

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

**CONSTRUCCIÓN DE UN AUTOTRANSFORMADOR TRIFÁSICO
CON VOLTAJE DE SALIDA VARIABLE**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN
ELECTROMECAÁNICA**

EDWIN RAFAEL VILLACÍS CARPIO

edwin.villacis02@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. ABRAHAM ISMAEL LOJA ROMERO MSC.

abraham.loja@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. CARLOS ORLANDO ROMO HERRERA MSC.

carlos.romo@epn.edu.ec

Quito, enero 2021

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo Edwin Rafael Villacís Carpio, 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.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación -COESC-, soy titular de la obra en mención y otorgo una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional. Entregaré toda la información técnica pertinente. En el caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.



Edwin Rafael Villacís Carpio

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Edwin Rafael Villacís Carpio, bajo nuestra supervisión.

Ing. Loja Romero Abraham Ismael MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Carlos Orlando Romo Herrera MSc.

CODIRECTOR DEL PROYECTO

DEDICATORIA

El presente trabajo de grado va dedicado a Dios, quien como guía está presente en el caminar de mi vida, bendiciéndome y dándome fuerzas para continuar con mis metas trazadas sin desfallecer.

A mis padres Carmen y Néstor, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ellos he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy, son los mejores padres.

A mi hija Bianca, que es mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme día a día.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que este trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Edwin Villacís

AGRADECIMIENTO

Al finalizar este trabajo quiero utilizar este espacio para agradecer a Dios por todas sus bendiciones.

A mis Padres que han sabido darme su ejemplo de trabajo y honradez.

Al ingeniero Juan Ramírez, quien aportó con ideas y sugerencias fundamentales durante todas las etapas de desarrollo en este proyecto.

A mi tutor Ingeniero Abraham Loja, por su apoyo y paciencia a lo largo de todo el proceso de construcción.

Al ingeniero Carlos Romo, por su indispensable colaboración y seguimiento en todas las etapas de este trabajo.

Edwin Villacís

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Planteamiento del problema	1
1.2	Justificación	2
1.3	Objetivos	2
1.4	Conceptos generales.....	3
	Autotransformador	3
	Principio de funcionamiento del autotransformador.....	3
	Partes del autotransformador	4
	Autotransformador trifásico	6
	Conexiones de autotransformadores trifásicos	7
	Pruebas eléctricas en transformadores	9
2	METODOLOGÍA	12
2.1	Descripción de la metodología utilizada	12
2.2	Técnicas e instrumentos utilizados en la construcción	12
3	EJECUCIÓN Y RESULTADOS.....	15
3.1	Requerimientos de componentes para el autotransformador....	15
	Características eléctricas	15
	Dimensiones físicas del núcleo	16
	Cálculos de los elementos eléctricos.....	18
3.2	Estructuras del autotransformador	26
	Estructura metálica.....	26
	Núcleo y devanados	28
	Sistema de conexión variable.....	28
	Diagramas eléctricos de conexión.....	29
	Componentes del autotransformador	31

3.3	Instalación de los componentes	32
	Armado del núcleo.....	32
	Bobinado del núcleo	32
	Instalación de cableado y borneras	36
	Instalación de los contactos móviles del autotransformador	37
3.4	Pruebas de funcionamiento.....	40
	Pruebas eléctricas	40
	Pruebas funcionales	48
3.5	Adecuación final del autotransformador	49
3.6	Manual de mantenimiento	50
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
4.1	Conclusiones.....	52
4.2	Recomendaciones.....	54
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
	ANEXOS.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1	CIRCUITO DE UN AUTOTRANSFORMADOR	3
FIGURA 1.2	NÚCLEO ACORAZADO.....	4
FIGURA 1.3	NÚCLEO DE COLUMNAS	5
FIGURA 1.4	AUTOTRANSFORMADOR TRIFÁSICO.....	6
FIGURA 1.5	CONEXIÓN EN ESTRELLA DEL AUTOTRANSFORMADOR	7
FIGURA 1.6	CONEXIÓN EN TRIÁNGULO DEL AUTOTRANSFORMADOR	8
FIGURA 1.7	CONEXIÓN EN TRIÁNGULO PROLONGADO DEL AUTOTRANSFORMADOR.....	8
FIGURA 1.8	CONEXIÓN EN TRIÁNGULO ABIERTO DEL AUTOTRANSFORMADOR ...	9
FIGURA 1.9	PRUEBA DE VACÍO	9
FIGURA 1.10	PRUEBA DE CORTOCIRCUITO	11

FIGURA 2.1 METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL AUTOTRANSFORMADOR.....	14
FIGURA 3.1 DIMENSIONES PRINCIPALES DEL NÚCLEO APILADO	16
FIGURA 3.2 SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA COLUMNA DEL NÚCLEO TRIFÁSICO	18
FIGURA 3.3 VOLTAJES Y CORRIENTES EN LOS DEVANADOS	18
FIGURA 3.4 DIMENSIONES DE ALTURA DE LA BOBINA	25
FIGURA 3.5 ESTRUCTURA METÁLICA	27
FIGURA 3.6 NÚCLEO Y DEVANADOS DEL AUTOTRANSFORMADOR	28
FIGURA 3.7 MECANISMO MÓVIL PARA LA VARIACIÓN DE VOLTAJE	29
FIGURA 3.8 DIAGRAMA UNIFILAR DE CONEXIONES	30
FIGURA 3.9 NÚCLEO ARMADO	32
FIGURA 3.10 FORMAleta DE MADERA.....	33
FIGURA 3.11 ELABORACIÓN DEL DEVANADO	34
FIGURA 3.12 MONTAJE DE LOS DEVANADOS EN EL NÚCLEO.....	35
FIGURA 3.13 AUTOTRANSFORMADOR TRIFÁSICO CONSTRUIDO.....	35
FIGURA 3.14 CABLEADO Y MONTAJE DE BORNERAS.....	36
FIGURA 3.15 LIJADO DE LOS DEVANADOS	38
FIGURA 3.16 AUTOTRANSFORMADOR EN LA ESTRUCTURA METÁLICA	39
FIGURA 3.17 MONTAJE DEL MECANISMO MÓVIL.....	40
FIGURA 3.18 ADECUACIÓN FINAL DEL AUTOTRANSFORMADOR.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 VALORES DE MAGNITUDES EN LA PRUEBA DE VACÍO	10
TABLA 1.2 VALORES DE MAGNITUDES EN LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO	11
TABLA 3.1 DIMENSIONES DEL NÚCLEO	17
TABLA 3.2 VALORES DE DENSIDAD DE CORRIENTE	21
TABLA 3.3 CONDUCTORES DE COBRE AWG REDONDOS ESMALTADOS	22
TABLA 3.4 DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA METÁLICA.....	27
TABLA 3.5 AISLAMIENTO EN LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO	42
TABLA 3.6 AISLAMIENTO EN EL DEVANADO PRIMARIO	42
TABLA 3.7 VALORES DE RESISTENCIA A 180 (V).....	44
TABLA 3.8 VALORES DE RESISTENCIA A 120 (V).....	44
TABLA 3.9 VALORES DE VOLTAJE EN CIRCUITO ABIERTO.....	49

RESUMEN

Se construyó un autotransformador trifásico con voltaje de salida variable, para el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Politécnica Nacional. El estudio para la selección de cada uno de los componentes del autotransformador se realiza en base a conocimientos teórico-práctico de tecnología electromecánica, referencias bibliográficas y con el soporte experimental de una fábrica de transformadores.

El autotransformador se construye en un núcleo ferromagnético, con una potencia aproximada de 3 (kVA) entre los devanados del autotransformador en el cual se llevarán a cabo las conexiones, además de utilizarlo para pruebas de circuito abierto y cortocircuito en transformadores, el devanado primario se alimenta con 208 (V) entre fases y se tiene un voltaje a la salida variable entre 0 (V) a 311 (V).

Mediante los cálculos en base a las dimensiones del núcleo y de los voltajes que se necesitan obtener, se construyen las tres bobinas y posteriormente se montan sobre las columnas del núcleo ferromagnético del autotransformador trifásico.

Además, se implementa un mecanismo móvil para obtener el voltaje de salida variable, por medio de tres escobillas que se deslizan sobre los devanados de las columnas del autotransformador trifásico. Dicho mecanismo manual se basa en el movimiento de traslación de un reóstato lineal, que al variar su posición se desliza las escobillas sobre las espiras de los devanados y se obtiene un voltaje variable a la salida de los terminales del autotransformador.

PALABRAS CLAVE: autotransformador trifásico, voltaje variable, mecanismo móvil.

ABSTRACT

A three-phase autotransformer with variable output voltage was built for the Electrical Machines Laboratory of the National Polytechnic School. The study for the selection of each of the components of the autotransformer is carried out based on theoretical and practical knowledge of electromechanical technology, bibliographic references and with the experimental support of a transformer factory.

The autotransformer is built on a ferromagnetic core, with an approximate power of 3 (kVA) between the windings of the autotransformer in which the connections will be made, in addition to using it for open and short circuit tests in transformers, the primary winding It supplies 208 (V) between phases and has a variable output voltage between 0 (V) to 311 (V).

Through the calculations based on the dimensions of the core and the voltages that need to be obtained, the three coils are built and subsequently mounted on the columns of the ferromagnetic core of the three-phase autotransformer.

Furthermore, a mobile mechanism is implemented to obtain the variable output voltage, by means of three brushes that slide on the windings of the columns of the three-phase autotransformer. Said manual mechanism is based on the translational movement of a linear rheostat, which by varying its position slides the brushes on the turns of the windings and a variable voltage is obtained at the output of the autotransformer terminals.

KEY WORDS: three-phase autotransformer, variable voltage, moving mechanism.

1 INTRODUCCIÓN

La utilización de transformadores o autotransformadores eléctricos en los diferentes campos de aplicación de un sistema eléctrico permite en forma general la modificación de la energía eléctrica proveniente de una fuente en otra con características distintas en cuanto se refiere al voltaje e intensidad de corriente, este tipo de máquinas eléctricas denominadas estáticas cumplen un rol fundamental dentro de la vida cotidiana de nuestro entorno, la importancia de los transformadores precisamente se puede evidenciar en la presencia que tienen en el mundo y que gracias a ellos se pueden llevar a cabo la transmisión, subtransmisión y distribución de la energía eléctrica.

Los autotransformadores tienen mayor repercusión dentro de los sistemas eléctricos de potencia, para interconectar circuitos que funcionan a diferentes voltajes, en la industria se utilizan para conectar maquinaria fabricada para voltajes nominales diferentes a la de la fuente de alimentación disponible (por ejemplo, motores de 480 (V) conectados a una alimentación de 600 (V)). Se utilizan también para conectar aparatos, electrodomésticos y cargas menores en cualquiera de las dos alimentaciones más comunes a nivel mundial (100-130 (V) a 200-250 (V)).

1.1 Planteamiento del problema

Los transformadores para la transmisión de la energía eléctrica son sometidos a una serie de pruebas tanto en el proceso de fabricación para constatar la calidad y cumplimiento de normas internacionales de diseño, como también en la etapa de operación, para tener un registro del estado general del transformador y su posterior aplicación dentro de un campo específico.

Entre las pruebas que se realizan a los transformadores están: la prueba de cortocircuito, dicho ensayo tiene como propósito determinar las pérdidas en los bobinados y verificar el valor de la impedancia; y la prueba de circuito abierto que se realiza con el fin de determinar las pérdidas en vacío y la corriente de magnetización.

Como parte de la formación académica y profesional los estudiantes de la carrera de Tecnología Electromecánica reciben prácticas sobre estos ensayos en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas; sin embargo, debido a que el Laboratorio de Control Industrial de la ESFOT no cuenta con una fuente de energía necesaria para realizar la prueba de cortocircuito en un transformador real tipo distribución de 50 (kVA) existente en dicho laboratorio, es necesario dotar al mismo de un equipo que cumpla con las características técnicas. Por lo tanto, la construcción de un autotransformador trifásico con voltaje de salida variable, permitirá alimentar de voltaje variable y llevar a cabo estos ensayos de forma nominal, cuyos rangos de operación estarán definidos en base a los datos proporcionados por el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.

1.2 Justificación

Con el desarrollo de este trabajo se establecerá una solución al problema existente en el laboratorio, ya que la implementación, contendrá parámetros y lineamientos enfocados para la construcción de un autotransformador que servirá como fuente de alimentación trifásica para la ejecución de las pruebas de cortocircuito y circuito abierto al transformador trifásico didáctico tipo distribución de 50 (kVA) disponible en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la EPN [1]–[3]. El autotransformador se dimensionará a medida, para que se ajuste a los requisitos de las pruebas que se quieren desarrollar.

Este proyecto además de ser un aporte para el desarrollo estructural del Laboratorio de Máquinas Eléctricas que es utilizado por estudiantes de la ESFOT, es una solución teórica a un problema técnico real

1.3 Objetivos

Objetivo general

- Construir un autotransformador trifásico con voltaje de salida variable.

Objetivos específicos

- Determinar los requerimientos técnicos del autotransformador.
- Establecer el método de construcción para un autotransformador.

- Implementar el mecanismo móvil para la variación de voltaje en el autotransformador trifásico.
- Realizar las pruebas de funcionamiento.
- Adecuar el equipo para su etapa de operación definitiva.

1.4 Conceptos generales

Autotransformador

El autotransformador es un equipo eléctrico de construcción y características similares a las de un transformador; pero a diferencia de éste, sólo posee un único devanado alrededor del núcleo, por lo tanto, no existe aislamiento eléctrico entre los devanados primario y secundario. El autotransformador de la Figura 1.1, es una máquina eléctrica estática que cumple las mismas funciones que la de un transformador convencional, que es de transferir energía eléctrica a distintos niveles de voltaje y corriente, con la principal diferencia de que no solo transfiere mediante inducción electromagnética, sino también por conducción.

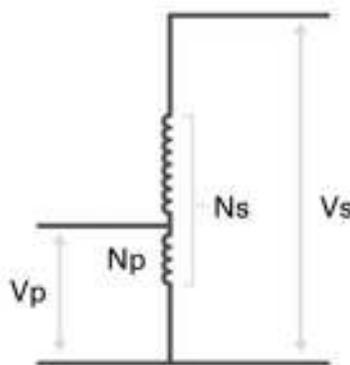


Figura 1.1 Circuito de un autotransformador

Fuente: Fundación Endesa, 2020

Principio de funcionamiento del autotransformador

Los autotransformadores funcionan basados en el principio de campos magnéticos que varían en el tiempo, por lo que no pueden ser utilizados en circuitos de corriente continua. La transferencia de potencia entre dos circuitos conectados a un autotransformador ocurre a través de dos fenómenos: el

acoplamiento magnético (como en un transformador común) y la conexión galvánica entre los dos circuitos (a través de la toma común).

Partes del autotransformador

Las partes que constituyen un autotransformador son similares a las de un transformador tradicional, la diferencia se establece en el mayor aislamiento que se le debe dar a los bobinados que forman el autotransformador.

- **Núcleo**

El núcleo constituye el circuito magnético del equipo de transformación, el cual se encarga de proporcionar un camino para conducir el flujo magnético, y está compuesto de varias láminas, hojas o chapas de material ferromagnético, las cuales son apiladas una sobre otra. Los tipos de núcleo se detallan a continuación:

- Núcleo acorazado: En la Figura 1.2 se muestra un núcleo acorazado, caracterizado porque las bobinas se encuentran casi totalmente rodeadas por el núcleo.

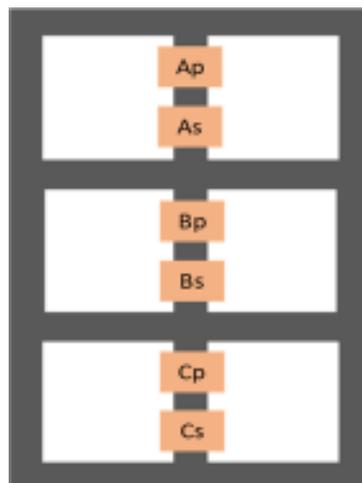


Figura 1.2 Núcleo acorazado

Fuente: Propia

En donde:

Ap, Bp y Cp: son los bobinados trifásicos primarios.

As, Bs, Cs: son los bobinados trifásicos secundarios.

- b. Núcleo en columnas: En la Figura 1.3 se puede observar un núcleo de columnas en donde las bobinas abrazan en su mayoría al núcleo. Se adaptan con mayor facilidad en alto voltaje, ya que la superficie a aislar es más reducida haciendo de éstos los núcleos más utilizados.

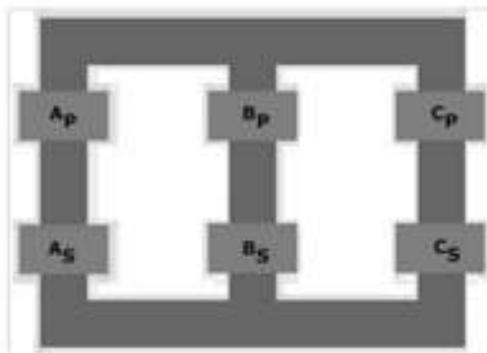


Figura 1.3 Núcleo de columnas

Fuente: Propia

En donde:

A_p, B_p y C_p: son los bobinados trifásicos primarios.

A_s, B_s, C_s: son los bobinados trifásicos secundarios.

- **Bobinas**

Las bobinas están determinadas por el número de vueltas en distintas capas de un conductor eléctrico esmaltado, que por lo general es de cobre o aluminio. Estas espiras cubren al núcleo y se las denomina devanado de bajo voltaje y devanado de alto voltaje. En transformadores de gran potencia el devanado de bajo voltaje envuelve primero al núcleo por cuestiones de uso de menor aislamiento, mientras que el devanado de alto voltaje cubre al de bajo voltaje, el cual debe estar más alejado del núcleo para evitar arcos eléctricos.

- **Aislamiento**

El aislamiento constituye la parte no conductora, los mismos que pueden ser de cartón, papel diamantado, Nomex o aceite; cuya finalidad es proteger al autotransformador de sobrevoltajes que pueden afectar a los devanados y al mismo núcleo.

El aislamiento se coloca entre capas de los devanados, entre devanados y entre la bobina y el núcleo; en algunos casos, para aumentar el aislamiento se puede colocar aceite que a su vez ayuda la refrigeración del equipo de transformación.

- **Elementos de sujeción**

Los elementos de sujeción son las prensas que mantienen compacto al núcleo y así evitar vibraciones de las chapas cuando está en funcionamiento. Además, se encuentran los herrajes que aseguran las prensas con la caja del transformador, y evitan el desplazamiento lineal del equipo.

Autotransformador trifásico

Los autotransformadores trifásicos se pueden formar empleando tres autotransformadores monofásicos, los circuitos magnéticos son completamente independientes, sin que se produzcan reacción o interferencia alguna entre los flujos respectivos; y otra posibilidad es un solo cuerpo compuesto de un único núcleo magnético en el que se ha dispuesto tres columnas sobre las que se ubican los arrollamientos primario y secundario de cada una de las fases, constituyendo un autotransformador denominado trifásico, Figura 1.4. Esta última opción es la más recomendable, debido a que el resultado es un transformador más pequeño, más ligero, más económico y algo más eficiente.

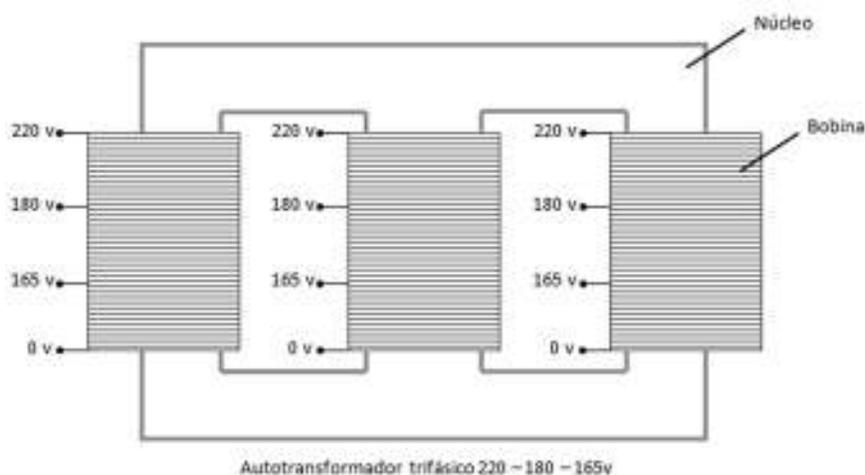


Figura 1.4 Autotransformador trifásico

Fuente: (Electromatic, 2013)

Conexiones de autotransformadores trifásicos

Los autotransformadores pueden conectarse de varias maneras para transformar tensiones. Las conexiones trifásicas más comunes que se pueden realizar es utilizando tres autotransformadores monofásicos o con un autotransformador trifásico con sus tres devanados para las tres fases arrollados sobre un mismo núcleo magnético.

- **Conexión en estrella de autotransformadores**

Un autotransformador puede conectarse en estrella, como se indica en la Figura 1.5. En estas condiciones, el comportamiento del banco es análogo, en muchos aspectos, al de un banco de tres transformadores de dos circuitos conectados en estrella – estrella.

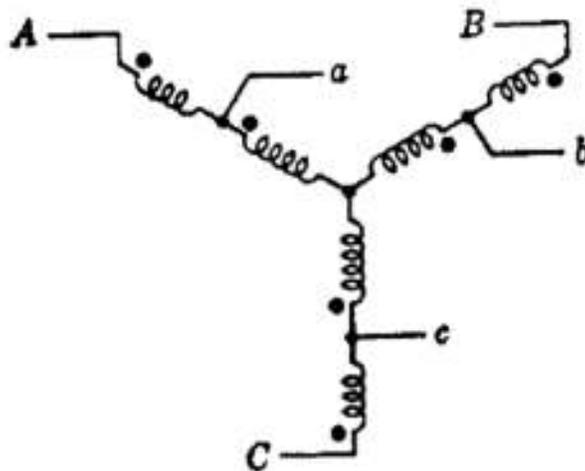


Figura 1.5 Conexión en estrella del autotransformador

Fuente: (E. E. Staff del M.I.T, 2001)

- **Conexión en triángulo de autotransformadores**

Un autotransformador se puede conectar en triángulo en la forma indicada en la Figura 1.6. Un posible inconveniente en esta conexión es que las tensiones de línea de los secundarios no están en concordancia de fase con las tensiones de línea de los primarios. Además, la mayor razón de transformación que puede obtenerse es 2:1.

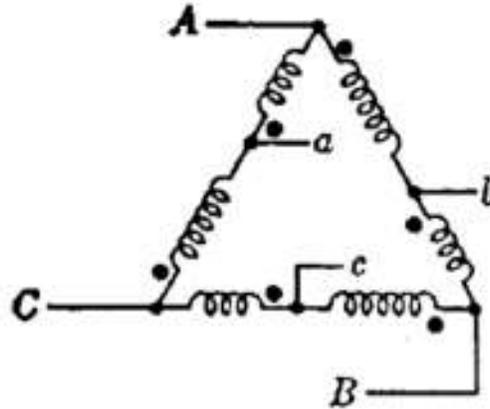


Figura 1.6 Conexión en triángulo del autotransformador

Fuente: (E. E. Staff del M.I.T, 2001)

Los autotransformadores también pueden conectarse en triángulo prolongado como se indica en la Figura 1.7. En la cual los devanados serie se conectan en serie con las líneas de alta tensión y los devanados comunes se conectan en triángulo. Al igual que la conexión triángulo de la Figura 1.6, las tensiones de línea del primario y secundario no están en fase.

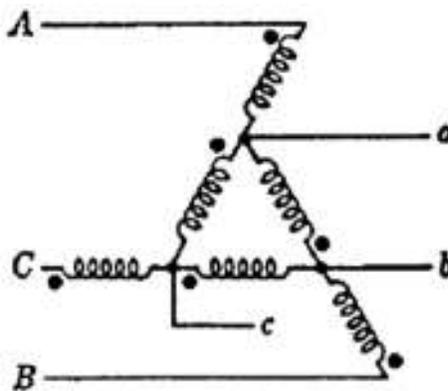


Figura 1.7 Conexión en triángulo prolongado del autotransformador

Fuente: (E. E. Staff del M.I.T, 2001)

- **Conexión de autotransformadores en triángulo abierto**

A diferencia de la conexión en triángulo, la conexión en triángulo abierto de autotransformadores Figura 1.8, no está restringida a razones de transformación inferiores a la 2:1.

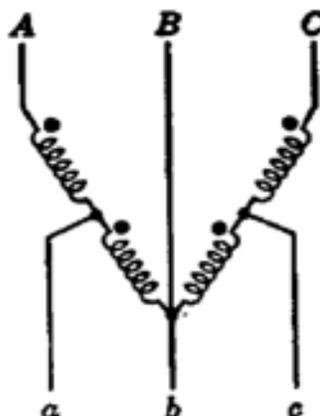


Figura 1.8 Conexión en triángulo abierto del autotransformador

Fuente: (E. E. Staff del M.I.T, 2001)

Pruebas eléctricas en transformadores

Las pruebas eléctricas en transformadores son realizadas con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento del equipo de transformación. Estas pruebas son:

- **Prueba de vacío**

Para esta prueba se alimenta con voltaje nominal a uno de los devanados, mientras que los otros devanados se encuentran abiertos (sin carga). De preferencia se alimenta el devanado de bajo voltaje, ya que es más fácil obtener y medir dichos voltajes de una fuente de alimentación de menor voltaje. En esta prueba se mide la corriente de vacío o excitación I_0 , la potencia absorbida por el hierro P_0 y el voltaje aplicado U_1 , tal como se muestra en la Figura 1.9.

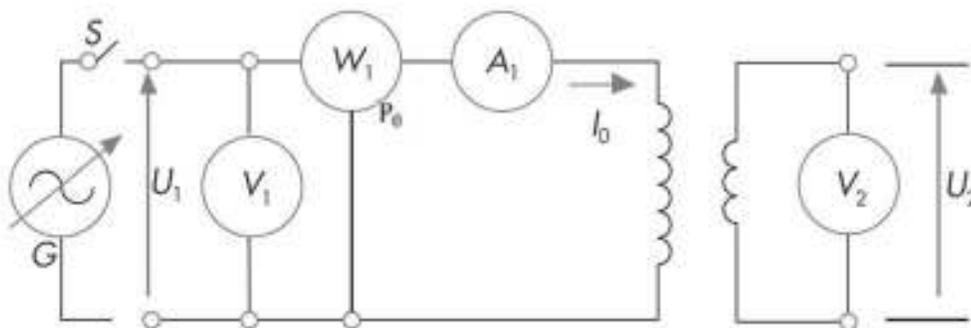


Figura 1.9 Prueba de vacío

Fuente: Propia

Los principales datos que hay que determinar en el ensayo en vacío se indica en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1 Valores de magnitudes en la prueba de vacío

Nombre	Fórmula
Pérdidas en el hierro (Watímetro)	$P_{Fe} = P_0$
Intensidad en vacío I_0 (Amperímetro)	$I_0 = A_1$
La relación de transformación (m)	$m = \frac{U_1}{U_2}$
La impedancia (Z)	$Z = \frac{U_1}{I_1}$
La potencia aparente en vacío (S_{sap})	$S_{sap} = U_1 * I_1$
La corriente de pérdidas (I_c)	$I_c = \frac{P_0}{U_1}$
La corriente de magnetización (I_m)	$I_m = \sqrt{I_0^2 - I_c^2}$
La resistencia de pérdidas (R_c)	$R_c = \frac{U_1}{I_c} = \frac{U_1^2}{P_0}$
La reactancia de magnetización (X_m)	$X_m = \frac{U_1}{I_m}$
La conductancia (G_c)	$G_c = \frac{1}{R_c}$
La susceptancia (B_m)	$B_m = \frac{1}{X_m}$

Fuente: Propia

- **Prueba de cortocircuito**

La prueba se realiza cortocircuitando uno de los devanados, por lo general el de bajo voltaje. Por otra parte, en el otro devanado se aplica voltaje mediante un autotransformador variable, comenzando desde cero se incrementa progresivamente la tensión, hasta conseguir que circule su corriente nominal I_1 o un valor próximo a este en los bobinados.

En esta prueba se mide el voltaje aplicado de cortocircuito V_{cc} , la potencia absorbida por el devanado P_{cc} , que también se las denomina pérdidas nominales del transformador y la corriente I_1 , como se muestra en la Figura 1.10.

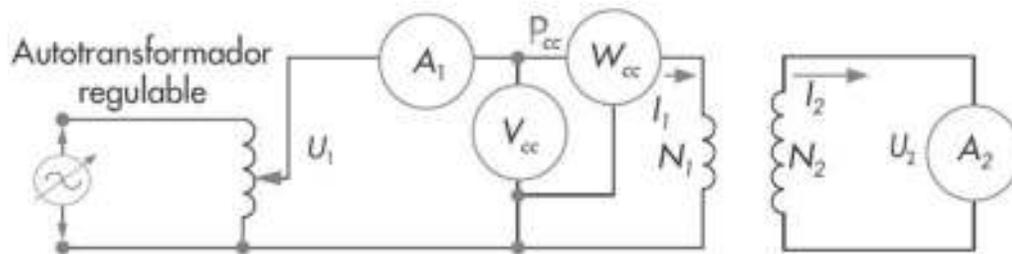


Figura 1.10 Prueba de cortocircuito

Fuente: Propia

Los principales datos que hay que determinar en la prueba de cortocircuito se presenta en la Tabla 1.2:

Tabla 1.2 Valores de magnitudes en la prueba de cortocircuito

Nombre	Fórmula
Perdidas en el cobre o cortocircuito (P_{cu})	$P_{cu} = P_{cc}$
La impedancia serie del circuito equivalente ($ Z $)	$ Z = \frac{U_1}{I_1}$
La resistencia de la impedancia serie (R)	$R = \frac{P_{cc}}{I_1^2}$
La reactancia de la impedancia serie (X)	$X = \sqrt{ Z ^2 - R^2}$

Fuente: Propia

2 METODOLOGÍA

2.1 Descripción de la metodología utilizada

Para el desarrollo del presente proyecto de construcción de un autotransformador trifásico tipo seco con voltaje de salida variable, se realiza el estudio de los componentes, herramientas e instrumentos necesarios para la construcción del autotransformador. Este proyecto se basa en dos estudios: exploratorio y aplicado.

El estudio exploratorio se utiliza para observar y entender las necesidades dentro del actual Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la EPN, en donde una de las principales falencias es la inexistencia de un autotransformador trifásico con voltaje de salida variable, el autotransformador se utilizará como fuente de alimentación trifásica para la ejecución de las pruebas de cortocircuito y circuito abierto al transformador trifásico didáctico tipo distribución de 50 (kVA) disponible en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, pruebas que comúnmente se aplican en el ámbito industrial a nivel local y mundial. Este estudio fue de gran ayuda a la hora de recolectar la mayor cantidad de información referente a las aplicaciones de transformadores y autotransformadores.

El estudio aplicado, tuvo un gran papel a la hora de realizar los cálculos y la selección de los componentes necesarios para la construcción del autotransformador trifásico y la implementación del mecanismo móvil para la variación de voltaje, dichos elementos como el caso del núcleo ferromagnético, puede ser utilizado de equipos reciclados y los demás elementos que se encuentran disponibles en el mercado nacional.

2.2 Técnicas e instrumentos utilizados en la construcción

La fase inicial del proyecto consistió en determinar los requerimientos necesarios para la construcción del autotransformador trifásico, para lo cual primero se enlistó cuáles son las necesidades de los estudiantes en el laboratorio. Con la información obtenida por parte de los estudiantes y profesores encargados de la asignatura; se tiene una serie de datos importantes de la capacidad instalada en cuanto a transformadores y autotransformadores de

prueba, es decir, se obtuvo tensiones e intensidades disponibles en el laboratorio, para lograr los objetivos propuestos aplicando las pruebas de cortocircuito y circuito abierto.

Para la segunda fase se realizó todos los cálculos necesarios para determinar las dimensiones del núcleo, considerando que el largo de la columna del mismo sea lo suficientemente alta para alojar a los devanados primario y secundario en una sola capa. Además, se calcula el tipo y calibre de alambre a utilizar, y el número de espiras para cada devanado.

En la tercera fase que corresponde al proceso de construcción de la parte mecánica y eléctrica del autotransformador, se detalla el uso de las herramientas y moldes necesarios para la elaboración de los devanados primario y secundario; cada uno de estos parámetros depende de las dimensiones del núcleo seleccionado.

En la cuarta fase, se detalla todo el proceso paso a paso acerca del montaje de los bobinados en el núcleo, ubicación de los elementos de sujeción, aislamientos, empalmes necesarios, montaje y adaptación del mecanismo móvil que sujeta las escobillas encargadas de la variación del voltaje en el autotransformador trifásico.

En la quinta fase, se realiza las pruebas de funcionamiento al autotransformador trifásico, tales como: prueba de aislamiento, prueba de resistencia en los devanados, prueba de circuito abierto; cada una de estas desde el punto de vista experimental, con la finalidad de comprobar los objetivos perseguidos.

En la última fase, se describe el manual de mantenimiento para el autotransformador trifásico con voltaje de salida variable, de manera que puedan ser utilizados y aplicados en forma correcta.

En la Figura 2.1 se observa el diagrama de los procesos realizados mediante la descripción de la metodología para la implementación del presente proyecto.



Figura 2.1 Metodología para la construcción del autotransformador

Fuente: Propia

3 EJECUCIÓN Y RESULTADOS

Para el desarrollo del presente proyecto de construcción de un autotransformador trifásico con voltaje de salida variable con una capacidad de 3 (kVA) en todo el rango de transformación, el cual permita la obtención de voltajes con una variación entre 0 (V) a 311 (V), con la finalidad de realizar pruebas eléctricas a los transformadores existentes en Laboratorio de Control Industrial de la ESFOT, tales como: energización en vacío, ensayo de cortocircuito, variación de rangos de voltaje respecto al nominal. Además, cabe mencionar que se implementa un mecanismo manual móvil, el cual permite variar los valores de voltaje a la salida variable del autotransformador.

Para la construcción del autotransformador trifásico del presente proyecto, se considera la disponibilidad de un núcleo de hierro ferromagnético, el mismo que debe ajustar a las características eléctricas, físicas y de potencia de transformación necesarias. Uno de los puntos más importantes en el dimensionamiento del autotransformador, es la longitud de las columnas del núcleo, ya que en base a esta característica se acopla el mecanismo móvil con las escobillas para la variación de voltaje.

3.1 Requerimientos de componentes para el autotransformador

Características eléctricas

A continuación, se detalla las características eléctricas para la construcción del autotransformador trifásico con voltaje de salida variable.

- Configuración: Trifásica
- Potencia: 3 (kVA)
- Voltaje de alimentación: 208 (V)
- Voltaje a la salida variable: 0-311 (V)
- Mecanismo de variación de voltaje: Manual
- Conexión: Los devanados primario y secundario se conectan como autotransformador en YNyn.

Dimensiones físicas del núcleo

Para la construcción del autotransformador trifásico, se deben tomar en consideración: la altura del núcleo, longitud de su base, ancho y espesor de la columna, altura y ancho de la ventana; también se toma la medida del largo, ancho y espesor de las láminas o chapas que forman el núcleo, cada capa en el apilamiento, por lo general, lleva un juego de seis a siete de láminas, dependiendo del tamaño del núcleo, el mismo que está relacionado directamente con la potencia a transferir. Cabe mencionar que las mediciones se deben tomar con el núcleo prensado, una vez que sus láminas se encuentren juntas entre sí.

El material empleado para el núcleo del autotransformador, son láminas magnéticas de acero al silicio de grano orientado. Este acero ofrece gran resistencia al envejecimiento y puede trabajarse a elevadas inducciones debido a su alta permeabilidad y muy bajas pérdidas en la dirección de la laminación.

En la Figura 3.1 se ilustra las dimensiones del núcleo para la construcción del equipo de transformación.

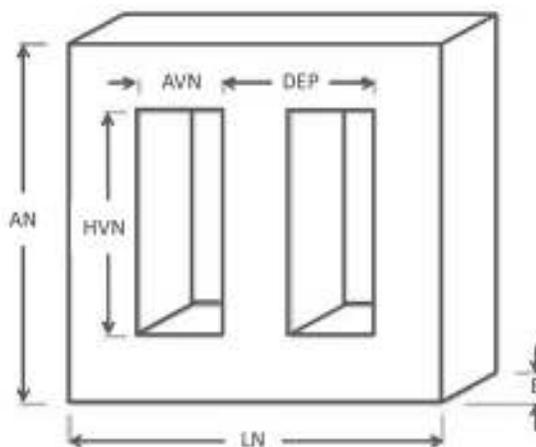


Figura 3.1 Dimensiones principales del núcleo apilado

Fuente: Propia

En donde:

AN: altura del núcleo

HVN: altura de la ventana del núcleo

AVN: ancho de la ventana del núcleo

DEP: distancia entre piernas o columnas

LN: longitud de la base del núcleo

E: espesor del núcleo

- **Dimensiones para el núcleo del autotransformador**

En la Tabla 3.1 se presenta un resumen con las dimensiones del núcleo disponible para el diseño del autotransformador trifásico.

Tabla 3.1 Dimensiones del núcleo

Parámetro	Valor
Ancho de lámina (cm)	5
Espesor de la lámina (mm)	0,26
Longitud de la base del núcleo (cm)	25
Espesor de núcleo (cm)	7
Altura del núcleo (cm)	53
Ancho de la ventana del núcleo (cm)	5
Altura de la ventana del núcleo (cm)	43
Distancia entre columnas (cm)	10
Peso del núcleo (Kg)	46

Fuente: Propia

- **Cálculo de la sección del núcleo**

En la Figura 3.2 se ilustra un corte con vista superior, en donde se puede apreciar las dimensiones de la sección transversal para el cálculo del área de una columna del núcleo trifásico.

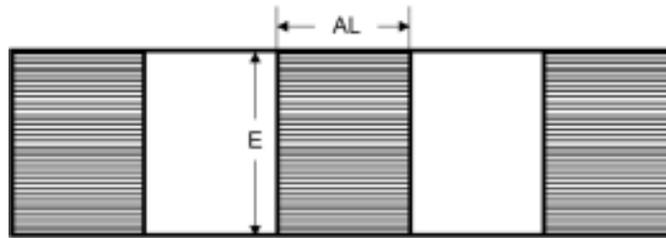


Figura 3.2 Sección transversal de la columna del núcleo trifásico

Fuente: Propia

El área de la sección transversal de la columna del núcleo, depende del ancho de la lámina (AL) y del espesor del núcleo armado (E).

$$A_{Núcleo} = AL * E$$

Ecuación 3.1 Área de la sección rectangular.

En base a los valores de la Tabla 3.1 y usando la ecuación 3.1 se tiene:

$$A_{Núcleo} = 5(cm) * 7(cm)$$

$$A_{Núcleo} = 35 (cm^2)$$

Cálculos de los elementos eléctricos

Las magnitudes de voltajes y corrientes que se van a considerar para los cálculos en el diseño del autotransformador trifásico, se muestran en la Figura 3.3, los mismos que ayudan a entender de mejor manera la disposición y ubicación de dichos parámetros en el circuito y se detallan a continuación:

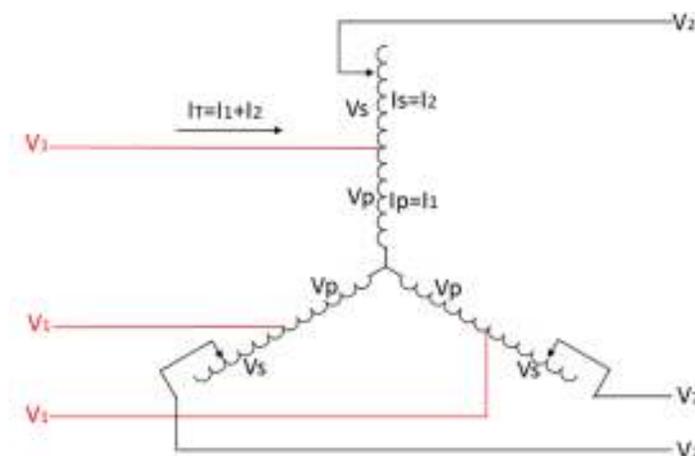


Figura 3.3 Voltajes y corrientes en los devanados

Fuente: Propia

En donde:

V_1 : voltaje fase-fase de alimentación.

V_2 : voltaje fase-fase máxima a la salida del autotransformador.

V_p : Voltaje por fase en el devanado primario.

V_s : Voltaje por fase en el devanado secundario.

I_p : Corriente en el devanado primario.

I_s : Corriente en el devanado secundario.

I_T : Corriente total que absorbe los devanados primario y secundario.

- **Cálculo de voltajes**

El devanado primario del autotransformador se encuentra en configuración “Y”, por lo tanto, su voltaje fase se calcula con la Ecuación 3.2.

$$V_p = \frac{V_1}{\sqrt{3}}$$

Ecuación 3.2 Voltaje por fase en el devanado primario.

El valor del voltaje de alimentación entre fase-fase V_1 considerado para este caso es de 208 V.

Por lo tanto:

$$V_p = \frac{208}{\sqrt{3}}$$

$$V_p = 120 \text{ (V)}$$

El voltaje fase del devanado secundario del autotransformador se calcula con la Ecuación 3.3.

$$V_s = \frac{V_2 - V_1}{\sqrt{3}}$$

Ecuación 3.3 Voltaje por fase en el devanado secundario.

Según la configuración del circuito de la Figura 3.3, el voltaje máximo a la salida del autotransformador trifásico es de 311 (V).

Por lo tanto:

$$V_s = \frac{311(V) - 208(V)}{\sqrt{3}} = \frac{103(V)}{\sqrt{3}}$$

$$V_s = 60 (V)$$

- **Cálculo de la potencia del núcleo trifásico**

Para calcular la potencia del núcleo trifásico, se utiliza la Ecuación 3.4.

$$A_{Núcleo} = k * \sqrt{P_{max}}$$

Ecuación 3.4 Área del núcleo en función de la potencia.

Despejando de la Ecuación 3.4 la potencia del autotransformador, la expresión en función de la potencia como transformador convencional se escribe como:

$$P_{max} = \left(\frac{A_{núcleo}}{1,152} \right)^2$$

Ecuación 3.5 Potencia del autotransformador en función de su área.

De donde se obtiene:

$$P_{max} = \left(\frac{35}{1,152} \right)^2$$

$$P_{max} = 923,06 (W)$$

- **Cálculo de las corrientes**

Para el cálculo de las corrientes máximas disponibles por cada fase de los devanados se calcula con la Ecuación 3.6. Esto considerando el voltaje máximo de salidas por fase.

$$I_{max_disponible} = \frac{P_{max}}{V_{salida}}$$

Ecuación 3.6 Corriente máxima disponible en los devanados por fase.

De donde se obtiene:

$$I_{max} = \frac{923,06 (W)}{180 (V)}$$

$$I_{max_disponible} = 5,12 (A) \approx 5 (A)$$

- **Cálculo del calibre de los conductores**

Para calcular el calibre del conductor es necesario tomar una densidad de corriente, la cual depende del tipo de transformador a diseñar como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Valores de densidad de corriente

Tipo transformador	Densidad de corriente (A/mm ²)
En aceite	2,5 a 3,5
En Seco	1,5 a 2,5

Fuente: Delta Mackalles, 2016

La sección del conductor se calcula en función de la densidad de corriente y la corriente que circulará por el mismo.

Al tratar de un autotransformador de tipo seco, se elige una densidad de corriente máxima de 2,5 (A/mm²). La sección del devanado secundario y primario se calcula con la Ecuación 3.7.

$$S = \frac{I}{\delta}$$

Ecuación 3.7 Sección del conductor en función de la corriente y su densidad.

Por ser un autotransformador con voltaje de salida variable, la sección del conductor tanto para el devanado primario como secundario debe ser de la misma dimensión; esto se debe a que sus devanados estarán sobre una columna de hierro ferromagnético dispuesto en una sola capa; por lo tanto, la superficie sobre los devanados, deben ser lo más uniforme posible para acoplar el mecanismo móvil de escobillas y obtener voltaje variable a la salida del autotransformador.

Usando la Ecuación 3.7 se tiene:

$$S_s = \frac{I_s}{\delta}$$

$$S_s = \frac{5 (A)}{2,5 (A)/(mm^2)}$$

$$S_s = 2 (mm^2)$$

Así también:

$$S_p = 2 (mm^2)$$

Para la selección de conductores de cobre redondos esmaltados, se considera la Tabla 3.3

Tabla 3.3 Conductores de cobre AWG redondos esmaltados

Calibre AWG	Sección (mm²)	Diámetro (mm)
6	13,30	4,115
7	10,55	3,665
8	8,37	3,264
9	6,63	2,906
10	5,26	2,680
11	4,17	2,305
12	3,31	2,053
13	2,62	1,828
14	2,08	1,628
15	1,65	1,45
16	1,31	1,291
17	1,04	1,15
18	0,823	1,024
19	0,653	0,912
20	0,518	0,813
21	0,41	0,723
22	0,326	0,644
23	0,258	0,573
24	0,205	0,546
25	0,162	0,455
26	0,129	0,405

Fuente: S. Fernández, 2014

Por lo tanto, los conductores elegidos según la Tabla 3.3 con valores de sección cercanos a los calculados son:

- Devanado primario y secundario: 14 AWG cuya sección transversal es de 2,08 (mm²), diámetro 1,628 (mm).
- **Cálculo del número de vueltas por voltio**

Para calcular el número de vueltas por voltio se utiliza la Ecuación 3.8, que permite estimar el parámetro en mención.

$$\frac{\#vueltas}{voltio} = \frac{1}{4,44 * f * B * 0,0001 * A_{núcleo}}$$

Ecuación 3.8 Cálculo del número de vueltas por voltio.

Utilizando la Ecuación 3.8 y los valores estándar de la frecuencia f y del flujo magnético B (Tabla ANEXO 9), se calcula el número de vueltas por voltio.

Donde:

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

$$B = 0.8 \text{ (Webber/m}^2\text{), (criterio de diseño)}$$

Por lo tanto, sustituyendo valores se tiene:

$$\frac{\#vueltas}{voltio} = \frac{1}{4,44 * 60 \text{ hz} * 0,8 \left(\frac{\text{Webber}}{\text{m}^2}\right) * 0,0001 * 35 \text{ (cm}^2\text{)}}$$

$$\frac{\#vueltas}{voltio} = 1,34 \text{ (vuelta/V)}$$

- **Cálculo del número de espiras en los bobinados**

Para calcular el número de espiras que lleva cada devanado se recurre a la Ecuación 3.9. Este cálculo permite establecer en número de vuelta a la que se le derivará un terminal a la bornera de conexiones.

$$N = V * \frac{\#vueltas}{voltio}$$

Ecuación 3.9 Cálculo del número de vueltas en el devanado primario.

Cabe señalar que, tanto el devanado primario como el secundario deben tener el mismo calibre del conductor.

Por lo tanto, usando la Ecuación 3.9 se tiene:

$$N_1 = V_1 * \frac{\#vueltas}{voltio}$$

$$N_1 = 120 V * 1,34 (vuelta/V)$$

$$N_1 = 160,8 (vueltas)$$

Redondeando se tiene que el número nominal de vueltas en el devanado primario es: $N_1 = 161$ (vueltas).

El número de espiras para el devanado secundario será:

$$N_2 = V_s * \frac{\#vueltas}{voltio}$$

$$N_2 = 60_{voltios} * 1,34(vuelta/V)$$

$$N_2 = 80,4 (vueltas)$$

Considerando valores enteros, se tiene que el número nominal de vueltas en el devanado secundario es: $N_2 = 81$ (vueltas).

Para el cálculo del número de espiras totales que tendrá el devanado de cada columna del autotransformador se utiliza la Ecuación 3.10.

$$N_T = N_1 + N_2$$

Ecuación 3.10 Cálculo del número de vueltas en cada columna del autotransformador.

$$N_T = 161 (vueltas) + 81 (vueltas)$$

$$N_T = 242 (vueltas)$$

- **Cálculo de altura de las bobinas**

La altura de las bobinas del autotransformador es muy importante en el diseño, debido a que, en la salida se necesita un voltaje que varía de 0 (V) a 311 (V); por lo tanto, lo ideal es que solo tenga una sola capa para poder acoplar el

mecanismo de variación de voltaje con escobillas. Las definiciones de las longitudes de la bobina se presentan en la Figura 3.4.

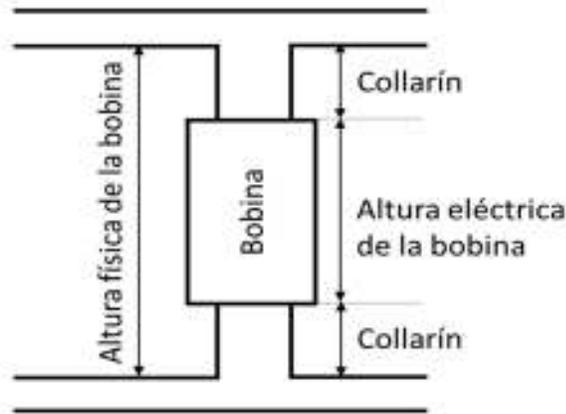


Figura 3.4 Dimensiones de altura de la bobina

Fuente: Propia

- **Cálculo de la altura eléctrica del devanado total**

Para el cálculo de la altura eléctrica que tendrá el devanado en cada columna del autotransformador se utiliza la Ecuación 3.11.

$$HEB = [N_T + 1] * T * L * C$$

Ecuación 3.11 Cálculo de la altura eléctrica del devanado.

Donde:

N_T : Espiras por capa total.

T: Tolerancia, generalmente del 5%

L: Ancho del conductor en (mm)

C: Cantidad de conductores necesarios para completar el área de la sección requerida

$$HEB = [242 + 1] * 1,05 * 1,628(mm) * 1$$

$$HEB = 415,38 (mm)$$

Por lo tanto, se considera una altura en cm de aproximadamente:

$$HEB = 42 (cm).$$

- **Cálculo de la potencia del autotransformador**

Para el cálculo de la potencia por fase del autotransformador, se utiliza la Ecuación 3.12

$$S = \frac{V_2}{\sqrt{3}} * I_{\max_disponible}$$

Ecuación 3.12 Potencia del autotransformador.

Utilizando la Ecuación 3.12 y los valores de voltaje máximo por fase y la corriente máxima que circula por el devanado se tiene:

$$S = \frac{311 (V)}{\sqrt{3}} * 5 (A)$$

$$S = 897,78 (VA) \approx 900 (VA)$$

$$S = 0,9 (kVA)$$

La potencia trifásica se calcula con la Ecuación 3.13.

$$S_{3\phi} = 3 * S$$

Ecuación 3.13 Potencia trifásica del autotransformador.

$$S_{3\phi} = 3 * 0,9 (kVA)$$

$$S_{3\phi} = 2,7 (kVA)$$

3.2 Estructuras del autotransformador

Estructura metálica

En la Figura 3.5 se puede observar el prototipo de la estructura metálica que se va a construir, la misma que posee una base rectangular que servirá de soporte para sujetar al autotransformador. Además, se agregan dos rieles verticales y paralelos, que servirán para acoplar la base portaescobillas, y mediante el cual se desliza el mecanismo móvil con las escobillas para la variación del voltaje en el autotransformador trifásico.

Finalmente, se acopla dos ejes a la base de la estructura metálica, las mismas que servirán para montar las cuatro ruedas, mediante las cuales se podrá transportar el equipo de transformación.

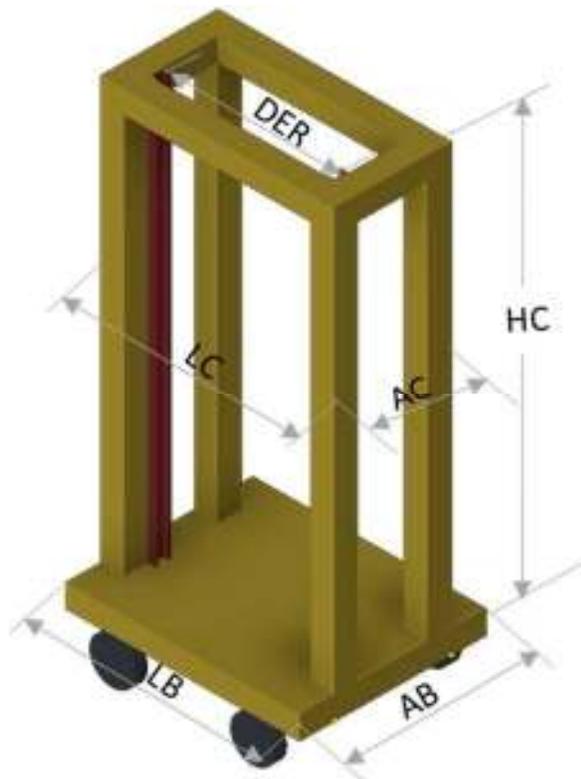


Figura 3.5 Estructura metálica

Fuente: Propia

En la Tabla 3.4 se indica las dimensiones a la que hace referencia la estructura metálica de la Figura 3.5.

Tabla 3.4 Dimensiones de la estructura metálica

Parámetro	Valor
Largo de la base (LB) (cm)	40
Ancho de la base (AB) (cm)	25
Largo del cuerpo (LC) (cm)	40
Ancho del cuerpo (AC) (cm)	18,50
Distancia entre rieles (DER) (cm)	13,50
Altura del cuerpo (HC) (cm)	65

Fuente: Propia

Núcleo y devanados

En la Figura 3.6 se muestra el prototipo del autotransformador trifásico, el mismo que consta de un núcleo magnético, tres devanados y las bornera respectivas.



Figura 3.6 Núcleo y devanados del autotransformador

Fuente: Propia

Sistema de conexión variable

El sistema está compuesto por una placa portaescobillas que contienen a las escobillas de carbón, una varilla roscada que atraviesa el cuerpo de la placa, que al hacer girar en sentido horario o antihorario transmite un movimiento de traslación a través de su eje. De este modo mientras se ajusta o se afloja dicha varilla, la placa portaescobillas asciende o desciende a través de los rieles colocados en la estructura metálica; a su vez las escobillas de carbón se encargan de llevar el voltaje presente a las salidas del autotransformador trifásico.

En la Figura 3.7, se ilustra los elementos más importantes que constituyen el sistema o mecanismo móvil de escobillas para la variación de voltaje en el autotransformador trifásico.

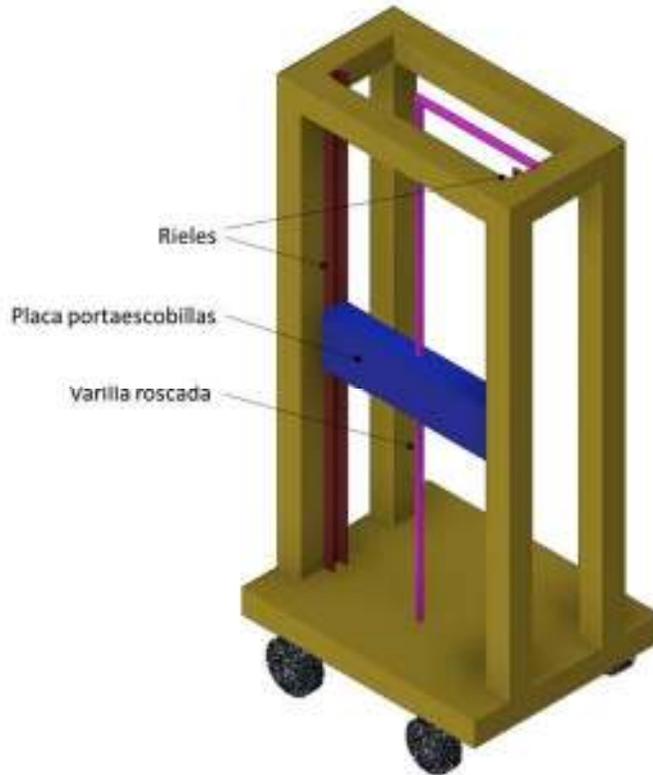


Figura 3.7 Mecanismo móvil para la variación de voltaje

Fuente: Propia

Diagramas eléctricos de conexión

La parte más importante en la construcción del equipo de transformación es tener implementado un sistema para la variación de voltaje, el mismo que estará controlado de forma manual por el operador, de tal manera que las escobillas de carbón se deslizan linealmente sobre las espiras de los devanados dispuestos sobre las columnas del autotransformador trifásico.

En la Figura 3.8, se ilustra el diagrama unifilar de conexiones del autotransformador trifásico con voltaje de salida variable, en el mismo se conecta a la fuente de alimentación de la red trifásica de la E.E.Q disponible en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la EPN y a su vez las salidas de voltaje tanto fijas como la salida variable hacia las borneras en los terminales.

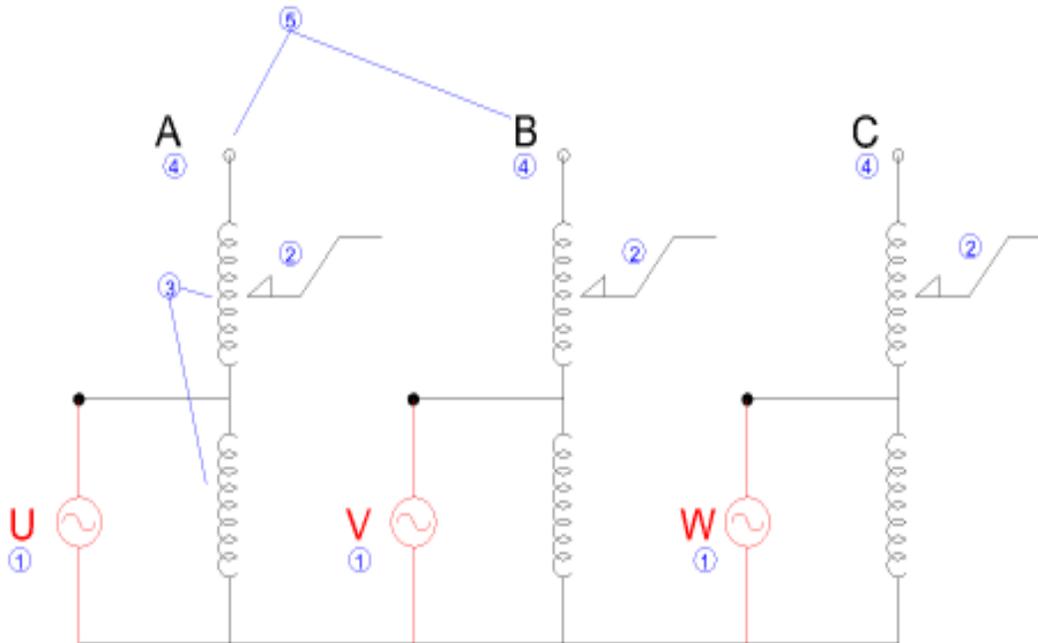


Figura 3.8 Diagrama unifilar de conexiones

Fuente: Propia

En donde:

- 1: Voltaje de entrada trifásico proporcionada por la red E.E.Q. fases U, V y W (120 (V) / 208(V)).
- 2: Mecanismo variador de voltaje manual, construido a base del principio de movimiento del reóstato lineal.
- 3: Devanados de autotransformador, de acuerdo al diseño del presente estudio.
- 4: Voltaje monofásico máximo a la salida del autotransformador A, B y C (180 (V)).
- 5: Voltaje trifásico máximo a la salida del autotransformador AB, AC, BC (311 (V))

Componentes del autotransformador

El autotransformador consta de varias partes las cuales están divididas en dos grupos, un principal y un auxiliar, los mismos que se detallan a continuación:

Componentes principales

- Núcleo magnético de silicio (35 cm^2) de área total, altura de 55 (cm).
- Conductor esmaltado de cobre # 14 AWG para el bobinado, primario y secundario.

Componentes auxiliares

- Formaleta de madera.
- Borneras.
- Material aislante NOMEX 220 ($^{\circ}\text{C}$)
- Barniz dieléctrico tipo H 220 ($^{\circ}\text{C}$)
- Cinta de fibra de vidrio 220 ($^{\circ}\text{C}$)
- Culatas.
- Tubo cuadrado de hierro galvanizado de 1"x2 (mm) del mecanismo móvil.
- Base metal-madera porta escobillas.
- Escobillas de carbón Hitachi M17 - 7x13x17 (mm) con resorte, cable y conector, hasta 10 (A).
- Varilla roscada de $\frac{1}{2}$ " x 80 (cm), paso diametral
- Cuatro ruedas M60R de 3"
- Pernos autoperforantes de cabeza hexagonal de $\frac{5}{16}$ " x $\frac{3}{4}$ "
- Placa de acrílico transparente 4 (mm) de 65 (cm) x 42 (cm).
- Disyuntor térmico tripular de 10A para riel Din.
- Riel Din de 2".
- Cable flexible # 14 AWG para conexiones entre las borneras y escobillas.

3.3 Instalación de los componentes

Armado del núcleo

En este punto se apilan las láminas de acero al silicio para armar el núcleo, esto se hace sobre una mesa plana y con topes que facilitan el armado, de tal manera que las láminas queden compactadas (sin aberturas entre las láminas), y de acuerdo al modelo traslapar, así también, sean fáciles de extraer los cierres para cuando se monten las bobinas y se pueda volver a cerrar el circuito magnético.

En la Figura 3.9 se puede apreciar el núcleo magnético completamente armado, que al extraer los cierres se puede montar las bobinas respectivas.



Figura 3.9 Núcleo armado

Fuente: Propia

Bobinado del núcleo

- **Confección de los bobinados primario y secundario**

En este punto se construyen las bobinas del primario y secundario, el proceso de construcción de las bobinas es el mismo tanto para transformadores como para autotransformadores.

Con los cálculos establecidos del número de espiras se procede a dimensionar el tipo de bobina y la formaleta que se va usar, la formaleta no es más que una base de madera compuesta por dos piezas las cuales tienen forma

rectangular y que permiten con facilidad la extracción de la bobina cuando se haya terminado de elaborar.

La formaleta se la construye en el caso de no existir alguna elaborada que coincida con las dimensiones requeridas en función del tamaño del núcleo (pierna del núcleo). En la Figura 3.10 se ilustra la formaleta que se utiliza para la elaboración de los devanados.



Figura 3.10 Formaleta de madera

Fuente: Propia

Con la formaleta ya lista, se procede a colocar en la máquina bobinadora, asegurándose de que esté bien centrada y fija, ya que a medida que se va elaborando la bobina esta adquiere volumen y peso que son de gran consideración.

Revisado todos estos aspectos se recubre con láminas de cartón, esto con la finalidad de acuerpar el transformador y proteger de los esfuerzos mecánicos al momento de montar la bobina en el núcleo, el bobinador se ayuda de una estructura base en donde coloca los carretes con los conductores para pasarlos por un templador el cual es de mucha ayuda ya que a más de ser un apoyo para los conductores permite mayor templado de los mismos cuando estos están siendo enrollados.

En la Figura 3.11 se puede apreciar el mecanismo y los elementos necesarios para la elaboración de los devanados del autotransformador.



Figura 3.11 Elaboración del devanado

Fuente: Propia

Una vez elaborado cada devanado, se procede a retirar de la máquina bobinadora, para luego extraer la formaleta y en lo posterior montar la bobina en el núcleo trifásico.

- **Montaje de los bobinados**

En esta parte del proceso se tiene el núcleo trifásico armado y las tres bobinas previamente confeccionadas.

Para montar los devanados en el núcleo, se retira las prensas y los cierres del núcleo, esto para permitir el ingreso de las bobinas en cada pierna del núcleo. A continuación, se procede a introducir las bobinas en las piernas del núcleo con total cuidado.

En la Figura 3.12 se puede apreciar el montaje de los devanados en las dos columnas del autotransformador trifásico.



Figura 3.12 Montaje de los devanados en el núcleo

Fuente: Propia

Una vez montadas los tres devanados en las columnas, se colocan los cierres del núcleo y las prensas (culatas) para poder sujetar firmemente y transportar el núcleo con las bobinas que forman el equipo de transformación.

En la Figura 3.13 se puede apreciar el autotransformador trifásico completamente armado.



Figura 3.13 Autotransformador trifásico construido

Fuente: Propia

Instalación de cableado y borneras

En este proceso se realiza la identificación de todas las conexiones que permiten el funcionamiento correcto del autotransformador, aquí las bobinas y el núcleo se denominan como la parte activa del autotransformador.

La instalación de las borneras se realiza a fin de mantener un aislamiento entre los terminales de los devanados y además para que se pueda realizar el grupo de conexión que debe tener en el autotransformador trifásico construido, entonces se identifica todas las puntas salientes de cada bobina y procede a etiquetarlas en relación a las borneras respectivas.

En la Figura 3.14 se ilustra las conexiones de los devanados y el montaje de las borneras en el autotransformador trifásico.



Figura 3.14 Cableado y montaje de borneras

Fuente: Propia

Instalación de los contactos móviles del autotransformador

El mecanismo de variación de voltaje se basa en el funcionamiento de un reóstato lineal, cuyo movimiento de traslación de las escobillas se lo realiza mediante un eje compuesto por una varilla roscada, la cual, al hacer girar en un sentido u otro, traslada a las escobillas sobre la superficie de los devanados previamente lijados. Además, para el acoplamiento del mecanismo móvil se debe construir una estructura metálica, la cual sirve de soporte para el autotransformador y para el sistema de variación de voltaje.

- **Construcción de la estructura metálica**

Para la implementación del mecanismo móvil del presente proyecto, es necesario la construcción de una estructura metálica, cuyas dimensiones deben ajustarse a las medidas del autotransformador trifásico y a las dimensiones de la placa metal-madera que contendrá a las escobillas.

Para la construcción de la estructura metálica, se corta el tubo de hierro galvanizado cuadrado según las dimensiones que se requieren para montar el autotransformador y el mecanismo móvil para la variación de voltaje. Las dimensiones para la construcción de la estructura metálica se presentan en la Tabla 3.4.

Una vez construida la estructura metálica de base rectangular, se agrega dos rieles paralelos en forma vertical en la parte frontal de dicha estructura, los mismos que servirán de guías para deslizar la placa portaescobillas de metal-madera. Además, se colocan cuatro ruedas sobre dos ejes situados en la base de la estructura metálica, las mismas que facilitan la transportación del equipo de transformación.

- **Lijado de los devanados**

En este punto se realiza el lijado de los devanados en la parte posterior del autotransformador trifásico, para lo cual se usa una lija fina #1200, cuyo objetivo es retirar una franja de esmalte de la capa superficial de los devanados primario y secundario; esto con la finalidad de que exista un contacto correcto entre las espiras libre de esmalte de los devanados y las escobillas al momento de acoplar el mecanismo móvil.

En la Figura 3.15 se ilustra las franjas en las columnas de los devanados que van a ser lijadas, para este proceso se coloca cinta masqui alrededor de las franjas que se va a lijar; y con total cuidado se lija suavemente para retirar el esmalte a lo largo de la columna de cada devanado.



Figura 3.15 Lijado de los devanados

Fuente: Propia

- **Montaje del autotransformador en la estructura metálica**

En este punto se monta el autotransformador trifásico sobre la estructura metálica construida, y con la ayuda de pernos y tuercas se los sujeta fijamente a las bases de la estructura metálica, desde las culatas inferiores y superiores del autotransformador.

En la Figura 3.16 se ilustra el autotransformador trifásico acoplado a la estructura metálica, en el cual posteriormente se acondicionará el mecanismo móvil de escobillas para la variación del voltaje.



Figura 3.16 Autotransformador en la estructura metálica

Fuente: Propia

- **Montaje del mecanismo móvil de escobillas**

Para el montaje de las escobillas se utilizan los dos rieles fijos y paralelos que están dispuestos en la estructura metálica; sobre estos rieles se coloca la base de metal-madera que contiene las tres escobillas de carbón, esta base a su vez contiene a la varilla roscada sujeta a la culata inferior y con un manubrio en la parte superior, que hace girar en sentido horario o antihorario para que baje o suba la base con las escobillas, produciendo el incremento o disminución de voltaje en las terminales de la salida variable del autotransformador.

En la Figura 3.17 se puede observar los componentes constitutivos principales del mecanismo móvil en el autotransformador trifásico.



Figura 3.17 Montaje del mecanismo móvil

Fuente: Propia

3.4 Pruebas de funcionamiento

Pruebas eléctricas

- **Relación de transformación**

Esta prueba se la realiza con el TTR el cual es un comparador, es decir, es un transformador de referencia que tiene un generador, y esta comparación se ve reflejada en un amperímetro, voltímetro y un “Null Det”, que es el dispositivo que permite sincronizar un galvanómetro cuando el flujo y contra flujo magnético están balanceados.

El TTR tiene cuatro terminales: dos para colocarlos en la alta tensión y los otros dos para baja tensión; consta de una manivela la cual hace girar un imán, el mismo que genera energía que alimenta al sistema, el resultado de la comprobación es una cantidad adimensional que permite determinar si esta con

el número de espiras adecuado y cuando se le compara entre bobinas si estas tienen la misma relación.

Esta prueba es una de las más necesarias e importantes debido a que permite conocer si está bien conectado el autotransformador o tiene algún cortocircuito.

Para el cálculo de la relación de transformación por fase, se utiliza la Ecuación 3.14.

$$m = \frac{V_s}{V_p}$$

Ecuación 3.14 Relación de transformación.

De donde se obtiene:

$$m = \frac{180 (V)}{120 (V)}$$

$$m = 1,5$$

- **Resistencia de aislamiento**

La resistencia de aislamiento es una prueba que permite conocer el nivel de aislamiento que tiene el autotransformador entre baja tensión y tierra, y entre alta tensión y tierra, esta prueba se realiza con el medidor de aislamiento, con un tiempo de uno a cinco minutos a voltaje nominal, en los cuales la lectura es mucho más correcta, esta medida debe pasar de 1.4 (GΩ) en los cuales se indica un aislamiento adecuado.

Otra de las funciones del medidor de aislamiento es indicar el nivel de humedad que tiene la parte activa o inclusive el aceite en cuyo caso debe sobrepasar los 2 (Gohms), y dependiendo del voltaje puede llegar la alta tensión alcanzar valores de hasta los 10 (Gohms).

En la Tabla 3.5 y 3.6 se puede tabular los valores que se obtienen entre cada devanado respecto a tierra.

Tabla 3.5 Aislamiento en los devanados primario y secundario

Aislamiento medido en los ramales de 180(V) con respecto a tierra			
	R1 (MΩ)	R2 (MΩ)	R3 (MΩ)
Medida	24,00	24,20	24,40

Fuente: Propia

Tabla 3.6 Aislamiento en el devanado primario

Aislamiento medido en los ramales de 120 (v) con respecto a tierra			
	R1 (MΩ)	R2 (MΩ)	R3 (MΩ)
Medida	23,20	23,50	23,90

Fuente: Propia

Los valores arrojados por el medidor de aislamiento se encuentran dentro de los parámetros de un aislamiento estándar.

- **Pérdidas en vacío**

Esta prueba permite conocer las pérdidas cuando el transformador está sin carga, esta prueba se la hace con el voltaje y frecuencia nominal, la forma de onda del voltaje nominal será aproximadamente sinusoidal.

El voltaje es aplicado a uno de los bobinados mientras que el otro es dejado en circuito abierto.

La pérdida se calcula con los valores de voltaje y de corriente que arroja el voltímetro y amperímetro respectivamente, estas pérdidas son las del hierro y se dan en vatios.

Para determinar la potencia en vacío en cada ramal, se utiliza la Ecuación 3.15.

$$P = V * I * \cos \phi$$

Ecuación 3.15 Potencia en vacío de cada ramal.

De donde:

Voltaje medido = 121,8 (V)

Corriente medida = 0,16 (A)

Aplicando la Ecuación 3.15 y los valores de voltaje y corriente se tiene:

$$P_1 = V_1 * I_1 * \cos \phi$$

$$P_1 = 121,8 * 0,16 * 0,3$$

$$P_1 = 5,85 (W)$$

Las potencias en cada ramal de autotransformador trifásico son las mismas.

Por lo tanto:

$$P_1 = P_2 = P_3 = 5,85 (W)$$

- **Resistencia de bobinas**

La resistencia de los devanados o bobinas se la toma de manera muy simple con la ayuda de un Óhmetro de alta precisión, se mide la resistencia de cada devanado, estos valores son en el orden de los ohmios para las bobinas de AV y en mili-ohmios para las bobinas de BV.

En esta prueba se realiza también inyectando una intensidad de corriente, la cual ayuda a obtener la temperatura adecuada, la prueba se denomina de elevación de temperatura.

En la Tabla 3.7 y 3.8 se presenta los valores de las resistencias en los ramales de cada devanado, tanto para el AV de 180 (V), como para el BV de 120 (V) y a plena carga.

Tabla 3.7 Valores de resistencia a 180 (V)

Resistencia medidas en los ramales de 180 (V)			
Medición	R1 (Ω)	R2 (Ω)	R3 (Ω)
1	0,91	1,08	1,11
2	1,04	1,30	1,32
3	1,32	1,15	1,71
4	1,17	1,15	1,69
5	1,23	1,25	1,60
Promedio	1,13	1,19	1,49

Fuente: Propia

Tabla 3.8 Valores de resistencia a 120 (V)

Resistencia medidas en los ramales de 120 (V)			
Medición	R1 (Ω)	R2 (Ω)	R3 (Ω)
1	0,44	0,46	0,57
2	0,49	0,48	0,58
3	0,45	0,42	0,55
4	0,45	0,42	0,55
5	0,42	0,42	0,55
Promedio	0,45	0,44	0,56

Fuente: Propia

- **Pérdidas de cortocircuito.**

La prueba de corto circuito se la realiza colocando el lado de bajo voltaje en cortocircuito, se alimenta con voltaje al otro bobinado hasta llegar a la corriente nominal de este (previamente calculada), luego de este proceso se procede a tomar la lectura de las pérdidas en vatios, se toma el valor de voltaje de cortocircuito para calcular la impedancia del transformador.

Mediante esta prueba se obtiene las pérdidas en el cobre, y lo que se realiza con el cortocircuito es de conducirlo a un estado de carga máxima.

Para determinar las pérdidas en el cobre, se utiliza la Ecuación 3.16.

$$P_{cc} = I_{cc}^2 * R$$

Ecuación 3.16 Perdidas en el cobre.

Aplicando la Ecuación 3.16 y los valores de corriente máxima y resistencia en cada ramal de la Tabla 3.7 y 3.8, se tiene:

$$P_{cc1} = I_{cc}^2 * R_1$$

$$P_{cc1} = (5 A)^2 * 1,08 (\Omega)$$

$$P_{cc1} = 27 (W)$$

$$P_{cc2} = I_{cc}^2 * R_2$$

$$P_{cc2} = (5 A)^2 * 1,14 (\Omega)$$

$$P_{cc2} = 28,5 (W)$$

$$P_{cc3} = I_{cc}^2 * R_3$$

$$P_{cc3} = (5 A)^2 * 1,44 (\Omega)$$

$$P_{cc3} = 36 (W)$$

Para calcular las pérdidas totales a plena carga por ramal, se utiliza la Ecuación 3.17.

$$P_{Ti} = P_i + P_{cci}$$

Ecuación 3.17 Pérdidas totales en el cobre.

Por lo tanto, aplicando la ecuación 3.17 y los valores calculados anteriormente se tiene:

$$P_{T1} = P_1 + P_{cc1}$$

$$P_{T1} = 5,85 (W) + 27 (W)$$

$$P_{T1} = 32,85 (W)$$

$$P_{T2} = P_2 + P_{cc2}$$

$$P_{T_2} = 5,85 (W) + 28,5 (W)$$

$$P_{T_2} = 34,35 (W)$$

$$P_{T_3} = P_3 + P_{cc_3}$$

$$P_{T_3} = 5,85 (W) + 36 (W)$$

$$P_{T_3} = 41,85 (W)$$

- **Cálculo del porcentaje de pérdidas**

Para calcular el porcentaje de pérdidas por cada ramal, se utiliza la Ecuación 3.18.

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{P_T}{P_{max}}$$

Ecuación 3.18 Porcentaje de pérdidas en el cobre.

De donde se obtiene:

$$P_{max} = 923,06 (W)$$

Aplicando la Ecuación 3.18 y los valores de potencia máxima y la potencia total de pérdidas se tiene:

Porcentaje de pérdidas en el primer devanado:

$$\% \text{ Pérdidas}_1 = \frac{P_{T_1}}{P_{max}}$$

$$\% \text{ Pérdidas}_1 = \frac{32,85 (W)}{923,06 (W)}$$

$$\% \text{ Pérdidas}_1 = 0,036$$

$$\% \text{ Pérdidas}_1 = 3.6 \%$$

Porcentaje de pérdidas en el segundo devanado:

$$\% \text{ Pérdidas}_2 = \frac{P_{T2}}{P_{max}}$$

$$\% \text{ Pérdidas}_2 = \frac{34,35 (W)}{923,06 (W)}$$

$$\% \text{ Pérdidas}_2 = 0,037$$

$$\% \text{ Pérdidas}_2 = 3.7 \%$$

Porcentaje de pérdidas en el tercer devanado:

$$\% \text{ Pérdidas}_3 = \frac{P_{T3}}{P_{max}}$$

$$\% \text{ Pérdidas}_3 = \frac{41,85 (W)}{923,06 (W)}$$

$$\% \text{ Pérdidas}_3 = 0,045$$

$$\% \text{ Pérdidas}_3 = 4,5\%$$

- **Cálculo del porcentaje de rendimiento en los devanados**

En equipos de transformación mientras mayor potencia manejen son más eficientes. Esto se puede demostrar analizando cómo varían las pérdidas y cómo lo hace la potencia de la máquina. En efecto tanto las pérdidas en el hierro PFe como las del cobre PCu dependen a igualdad de condiciones de diseño y materiales de los respectivos volúmenes de hierro VFe y cobre VCu, es decir, del cubo de las dimensiones lineales.

Para determinar el porcentaje de rendimiento de cada devanado en el autotransformador trifásico, se utiliza la Ecuación 3.19.

$$\% \eta = 100 \% - \% \text{ Pérdidas}$$

Ecuación 3.19 Porcentaje de rendimiento de cada devanado.

Aplicando la Ecuación 3.19 y los valores del porcentaje de pérdidas se tiene:

Porcentaje de rendimiento en el primer devanado.

$$\% \eta_1 = 100 \% - \% \text{ Pérdidas}_1$$

$$\% \eta_1 = 100 \% - 3,6 \%$$

$$\% \eta_1 = 96,4 \%$$

Porcentaje de rendimiento en el segundo devanado.

$$\% \eta_2 = 100 \% - \% \text{ Pérdidas}_2$$

$$\% \eta_2 = 100 \% - 3,7 \%$$

$$\% \eta_2 = 96,3$$

Porcentaje de rendimiento en el tercer devanado.

$$\% \eta_3 = 100 \% - \% \text{ Pérdidas}_3$$

$$\% \eta_3 = 100 \% - 4,5 \%$$

$$\% \eta_3 = 95,5 \%$$

Pruebas funcionales

Mediante estas pruebas se verifica el cumplimiento de todos los esquemas y parámetros de la construcción del autotransformador trifásico con voltaje de salida variable, de tal manera que permitan asegurar la operación y su posterior uso del equipo para los objetivos en mención.

Dentro de estas pruebas se incluye la verificación de funcionamiento del mecanismo móvil de las escobillas, las cuales deben tener un buen contacto continuo al desplazarse sobre la superficie de los devanados del autotransformador trifásico; además, se verifica que los voltajes que entrega en las terminales del autotransformador con voltaje de salida variable sean iguales.

En la Tabla 3.9 se presenta los valores de voltajes que se obtienen al mover la varilla roscada y ubicar las escobillas en la posición mínima, media y máxima respecto a la altura de la columna sobre el cual están dispuestos los devanados.

Tabla 3.9 Valores de voltaje en circuito abierto

Posición de escobillas	Voltaje por fase (V)	Voltaje entre fases (V)
Mínima	0,2	0,4
Media	117	205
Máxima	183	322

Fuente: Propia

3.5 Adecuación final del autotransformador

Una vez que el autotransformador está probado tanto mecánicamente como eléctricamente y se ha realizado las pruebas funcionales, se procede a etiquetar los datos identificativos y de conexión, los cuales van detallados en la placa en la parte frontal del equipo de transformación.

Finalmente, el autotransformador trifásico con voltaje de salida variable es ubicado en el Laboratorio de Control Industrial de la ESFOT, para uso y disposición dentro de las instalaciones en mención.

En la Figura 3.18 se ilustra el módulo terminado con todos los elementos que constituyen tanto para su funcionamiento como para su protección.



Figura 3.18 Adecuación final del autotransformador

Fuente: Propia

3.6 Manual de mantenimiento

Las operaciones de mantenimiento y/o reparación del autotransformador trifásico con voltaje de salida variable, deben ser efectuadas por personal especializado en el tema, ya que, revisando periódicamente los parámetros de los componentes más importantes se puede asegurar un funcionamiento correcto y mayor durabilidad de los elementos que componen el equipo de transformación.

Precauciones de seguridad

Para utilizar el equipo de modo correcto y seguro, es esencial que las personas encargadas del mantenimiento y/o reparación tomen en cuenta las medidas de seguridad tanto eléctrica como mecánica, a fin de reducir los riesgos de descarga eléctrica y de lesiones.

Mantenimiento preventivo

Con el objeto de mantener el autotransformador trifásico con voltaje de salida variable en buenas condiciones se realiza un mantenimiento preventivo, el cual provee los medios para la conservación de sus elementos físicos, con una máxima eficiencia, seguridad y economía.

Mantenimiento del mecanismo móvil

La parte de los componentes más importantes a ser revisados es el mecanismo móvil del equipo, los mismos que se detallan a continuación:

- Revisar que la varilla roscada esté funcionando correctamente y con lubricación adecuada.
- Revisar y ajustar la placa porta escobillas, la misma que debe tener un movimiento suave y asegurar que tenga suficiente lubricación en sus rieles.
- Revisar que la superficie de los devanados que están en contacto con las escobillas no presenten suciedad o residuos de grasa.
- Revisar que los carbones de las escobillas estén en buen estado, a fin de mantener un contacto adecuado con la superficie de las espiras de los devanados del autotransformador.

Mantenimiento general del autotransformador

Dado que el proceso de enfriamiento consiste en la circulación de aire, el mantenimiento de los autotransformadores tipo seco es muy fácil y conveniente, entre las cuales se detallan a continuación:

- Aspirar el polvo a fondo, soplando hacia arriba de los circuitos y la estructura metálica.
- Revisar el estado del cableado en el autotransformador, el cual debe estar libre de agentes extraños, mismos que puedan cortar, lastimar, recalentar los cables e incluso producir cortocircuitos.
- Revisar y ajustar los tornillos de las borneras, con la finalidad de que exista un buen contacto con los terminales de los devanados del autotransformador.
- Verificar que los pernos y tuercas estén bien apretadas.
- Comprobar los voltajes y corrientes nominales en los terminales del autotransformador.
- Chequeo periódico del disyuntor térmico, revisar ajustes en los terminales del mismo y verificar su correcto enclavamiento.
- Verificar que la estructura metálica no presente deterioro u óxido, debido a que este se encuentra expuesto al aire libre.

Mediante estas actividades, se verifica el cumplimiento de todos los esquemas y filosofías de un control periódico, protección y medidas de prevención, de tal manera que permitan asegurar un funcionamiento correcto del equipo de transformación y evitar reparaciones a corto plazo.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

En la presente sección se detalla las conclusiones a la que se ha llegado luego de haber desarrollado la implementación del presente proyecto de construcción del autotransformador trifásico con voltaje de salida variable en función de las experiencias que se adquieren durante la ejecución del proyecto.

- Se construyó un autotransformador trifásico tipo seco, el cual se complementa con una estructura metálica para el montaje del mecanismo móvil de escobillas; este mecanismo móvil se basa en el funcionamiento de un reóstato lineal para la traslación de las escobillas de carbón en forma vertical, mismo que permite al operador girar manualmente la varilla roscada y así, obtener diferentes valores de voltaje a la salida variable del autotransformador.
- Para la construcción del autotransformador trifásico con voltaje de salida variable, se utilizó un núcleo de hierro magnético no común en el mercado con una altura de 52 (cm), sobre el cual está montado el devanado primario y secundario formando una sola capa, característica principal que fue considerado en el diseño del dispositivo, esto con la finalidad de que se acople de mejor manera el mecanismo móvil de escobillas que deslizan sobre las espiras y así obtener valores de voltaje variable en las salidas de los terminales, desde 0 (V) en la posición mínima, hasta 311 (V) en la posición máxima del equipo de transformación.
- Para la elaboración de los devanados primario y secundario del autotransformador trifásico, se utilizó alambre esmaltado redondo # 14 AWG y una máquina bobinadora de tipo horizontal semiautomática, misma que se encarga de indicar el número de espiras formadas durante el proceso de confección de los devanados.
- Para la construcción de la estructura metálica se utilizó un tubo cuadrado de hierro galvanizado de 1"x2 (mm) reciclado, que luego de ser cortado con las dimensiones correspondientes, se ensambló, utilizando suelda de corriente alterna con electrodo 6011 de revestimiento tipo celulósico.

- Una de las soluciones a la falta de una fuente de voltaje de salida variable, es la construcción de un autotransformador trifásico con voltaje de salida variable, el mismo que permite a los estudiantes de la EPN y en particular a los estudiantes de la carrera de Tecnología Electromecánica, tener a disposición un equipo de transformación para las prácticas pertinentes en el pensum de estudios del Laboratorio de Máquinas Eléctricas.
- El autotransformador construido cumple con el requerimiento de proporcionar un voltaje trifásico variable desde 0 (V) a 311 (V), con ajustes dentro del rango especificado, y proporcionando la potencia necesaria para cumplir con los objetivos establecidos en el desarrollo del presente proyecto.
- Mediante las pruebas de resistencia en los devanados, pruebas de funcionamiento en vacío y pérdidas en el cobre, se pudo constatar que el equipo construido cumple con los parámetros para el que fue diseñado; sin embargo, cabe señalar que algunas pruebas como: el voltaje aplicado, voltaje inducido, prueba de cortocircuito no pudieron realizarse, debido a que no se dispone de una fuente que proporcione un voltaje con el doble del valor nominal para el que fue construido el prototipo y además por las restricciones de acceso a los laboratorios debido a la situación actual.
- La implementación del presente proyecto, es un aporte a la falta de una fuente variable de voltaje en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas; sin embargo, puede tener muchas falencias especialmente en el sistema de variación de voltaje, por lo que se podría mejorar dicho sistema de movimiento de escobillas, acoplado dos varillas roscadas paralelas, para que el movimiento del portaescobillas sea simétrico y así evitar desfases en los valores entregados a la salida del autotransformador.
- Finalmente, en relación al costo para la ejecución del presente proyecto de construcción del autotransformador trifásico con voltaje de salida variable, y considerando que determinados elementos que los constituye son reciclados o donados, este asciende a \$800 aproximadamente en su totalidad.

4.2 Recomendaciones

Tomando en consideración los resultados arrojados en la implementación del presente proyecto, se puede enunciar las siguientes recomendaciones:

- Estudiar los manuales y fichas técnicas de diseño y construcción de equipos de transformación de voltaje, facilita los cálculos y la correcta selección de los elementos para su implementación.
- Se recomienda realizar las pruebas pendientes con el módulo implementado como son: voltaje aplicado, voltaje inducido, prueba de cortocircuito; las mismas que no se pudo realizar por la inaccesibilidad a los laboratorios que proporcionan fuentes de alimentación y equipos de medición, como es el caso del analizador industrial.
- Para el correcto uso del módulo implementado, es importante interpretar los diagramas grabados en la placa del autotransformador, esto evitará accidentes personales o cortocircuitos en el equipo de transformación.
- El mantenimiento preventivo del autotransformador es esencial para un alargamiento de su vida útil. Por lo tanto, la mayoría de las fallas producidas en estos equipos tales como: sobrecalentamiento, sobreflujo magnético, cortocircuitos en los devanados, pueden ser atribuidas al deterioro de los componentes externos, el mismo que puede ser fortalecido si se mantiene un programa completo de mantenimiento preventivo periódico orientado a combatir los factores (humedad, oxígeno, calor y contaminación) que inciden en el deterioro de los componentes del autotransformador.
- Cuando se realicen operaciones de mantenimiento se deben eliminar todos los riesgos posibles, para este caso se deben descartar los riesgos eléctricos y mecánicos en todo el equipo.
- Los componentes más sensibles en el módulo implementado, es el sistema de mecanismo móvil de escobillas para la variación de voltaje y la placa de acrílico ubicada en la parte frontal del equipo, por lo que es

importante tener mucho cuidado al momento de su utilización, así como al momento de realizar un mantenimiento al autotransformador.

- Cuando utilice el modulo, haga girar el manubrio para la variación de voltaje, asegurándose de que el portaescobillas se mueva de forma simétrica, esto a fin de obtener similares valores de voltaje por fase en las salidas del autotransformador.
- Mediante la ejecución del proyecto se pudo observar las falencias de conocimientos de los procesos productivos, por los que se sugiere tener un mayor número de visitas técnicas a empresas e industrias.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. GLOVER, M. SARMA, y T. OVERBYE, ANÁLISIS Y DISEÑO DE SISTEMAS DE POTENCIA, Quinta edición. EEUU: Ingeniería Global, 2010.
- [2] S. J. CHAPMAN, MAQUINAS ELECTRICAS, Quinta Edición. México: MC Graw Hill, 2012.
- [3] S. O. FRONTIN, EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSAO, Primera edición. Brasilia: Goya Editora LTDA, 2013.
- [4] E. E. Staff del M.I.T, CIRCUITOS MAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES, Editorial Reverté, México, 2001.
- [5] V. E. Mena Altamirano y J. P Maldonado Carvajal, Diseño y Construcción de un Transformador Trifásico para Control de Voltaje en el laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia, Quito EPN, 2017.
- [6] Raul H. Varetto MANUAL DE MECÁNICA Y ELECTRICIDAD, edición ilustrada. Tecnibook Ediciones. México. 2013.
- [7] J. J. M. ORREGO, Máquinas eléctricas, 2 edición actualizada. Ediciones Paraninfo S.A. España Badajoz, 2014.
- [8] V. TIBANLOMBO, “ESTUDIO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA MEDIANTE PRUEBAS DE IMPULSO PARA LA EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL AISLAMIENTO EN TRANSFORMADORES”, Trabajo de titulación previo a la obtención del título de ingeniero eléctrico, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2018.
- [9] C. R. i Romeva, Selección de materiales en el diseño de máquinas. Universidad Politécnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politécnica. 2010.
- [10] C.A. Chiluisa, Apuntes de clase Maquinas Eléctricas I y II, Quito E.P.N., 2008.
- [11] C.A. Chiluisa, Apuntes de clase Laboratorio de Maquinas Eléctricas I y II, Quito E.P.N., 2008.
- [12] *M.I.T., Circuitos Magnéticos y Transformadores, Reverté, Buenos Aires 1981.*
- [13] «Norma Técnica Colombiana NTC 3445 Electrotécnica. Transformadores trifásicos autorefrigerados, Tipo seco abierto y encapsulado en resina, Corriente sin carga, Pérdidas y voltaje de cortocircuito,» Bogotá, 1992.

- [14] P. Avelino Pérez, *Transformadores de distribución, Teoría, calculo, construcción y pruebas*, México: Reverté, S.A., 2001.
- [15] C. R. S.R.L, «*Calibre Americano AWG Equivalencias AWG/Milimétrica,*»
[En línea]. Available: <http://www.conductoresrg.com.ar/equivalencias-awg.pdf>. [Último acceso: 29 abril 2020].