
-0,14	0,184
-0,12	0,16
-0,16	0,16
-0,14	0,144
-0,16	0,136
-0,16	0,12

Ch1 Vr	Ch2 Vc
-0,18	0,104
-0,16	0,088
-0,18	0,072
-0,18	0,064
-0,2	0,032
-0,2	0,016
-0,2	0
-0,22	0
-0,22	-0,016
-0,22	-0,04
-0,22	-0,056
-0,2	-0,064
-0,22	-0,08
-0,24	-0,096
-0,24	-0,112
-0,24	-0,12
-0,24	-0,144
-0,26	-0,152
-0,24	-0,152
-0,28	-0,176
-0,28	-0,184
-0,28	-0,192
-0,28	-0,216
-0,28	-0,216
-0,32	-0,232
-0,32	-0,248
-0,32	-0,264
-0,34	-0,264
-0,34	-0,296
-0,34	-0,296
-0,36	-0,296
-0,36	-0,304
-0,38	-0,312
-0,38	-0,312
-0,4	-0,344
-0,44	-0,36
-0,38	-0,36
-0,4	-0,36
-0,46	-0,376
-0,46	-0,384
-0,46	-0,392
-0,48	-0,392
-0,5	-0,4

Ch1 Vr	Ch2 Vc
-0,52	-0,408
-0,54	-0,4
-0,56	-0,416
-0,58	-0,416
-0,6	-0,424
-0,62	-0,424
-0,64	-0,424
-0,64	-0,432
-0,66	-0,44
-0,68	-0,44
-0,66	-0,448
-0,66	-0,44
-0,6	-0,44
-0,56	-0,432
-0,54	-0,44
-0,48	-0,432
-0,44	-0,432
-0,42	-0,424
-0,36	-0,416
-0,34	-0,408
-0,28	-0,416
-0,26	-0,4
-0,26	-0,392
-0,22	-0,4
-0,18	-0,384
-0,16	-0,376
-0,14	-0,376
-0,12	-0,36
-0,1	-0,36
-0,08	-0,344
-0,06	-0,328
-0,04	-0,328
-0,02	-0,328
-0,02	-0,32
0	-0,296
0,02	-0,288
0,02	-0,288
0,06	-0,256
0,04	-0,256
0,08	-0,232
0,06	-0,232
0,08	-0,216
0,1	-0,208

Ch1 Vr	Ch2 Vc
0,1	-0,2
0,1	-0,184
0,12	-0,168
0,12	-0,152
0,14	-0,152
0,12	-0,144
0,16	-0,112
0,14	-0,112
0,14	-0,088
0,16	-0,072
0,16	-0,064
0,16	-0,048
0,16	-0,048

## **ANEXO IX. Software para el Diseño de Transformadores Monofásicos Tipo Seco**

La presente sección muestra el software para el diseño de transformadores monofásicos del tipo seco, el software es una adaptación en base al trabajo de diseño y construcción de un transformador trifásico para control de voltaje en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia [22]. Mediante la plataforma computacional Matlab y su interfaz Guide, se adapta para diseñar transformadores monofásicos del tipo seco que permita comparar el proceso de diseño y cálculos de los transformadores.

El software está diseñado para que el usuario ingrese los datos o características del transformador, como:

- Potencia nominal del transformador en kVA
- Voltaje del primario en kV
- Voltaje del secundario en kV
- Taps en el primario
- Dimensiones del núcleo en cm

Además, al seleccionar la disponibilidad de taps en el primario se debe ingresar el rango de la variación de los taps y el tamaño del paso. De igual forma se puede obtener las dimensiones del núcleo de la forma convencional o dando las dimensiones del núcleo cuando se disponga.

Los resultados finales del diseño del transformador se despliegan en diferentes ventanas con los resultados de cada sección del transformador, como:

- Resultados del núcleo
- Resultados de las bobinas
- Resultados de los taps
- Circuito equivalente

### **Restricciones del diseño en el software**

El programa se encuentra elaborado bajo las siguientes restricciones de diseño de transformadores monofásicos tipo seco, como:

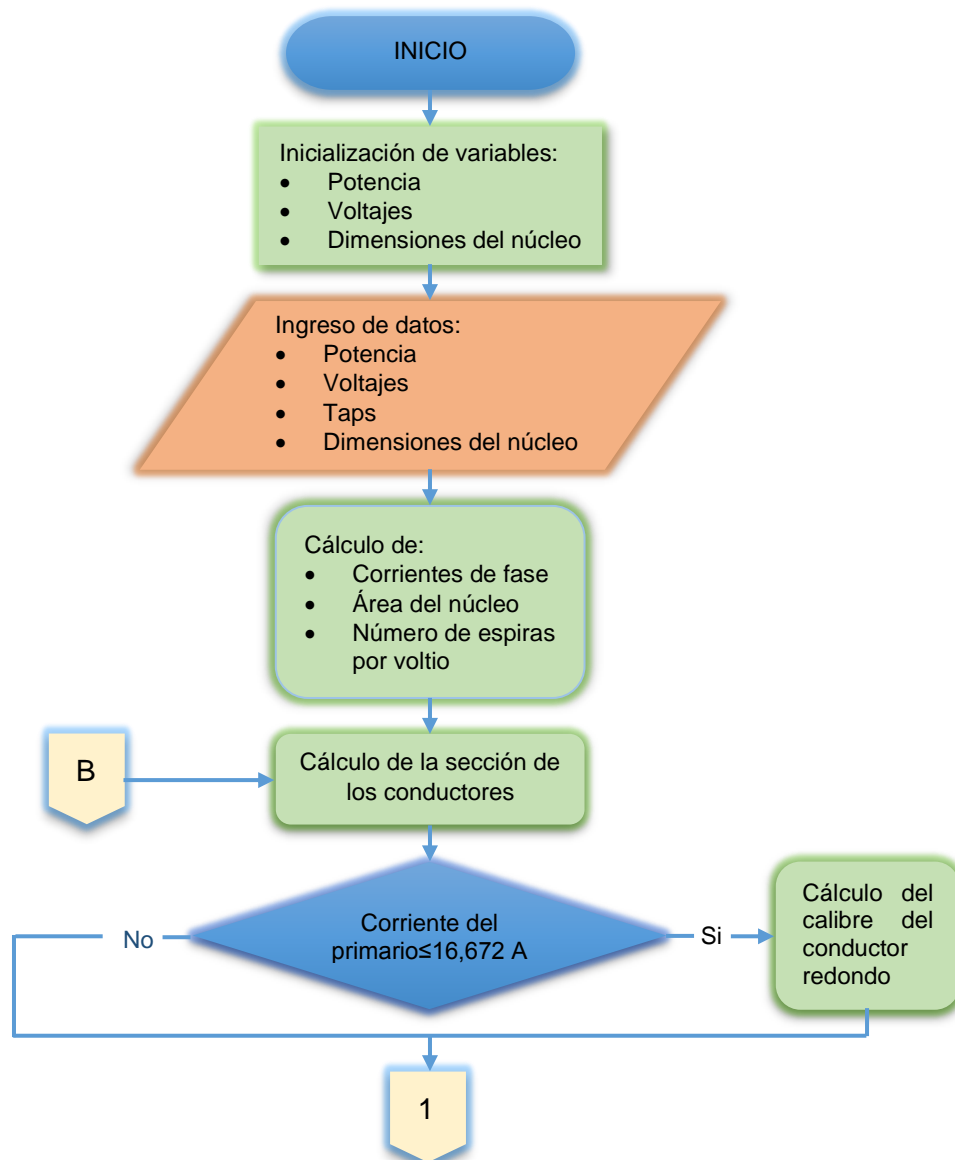
La potencia se establece desde 0,5 kVA hasta 15 kVA, el motivo de restringir la potencia es que en casos de transformadores de grandes potencias y bajos voltajes se requiere de un conductor de mayor sección y mayor enfriamiento en transformadores de tipo seco [22].

El máximo voltaje debe ser de 15 kV, por ser transformadores monofásicos del tipo seco. Si los voltajes fueran mayores se diseña para transformadores sumergidos en aceite por la necesidad de enfriamiento y aislamiento mayores [22].

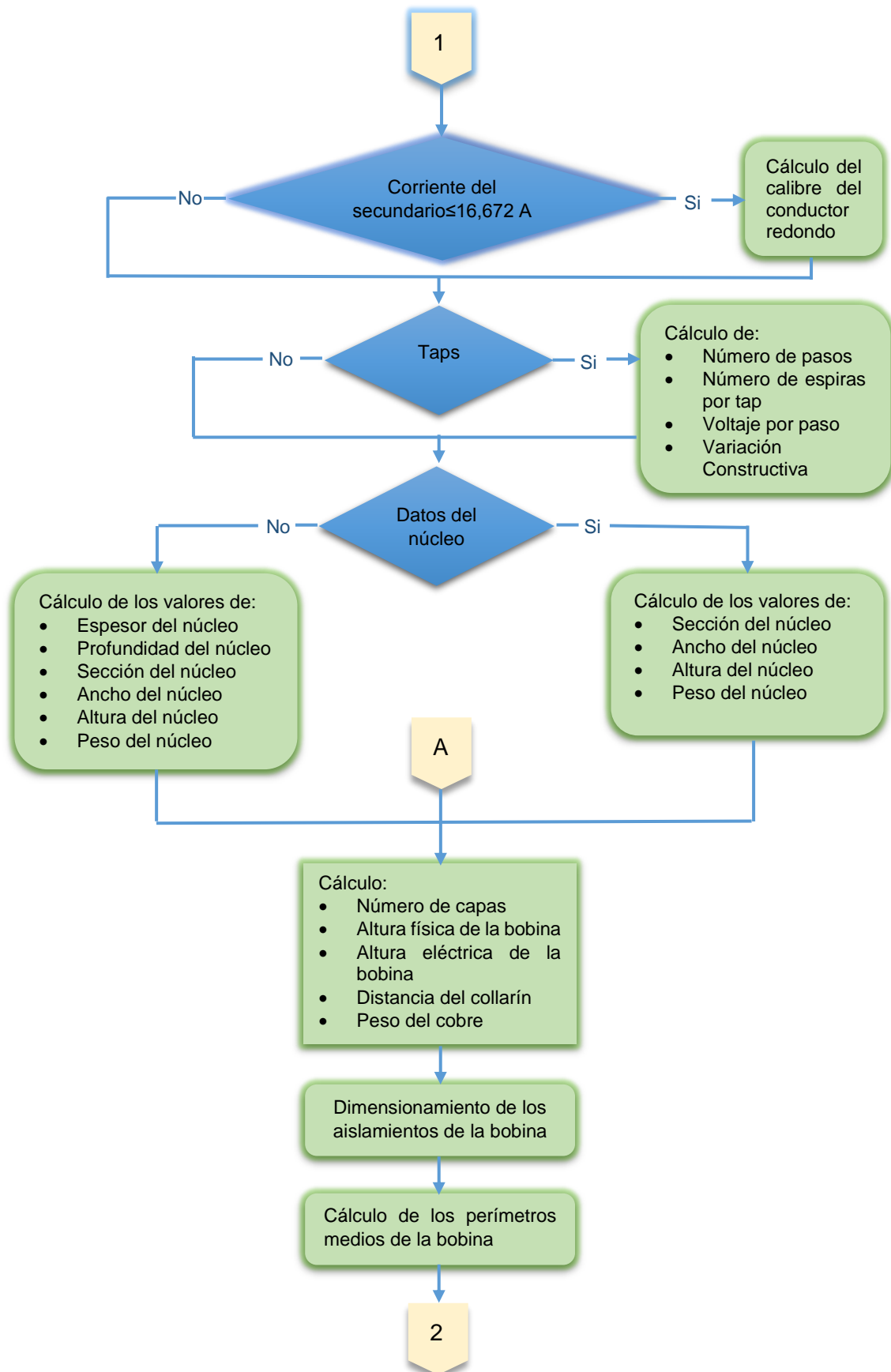
En cambio, el mínimo voltaje debe ser de 208 V, ya que en caso de tener la máxima potencia de 15 kVA la corriente obtenida es grande, para lo cual se necesita un conductor de mayor sección.

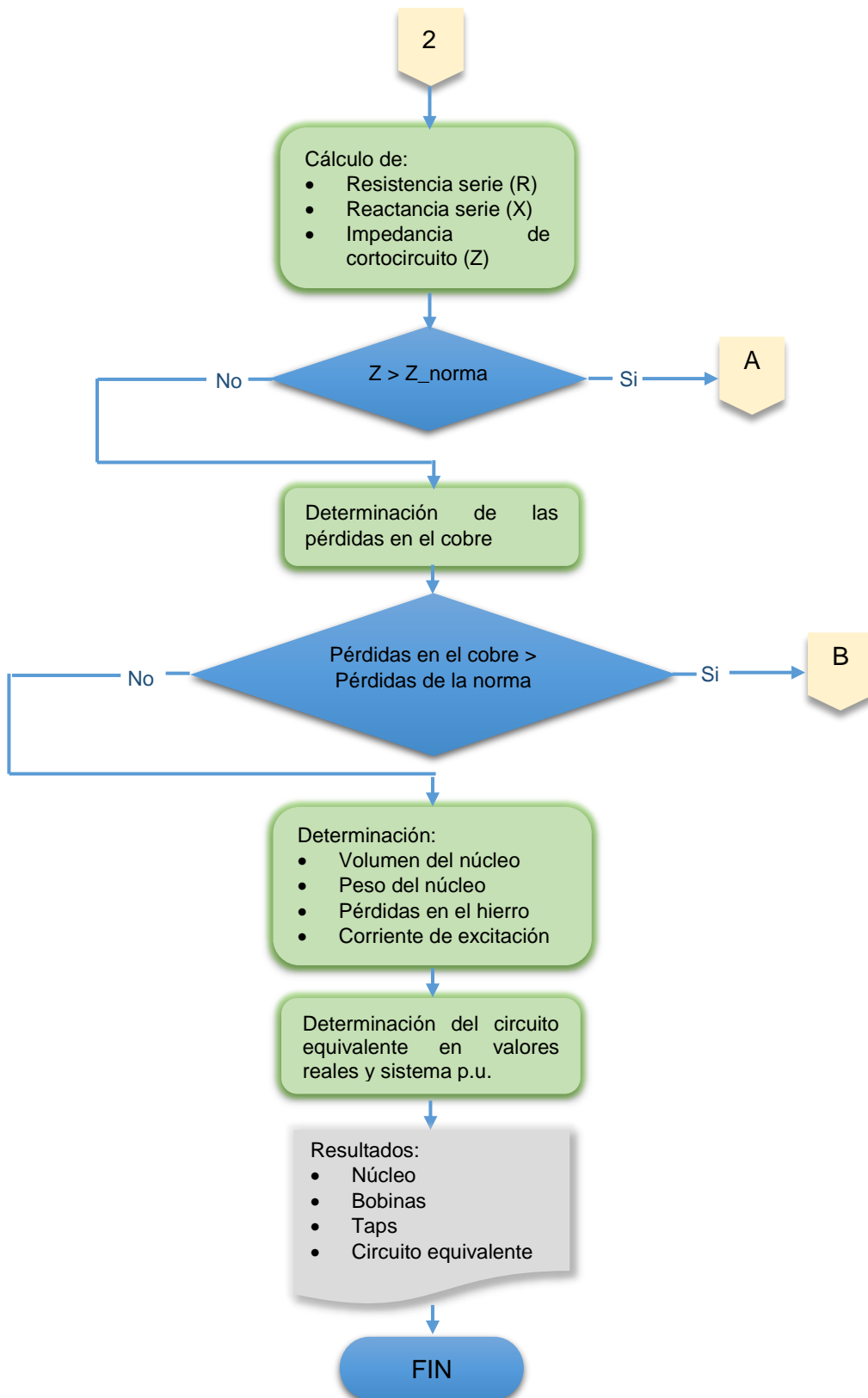
### Diagrama de bloques del diseño del programa

En la Figura A9.1 se indica la estructura de los bloques que permite el desarrollo del diseño de transformadores monofásicos tipo seco.









**Figura A9.1.** Diagrama de bloques del programa de diseño de transformadores monofásicos [22]

## Resultados del diseño del programa

A continuación, el programa despliega una serie de ventanas con los diferentes procesos del diseño de transformadores monofásicos tipo seco, el cual indica los parámetros a ingresar, las restricciones que debe cumplir y los resultados finales.

En la Figura A9.2 se muestra la presentación inicial del programa de diseño de transformadores monofásicos.



**Figura A9.2.** Presentación inicial del programa

Al seleccionar la opción de análisis, se despliega la ventana de parámetros, en la cual se debe ingresar los valores de los datos, como se muestra en la Figura A9.3.

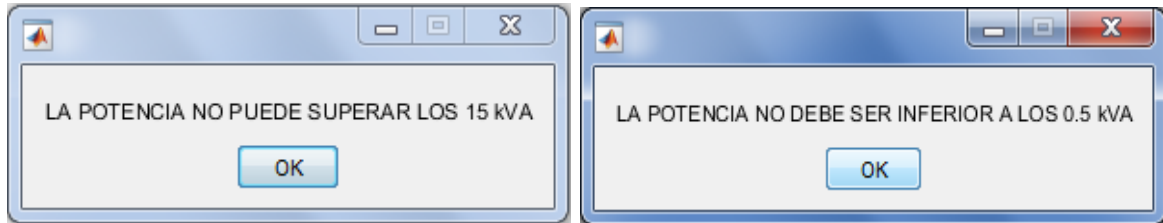
Datos que solicita el programa:

- Potencia
- Voltaje
- Taps
- Dimensiones del núcleo

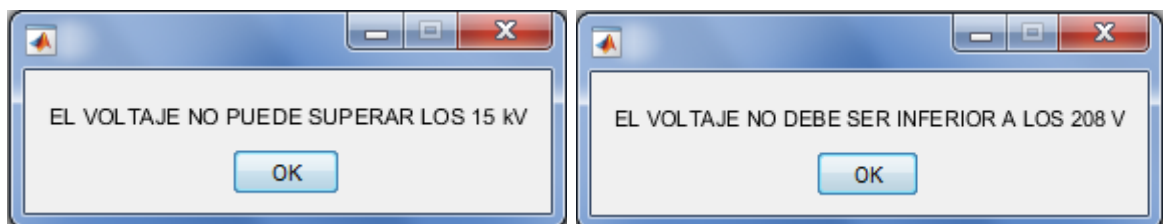
Si los valores ingresados se encuentran dentro de los parámetros límites se presiona el botón CONTINUAR para seguir con el proceso de diseño

**Figura A9.3.** Ingreso de los datos para el diseño

Si los datos ingresados en la ventana de parámetros no cumplen con las restricciones del programa, se despliegan ventanas de avisos que solicita el ingreso de los datos o valores correctos, Figuras A9.4 y A9.5.



**Figura A9.4.** Avisos de los límites de potencia que debe cumplir el diseño



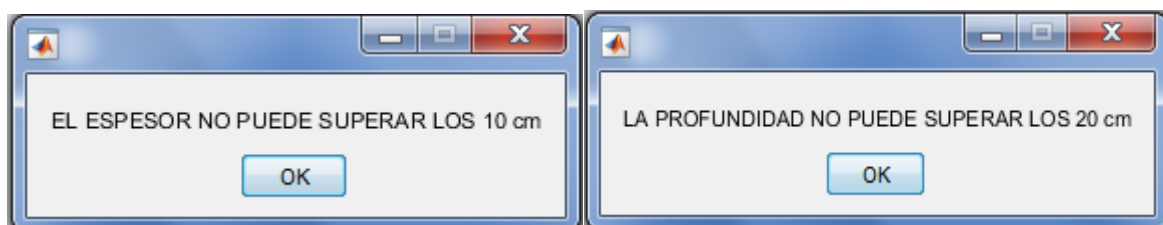
**Figura A9.5.** Avisos de los límites de voltaje que debe cumplir el diseño

En cambio, si al ingresar los valores del rango y tamaño del paso de los taps, el programa despliega una señal con el mensaje que se muestra en la Figura A9.6.



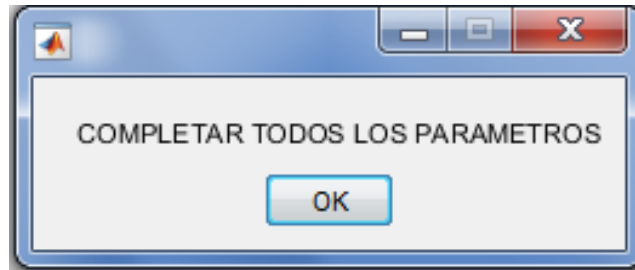
**Figura A9.6.** Avisos de los límites del rango y paso

Para los campos de que si se dispone de las dimensiones del núcleo los mensajes que despliega el programa se muestra en la Figura A9.7.



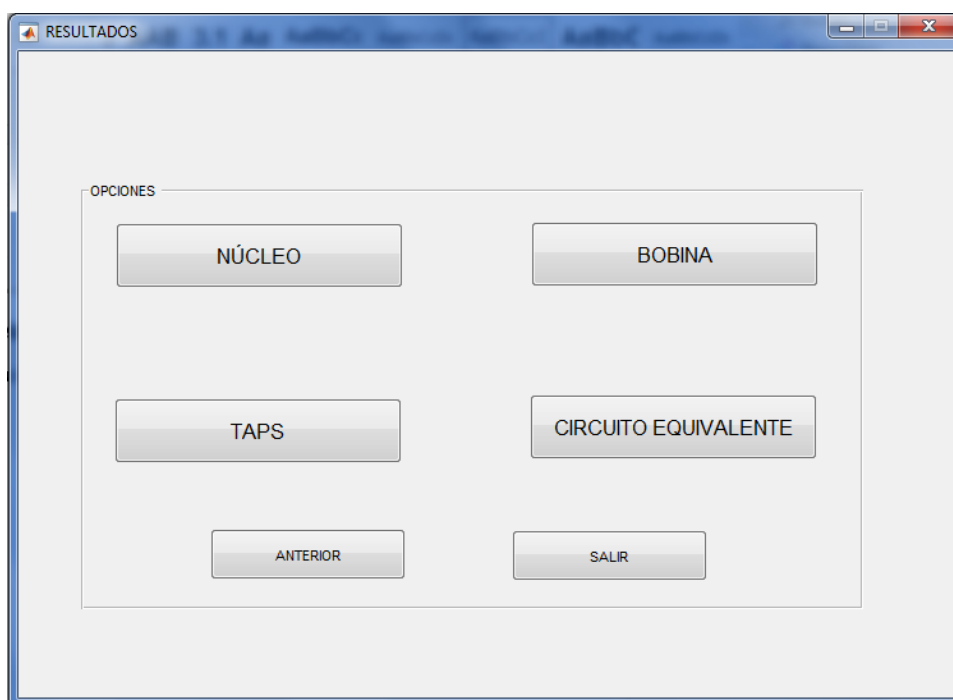
**Figura A9.7.** Avisos de los límites del espesor y profundidad del núcleo

Además, si no se llenan todos los campos que solicita el interfaz, se despliega una ventana con el mensaje de completar todos los parámetros, por lo que se muestra esta condición en la Figura A9.8.



**Figura A9.8.** Campos incompletos

Completado los valores de los parámetros solicitados dentro de los campos de la interfaz del programa, se efectúan los respectivos cálculos para el diseño correspondiente y se despliega la ventana con la sección de los resultados del diseño de los parámetros como se indica en la Figura A9.9.



**Figura A9.9.** Menú de resultados

Seleccionada la opción de núcleo, se obtienen sus resultados, como se muestra en la Figura A9.10.

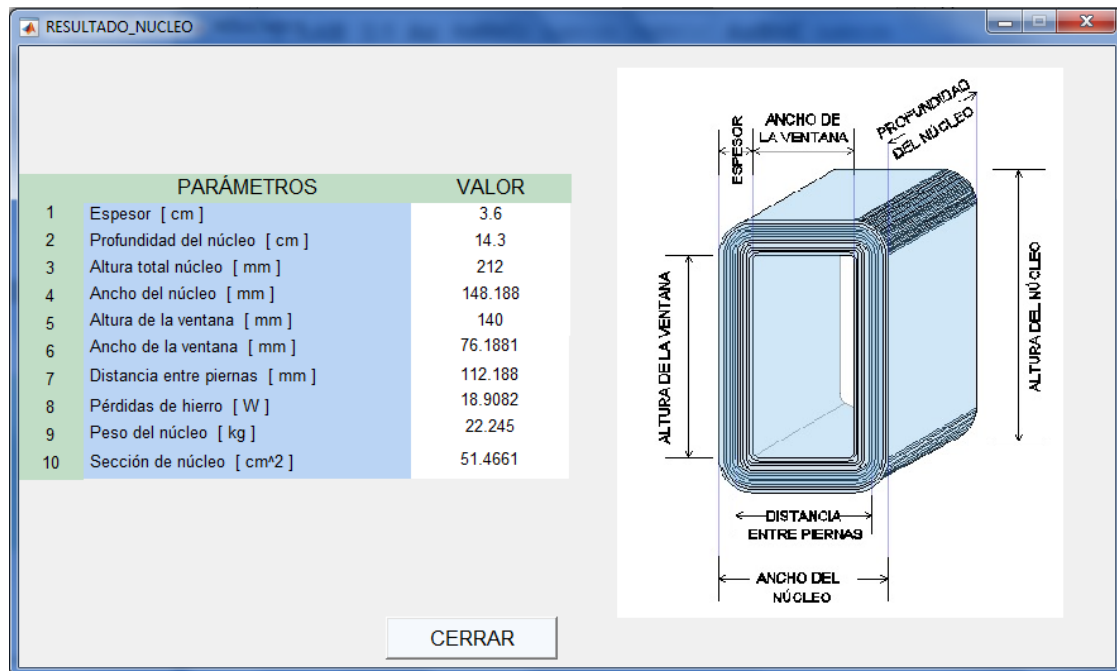


Figura A9.10. Resultados del núcleo

Seleccionada la opción de bobina se obtienen sus resultados, como se muestra en la Figura A9.11.

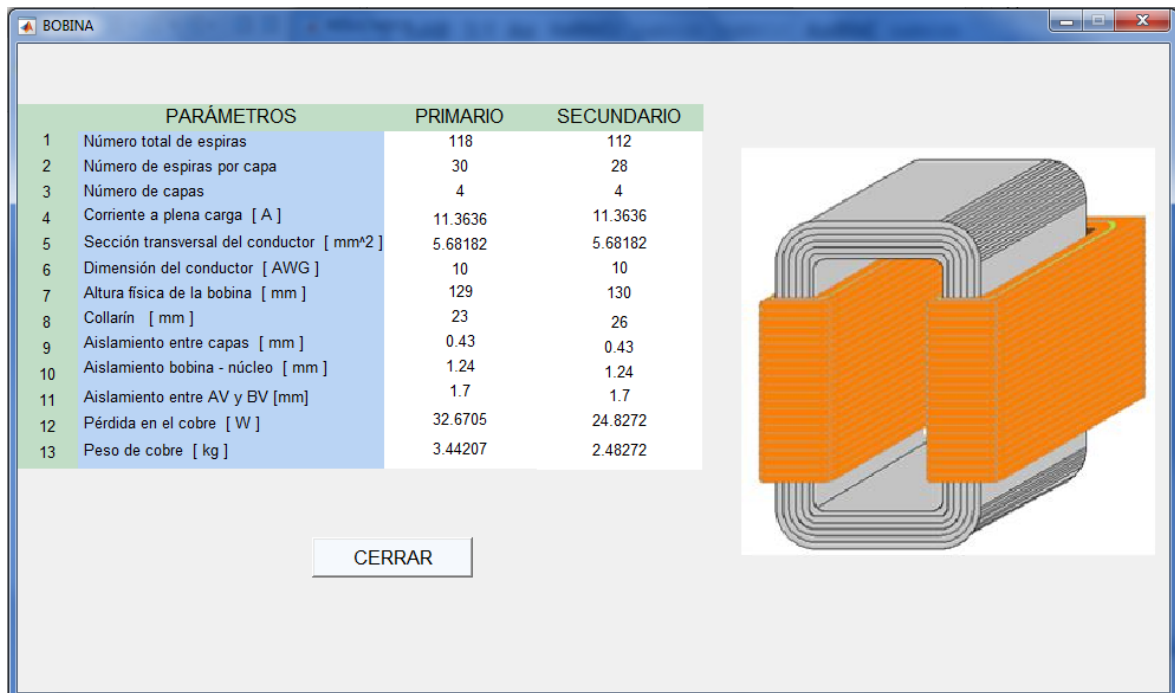


Figura A9.11. Resultados de las bobinas

Si se selecciona la opción de taps se obtienen sus resultados, como se muestra en la Figura A9.12.

Posición del Tap	Número de espiras	Relación de trans. teórico	Relación de trans. real	Voltaje primario teórico [ V ]	Voltaje primario real [ V ]	Variación constructiva [ % ]
1	106	0.950625	0.946429	209.137	208.214	-0.441439
2	109	0.975	0.973214	214.5	214.107	-0.18315
3	112	1	1	220	220	0
4	115	1.025	1.02679	225.5	225.893	0.174216
5	118	1.05062	1.05357	231.137	231.786	0.280445

SALIR

**Figura A9.12.** Resultados de los taps

Si se selecciona la opción de circuito equivalente, se obtienen sus resultados referidos al primario, como se muestra en la Figura A9.13.

$$\begin{array}{c}
 R1 \quad jX \quad a^2 R2 \\
 \text{---} \text{---} \text{---} \\
 + \quad \quad \quad + \\
 Vp \quad \quad \quad aVs \\
 - \quad \quad \quad - \\
 \quad \quad \quad \begin{array}{c} Gc/a^2 \\ \text{---} \\ -jBm/a^2 \end{array}
 \end{array}$$

PARÁMETROS	Valor real [ ohm ] [ A ] [ W ]	Valor [ p.u. ]
1 Resistencia del primario [ R1 ]	0.253	0.0130682
2 Resistencia del secundario [ R2 ]	0.192262	0.00993089
3 Resistencia serie [ Rserie ]	0.445262	0.0229991
4 Resistencia de pérdidas en el núcleo [ Rc ]	2559.73	132.218
5 Reactancia serie [ X ]	0.331409	0.0171182
6 Reactancia de magnetización [ Xm ]	3116.2	160.961
7 Impedancia de cortocircuito [ Z ]	0.555058	0.0286704
8 Conductancia en paralelo [ Gc ]	0.000390666	0.00756329
9 Susceptancia en paralelo [ Bm ]	0.000320903	0.00621269
10 Corriente de pérdidas [ Ic ]	0.0859465	0.00756329
11 Corriente de magnetización [ Im ]	0.0705987	0.00621269
12 Corriente de excitación [ Io ]	0.111225	0.00978779
13 Pérdidas en el cobre [ Wcu ]	57.4977	0.0229991
14 Pérdidas en el hierro [ WFe ]	18.9082	0.00756329

CERRAR

**Figura A9.13.** Resultados del circuito equivalente.

# ORDEN DE EMPASTADO



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**"CAMPUS POLITÉCNICO JOSÉ RUBÉN ORELLANA RICAURTE"**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

## ORDEN DE EMPASTADO

*De acuerdo con lo estipulado en el Art. 27 del Instructivo para la Implementación de la Unidad de Titulación en las Carreras y Programas Vigentes de la Escuela Politécnica Nacional, aprobado por Consejo Politécnico en sesión extraordinaria del 29 de abril de 2015 y por delegación del Decano, una vez verificado el cumplimiento de formato de presentación establecido, se autoriza la impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación presentado por:*

**KLEBER HERNÁN IZA IZA**

*Fecha de autorización: 5 de diciembre de 2018*



Paola P