



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

SEDE GUAYAQUIL

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

**INGENIERO ELÉCTRICO**

Proyecto Técnico

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR  
MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN 15KVA TIPO TANQUE  
PARA EL LABORATORIO DE ALTA TENSION DE LA  
UPS - GYE”**

**AUTORES:**

DIEGO ADOLFO AQUINO CASTRO

CRISTHIAN OLIVER ZUÑIGA GUACHICHULCA

**TUTOR:**

ING. OTTO WASHINGTON ASTUDILLO ASTUDILLO MAE.

**Guayaquil – Ecuador**

**2018**

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS**

Nosotros, **DIEGO ADOLFO AQUINO CASTRO**, con documento de identificación N° **0921975801**, y **CRISTHIAN OLIVER ZUÑIGA GUACHICHULCA**, con documento de identificación N° **1207072230**, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de grado titulado “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN 15KVA TANQUE PARA EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UPS - GYE**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autor nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que se hace entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, Marzo de 2018

---

**DIEGO ADOLFO AQUINO CASTRO**

**0921975801**

---

**CRISTHIAN OLIVER ZUÑIGA GUACHICHULCA**

**1207072230**

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR**

Yo, OTTO WASHINGTON ASTUDILLO ASTUDILLO, director del proyecto de titulación denominado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN 15KVA TIPO TANQUE PARA EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UPS - GYE” realizado por los estudiantes, DIEGO ADOLFO AQUINO CASTRO y CRISTHIAN OLIVER ZUÑIGA GUACHICHULCA, certifico que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, Marzo, 2018

---

Ing. Otto Washington Astudillo Astudillo MAE.

C.I.0102054871

TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACION

## **DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **DIEGO ADOLFO AQUINO CASTRO** y **CRISTHIAN OLIVER ZUÑIGA GUACHICHULCA**, autorizamos a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro. Además, declaramos que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, Marzo, 2018

---

**DIEGO ADOLFO AQUINO CASTRO**

**CI: 0921975801**

---

**CRISTHIAN OLIVER ZUÑIGA GUACHICHULCA**

**CI: 1207072230**

## **DEDICATORIAS**

Este proyecto de vida va dedicado directamente a mis padres los cuales siempre han estado motivándome para que tan anhelado propósito se haga realidad, brindándome día a día de sus sabios y valiosos consejos.

A mi hijo Diego Sebastián por ser mi fuente de motivación e inspiración para la culminación de mi proyecto de vida, pensando en un futuro por días mejores para él.

*Diego Adolfo Aquino Castro*

A Dios, por haberme permitido llegar a cumplir esta meta. A mis padres que me han brindado su apoyo durante todos estos años y que sin ellos no había podido lograrlo, siempre guiándome a hacer el bien y ser responsable con mis actividades, vida profesional y personal. Dedico este estudio a mi madre quien en esta ocasión está cerrando otro ciclo con sus hijos y que de esta forma se siente orgullosa de nosotros.

*Christian Oliver Zuñiga Guachichulca*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al padre celestial por darme la dicha de estar con vida.

A cada uno de los docentes que estuvieron de una u otra forma brindándonos de sus conocimientos y motivándonos para la culminación de nuestra carrera.

A mi madre Hilda Eugenia por ser una mujer tan maravillosa que pese a las circunstancias siempre ha estado conmigo en los buenos y malos momentos siendo con mi hijo lo más valioso que tengo, los amo mucho mis amores eternos, gracias por su comprensión, paciencia y fortaleza siendo pilares fundamentales en mi vida.

*Diego Adolfo Aquino Castro*

Sin duda Dios y mi familia son parte de todos los objetivos alcanzados a lo largo de mi vida, gracias a ellos tuve la fuerza y perseverancia de culminar mi carrera pese a las responsabilidades del trabajo y la universidad, siempre supieron darme ese apoyo que necesitaba durante las semanas aun a la distancia. Un agradecimiento especial a mi madre a quien admiro y respeto por todo lo que hemos logrado juntos con familia.

*Christian Oliver Zuñiga Guachichulca*

## ABREVIATURAS

|             |   |
|-------------|---|
| <b>ANSI</b> | Instituto Nacional Americano de Normalización             |
| <b>ASTM</b> | Asociación Americana de Ensayo de Materiales              |
| <b>AWG</b>  | Calibre de alambre estadounidense                         |
| <b>A.T</b>  | Alta tensión  |
| <b>BIL</b>  | Nivel Básico de Aislamiento                               |
| <b>Cu</b>   | Cobre   |
| <b>Fem</b>  | Fuerza Electromotriz                                      |
| <b>Fp</b>   | Factor de potencia  |
| <b>KV</b>   | Kilo voltios  |
| <b>KVA</b>  | Kilo voltios amperios                                     |
| <b>INEN</b> | Instituto Ecuatoriano de Normalización                    |
| <b>IEEE</b> | Institute of Electrical and Electronics Engineering       |
| <b>MEER</b> | Ministerio de Electricidad y Energía Renovable            |
| <b>NTC</b>  | Norma Técnica Colombiana                                  |
| <b>ONAN</b> | Oil Natural Circulation Air Natural Circulation           |
| <b>ONAF</b> | Oil Natural Circulation Air Forced Circulation            |
| <b>PCB</b>  | Bifenilos Policlorados                                    |
| <b>SEP</b>  | Sistema eléctrico de potencia                             |
| <b>THHN</b> | Thermoplastic Insulation/Nylon Sheath Heat, Oil resistant |
| <b>V</b>    | Voltios   |
| <b>W</b>    | Wattio  |
| <b>Vp</b>   | Voltaje Primario  |
| <b>Vs</b>   | Voltaje Secundario  |

## SIMBOLOGÍA

|                       |                             |
|-----------------------|-----------------------------|
| <b>A</b>              | Amperios                    |
| <b>°C</b>             | Grados Centígrados          |
| <b>C</b>              | Capacitancia                |
| <b>F</b>              | Frecuencia                  |
| <b>I</b>              | Corriente                   |
| <b>I<sub>cc</sub></b> | Corriente de cortocircuito  |
| <b>I<sub>o</sub></b>  | Corriente de vacío          |
| <b>I<sub>op</sub></b> | Corriente de operación      |
| <b>Hz</b>             | Hertz                       |
| <b>L</b>              | Inductancia                 |
| <b>Ohm</b>            | Ohmios                      |
| <b>P<sub>o</sub></b>  | Potencia vacío              |
| <b>P<sub>c</sub></b>  | Potencia cortocircuito      |
| <b>R</b>              | Resistencia                 |
| <b>V</b>              | Voltaje                     |
| <b>V<sub>p</sub></b>  | Voltaje Primario            |
| <b>V<sub>s</sub></b>  | Voltaje Secundario          |
| <b>W</b>              | Wattio                      |
| <b>X</b>              | Reactancia                  |
| <b>X<sub>C</sub></b>  | Reactancia capacitiva       |
| <b>X<sub>L</sub></b>  | Reactancia inductiva        |
| <b>Z</b>              | Impedancia                  |
| <b>Z<sub>cc</sub></b> | Impedancia de cortocircuito |



## RESUMEN

**Palabras Claves: TRANSFORMADOR CONMUTABLE; INEN; VOLTAJE DE OPERACIÓN; REDES ELÉCTRICAS.**

*La finalidad del proyecto es diseñar y construir un transformador monofásico de distribución de 15kVA tipo tanque para el laboratorio de Alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana – sede Guayaquil que permita realizar a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica pruebas de laboratorio y operar un transformador real que cumpla con las especificaciones y requerimientos técnicos que indican las normas INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) vigentes para transformadores de distribución. Se detallan los cálculos eléctricos, características eléctricas de la materia prima, dimensionamiento de los devanados y núcleo para conformar la parte activa.*

*Los procesos de producción se enlistan con el fin de dar a conocer la manufactura del transformador. Las pruebas de laboratorio para los transformadores de distribución se llevan a cabo en un laboratorio certificado, y se emite el protocolo de prueba del transformador para de esta forma corroborar los valores obtenidos teóricamente con la medición en el laboratorio. Este transformador está diseñado y construido para operar en una red de clase 15kV, ya sea a 6300 V o 7620 V por eso se le denomina transformador conmutable. Dentro del desarrollo de este proyecto se hace referencia a las vigentes normas INEN con el fin de conocer los valores máximos permitidos de pérdidas en vacío y en el cobre, nivel de aislamiento, relación de transformación. El estudio está direccionado para que se pueda contar con un transformador real operable en laboratorio de alta tensión y conocer cada parte del diseño y la construcción del mismo.*

## ABSTRACT

**Keywords: SWITCHABLE TRANSFORMER; INEN; OPERATING VOLTAGE; ELECTRICAL NETWORKS.**

*The purpose of the project is to design and build a 15kVA single-phase distribution tank type transformer for the Universidad Politécnica Salesiana - GYE high-voltage laboratory, that allows students in Electrical Engineering career to perform laboratory tests and operate a real transformer that complies with the specifications and technical requirements indicated by the standards INEN (Ecuadorian Standardization Institute) valid for distribution transformers. The electrical calculations, electrical characteristics of the raw material, dimensioning of the windings and core to form the active part are detailed.*

*The production processes are listed in order to make the manufacturing process of the transformer known. The laboratory tests for the distribution transformers are carried out in a certified laboratory, and the transformer test protocol is issued in order to corroborate the values obtained theoretically with the measurement in the laboratory. This transformer is designed and built to operate in a 15kV class network, either at 6300 V or 7620 V, which is why it is called a switchable transformer. Within the development of this project reference is made to the current INEN standards in order to know the maximum allowed values of vacuum losses and copper, insulation level, transformation ratio. The study is directed to have a real transformer operable in the high voltage laboratory and know each part of the design and construction of it.*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN.....  | 1  |
| 1. MARCO GENERAL.....  | 3  |
| 1.1. Descripción del problema .....  | 3  |
| 1.2. Importancia y alcances.....   | 4  |
| 1.3. Delimitación.....   | 4  |
| 1.4. Objetivos.....  | 5  |
| 2. MARCO TEÓRICO .....   | 6  |
| 2.1. Concepto de transformador.....  | 6  |
| 2.2. Principio de funcionamiento de un transformador .....   | 6  |
| 2.3. Clasificación .....   | 7  |
| 2.4. Condiciones de servicio .....   | 9  |
| 2.5. Normas NATSIM de la distribuidora para los transformadores en un sistema de distribución.....             | 10 |
| 2.6. Elementos principales para la construcción.....   | 11 |
| 2.7. Polaridad del transformador.....  | 19 |
| 2.8. Especificaciones técnicas generales.....  | 21 |
| 3. DISEÑO ELÉCTRICO DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN.....   | 22 |
| 3.1. Descripción del tipo de transformador monofásico de distribución conmutable 15kVA autoprotegido.....      | 22 |
| 3.2. Cálculo para los devanados primario y secundario de los transformadores de distribución monofásicos ..... | 22 |
| 3.3. Diseño eléctrico de bobina secundaria.....  | 26 |
| 3.4. Diseño del núcleo.....  | 28 |
| 3.5. Dimensiones de la bobina secundaria.....  | 34 |
| 3.6. DISEÑO ELÉCTRICO DE BOBINAS PRIMARIAS .....   | 34 |
| 3.7. Cálculo de la distancia entre ejes .....  | 50 |
| 3.8. Cálculo del cobre bobina de baja tensión .....  | 54 |
| 3.9. Cálculo del cobre bobina de alta tensión .....  | 55 |
| 3.10. Cálculos para el dimensionamiento del tanque.....  | 55 |
| 3.11. Cálculo de potencia a disipar a 85°C, posición 2.....  | 56 |
| 3.12. Bobinado .....   | 64 |

|  |     |
|--|-----|
| 4. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN.....  | 66  |
| 4.1. Descripción .....   | 66  |
| 4.2. Construcción del transformador en C.A MORETRAN.....   | 67  |
| 5. PRUEBAS ELÉCTRICAS EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.....  | 82  |
| 5.1 Pruebas eléctricas.....  | 82  |
| 5.2 Formato de protocolo de pruebas NTE INEN 2138:2013 .....   | 82  |
| 5.3 Pruebas eléctricas requeridas en transformadores de distribución monofásicos. ....                                     | 83  |
| 5.4 Información general del transformador .....  | 84  |
| 5.5 Pruebas de rutina para el transformador autoprotegido 15kVA .....  | 85  |
| 5.6 Líquido aislante.....  | 86  |
| 5.6.1 Método de prueba estándar para voltaje de ruptura dieléctrico de los líquidos aislantes usando electrodos Vdel. .... | 86  |
| 5.7. Prueba de resistencia de aislamiento .....  | 90  |
| 5.7.1. Resultado De Prueba De Resistencia De Aislamiento.....  | 92  |
| 5.8. Prueba De Relación De Transformación .....  | 94  |
| 5.8.1 Resultado de prueba de relación de transformación a 6300 V.....  | 96  |
| 5.8.2 Resultado de prueba de relación de transformación a 7620 V.....  | 98  |
| 5.9. Resistencia entre terminales.....   | 99  |
| 5.9.1. Resultado de prueba medición de resistencia entre terminales – 6300 V. 102  |     |
| 5.9.2 Resultado de prueba medición de resistencia entre terminales – 7620 V 103  |     |
| 5.10 Prueba sin carga .....  | 103 |
| 5.10.1 Resultado de la prueba sin carga.....   | 105 |
| 5.11. Prueba de sobre-excitación .....   | 105 |
| 5.11.1 Resultado de la prueba de sobre-excitación.....   | 107 |
| 5.12. Prueba de cortocircuito .....  | 107 |
| 5.12.1. Resultado de la prueba de cortocircuito – 6300 V .....   | 110 |
| 5.12.2. Resultado de la prueba de cortocircuito – 7620 V .....   | 111 |
| 5.13. Ensayo de aislamiento.....   | 112 |
| 5.13.1. Resultados de la pruebas de aislamiento .....  | 115 |
| 5.14. Regulación a plena carga a $f_p = 0,8$ (%). ....   | 115 |

|                                  |  |     |
|----------------------------------|--|-----|
| 5.14.1.                          | Resultado de la regulación a plena carga $f_p=0.8$ (%) - 6300 V.....         | 116 |
| 5.14.2.                          | Resultado de la regulación a plena carga $f_p=0.8$ (%) - 7620 V.....         | 117 |
| 5.15.                            | Rendimiento a plena carga a $f_p = 0,8$ (%).....                             | 118 |
| 5.15.1.                          | Resultado de rendimiento a plena carga a $f_p=0,8$ (%) – 6300 V....          | 119 |
| 5.15.2.                          | Resultado de rendimiento a plena carga a $f_p=0,8$ (%) – 7620 V....          | 119 |
| 5.16.                            | Características mecánicas.....   | 119 |
| 5.17                             | Modelo real del transformador / 7620 V .....                                 | 120 |
| 5.18                             | Resumen del funcionamiento de los dos conmutadores del transformador.<br>123 |     |
| CONCLUSIONES.....                |  | 131 |
| RECOMENDACIONES .....            |  | 132 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... |  | 133 |

## INDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1:</b> Funcionamiento de dos conmutadores en el devanado primario del transformador ..... | 5  |
| <b>Figura 2:</b> Núcleo tipo columna .....  | 7  |
| <b>Figura 3:</b> Transformador convencional monofásico .....  | 8  |
| <b>Figura 4:</b> Transformador Autoprotegido Monofásico .....                                       | 9  |
| <b>Figura 5:</b> Máquina para bobinar devanados de alta tensión.....                                | 12 |
| <b>Figura 6:</b> Bobinas aisladas con papel presspan.....   | 13 |
| <b>Figura 7:</b> Máquina de corte unicore para lámina de acero.....                                 | 14 |
| <b>Figura 8:</b> Acero al silicio .....   | 14 |
| <b>Figura 9:</b> Parte activa de transformadores monofásicos .....                                  | 15 |
| <b>Figura 10:</b> Tanque de transformador .....   | 17 |
| <b>Figura 11:</b> Tipo de polaridad .....   | 19 |
| <b>Figura 12:</b> Curva de Lámina de acero 27ZH100 .....  | 29 |
| <b>Figura 13:</b> Medidas a considerar del núcleo .....   | 30 |
| <b>Figura 14:</b> Planos de dimensiones reales del núcleo.....                                      | 31 |
| <b>Figura 15:</b> Parte activa del transformador en el tanque .....                                 | 50 |
| <b>Figura 16:</b> Plano dimensional del transformador autoprotegido .....                           | 56 |
| <b>Figura 17:</b> Pérdidas en vacío clase 15kV, potencia nominal .....                              | 61 |
| <b>Figura 18:</b> Pérdidas con carga clase 15kV, potencia nominal .....                             | 62 |
| <b>Figura 19:</b> Pérdidas en vacío clase 25kV y 34.5kV, potencia nominal .....                     | 62 |
| <b>Figura 20:</b> Pérdidas con carga clase 25kV y 34.5kV, potencia nominal .....                    | 63 |
| <b>Figura 21:</b> Proceso de corte, armado y recocido del núcleo .....                              | 68 |
| <b>Figura 22:</b> Horno de secado de partes activas.....  | 68 |
| <b>Figura 23:</b> Selección del carrete para bobinas .....  | 70 |
| <b>Figura 24:</b> Proceso de confección de arrollamiento de baja tensión .....                      | 70 |
| <b>Figura 25:</b> Devanado de baja tensión.....   | 71 |
| <b>Figura 26:</b> Proceso de confección de arrollamiento de alta tensión .....                      | 71 |
| <b>Figura 27:</b> Ensamble de devanados de alta y baja tensión.....                                 | 72 |
| <b>Figura 28:</b> Selección de la brida para el transformador .....                                 | 72 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 29:</b> Proceso de producción y rolado de tanque de lámina de acero al carbón                             | 73  |
| <b>Figura 30:</b> Soldadura y uniones de tanque de lámina de acero al carbón  | 74  |
| <b>Figura 31:</b> Tanque terminado  | 75  |
| <b>Figura 32:</b> Proceso de prensado de las bobinas de alta y baja tensión   | 76  |
| <b>Figura 33:</b> Parte activa del transformador  | 76  |
| <b>Figura 34:</b> Prueba de conexiones y resistencia de aislamiento   | 78  |
| <b>Figura 35:</b> Prueba de relación de transformación antes de encubar la parte activa al tanque del transformador | 78  |
| <b>Figura 36:</b> Proceso de secado de la parte activa  | 79  |
| <b>Figura 37:</b> Montaje de la parte activa al tanque  | 80  |
| <b>Figura 38:</b> Proceso de encubado del transformador   | 81  |
| <b>Figura 39:</b> Pruebas eléctricas al transformador   | 81  |
| <b>Figura 40:</b> Formato de certificado de pruebas para transformadores  | 83  |
| <b>Figura 41:</b> Equipo para medir la rigidez dieléctrica del aceite   | 90  |
| <b>Figura 42:</b> Equipo para medir la resistencia de aislamiento   | 92  |
| <b>Figura 43:</b> Equipo para medir la relación de transformación   | 95  |
| <b>Figura 44:</b> Equipo para medir la resistencia entre terminales   | 101 |
| <b>Figura 45:</b> Transformador utilizado para realizar la prueba sin carga   | 104 |
| <b>Figura 46:</b> Transformador utilizado para realizar la prueba de cortocircuito                                  | 108 |
| <b>Figura 47:</b> Valores en Alta Tensión, Baja Tensión reales  | 120 |
| <b>Figura 48:</b> Modelo real - 7620 V  | 122 |
| <b>Figura 49:</b> Modelo real - 240 V   | 123 |
| <b>Figura 50:</b> Modelo real / valores reales  | 123 |
| <b>Figura 51:</b> Funcionamiento de los dos conmutadores de cinco posiciones  | 124 |
| <b>Figura 52:</b> Funcionamiento de conmutador de 5 posiciones 15KVA 6300 / 7620 V                                  | 126 |
| <b>Figura 53:</b> Prueba de relación fundamental de transformación realizada con instrumento TTR-20                 | 129 |
| <b>Figura 54:</b> Protocolo de pruebas a transformador – 6300 V   | 137 |
| <b>Figura 55:</b> Protocolo de pruebas a transformador – 7620 V   | 138 |

## INDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1:</b> Separación entre terminales de bujes de bajo voltaje .....  | 16 |
| <b>Tabla 2:</b> Relaciones de voltaje nominal del sistema, voltaje máximo del sistema y nivel básico de aislamiento NBA (BIL).....    | 21 |
| <b>Tabla 3:</b> Relación de voltaje en las 5 posiciones del tap.....  | 23 |
| <b>Tabla 4:</b> Relación de corriente en las 5 posiciones del tap .....   | 23 |
| <b>Tabla 5:</b> Tabla de alambre redondo esmaltado (calibres, densidad y sección). .....  | 24 |
| <b>Tabla 6:</b> Tabla de platinas de cobre esmaltadas.....  | 25 |
| <b>Tabla 7:</b> Lámina de acero para el núcleo. ....  | 29 |
| <b>Tabla 8:</b> Medidas para la construcción del núcleo (Lazo) .....  | 31 |
| <b>Tabla 9:</b> Longitud de bobina de baja tensión .....  | 34 |
| <b>Tabla 10:</b> Aislamiento contra el yugo bobina de baja tensión .....  | 34 |
| <b>Tabla 11:</b> Numero de espiras bobina 7620 V.....   | 37 |
| <b>Tabla 12:</b> Aislamiento contra el yugo bobina 7620 V .....   | 41 |
| <b>Tabla 13:</b> Capas de papel bobina 7620 V .....   | 42 |
| <b>Tabla 14:</b> Diferencia de espiras.....   | 44 |
| <b>Tabla 15:</b> Aislamiento contra el yugo bobina 6300 V .....   | 49 |
| <b>Tabla 16:</b> Capas de papel bobina 6300 V .....   | 50 |
| <b>Tabla 17:</b> Eje transversal.....   | 51 |
| <b>Tabla 18:</b> Eje Longitudinal.....  | 52 |
| <b>Tabla 19:</b> Calculo del TCC .....  | 53 |
| <b>Tabla 20:</b> Detalle de longitud de las espiras de alta tensión. ....   | 54 |
| <b>Tabla 21:</b> Detalle de longitud de las espiras de baja tensión. ....   | 54 |
| <b>Tabla 22:</b> Detalle de espiras de baja tensión.....  | 54 |
| <b>Tabla 23:</b> Detalle de longitud y peso .....   | 55 |
| <b>Tabla 24:</b> Pérdidas resistivas AT .....   | 56 |
| <b>Tabla 25:</b> Perdidas resistivas baja tensión .....   | 58 |
| <b>Tabla 26:</b> Perdidas resistivas totales A.T.+B.T.....  | 59 |
| <b>Tabla 27:</b> Transformadores monofásicos de 3 a 333KVA clase medio voltaje <25kV clase de voltaje < 1.2 kV referidos a 5ª C ..... | 63 |
| <b>Tabla 28:</b> Pérdidas del diseño monofásico.....  | 64 |
| <b>Tabla 29:</b> Bobinado de baja tensión – 6300 / 7620V .....  | 64 |



|  |     |
|--|-----|
| <b>Tabla 30:</b> Bobinado de alta tensión – 6300 / 7620V .....                                       | 64  |
| <b>Tabla 31:</b> Capas de bobinado de alta tensión – 6300 / 7620 V .....                             | 65  |
| <b>Tabla 32:</b> Información general para producción del transformador .....                         | 85  |
| <b>Tabla 33:</b> Características eléctricas del transformador – 6300 V .....                         | 85  |
| <b>Tabla 34:</b> Características eléctricas del transformador – 7620 V .....                         | 86  |
| <b>Tabla 35:</b> Resultados de la prueba de líquido aislante .....                                   | 86  |
| <b>Tabla 36:</b> Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento .....                         | 93  |
| <b>Tabla 37:</b> Conmutador de cinco posiciones 6300 V .....   | 96  |
| <b>Tabla 38:</b> Resultados de la prueba de relación de transformación - 6300 V. ....                | 97  |
| <b>Tabla 39:</b> Posición 1 del selector de voltaje – 6300 V.....                                    | 97  |
| <b>Tabla 40:</b> Resultados de la prueba de relación de transformación - 7620 V. ....                | 98  |
| <b>Tabla 41:</b> Posición 2 del selector de voltaje – 7620 V.....                                    | 99  |
| <b>Tabla 42:</b> Conexión de cables para la prueba de medición de resistencia entre terminales ..... | 102 |
| <b>Tabla 43:</b> Resultados de la prueba de medición de resistencia entre terminales – 6300 V .....  | 102 |
| <b>Tabla 44:</b> Resultados de la prueba de medición de resistencia entre terminales – 7620 V .....  | 103 |
| <b>Tabla 45:</b> Resultado de la prueba sin carga .....  | 105 |
| <b>Tabla 46:</b> Panel de medición para la prueba sin carga.....                                     | 106 |
| <b>Tabla 47:</b> Resultado de la prueba de sobre-excitación.....                                     | 107 |
| <b>Tabla 48:</b> Panel de medición para prueba de cortocircuito.....                                 | 109 |
| <b>Tabla 49:</b> Criterios de aprobación al terminar la prueba de cortocircuito .....                | 109 |
| <b>Tabla 50:</b> Resultado de la prueba de cortocircuito – 6300 V .....                              | 110 |
| <b>Tabla 51:</b> Resultado de la prueba de cortocircuito – 7620 V .....                              | 111 |
| <b>Tabla 52:</b> Criterios de aprobación o rechazo para la prueba de voltaje aplicado....            | 113 |
| <b>Tabla 53:</b> Criterios de aprobación o rechazo para la prueba de voltaje inducido ...            | 114 |
| <b>Tabla 54:</b> Resultado de las pruebas de aislamiento .....                                       | 115 |
| <b>Tabla 55:</b> Resultado de regulación a plena carga a $f_p=0.8$ – 6300 V .....                    | 117 |
| <b>Tabla 56:</b> Resultado de regulación a plena carga a $f_p=0.8$ – 7620 V .....                    | 117 |
| <b>Tabla 57:</b> Resultado de rendimiento a plena carga a $f_p=0.8$ – 6300 V .....                   | 119 |
| <b>Tabla 58:</b> Resultado de rendimiento a plena carga a $f_p=0.8$ – 7620 V .....                   | 119 |
| <b>Tabla 59:</b> Características mecánicas del transformador.....                                    | 120 |
| <b>Tabla 60:</b> Funcionamiento del selector de voltaje en posición 1 – 2.....                       | 125 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Tabla 61:</b> Selector de voltaje en posición 2. ....   | 127 |
| <b>Tabla 62:</b> Relación fundamental de transformación valores de laboratorio y teóricos<br>..... | 128 |
| <b>Tabla 63:</b> Prueba de laboratorio – Megger TTR 20.....  | 130 |

# INTRODUCCIÓN

Actualmente un SEP (sistema eléctrico de potencia) está constituido por la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica es de suma importancia el área de distribución en el cual intervienen: las subestaciones eléctricas, redes de media y baja tensión, transformadores de distribución hasta el sistema de medición que es instalada por la empresa distribuidora para dar servicio a las áreas residenciales, comerciales e industriales en el área de concesión urbana o rural que les compete.

El correcto funcionamiento de los transformadores de distribución, son parte esencial en las redes de media y baja tensión esperando que el suministro de energía eléctrica llegue de una manera continua y confiable a los usuarios.

El tema del proyecto de titulación propuesto es “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN 15KVA TIPO TANQUE PARA EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UPS - GYE”, el cual se desarrolló el cálculo, diseño y construcción del transformador que va a ser utilizado en el laboratorio de alta tensión; realizando sus respectivas pruebas, el reconocimiento físico de las partes principales y el funcionamiento del mismo.

El propósito de este proyecto es detallar el proceso de diseño y construcción del transformador de distribución ya que actualmente existen fábricas nacionales las cuáles cuentan con proceso de manufactura calificado para cumplir las normas exigidas por el Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN y Ministerio de Electricidad y Energía Renovable MEER para que los transformadores puedan ser instalados en el sistema de distribución nacional.

El diseño del transformador propuesto tuvo la particularidad de poder ser utilizado para dos diferentes niveles de tensión en el lado primario, ya sea a 6300 V o 7620 V, esto no es común en los transformadores de distribución solicitados por las empresas eléctricas de cada provincia del país, sin embargo tiene un gran uso en la sierra y Amazonía debido a la nueva matriz energética del Ecuador y la inserción de nuevos sistemas de generación en el país, los cuáles a mediano plazo se tiene previsto elevar el nivel de tensión de 15 kV hasta 25 kV.

Además se evaluó y comparó los valores de las pruebas realizadas en el laboratorio de la C.A. MORETRAN y los resultados de los cálculos teóricos para de esta forma confirmar la eficiencia del diseño realizado y el transformador fabricado.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO GENERAL

En este capítulo se describen los problemas que se presentan. Se explica el planteamiento de la solución para resolver estos inconvenientes y a la vez mejorar el proceso de aprendizaje enfocándonos en los conocimientos de diseño eléctrico para la fabricación de transformadores de distribución.

### 1.1. Descripción del problema

En las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil existe un laboratorio de alta tensión destinado a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica en el cuál se efectúan diversas prácticas, pruebas de equipos y de materiales eléctricos aislantes. Parte de las prácticas a realizarse en este laboratorio tienen que ver con pruebas eléctricas a transformadores de distribución tipo tanque como lo son pruebas de relación fundamental de transformación, resistencia de aislamiento, rigidez dieléctrica, etc.

Uno de los problemas que afrontan los estudiantes al momento de realizar las prácticas en el laboratorio de alta tensión es no contar con un transformador totalmente operable que sea diseñado de acuerdo a las vigentes normas del INEN y construido de acuerdo a las vigentes normas del MEER.

De esta deficiencia parte la iniciativa de hacer el diseño y construcción del transformador monofásico autoprotegido conmutable de distribución de 15kVA para que sea suministrado al laboratorio de alta tensión y pueda ser utilizado por los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica.

Los estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana puedan desarrollar diferentes prácticas que conlleven a la utilización e inserción de un transformador de distribución monofásico durante sus estudios académicos reforzando los conocimientos adquiridos en las aulas de clases.

## **1.2. Importancia y alcances**

La importancia de este proyecto radica en la utilidad que se le dará al transformador de distribución monofásico tipo tanque en el laboratorio de alta tensión siendo utilizado por los docentes y estudiantes en el proceso de las diferentes prácticas a desarrollar en sus estudios académicos, complementando así los conocimientos recibidos de manera teórica en las asignaturas de la carrera, con el perfeccionamiento de prácticas orientadas a un modelo real.

Una de las ventajas y beneficios de este transformador autoprotegido conmutable es que podrá trabajar a dos diferentes niveles de tensión primaria, por lo que en las prácticas a realizarse tales como: relación de transformación, tensión de ruptura, rigidez dieléctrica, etc., podrán hacerse análisis a dos niveles diferentes de tensión con un solo equipo.

El alcance del proyecto se limita a realizar una guía donde se explique el diseño, procesos en la construcción, características eléctricas y mecánicas del transformador monofásico autoprotegido conmutable de distribución de 15 kVA bajo las normas anteriormente mencionadas para que de esta forma pueda ser bien utilizado y maniobrado por los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la UPS – GYE.

## **1.3. Delimitación**

Este proyecto consiste en el Diseño y construcción de un transformador monofásico autoprotegido conmutable de distribución de 15kVA tipo tanque para el laboratorio de alta tensión de la UPS – GYE bajo las normas nacionales detalladas a continuación:

- Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN.
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable MEER.

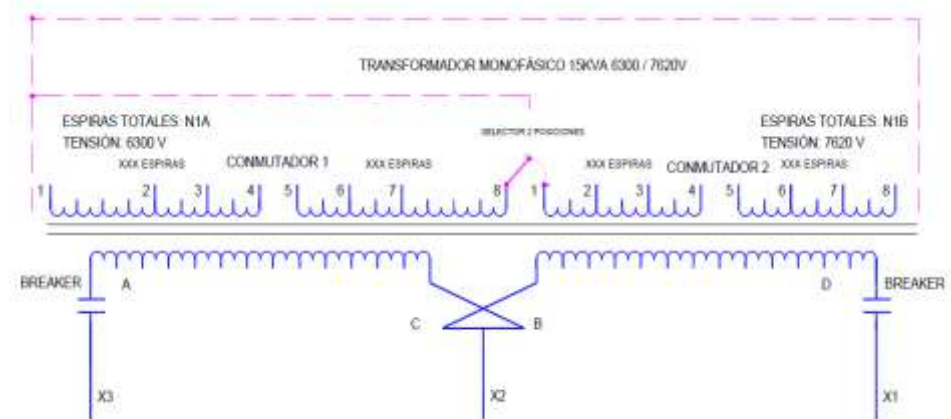
## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo generales

Diseñar y construir un transformador monofásico autoprotegido de distribución de 15kVA tipo tanque para ser utilizado en el laboratorio de alta tensión por los estudiantes de Ingeniería Eléctrica de la UPS – GYE.

### 1.4.2. Objetivos específicos

1. Elaborar el diseño eléctrico de un transformador monofásico autoprotegido conmutable de distribución de 15 kVA tipo tanque que cumpla con las vigentes normas INEN. Características eléctricas:
  - Voltaje primario 1: 6300 V
  - Voltaje primario 2: 7620 V
  - Voltaje secundario: 120 / 240 V
  - Taps: +1x2.5%, -3x2.5% (Posición nominal 2).
2. Analizar el funcionamiento de los dos conmutadores de cinco posiciones de tal forma que los pasos cumplan la relación de transformación en un 2.5%.



**Figura 1:** Funcionamiento de dos conmutadores en el devanado primario del transformador

Fuente: Los autores

3. Desarrollar una guía con el proceso de construcción del transformador y pruebas eléctricas a realizarse para elaborar el protocolo del equipo.

# CAPÍTULO II

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Concepto de transformador

Un transformador de distribución es una máquina eléctrica estática empleada para cambiar el nivel de tensión, ya sea de medio voltaje a bajo voltaje o viceversa basándose en el fenómeno de inducción electromagnética sin variar la frecuencia.

La eficiencia de un transformador es bastante alta al tratarse de una máquina estática, este porcentaje de pérdidas depende del diseño, tamaño y materiales utilizados en la construcción del mismo.

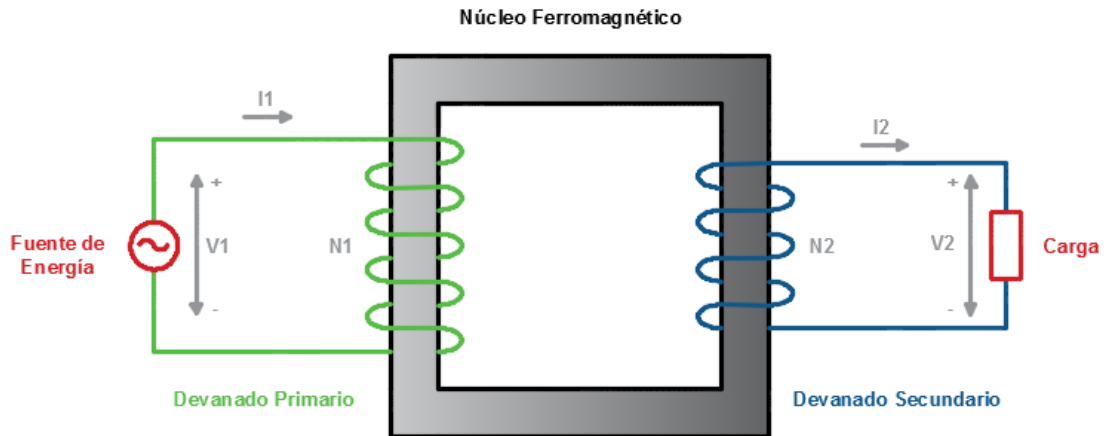
Los transformadores por ser estáticos y no poseer partes giratorias tienen muchas ventajas en comparación con las máquinas rotativas ya que requieren poca vigilancia y escasos gastos de conservación.

El costo por kilowatts es bajo comparado con el de otros aparatos y su rendimiento es muy superior. Como no hay dientes, ranuras, ni órganos giratorios, y sus arrollamientos pueden estar sumergidos en aceite, no es difícil lograr un buen aislamiento para muy altas tensiones [1].

### 2.2. Principio de funcionamiento de un transformador

El transformador es una máquina eléctrica que por inducción electromagnética transfiere energía eléctrica. Al acoplar un voltaje alterno  $V_1$  al devanado primario del transformador, transitará una corriente por el que genera un flujo magnético en el núcleo ferromagnético. Este flujo magnético en justicia a la Ley de Faraday, induce en el devanado secundario una fuerza electromotriz (f.e.m.) que dará como resultado un voltaje  $V_2$  en los bornes del devanado secundario. De este modo se obtiene transformar un voltaje alterno de valor eficaz  $V_1$  en otra de valor eficaz  $V_2$  con la misma frecuencia.





**Figura 2:** Núcleo tipo columna

Fuente: Los autores

## 2.3. Clasificación

Los transformadores de distribución se clasifican en:

- Por su operación: distribución y potencia
- Por el número de fases: monofásicos y trifásicos
- Por su utilización: generación, subestación y distribución
- De distribución: potencial y corriente
- Por las condiciones de servicio: interior e intemperie

Por ser muy amplio el estudio de los transformadores, en el presente trabajo de titulación estará enfocado a los transformadores de distribución monofásicos.

### 2.3.1. Transformadores de distribución

Son aquellos que reducen la tensión de distribución a tensiones aplicables en zonas de consumo, es decir a baja tensión. Ya sea para el sector residencial, industrial, alumbrado público, comercial, etc. Estos transformadores pueden ser de dos tipos:

- 1) Convencionales
- 2) Autoprotegidos

### 2.3.2. Transformadores convencionales

Los transformadores convencionales monofásicos tienen condición de servicio Exterior – Continuo. Instalación en poste, cámara o cabina. Estos transformadores no poseen protecciones eléctricas en media y baja tensión.

La parte activa está inmersa en aceite mineral dentro de un tanque sellado y accesorios normales para su funcionamiento. Constan de dos bushing de media tensión y un terminal de tierra ya que pueden ser instalados con diferentes tipos de conexiones formando un banco de dos o tres transformadores y obtener servicio trifásico o en servicio monofásico con un solo transformador.

Estos transformadores se fabrican en potencias desde 5kVA hasta 333kVA, acorde a la necesidad del cliente/proyecto al que vaya a dar el servicio.



**Figura 3:** Transformador convencional monofásico

Fuente: C.A. MORETRAN [2]

### 2.3.3. Transformadores autoprotegidos

Los transformadores autoprotegidos además de su parte activa y accesorios normales para su funcionamiento, elementos de protección contra: sobretensiones, sobrecargas y cortocircuitos, incluyen pararrayo en media y baja tensión, fusible de expulsión, interruptor termomagnético y luz piloto.

Estos transformadores normalmente son de uso para sistemas de distribución residencial debido a que pueden trabajar a plena carga o sobrecargados por un lapso de tiempo, sí la sobrecarga continúa el breaker se abre para que se sustituya el transformador por uno de mayor capacidad. El breaker es operable con pértiga y puede ser abierto o cerrado con carga o en vacío desde el piso por personal de la empresa eléctrica.

Los transformadores autoprotegidos se fabrican a partir de 5kVA hasta 75kVA según lo que indican las especificaciones particulares – transformadores monofásicos del MEER [3].



**Figura 4:** Transformador Autoprotegido Monofásico

Fuente: C.A. MORETRAN [2]

## **2.4. Condiciones de servicio**

### **2.4.1. Servicio**

Las condiciones de servicio para los transformadores monofásicos de distribución son Exterior – Continuo, se conoce que estas máquinas una vez que son energizadas pueden trabajar durante las 24 horas del día y los 365 días del año.

### **2.4.2. Montaje**

Los transformadores monofásico tipo convencional pueden ser montados en poste, cámara o cabina; esto depende del diseño eléctrico que se haya presentado y aprobado en la empresa eléctrica local. Generalmente para transformadores que van a dar servicio monofásico el montaje debe ser en poste o estructura H dependiendo de

la potencia del transformador a instalar. Cuando se va a conectar un banco de transformadores para brindar el servicio trifásico la instalación es en cabina o estructura H.

Los transformadores monofásicos autoprotectidos son de instalación únicamente en poste con acometidas aéreas, para el montaje de los transformadores en poste se utilizan herrajes para la sujeción de los transformadores y brindar las seguridades adecuadas a los peatones.

### **2.4.3. Tipo de refrigeración**

Es necesario añadir sistemas de refrigeración a los transformadores de distribución, ya que el calor que se produce dentro de la cuba del transformador puede llegar a dañar los materiales aislantes de los devanados. Para que el transformador tenga una operación continua y en condiciones normales existen varios tipos de refrigeración las cuáles son:

- Tipo ONAN (Oil Natural circulation Air Natural circulation): Este tipo de refrigeración se basa en la circulación natural del aceite y del aire en los radiadores. En todos los transformadores de distribución menores a 2000 kVA se emplea este tipo de refrigeración.
- TIPO ONAF (Oil Natural circulation Air Forced circulation): Este tipo de refrigeración se realiza mediante la circulación natural del aceite y ventilación forzada de aire a los radiadores. Se utiliza la refrigeración ONAN en transformadores de distribución desde 2000kVA hasta 3000kVA y en transformadores tipo subestación de 5MVA en adelante; donde a través de la ventilación forzada se busca elevar la potencia nominal del equipo en horarios de alta demanda.

## **2.5. Normas NATSIM de la distribuidora para los transformadores en un sistema de distribución**

El Distribuidor proveerá e instalará sus transformadores en su sistema de distribución, para consumidores con una demanda de hasta 30 kW, siempre que no se localicen situados en urbanizaciones o lotizaciones donde existan escenarios especiales.

Si la demanda excede de 30 kW, el consumidor proveerá e instalará sus propios transformadores dentro de un cuarto idóneo para el efecto, cuya capacidad, voltajes de primario, secundario y tipo de conexión se detallará en el diagrama unifilar del proyecto eléctrico que se mostrará al distribuidor para su aprobación [4].

Si se prevé la instalación de un solo transformador monofásico, este será máximo de 100 kVA y podrá ser del tipo convencional o autoprotegido; pero si se piensa en la instalación de un banco de transformadores, cada unidad monofásica que lo conforma será del tipo convencional y apropiado para ser utilizado en un sistema eléctrico de 13,800Y/7,977 voltios en el lado primario y 120/240 voltios en el lado secundario, con derivaciones de 2.5 % arriba y abajo de su voltaje nominal [4].

Todos los transformadores monofásicos a instalarse cumplirán con la norma **INEN 2114:2004** y los transformadores trifásicos con la norma Técnica Ecuatoriana **INEN 2115:2004**.

## **2.6. Elementos principales para la construcción**

Un transformador consta de algunas partes esenciales, en el proceso de producción participan diversas áreas mecánicas y eléctricas cuyos subproductos conforman la base del transformador final.

Todo proceso constructivo parte de un requerimiento y/o de una necesidad, ya sea para una industria o sector residencial, con lo cual el departamento de producción genera toda la documentación con los requisitos solicitados por el cliente.

### **2.6.1. Bobinas**

El proceso constructivo arranca con la fabricación de las bobinas, para esto se usan bobinadoras horizontales.



**Figura 5:** Máquina para bobinar devanados de alta tensión

Fuente: C.A. MORETRAN [2]

Las bobinas tienen como componente principal el cobre, tanto para el bobinado primario como para el secundario, se fabrican con conductores de cobre electrolítico de alto grado de pureza y se aíslan con papeles especiales como es kraft presspan con clase de aislamiento tipo A del tipo DPP (Diamond Dotted Paper) que contiene rombos de resina epóxica la cual permite mejor adherencia del conductor con el papel aislante.

Los devanados de alta tensión se fabrican con alambres esmaltados, mientras que las bobinas de baja tensión se construyen con láminas de cobre o pletinas de cobre forradas de papel.

La bobina primaria se conecta a la red de media tensión de la empresa eléctrica y la bobina secundaria o de baja tensión se encarga de suministrar la energía eléctrica a las cargas.



**Figura 6:** Bobinas aisladas con papel presspan

Fuente: C.A. MORETRAN [2]

### **2.6.2. Núcleo magnético**

El núcleo del transformador es fabricado con lámina de acero al silicio de grano orientado de bajas pérdidas, ambas caras de la lámina de cobre tienen un aislante conocido como carlite de 0.01 mm de espesor, y su función principal es conducir el flujo magnético generado por las bobinas. Para este proceso se utiliza lámina de acero al silicio de alta calidad y bajas pérdidas, además para su corte y elaboración se procesa en uncore para la producción de los núcleos del tipo enrollado.

Para los transformadores de distribución, la tecnología uncore proporciona un sistema de producción preciso y fiable, altamente flexible con todas las ventajas inherentes de la tecnología de núcleo enrollado, como núcleos de muy bajas pérdidas, rápido ensamble y una alta producción en relación con la inversión de capital. Actualmente existen varios tipos de láminas de acero al silicio en diferente espesor, pérdidas por kilo y procedencia.



**Figura 7:** Máquina de corte uncore para lámina de acero

Fuente: C.A. MORETRAN [2]



**Figura 8:** Acero al silicio

Fuente: C.A. MORETRAN [2]

La diferencia entre usar un tipo de acero u otro tiene, como finalidad comparar los datasheet de cada fabricante donde se detallan los valores de pérdidas por kilo (W/kg) que aseguran en cada uno de sus productos, mientras el acero sea de menor calidad (mayor factor de pérdidas por kilo) se necesita hacer un diseño del núcleo menos robusto pero con mayor número de espiras en las bobinas para de esta forma compensar y asegurar que el transformador cumpla con lo requerido en la tabla 1 de norma NTE INEN 2114 donde se indica que las pérdidas a vacío para un



transformador de distribución sumergido en aceite de 15kVA clase 15kV deben ser menores o iguales a 68 W [5].

Si la lámina de acero es de mejor calidad (menor factor de pérdidas por kilo), el núcleo podrá ser más robusto y de menores pérdidas asegurando de esta forma la prueba de vacío de los transformadores.

### **2.6.3. Parte activa**

La unidad conformada por el núcleo, las bobinas y las bridas de ensamble se conoce como la parte activa. Las configuraciones más utilizadas son las conformadas por dos núcleos y una bobina para transformadores monofásicos y cuatro núcleos y tres bobinas para transformadores trifásicos.



**Figura 9:** Parte activa de transformadores monofásicos

Fuente: C.A. MORETRAN [2]

Luego que se ha efectuado el ensamble de la parte activa, un paso determinante para la confiabilidad del transformador es el proceso de secado el cual consiste en someter a esta unidad o más unidades de partes activas a un proceso de horneado a una temperatura de 110°C, para eliminar la humedad de los aislamientos, durante un lapso de tiempo que depende del tamaño de la bobina y la capacidad del transformador.

Este proceso de secado es fundamental para asegurar las propiedades eléctricas de la lámina de acero garantizadas por los fabricantes en sus datasheet, ya que luego de

pasar por el proceso de corte y ensamble junto con la bobina, la lámina es sometida a procesos destructivos y con esta etapa en producción se recupera gran parte de sus propiedades.

#### 2.6.4. Bushing de media y baja tensión

Los bushings de media tensión son los accesorios que permiten energizar el transformador desde la red primaria, se dimensionan a partir de la clase de voltaje al que va a ser utilizado el transformador, mientras más alto es el voltaje primario el bushing debe ser de mayor aislamiento, voltaje de operación MCOV y longitud. Los terminales de alto voltaje deben tener un conector tipo ojo sin soldadura, según lo indicado en el punto 3.10.2 Terminales a) de la norma NTE INEN 2139 [6].

Los bushings de baja tensión son los que permiten energizar las cargas instaladas del transformador, para transformadores de distribución la norma NTE INEN 2139 lo indica en el punto 3.10.2 Terminales b) de la norma NTE INEN 2139 [6]

Los terminales de bajo voltaje de acuerdo con su corriente deben llevar los siguientes conectores:

Hasta 420 A inclusive, del tipo Ojo

De 420 A en adelante, del tipo Espada (Paleta)

Las separaciones externas entre los terminales de los bujes o pasatapas de bajo voltaje serán las indicadas en la tabla 2.1 [6].

**Tabla 1:** Separación entre terminales de bujes de bajo voltaje

Fuente: NTE INEN 2139 [6]

| kVA  | Separación mínima entre las partes metálicas activas cuando las partes móviles de los terminales de los bujes o pasatapas nominales de bajo voltaje estén en una misma disposición relativa (mm) | Distancia máxima entre los puntos centrales de los terminales de los aisladores (mm) |
|--|--|--|
| 5 a 50   | 44*  | 228  |
| 75 a 167   | 76*  | 228  |
| (*) Donde las dimensiones del tanque no permitan tales separaciones, éstas pueden ser reducidas, pero no en más de 19 mm |  |  |

### 2.6.5. Tanques de transformadores monofásicos de distribución

Los transformadores monofásicos son diseñados y construidos de forma circular en lámina de acero laminado al frío, con refuerzos que le permiten soportar las presiones internas producidas por el aumento de temperatura y los esfuerzos mecánicos en el manejo e instalación del equipo. Esto se conoce como el límite de presión sin deformarse (kgf/cm<sup>2</sup>) que la norma indica que es desde -0.65 hasta +0.65.

La fijación de la tapa al tanque es por medio de una banda de cierre apernada y empaques, no es permitido el uso de soldadura. La tapa estará provista de una adecuada pendiente que impida el estancamiento de agua.

Una vez fabricado el tanque se somete a un proceso de desengrase, y limpieza vía decapado para preparación de la superficie previo al proceso de pintura. Para transformadores monofásicos la pintura es en polvo, aplicada directamente en forma electrostática sobre la superficie según lo que indica la norma NTC 3396, ASTM B117 – ASTM G154. El espesor de la pintura será de 120 micras y el color utilizado de manera estándar es gris claro similar a RAL serie 70, grado de adherencia 4A (ASTM D3359).

La identificación de la potencia nominal del transformador es en azul eléctrico, tipo de letra arial, tamaño 7 x 3.5 x 1 cm. Para la identificación de que el aceite utilizado en el transformador es libre de PCB'S de utilizará un sticker círculo de color verde de 10 cm de diámetro.



**Figura 10:** Tanque de transformador

Fuente: C.A. MORETRAN [2]

### **2.6.6. Medio refrigerante**

El líquido mineral aislante y refrigerante utilizado en transformadores de distribución monofásicos es el aceite mineral inhibido, según lo que indica la norma NTE INEN 2133-98 [7], las características eléctricas están detalladas en la norma ASTM D 877.

Una parte importante a considerar de este aceite mineral es que debe ser libre de PCB'S para cumplir por la norma ambiental D 4059. Utilizar aceite mineral inhibido para la refrigeración del transformador de distribución garantiza su tiempo de vida útil y correcto funcionamiento en condiciones normales, sin embargo no es el único medio refrigerante que puede utilizarse; también existen transformadores de distribución donde el refrigerante es el aire, resina epoxi y aceite vegetal.

Cada uno de estos tipos de dieléctrico tiene ventajas y desventajas, ya sea eléctrica o mecánica las cuáles son motivo de estudio para definir el diseño del transformador y las condiciones de servicio.

### **2.6.7. Encubado o ensamble**

Una vez que el proceso de secado se cumplió se procede al montaje de la parte activa dentro del tanque del transformador, donde se le conectan y montan los bushings de alta y baja tensión, el cambiador de taps, en los transformadores autoprotegidos se conectan accesorios adicionales como el breaker, pararrayo de media y baja tensión, luz piloto.

En los transformadores monofásicos una vez realizado este montaje se le acopla al neplo de la válvula de alivio de presión, mangueras por las cuales se efectuará el proceso de vacío y llenado de aceite. El proceso de vacío sirve para extraer la humedad aún presente, para cumplir los valores deseados de aislamiento y, aun con vacío se procede al llenado de aceite al tanque, este proceso garantiza la no presencia de burbujas de aire y refuerza la eliminación de la humedad.

### **2.6.8. Indicadores y accesorios**

Forman parte del transformador y están indicados en el MEER en el punto 3.6: Especificaciones técnicas de materiales y equipos del sistema de distribución, transformadores monofásicos – autoprotegidos y normados por el INEN.

En el caso de los indicadores su función principal es dar el estado general del transformador y para los accesorios se garantiza la correcta instalación en poste y maniobra por parte del operador.

Según lo indica [3], Accesorios:

- a. Soportes para montaje del transformador - Norma NTE INEN 2139.
- b. Orejas para levantar el transformador - Norma NTE INEN 2139.
- c. Cambiador de derivaciones con accionamiento exterior - 5 posiciones.
- d. Indicador interno de nivel de aceite - Norma NTE INEN 2139.
- e. Válvula de alivio de presión - Norma NTE INEN 2139, NTC 3609.
- f. Luz piloto de alarma, cambiabile exteriormente sin suspensión - Por encima del nivel de aceite. Bloqueo antigiro.
- g. Placa de características - Norma NTE INEN 2130 – 2139 [8] [6].
- h. Localización de los terminales - Norma NTE INEN 2139.

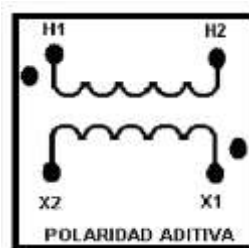
## 2.7. Polaridad del transformador

El ensayo de polaridad consiste en asignar a los terminales ubicados a la izquierda con las letras H1 y X1 respectivamente, se conecta por medio de un puente estos puntos, se alimenta el devanado H1 y H2 con corriente alterna (V), por medio de un voltímetro que está conectado entre H2 y X2, se realiza las lecturas y se obtiene como resultado:

$V > V_{in}$  la polaridad es aditiva.

$V < V_{in}$  la polaridad es sustractiva.

Para el caso de los transformadores de distribución monofásicos clase 15kV, la norma base del MEER indica que la polaridad debe ser aditiva.



**Figura 11:** Tipo de polaridad

Fuente: Los autores

### 2.7.1. Niveles de aislamiento

Los niveles de aislamiento están detallados en la norma NTE INEN 2127:2013, esta norma establece los niveles de aislamiento de los devanados para los transformadores de distribución y potencia sumergidos en líquido refrigerante, con niveles de voltaje menores de 110 kV [9].

Para los efectos de esta norma, se adoptan las definiciones contempladas en la NTE INEN 2110 [10], según como se indica en [9]:

**“Nivel Básico de Aislamiento NBA (BIL).**

Nivel de aislamiento para devanados y partes conectadas, no diseñadas para ser sometidas a las pruebas de voltaje de impulso.

Los requisitos de aislamiento y las pruebas correspondientes para transformadores, están dados con referencia a un devanado específico y sus terminales.

Para transformadores sumergidos en líquido refrigerante, los requisitos se aplican únicamente para el aislamiento interno. Cualquier requisito adicional o prueba con miras a verificar el aislamiento externo que se considere necesario, debe estar sujeto a un acuerdo entre el comprador y el fabricante.

- **Requisitos**

Voltaje máximo del equipo y su nivel de aislamiento, a cada devanado de un transformador se asignará un valor de voltaje máximo del equipo  $V_m$ . Las exigencias para la coordinación del aislamiento de un transformador con respecto a sobrevoltajes transitorios se formularán de manera diferente dependiendo del valor de  $V_m$ . Cuando las exigencias acerca de pruebas específicas para devanados diferentes en un transformador difieran, se aplicará la exigencia para el devanado con el más alto  $V_m$ .

Los valores generalizados de  $V_m$  se indican en las tablas 1 y 2. El valor que se va a seleccionar para un devanado del transformador será igual o inmediatamente superior al voltaje nominal del devanado. Si el voltaje máximo del sistema  $V_m$  no es excedido, los devanados de los transformadores podrán estar provistos de derivaciones para voltajes por encima del valor del voltaje nominal, sin incrementar el nivel básico de aislamiento NBA (BIL) seleccionado.”

**Tabla 2:** Relaciones de voltaje nominal del sistema, voltaje máximo del sistema y nivel básico de aislamiento NBA (BIL)

Fuente: NTE INEN 2127 [9]

| Aplicación                           | Voltaje nominal del sistema Vn<br>kV ef. | Voltaje máximo del sistema Vm<br>kV ef. | Nivel básico de Aislamiento<br>NBA kV |
|--------------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| Distribución hasta 500 kVA inclusive | 1,2                                      | 1,2                                     | 30                                    |
|                                      | 2,5                                      | 2,5                                     | 45                                    |
|                                      | 5,0                                      | 5,0                                     | 60                                    |
|                                      | 8,7                                      | 8,7                                     | 75                                    |
|                                      | 15,0                                     | 15,0                                    | 95                                    |
|                                      | 25                                       | 25                                      | 150-125                               |
|                                      | 34,5                                     | 36                                      | 200-150                               |
|                                      | 46                                       | 52                                      | 250-200                               |
|                                      | 1,2                                      | 1,2                                     | 45                                    |
|                                      | 2,5                                      | 2,5                                     | 60                                    |
|                                      | 5,0                                      | 5,0                                     | 75                                    |
|                                      | 8,7                                      | 8,7                                     | 95                                    |
|                                      | 15,0                                     | 15,0                                    | 110                                   |
|                                      | 25,0                                     | 25,0                                    | 150                                   |
|                                      | 34,5                                     | 36,0                                    | 200                                   |
|                                      | 46,0                                     | 52,0                                    | 250                                   |
|                                      | 69,0                                     | 72,5                                    | 350                                   |

## 2.8. Especificaciones técnicas generales

Para la construcción de un transformador hay que definir varias especificaciones técnicas eléctricas y mecánicas, estos valores de cálculo están definidos acorde a estándares definidos por normas internacionales y nacionales. Los transformadores de distribución deben ser diseñados con una alta eficiencia y bajas pérdidas, de esta forma se garantiza el funcionamiento del transformador durante los 365 días del año y trabajando al 100% de su capacidad, el aislante dieléctrico o aceite mineral que se utiliza en los transformadores de distribución es muy importante en el funcionamiento ya que gracias a su refrigeración se logra la operación continua de estos equipos.

En nuestro país, Ecuador, de acuerdo a la región tenemos varias clases de voltaje para distribución, ya sea 15kV, 25kV y 35kV. El sitio de instalación del transformador nos da una idea del nivel de voltaje al que va a ser conectado ya que los datos más importantes para el diseño y la construcción de un transformador son el voltaje primario, voltaje secundario, capacidad en kVA, altura de instalación, derivaciones en el lado primario de la relación de transformación, clase de aislamiento y nivel básico de aislamiento. Las demás características eléctricas y mecánicas ya están definidas acorde a estándares por potencia y clase de los transformadores en las distintas normas del INEN y MEER.

## **CAPÍTULO III**

### **3. DISEÑO ELÉCTRICO DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN**

#### **3.1. Descripción del tipo de transformador monofásico de distribución conmutable 15kVA autoprotegido**

El transformador será construido con el núcleo del tipo acorazado rectangular constituido por tres columnas, los devanados de media y baja tensión se hallan en un solo paquete en la columna central del núcleo.

El devanado de media tensión tiene una particularidad ya que puede operar tanto a 6300 V y 7620 V, esto se logra a través de un selector de voltaje de dos posiciones sin afectar el voltaje secundario ya que en ambos casos mantendrá su relación de transformación a 240 / 120 V. El transformador cuenta con dos conmutadores de cinco posiciones con el fin de cumplir la relación de transformación para ambos voltajes en un  $\pm 1/3 \times 2.5\%$ .

#### **3.2. Cálculo para los devanados primario y secundario de los transformadores de distribución monofásicos**

- **Cálculo de voltaje y corriente en los devanados**

Datos primordiales del transformador a diseñar

Potencia = 15 kVA

Voltaje primario 1= 6300 V

Voltaje primario 2= 76200 V

Voltaje secundario= 240 / 120 V

- **Cálculo de voltaje primario**

Este transformador conmutable puede operar a dos niveles de tensión distintos, por lo que vamos a tener que calcular ciertos valores para ambos casos.



La relación de transformación será +1/-3x2.5% para ambos niveles de tensión como se muestra en la tabla 3:

**Tabla 3:** Relación de voltaje en las 5 posiciones del tap

Fuente: Los autores

| <b>Selector de voltaje</b> | <b>Tap</b>           | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> | <b>D</b> | <b>E</b> |
|----------------------------|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Posición 1</b>          | Voltaje primario (V) | 6457.5   | 6300     | 6142.5   | 5985     | 5827.5   |
| <b>Posición 2</b>          | Voltaje primario (V) | 7810.5   | 7620     | 7429.5   | 7239     | 7048.5   |

- **Cálculo de corrientes para cada posición de tap en el primario**

Formula cálculo de la corriente nominal en el primario:

$$I_p \text{ selector posición 1} = \frac{kVA * 1000}{V_p} = \frac{15 * 1000}{6300} = 2.38 \text{ A}$$

$$I_p \text{ selector posición 2} = \frac{kVA * 1000}{V_p} = \frac{15 * 1000}{7620} = 1.97 \text{ A}$$

**Tabla 4:** Relación de corriente en las 5 posiciones del tap

Fuente: Los autores

| <b>Selector de voltaje</b> | <b>Tap</b>             | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> | <b>D</b> | <b>E</b> |
|----------------------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Posición 1</b>          | Corriente primario (A) | 2.32     | 2.38     | 2.44     | 2.51     | 2.57     |
| <b>Posición 2</b>          | Corriente primario (A) | 1.92     | 1.97     | 2.02     | 2.07     | 2.13     |

- **Corriente en el secundario:**

La corriente en el secundario siempre será la misma ya que el transformador si lo alimentamos con el voltaje nominal siempre tendrá que cumplir la relación de transformación.

Fórmula para calcular la corriente secundaria

$$I_s = \frac{kVA * 1000}{V_s} = \frac{15 * 1000}{240} = 62.50 \text{ A}$$

**Tabla 5:** Tabla de alambre redondo esmaltado (calibres, densidad y sección).

Fuente: Los autores

| Calibre<br>AWG | Diámetro<br>nominal<br>Desnudo<br>(mm) | Sección<br>(mm <sup>2</sup> ) | Diámetro<br>máximo<br>doble capa<br>(mm). | Peso<br>(kg/km) | Resistencia<br>20°C<br>(Ohm/km) |
|----------------|--|-------------------------------|---|-----------------|---------------------------------|
| 6              | 4,115                                  | 13,29932382                   | 4,272                                     | 118,8           | 1,296                           |
| 7              | 3,665                                  | 10,54964485                   | 3,815                                     | 94,4            |                                 |
| 8              | 3,264                                  | 8,367393272                   | 3,406                                     | 75              | 2,061                           |
| 9              | 2,906                                  | 6,632558685                   | 3,043                                     | 59,5            | 2,6                             |
| 10             | 2,588                                  | 5,260395837                   | 2,72                                      | 47,3            | 3,277                           |
| 11             | 2,304                                  | 4,169220177                   | 2,431                                     | 37,5            |                                 |
| 12             | 2,052                                  | 3,307079188                   | 2,159                                     | 29,4            | 5,213                           |
| 13             | 1,829                                  | 2,627346138                   | 1,935                                     | 23,36           | 6,562                           |
| 14             | 1,628                                  | 2,081606726                   | 1,732                                     | 18,51           | 8,283                           |
| 15             | 1,450                                  | 1,651299639                   | 1,549                                     | 14,68           | 10,441                          |
| 16             | 1,290                                  | 1,306981084                   | 1,384                                     | 11,62           | 13,19                           |
| 17             | 1,151                                  | 1,040496272                   | 1,247                                     | 9,42            | 16,6                            |
| 18             | 1,024                                  | 0,823549665                   | 1,118                                     | 7,47            | 21                              |
| 19             | 0,912                                  | 0,65325021                    | 1,003                                     | 5,94            | 26,4                            |
| 20             | 0,813                                  | 0,519123839                   | 0,897                                     | 4,72            |                                 |
| 21             | 0,724                                  | 0,411686868                   | 0,803                                     | 3,75            | 41,87891661                     |
| 22             | 0,643                                  | 0,324722085                   | 0,721                                     | 2,96            |                                 |
| 24             | 0,511                                  | 0,205083954                   | 0,582                                     | 1,82            |                                 |
| 25             | 0,455                                  | 0,162597055                   | 0,523                                     | 1,5             |                                 |
| 32             | 0,203                                  | 0,032365473                   | 0,249                                     | 0,305           |                                 |

**Tabla 6:** Tabla de platinas de cobre esmaltadas.

Fuente: Los autores

| <b>Ancho<br/>Pulgadas</b> | <b>Largo<br/>Pulgadas</b> | <b>Ancho<br/>mm</b> | <b>Largo<br/>Mm</b> | <b>Sección<br/>mm2</b> | <b>Resistencia<br/>20°C<br/>Ohm/km</b> |
|---------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|--|
| 0,118                     | 0,335                     | 2,9972              | 8,509               | 24,99                  | 0,691                                  |
| 0,138                     | 0,394                     | 3,5052              | 10,0076             | 34,38                  | 0,500                                  |
| 0,157                     | 0,216                     | 3,9878              | 5,4864              | 21,44                  | 0,805                                  |
| 0,177                     | 0,394                     | 4,4958              | 10,0076             | 44,09                  | 0,394                                  |
| 0,177                     | 0,512                     | 4,4958              | 13,0048             | 57,30                  | 0,303                                  |
| 0,177                     | 0,591                     | 4,4958              | 15,0114             | 66,14                  | 0,263                                  |
| 0,157                     | 0,394                     | 3,9878              | 10,0076             | 39,11                  |  |
| 0,118                     | 0,354                     | 2,9972              | 8,9916              | 26,41                  |  |
| 0,196                     | 0,275                     | 4,9784              | 6,985               | 34,08                  |  |
| 0,157                     | 0,472                     | 3,9878              | 11,9888             | 46,85                  |  |
| 0,196                     | 0,196                     | 4,9784              | 4,9784              | 24,29                  |  |
| 0,125                     | 0,375                     | 3,175               | 9,525               | 29,64                  |  |
| 0,1875                    | 0,75                      | 4,7625              | 19,05               | 88,91                  |  |
| 0,25                      | 1                         | 6,35                | 25,4                | 158,06                 |  |
| 0,25                      | 1,25                      | 6,35                | 31,75               | 197,58                 |  |
| 0,25                      | 1,5                       | 6,35                | 38,1                | 237,10                 |  |
| 0,25                      | 2                         | 6,35                | 50,8                | 316,13                 |  |
| 0,25                      | 3                         | 6,35                | 76,2                | 474,19                 |  |
| 0,25                      | 4                         | 6,35                | 101,6               | 632,26                 |  |
| 0,375                     | 1,5                       | 9,525               | 38,1                | 355,64                 |  |
| 0,375                     | 2                         | 9,525               | 50,8                | 474,19                 |  |
| 0,375                     | 3                         | 9,525               | 76,2                | 711,29                 |  |
| 0,375                     | 4                         | 9,525               | 101,6               | 948,39                 |  |
| 0,102                     | 0,472                     | 2,6                 | 12                  | 21,89                  | 0,789                                  |
| 0,118                     | 0,512                     | 3,00                | 13,00               | 38,22                  | 0,451                                  |
| 0,110                     | 0,220                     | 2,79                | 5,59                | 14,832                 | 1,162                                  |
| 0,177                     | 0,512                     | 4,500               | 13,000              | 57,623                 | 0,299                                  |

$$\text{seccion}(\text{mm}^2) = +3.14159265358979 * \left( \left( \frac{\text{diámetro nominal desnudo}}{2} \right)^2 \right)$$

Datos de platinas de cobre esmaltadas

ancho(mm) = ancho pulgadas \* 25.4

largo(mm) = largo pulgadas \* 25.4

seccion (mm<sup>2</sup>) = ancho \* largo

### 3.3. Diseño eléctrico de bobina secundaria

- **Cálculo del conductor de bobina de baja tensión**

Para el cálculo del fleje de cobre de baja tensión se toma el valor nominal de la corriente y la densidad de corriente para transformadores de distribución se consideran 3 Amp/mm<sup>2</sup>.

Corriente de la bobina de B/T = 62,50 Amp

seccion para densidad de  $\left(\frac{3A}{\text{mm}^2}\right) = \frac{\text{corriente de la bobina de B/T}}{3}$

seccion para densidad de  $\left(\frac{3A}{\text{mm}^2}\right) = \frac{62,50 \text{ Amp}}{3}$

seccion para densidad de  $\left(\frac{3A}{\text{mm}^2}\right) = 20,83 \text{ mm}^2$

seccion para densidad de  $\left(\frac{4A}{\text{mm}^2}\right) = \frac{\text{corriente de la bobina de B/T}}{4}$

seccion para densidad de  $\left(\frac{4A}{\text{mm}^2}\right) = \frac{62,50 \text{ Amp}}{4}$

seccion para densidad de  $\left(\frac{4A}{\text{mm}^2}\right) = 15,63 \text{ mm}^2$

Con estos valores se revisa en la tabla de flejes de cobre esmaltadas y elegimos:

Se escoge fleje Cu = 0,200 x 178 mm

Ancho = 0,20 mm

Largo = 178,00 mm

Sección = Ancho \* Largo

Sección = 0,20 mm \* 178,00 mm

Sección = 35,60 mm<sup>2</sup>

$$\text{Res. } 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = \frac{0,017241 * 1000}{35,60}$$

$$\text{Res. } 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = 0,484 \text{ Ohm/km}$$

$$\text{Ancho aislamiento} = 0,20 + 0,127 = 0,327 = 0.33 \text{ mm}$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ de flejes} = 1$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ plat. axial} = 1$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ plat. radial} = 1$$

$$\text{Sección total} = \text{N}^{\circ} \text{ de flejes} * \text{Sección}$$

$$\text{Sección total} = 1 * 35,60 \text{ mm}^2$$

$$\text{Sección total} = 35,60 \text{ mm}^2$$

$$\text{Longitud total} = \text{N}^{\circ} \text{ plat. axial} * \text{Largo}$$

$$\text{Longitud total} = 1 * 178,00 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud total} = 178,00 \text{ mm}$$

$$\text{Ancho total} = \text{N}^{\circ} \text{ plat. radial} * \text{ancho ais}$$

$$\text{Ancho total} = 1 * 0,327 \text{ mm}$$

$$\text{Ancho total} = 0,327 \text{ mm}$$

$$\text{Densidad de corriente} = \frac{\text{Corriente de la bobina de B. T.}}{\text{Sección total}}$$

$$\text{Densidad de corriente} = \frac{62,50 \text{ A}}{35,60 \text{ mm}^2}$$

$$\text{Densidad de corriente} = 1,76 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

- **Cálculo del número de espiras de bobina de baja tensión**

Se calcula el número de espiras de baja tensión en base a la materia prima utilizada en el núcleo. El nivel de gauss que garantiza el fabricante se encuentra en el datasheet del material, hay que tener en cuenta el factor w/kg puesto que de esto depende las pérdidas en vacío y el cumplimiento o no de la Tabla 1 de la norma NTE INEN 2114.

$$B_m = 14903 \text{ gauss}$$

$$N_2 = \frac{\text{voltaje B. T.} * 100000000}{4,44 * 60 * B_m * \text{Sección} * 2}$$

$$N_2 = \frac{240 * 100000000}{4,44 * 60 * 14903 * 57,2 * 2}$$

$$N_2 = 50 \text{ espiras}$$

Comprobación:

$$N_2 = 50 \text{ espiras}$$

$$B_m = \frac{\text{voltaje B. T.} * 100000000}{4,44 * 60 * N_2 * \text{Sección} * 2}$$

$$B_m = \frac{240 * 100000000}{4,44 * 60 * 50 * 57,2 * 2}$$

$$B_m = 14903,24 \text{ gauss}$$

### **3.4. Diseño del núcleo**

Una vez que elegido el factor a trabajar acorde a la materia prima a utilizar en el transformador, se revisa la curva del material dada por el fabricante en este caso se ha elegido Lámina de acero H100 0.27 mm [11]. En la curva del material el fabricante garantiza un factor de 0,834 w/kg, para el transformador a construir consideramos un factor de 1,008 puesto que en el proceso de manufactura se pierden características de la materia prima y por tanto debemos asegurar el cumplimiento de la norma NTE INEN 2114 en la prueba de vacío.

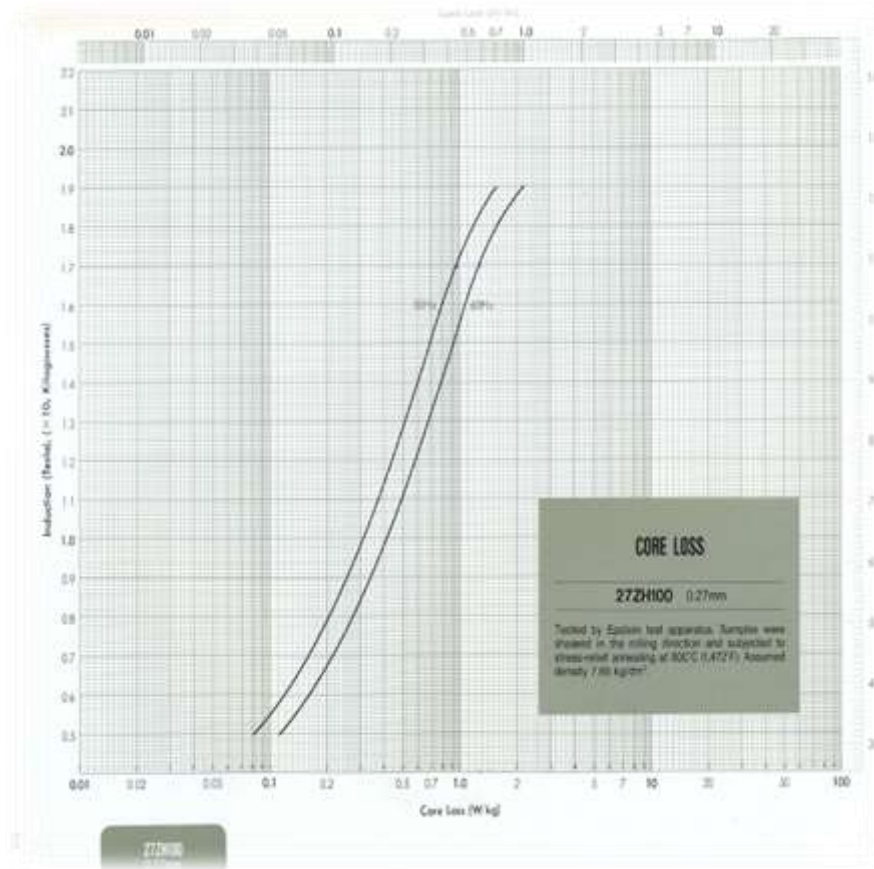
**Tabla 7:** Lámina de acero para el núcleo.

Fuente: Los autores

| <b>Lámina de Acero para el núcleo</b> |             |       |
|---------------------------------------|-------------|-------|
| <b>27ZH100<br/>Garantizado</b>        | Factor W/KG | 0,834 |
| <b>27ZH100<br/>Factor diseño</b>      | Factor W/KG | 1.008 |

Curva de Lámina de acero - H100 Core Loss 27ZH100 0.27 mm [11]

Aislante Carlite 0.01 mm



**Figura 12:** Curva de Lámina de acero 27ZH100

Fuente: Nippon Steel Corporation [11]

- **Sección transversal del núcleo**

Una vez que se elige el nivel de gauss a trabajar con la lámina de acero 27ZH100, por cálculo se puede determinar el área de la sección transversal del transformador.

$$B_m = 14903.24 \text{ Gauss} = 1.49 \frac{\text{wb}}{\text{m}^2} \text{ Tesla}$$

$$\text{femms} = \sqrt{2} \pi * f * \phi * N * kd$$

$$\phi = \frac{240}{\sqrt{2} * \pi * 60 * 50 * 1} = 0.018006 \text{ wb}$$

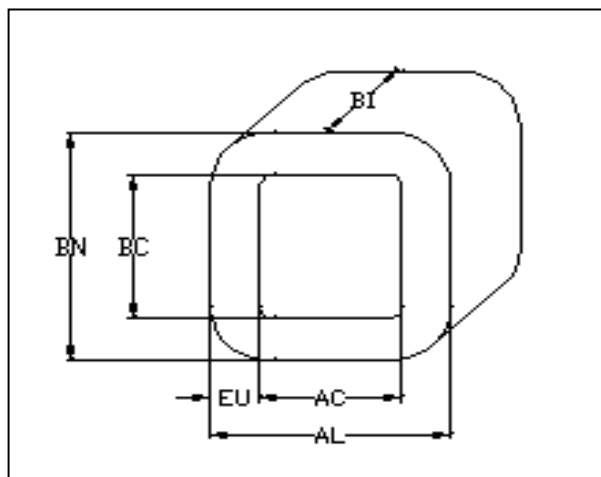
$$\text{Area} = \frac{\phi}{B_m} = \frac{0.018006 \text{ wb}}{1.49 \frac{\text{wb}}{\text{m}^2}} = 0.012082 \text{ m}^2$$

$$\text{Area} = 0.012082 \text{ m}^2 * \frac{100^2 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} = 120,822 \text{ cm}^2$$

- **Medidas para la construcción del núcleo**

Una vez que se obtiene el área de la sección transversal, el nivel de gauss y las características de la lámina de acero, se diseña el núcleo:

Datos del núcleo (lazo)

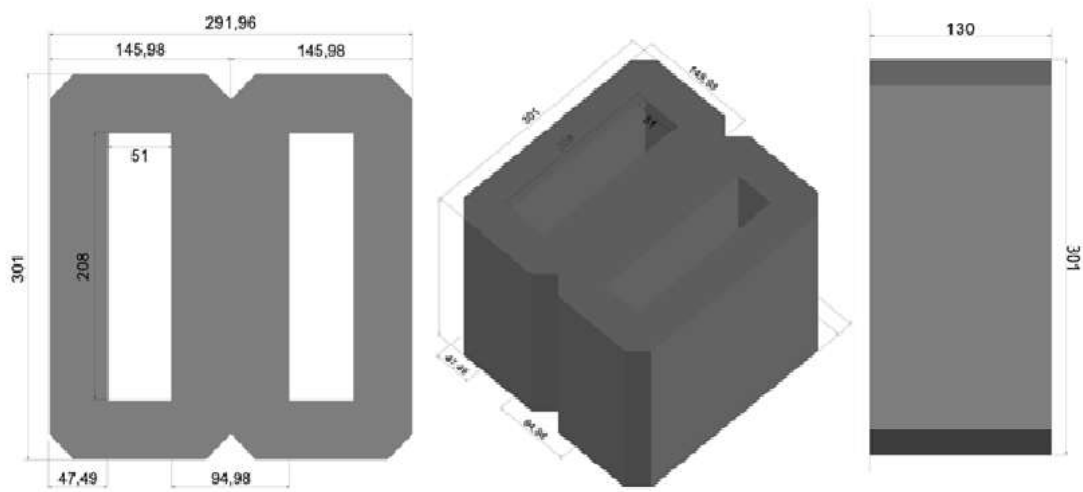


**Figura 13:** Medidas a considerar del núcleo  
Fuente: Los autores



**Tabla 8:** Medidas para la construcción del núcleo (Lazo)  
Fuente: Los autores

| <b>Datos del núcleo (Lazo):</b> |       |     |
|---------------------------------|-------|-----|
| Ancho (BI):                     | 130   | Mm  |
| Espesor(EU):                    | 46.5  | Mm  |
| Sección:                        | 60.45 | cm2 |
| H (BC):                         | 2.02  | Mm  |
| AC:                             | 1     | Mm  |
| BN:                             | 95.02 | Mm  |
| AL:                             | 96    | Mm  |



**Figura 14:** Planos de dimensiones reales del núcleo  
Fuente: Los autores

Ancho (BI) = 130 mm

Espesor (EU) = 46,5 mm

$$\text{Sección} = \frac{\text{Ancho (BI)} * \text{Espesor (EU)}}{100}$$

$$\text{Sección} = \frac{130 \text{ mm} * 46,5 \text{ mm}}{100}$$

$$\text{Sección} = 60,45 \text{ cm}^2$$

$$\text{Sección de transversal del núcleo} = 120,822 \text{ cm}^2$$

Alto de la ventana

$$H(BC) = \text{largo} + (2 * \text{distancia final})$$

$$H(BC) = 178,00 \text{ mm} + (2 * 15 \text{ mm})$$

$$H(BC) = 208,00 \text{ mm}$$

Ancho de la ventana

$$AC = AC + 1$$

$$AC = 50 \text{ mm} + 1$$

$$AC = 51 \text{ mm}$$

Alto del núcleo

$$BN = H(BC) + 2 * \text{espesor (EU)}$$

$$BN = 208 \text{ mm} + 2 * 46.5 \text{ mm}$$

$$BN = 301 \text{ mm}$$

Ancho del núcleo

$$AL = AC + 2 * \text{espesor (EU)} + 2$$

$$AL = 145,57 \text{ mm}$$

Columna

$$M = 2 * AC + 2 * EU$$

$$M = 2 * 51 \text{ mm} + 2 * 46,5 \text{ mm}$$

$$M = 194.1435 \text{ mm}$$

Peso del lazo = 30,50 Kg

Peso del núcleo = peso del lazo \* 2

$$\text{Peso del núcleo} = 30.50 \text{ kg} * 2$$

$$\text{Peso del núcleo} = 61,00 \text{ kg}$$

$$\text{Longitud del núcleo} = AL * 2 * 1,045$$

$$\text{Longitud del núcleo} = AL * 2 * 1,045$$

$$\text{Longitud del núcleo} = 145,57 \text{ mm} * 2 * 1,045$$

$$\text{Longitud del núcleo} = 304 \text{ mm}$$

### Áreas

$$\text{Área exterior} = (AL * BN) * 0,95$$

$$\text{Área exterior} = (301 * 145,57) * 0,95$$

$$\text{Área exterior} = 41626,24 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área interior} = (AC * H(BC)) * 0,99$$

$$\text{Área interior} = (51 * 208) * 0,99$$

$$\text{Área interior} = 10413,74 \text{ mm}^2$$

$$\text{Superficie Total} = \text{Área exterior} - \text{Área interior}$$

$$\text{Superficie Total} = 41626,24 - 10413,74$$

$$\text{Superficie Total} = 31212,51 \text{ mm}^2$$

$$\text{Volumen} = \frac{\text{Superficie Total} * \text{Ancho (BI)}}{1000}$$

$$\text{Volumen} = \frac{31212,51 * 130 \text{ mm}}{1000}$$

$$\text{Volumen} = 4057,626 \text{ cm}^3$$

### 3.5. Dimensiones de la bobina secundaria

Longitud de bobina de baja tensión o secundaria

Nº de capas x ½ bobina = 2

$$\text{Nº espiras} = \frac{N2}{\text{Nº de capas} * \frac{1}{2} \text{ bobina}}$$

Nº espiras = 25

**Tabla 9:** Longitud de bobina de baja tensión

Fuente: Los autores

| <b>Longitud de bobina de baja tensión</b> |           |
|---|-----------|
| Platinas:                                 | 178,00 mm |
| Separación entre espiras:                 | - mm      |
| Separación dentro de espiras              | - mm      |
| Cruze:                                    | - mm      |
|   | 178,00 mm |
| Factor Bocón:                             | * 1,000   |
| Longitud total de bob. B.T.               | 178 mm    |

**Tabla 10:** Aislamiento contra el yugo bobina de baja tensión

Fuente: Los autores

| <b>Aislamiento contra el yugo</b> |         |
|-----------------------------------|---------|
| Aislamiento del yugo:             | 2 mm    |
| Separación de aceite:             | 1 mm    |
| Collarín de B.T.                  | 12,0 mm |
| Distancia final:                  | 15 mm   |

### 3.6. DISEÑO ELÉCTRICO DE BOBINAS PRIMARIAS

#### 3.6.1. Diseño eléctrico de bobina primaria a 7620 V

- **Conductor de Bobina 7620 V**

En esta parte se calcula el calibre del conductor a utilizar en base a la sección para la densidad de corriente y resistencia del material, puesto que de esto va a depender la

medición para las pérdidas de cortocircuito del transformador y el cumplimiento o no de la norma NTE INEN 2114.

Conductor de bobina de A.T.

$$\text{Corriente de línea de A. T.} = \frac{\text{Potencia} * 1000}{\text{Voltaje en M. T.}}$$

$$\text{Corriente de línea de A. T.} = \frac{15 \text{ kVA} * 1000}{7620 \text{ V}}$$

$$\text{Corriente de línea de A. T.} = 1,97 \text{ Amp}$$

$$\text{Corriente de bobina de A. T.} = \frac{\text{Corriente de línea de A. T.}}{1}$$

$$\text{Corriente de bobina de A. T.} = \frac{1,97 \text{ Amp.}}{1}$$

$$\text{Corriente de bobina de A. T.} = 1,97 \text{ Amp}$$

$$\text{Seccion para densidad de } \left( \frac{3A}{\text{mm}^2} \right) = \frac{\text{corriente de la bobina de A/T}}{3}$$

$$\text{Seccion para densidad de } \left( \frac{3A}{\text{mm}^2} \right) = \frac{1,97 \text{ Amp}}{3}$$

$$\text{Seccion para densidad de } \left( \frac{3A}{\text{mm}^2} \right) = 0,66 \text{ mm}^2$$

$$\text{Seccion para densidad de } \left( \frac{4A}{\text{mm}^2} \right) = \frac{\text{corriente de la bobina de A/T}}{4}$$

$$\text{Seccion para densidad de } \left( \frac{4A}{\text{mm}^2} \right) = \frac{1,97 \text{ Amp}}{4}$$

$$\text{Seccion para densidad de } \left( \frac{4A}{\text{mm}^2} \right) = 0,49 \text{ mm}^2$$

Se escoge cable # 16

Sección = 1,307 mm

Resistencia 20 °C = 13,19 Ohm/Km

$$\text{Diámetro máximo} = 1,384 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro desnudo} = 1,290 \text{ mm}$$

$$\text{N}^\circ \text{ de conductor} = 1$$

$$\text{Sección total} = \text{N}^\circ \text{ de conductor} * \text{sección}$$

$$\text{Sección total} = 1 * 1,306 \text{ mm}^2$$

$$\text{Sección total} = 1,306 \text{ mm}^2$$

$$\text{Diámetro total} = \text{Diam. Máx} * \text{N}^\circ \text{ de conductor}$$

$$\text{Diámetro total} = 1,384 \text{ mm} * 1$$

$$\text{Diámetro total} = 1,384 \text{ mm}$$

$$\text{Densidad de corriente} = \frac{\text{corriente de la bobina de A/T}}{\text{Sección Total}}$$

$$\text{Densidad de corriente} = \frac{1,97 \text{ Amp}}{1,306 \text{ mm}^2}$$

$$\text{Densidad de corriente} = 1,51 \frac{\text{Amp}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\text{Voltaje}}{\text{Espiras}} = \frac{\text{voltaje en M. T.} * 1,025}{\# \text{ espiras escogidas}}$$

$$\frac{\text{Voltaje}}{\text{Espiras}} = \frac{7620 \text{ v} * 1,025}{1,627}$$

$$\frac{\text{Voltaje}}{\text{Espiras}} = 4,80 \text{ voltios}$$

- **Cálculo del número de espiras de la bobina de A.T. a 7620 V**

Para el cálculo del número de espiras de alta tensión se parte del número de espiras de baja tensión antes calculado, es decir  $N_2 = 50$  espiras

$$N1 = \frac{\text{Voltaje primario}}{\text{Voltaje Secundario}} * N2$$

**Tabla 11:** Numero de espiras bobina 7620 V  
Fuente: Los autores

| Tap | N° espiras | # De espiras escogidas | Error   | Diferencia de espiras |
|-----|------------|------------------------|---------|-----------------------|
| 1   | 1.627,19   | 1.627                  | -0,012% | 39                    |
| 2   | 1.587,50   | 1.588                  | 0,031%  | 40                    |
| 3   | 1.547,81   | 1.548                  | 0,012%  | 40                    |
| 4   | 1.508,13   | 1.508                  | -0,008% | 40                    |
| 5   | 1.468,44   | 1.468                  | -0,030% |                       |

El transformador propuesto tiene el tap nominal en la posición 2

$$N^{\circ} \text{ espiras en el tap 2} = \frac{\text{voltaje en M. T.}}{\text{voltaje en B. T.}} * N2$$

$$N^{\circ} \text{ espiras en el tap 2} = \frac{7620}{240} * 50$$

$$N^{\circ} \text{ espiras en el tap 2} = 1587,50 \approx 1588$$

N° espiras escogidas para el tap 2 = 1588 espiras

Para el cálculo de las espiras en la posición 1 del tap basta con multiplicar por 1,025 las espiras del tap 2. Puesto que en la posición 1 tenemos que agregar espiras conforme a lo que indica la relación de transformación +1/-3x2.5%

$$N^{\circ} \text{ espiras en el tap 1} = N^{\circ} \text{ espiras del TAP 2} * 1,025$$

$$N^{\circ} \text{ espiras en el tap 1} = 1587,50 * 1,025$$

$$N^{\circ} \text{ espiras en el tap 1} = 1627,19$$

N° espiras escogidas para el tap 1 = 1627 espiras

Para el cálculo de las espiras en la posición 3, 4 y 5 tenemos que restar en pasos de 2.5% la cantidad de espiras desde el tap 2.

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el tap 3} = \text{N}^{\circ} \text{ espiras del tap 2} * 0,975$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el tap 3} = 1587,50 * 0,975$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el tap 3} = 1547,81$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras escogidas para el tap 3} = 1548 \text{ espiras}$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el tap 4} = \text{N}^{\circ} \text{ espiras del tap 2} * 0,95$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el tap 4} = 1587,50 * 0,95$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el tap 4} = 1508,13$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras escogidas para el tap 4} = 1508 \text{ espiras}$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el tap 5} = \text{N}^{\circ} \text{ espiras del tap 2} * 0,925$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el tap 5} = 1587,50 * 0,925$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el tap 5} = 1468,44$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras escogidas para el tap 5} = 1468 \text{ espiras}$$

La tolerancia en el porcentaje de error en los transformadores de distribución son del 0.5%. Esto se detalla en la norma NTE INEN 2117:2013 punto 3.2 Tolerancias de la relación [12].

$$\% \text{ error en el tap 1} = \frac{+ (- \text{N}^{\circ} \text{ espiras en el tap 1} + \text{N}^{\circ} \text{ espiras escogidas en el tap 1})}{\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el tap 1}}$$

$$\% \text{ error en el tap 1} = \frac{+ (- 1627,19 + 1627)}{1627,19}$$

$$\% \text{ error en el tap 1} = -0,012 \%$$

$$\% \text{ error en el tap 2} = \frac{+ (- \text{N}^{\circ} \text{ espiras en el tap 2} + \text{N}^{\circ} \text{ espiras escogidas en el tap 2})}{\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el tap 2}}$$

$$\% \text{ error en el tap 2} = \frac{+ (- 1587,50 + 1588)}{1587,50}$$



$$\% \text{ error en el tap 2} = 0,031 \%$$

$$\% \text{ error en el tap 3} = \frac{+ (- N^{\circ} \text{ espiras en el tap 3} + N^{\circ} \text{ espiras escogidas en el tap 3})}{N^{\circ} \text{ espiras en el tap 3}}$$

$$\% \text{ error en el tap 3} = \frac{+ (- 1547,81 + 1548)}{1547,81}$$

$$\% \text{ error en el tap 3} = 0,012 \%$$

$$\% \text{ error en el tap 4} = \frac{+ (- N^{\circ} \text{ espiras en el tap 4} + N^{\circ} \text{ espiras escogidas en el tap 4})}{N^{\circ} \text{ espiras en el tap 4}}$$

$$\% \text{ error en el tap 4} = \frac{+ (- 1508,13 + 1508)}{1508,13}$$

$$\% \text{ error en el tap 4} = -0,008 \%$$

$$\% \text{ error en el tap 5} = \frac{+ (- N^{\circ} \text{ espiras en el tap 5} + N^{\circ} \text{ espiras escogidas en el tap 5})}{N^{\circ} \text{ espiras en el tap 5}}$$

$$\% \text{ error en el tap 5} = \frac{+ (- 1468,44 + 1468)}{1468,44}$$

$$\% \text{ error en el tap 5} = -0,030 \%$$

La diferencia de espiras entre taps se calcula para que de esta forma se compruebe que la relación entre las 5 posiciones del tap es del 2.5%

$$\text{Diferencia de espiras en el tap 1} = N^{\circ} \text{ espiras escogidas tap 1} - N^{\circ} \text{ espiras escogidas tap 2}$$

$$\text{Diferencia de espiras en el tap 1} = 1627 \text{ espiras} - 1588 \text{ espiras}$$

$$\text{Diferencia de espiras en el tap 1} = 39 \text{ espiras}$$

$$\text{Diferencia de espiras en el tap 2} = N^{\circ} \text{ espiras escogidas tap 2} - N^{\circ} \text{ espiras escogidas tap 3}$$

$$\text{Diferencia de espiras en el tap 2} = 1588 \text{ espiras} - 1548 \text{ espiras}$$

$$\text{Diferencia de espiras en el tap 2} = 40 \text{ espiras}$$

Diferencia de espiras en el tap 3 = N° espiras escogidas tap 3 – N° espiras escogidas tap 4

Diferencia de espiras en el tap 3 = 1548 espiras – 1508 espiras

Diferencia de espiras en el tap 3 = 40 espiras

Diferencia de espiras en el tap 4 = N° espiras escogidas tap 4 – N° espiras escogidas tap 5

Diferencia de espiras en el tap 4 = 1508 espiras – 1468 espiras

Diferencia de espiras en el tap 4 = 40 espiras

- **Dimensiones de la bobina de A.T.**

Factor Bocón = 1,02

Distancia final deseada = 13 mm

Espiras por capa escogidas = 129 espiras

N° de capas escogidas = 13

Capas de papel de 0,25 mm = 1,5

La longitud de la bobina de alta tensión va a depender del número de espiras por capa y el diámetro del conductor escogido.

Long. bobina de A. T. = Esp. por capa escog.\* Diámetro total conductor bobina \* F. bocón

Longitud de bobina de A. T. = 129 espiras \* 1,384 mm \* 1,020

Longitud de bobina de A. T. = 182 mm

El número de espiras por capa se calcula a partir del alto de la ventana del núcleo y la distancia final deseada en los aislamientos.

$$\text{Espiras por capa (tanteo)} = \frac{H(BC) * \text{distancia final deseada}}{\text{Factor bocón} * \text{diámetro total del conductor de la bobina}}$$

$$\text{Espiras por capa (tanteo)} = \frac{208 \text{ mm} * 13 \text{ mm}}{1,020 * 1,384 \text{ mm}}$$

Espiras por capa (tanteo) = 128,92 espiras

El número de capas de la bobina de alta tensión es una relación entre el número de espiras en el tap 1 puesto que es donde se considera el total de espiras y las espiras por capa escogidas.

$$\text{N}^{\circ} \text{ de capas} = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ de espiras escogidas en el TAP 1}}{\text{Espiras por capa escogidas}}$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ de capas} = \frac{1627 \text{ espiras}}{129 \text{ espiras}}$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ de capas} = 12,61$$

$$\text{Voltaje entre capas} = \frac{1,05 * \text{voltaje en M. T.} * \text{espiras por capa escogidas} * 2}{\text{N}^{\circ} \text{ de espiras escogidas en el TAP 1}}$$

$$\text{Voltaje entre capas} = \frac{1,05 * 7620\text{v} * 129 \text{ espiras} * 2}{1627 \text{ espiras}}$$

$$\text{Voltaje entre capas} = 1268,75 \text{ v}$$

El factor de kV/mm no podrá ser superior a 3 dado que puede llegar a dañar los aislamientos del devanado de alta tensión.

$$\frac{\text{kV}}{\text{mm}} = \frac{\frac{\text{voltaje entre capas}}{1000}}{\text{capas de papel de } 25 \text{ mm} * 0,25 + 1 * (\text{dia. máx.} - \text{dia. desn. del conductor})}$$

$$\frac{\text{kV}}{\text{mm}} = \frac{\frac{1268,75 \text{ v}}{1000}}{1,5 * 0,25 + 1 * (1,384 \text{ mm} - 1,290)}$$

$$\frac{\text{kV}}{\text{mm}} = 2,705$$

**Tabla 12:** Aislamiento contra el yugo bobina 7620 V

Fuente: Los autores

| <b>Aislamiento contra el yugo<br/>Bobina 7620 V</b> |       |
|---|-------|
| Aislamiento del yugo:                               | 2 mm  |
| Separación de aceite:                               | 1 mm  |
| Collarín de A.T.                                    | 10 mm |
| Distancia final:                                    | 13 mm |

$$\text{Collarín de A. T.} = \frac{(H(BC) - 2) * (\text{aislamiento del yugo} + \text{separación de aceite}) - (\text{longitud de la bobina de A. T.})}{2}$$

$$\text{Collarín de A. T.} = \frac{(208 \text{ mm} - 2) * (2 \text{ mm} + 1 \text{ mm}) - (182 \text{ mm})}{2}$$

$$\text{Collarín de A. T.} = 10 \text{ mm}$$

**Tabla 13:** Capas de papel bobina 7620 V

Fuente: Los autores

| Papel | Cantidad | Total | Capas           |
|-------|----------|-------|-----------------|
| 0,375 | 1        | 0,375 | (1RA Y 2DA)     |
| 0,375 | 1        | 3,75  | (2DA A 12AVA)   |
| 0,375 | 1        | 0,375 | (12AVA Y 13AVA) |

$$\text{N}^\circ \text{ de capas de la 1ra y 2da} = (\text{cantidad} * \text{papel}) = (1 * 0.375) = 0.375$$

$$\text{N}^\circ \text{ de capas de la 2da a la 12va} = (\text{N}^\circ \text{ de capas escogidas} - 3) * (\text{cantidad} * \text{papel})$$

$$\text{N}^\circ \text{ de capas de la 2da a la 12va} = (13 - 3) * (1 * 0,375)$$

$$\text{N}^\circ \text{ de capas de la 2da a la 12va} = 3,75$$

$$\text{N}^\circ \text{ de capas de la 12ava y 13ava} = \text{cantidad} * \text{papel} = (1 * 0.375) = 0.375$$

### 3.6.2. Diseño eléctrico de bobina primaria a 6300 V

En esta parte se calcula el calibre del conductor a utilizar en base a la sección para la densidad de corriente y resistencia del material, puesto que de esto va a depender la medición para las pérdidas de cortocircuito del transformador y el cumplimiento o no de la norma NTE INEN 2114.

- **Conductor de bobina de A.T.**

$$\text{Corriente de línea de A. T.} = \frac{\text{Potencia} * 1000}{\text{Voltaje en M. T.}}$$

$$\text{Corriente de línea de A. T.} = \frac{15 \text{ kVA} * 1000}{6300 \text{ v}}$$

$$\text{Corriente de línea de A. T.} = 2,38 \text{ Amp}$$

$$\text{Corriente de bobina de A. T.} = \frac{\text{Corriente de línea de A. T.}}{1}$$

$$\text{Corriente de bobina de A. T.} = \frac{2,38 \text{ Amp.}}{1}$$

$$\text{Corriente de bobina de A. T.} = 2,38 \text{ Amp}$$

$$\text{seccion para densidad de } \left( \frac{3A}{\text{mm}^2} \right) = \frac{\text{corriente de la bobina de A/T}}{3}$$

$$\text{seccion para densidad de } \left( \frac{3A}{\text{mm}^2} \right) = \frac{2,38 \text{ Amp}}{3}$$

$$\text{seccion para densidad de } \left( \frac{3A}{\text{mm}^2} \right) = 0,79 \text{ mm}^2$$

$$\text{seccion para densidad de } \left( \frac{4A}{\text{mm}^2} \right) = \frac{\text{corriente de la bobina de A/T}}{4}$$

$$\text{seccion para densidad de } \left( \frac{4A}{\text{mm}^2} \right) = \frac{2,38 \text{ Amp}}{4}$$

$$\text{seccion para densidad de } \left( \frac{4A}{\text{mm}^2} \right) = 0,60 \text{ mm}^2$$

Se escoge cable # 16

Sección = 1,307 mm

Res 20 °C = 13,19 Ohm/Km

Diámetro Máximo = 1,384 mm

Diámetro Desnudo = 1,290 mm

Nº de Conductor = 1

Sección Total = Nº de conductor \* Sección

Sección Total = 1 \* 1,306981084 mm<sup>2</sup>

Sección Total = 1,306981084 mm<sup>2</sup>

$$\text{Diámetro Total} = \text{Diam. Máx} * \text{N}^\circ \text{ de conductor}$$

$$\text{Diámetro Total} = 1,384 \text{ mm} * 1$$

$$\text{Diámetro Total} = 1,384 \text{ mm}$$

$$\text{Densidad de corriente} = \frac{\text{corriente de la bobina de A/T}}{\text{Sección Total}}$$

$$\text{Densidad de corriente} = \frac{2,38 \text{ Amp}}{1,306981084 \text{ mm}^2}$$

$$\text{Densidad de corriente} = 1,82 \frac{\text{Amp}}{\text{mm}^2}$$

$$\frac{\text{Voltaje}}{\text{Espiras}} = \frac{\text{voltaje en M. T.} * 1,025}{\# \text{ espiras escogidas}}$$

$$\frac{\text{Voltaje}}{\text{Espiras}} = \frac{6300 \text{ v} * 1,025}{1345}$$

$$\frac{\text{Voltaje}}{\text{Espiras}} = 4,80 \text{ voltios}$$

- **Cálculo del número de espiras de la bobina de A.T. a 6300 V**

Para el cálculo del número de espiras de alta tensión se parte del número de espiras de baja tensión antes calculado, es decir  $N_2 = 50$  espiras

$$N_1 = \frac{\text{Voltaje primario}}{\text{Voltaje Secundario}} * N_2$$

**Tabla 14:** Diferencia de espiras  
Fuente: Los autores

| Tap | Nº espiras | # de espiras escogidas | Error   | Diferencia de espiras |
|-----|------------|------------------------|---------|-----------------------|
| 1   | 1.345,31   | 1.345                  | -0,023% | 32                    |
| 2   | 1.312,50   | 1.313                  | 0,038%  | 33                    |

|   |          |       |         |    |
|---|----------|-------|---------|----|
| 3 | 1.279,69 | 1.280 | 0,024%  | 33 |
| 4 | 1.246,88 | 1.247 | -0,010% | 33 |
| 5 | 1.214,06 | 1.214 | -0,005% |    |

El transformador propuesto tiene el tap nominal en la posición 2

$$N^{\circ} \text{ espiras en el TAP 2} = \frac{\text{voltaje en M. T.}}{\text{voltaje en B. T.}} * N2$$

$$N^{\circ} \text{ espiras en el TAP 2} = \frac{6300}{240} * 50$$

$$N^{\circ} \text{ espiras en el TAP 2} = 1312,50 \approx 1313$$

Nº espiras escogidas para el TAP 2 = 1313 espiras

Para el cálculo de las espiras en la posición 1 del tap basta con multiplicar por 1,025 las espiras del tap 2. Puesto que en la posición 1 es necesario agregar espiras conforme a lo que indica la relación de transformación +1/-3x2.5%

$$N^{\circ} \text{ espiras en el TAP 1} = N^{\circ} \text{ espiras del TAP 2} * 1,025$$

$$N^{\circ} \text{ espiras en el TAP 1} = 1312,50 * 1,025$$

$$N^{\circ} \text{ espiras en el TAP 1} = 1345,31$$

Nº espiras escogidas para el TAP 1 = 1345 espiras

Para el cálculo de las espiras en la posición 3, 4 y 5 hay que restar en pasos de 2.5% la cantidad de espiras desde el tap 2.

$$N^{\circ} \text{ espiras en el TAP 3} = N^{\circ} \text{ espiras del TAP 2} * 0,975$$

$$N^{\circ} \text{ espiras en el TAP 3} = 1312,50 * 0,975$$

$$N^{\circ} \text{ espiras en el TAP 3} = 1279,69$$

Nº espiras escogidas para el TAP 3 = 1280 espiras

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el TAP 4} = \text{N}^{\circ} \text{ espiras del TAP 2} * 0,95$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el TAP 4} = 1312,50 * 0,95$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el TAP 4} = 1246,88$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras escogidas para el TAP 4} = 1247 \text{ espiras}$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el TAP 5} = \text{N}^{\circ} \text{ espiras del TAP 2} * 0,925$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el TAP 5} = 1312,50 * 0,925$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el TAP 5} = 1214,06$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ espiras escogidas para el TAP 5} = 1214 \text{ espiras}$$

La tolerancia en el porcentaje de error en los transformadores de distribución son del 0.5%. Esto se detalla en la norma NTE INEN 2117:2013 punto 3.2 Tolerancias de la relación.

$$\% \text{ error en el TAP 1} = \frac{+ (- \text{N}^{\circ} \text{ espiras en el TAP 1} + \text{N}^{\circ} \text{ espiras escogidas en el TAP 1})}{\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el TAP 1}}$$

$$\% \text{ error en el TAP 1} = \frac{+ (- 1345,31 + 1345)}{1345,31}$$

$$\% \text{ error en el TAP 1} = -0,023 \%$$

$$\% \text{ error en el TAP 2} = \frac{+ (- \text{N}^{\circ} \text{ espiras en el TAP 2} + \text{N}^{\circ} \text{ espiras escogidas en el TAP 2})}{\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el TAP 2}}$$

$$\% \text{ error en el TAP 2} = \frac{+ (- 1312,50 + 1313)}{1312,50}$$

$$\% \text{ error en el TAP 2} = 0,038 \%$$

$$\% \text{ error en el TAP 3} = \frac{+ (- \text{N}^{\circ} \text{ espiras en el TAP 3} + \text{N}^{\circ} \text{ espiras escogidas en el TAP 3})}{\text{N}^{\circ} \text{ espiras en el TAP 3}}$$

$$\% \text{ error en el TAP 3} = \frac{+ (- 1279,69 + 1280)}{1279,69}$$

$$\% \text{ error en el TAP 3} = 0,024 \%$$



$$\% \text{ error en el TAP 4} = \frac{+ (- N^{\circ} \text{ espiras en el TAP 4} + N^{\circ} \text{ espiras escogidas en el TAP 4})}{N^{\circ} \text{ espiras en el TAP 4}}$$

$$\% \text{ error en el TAP 4} = \frac{+ (- 1246,88 + 1247)}{1246,88}$$

$$\% \text{ error en el TAP 4} = -0,010 \%$$

$$\% \text{ error en el TAP 5} = \frac{+ (- N^{\circ} \text{ espiras en el TAP 5} + N^{\circ} \text{ espiras escogidas en el TAP 5})}{N^{\circ} \text{ espiras en el TAP 5}}$$

$$\% \text{ error en el TAP 5} = \frac{+ (- 1214,06 + 1214)}{1214,06}$$

$$\% \text{ error en el TAP 5} = -0,005 \%$$

La diferencia de espiras entre taps se calcula para que de esta forma se compruebe que la relación entre las 5 posiciones del tap es del 2.5%

Diferencia de espiras TAP 1 = N° espiras escogidas TAP 1 – N° espiras escogidas TAP 2

Diferencia de espiras en el TAP 1 = 1345 espiras – 1313 espiras

Diferencia de espiras en el TAP 1 = 32 espiras

Diferencia de espiras TAP 2 = N° espiras escogidas TAP 2 – N° espiras escogidas TAP 3

Diferencia de espiras en el TAP 2 = 1313 espiras – 1280 espiras

Diferencia de espiras en el TAP 2 = 33 espiras

Diferencia de espiras TAP 3 = N° espiras escogidas TAP 3 – N° espiras escogidas TAP 4

Diferencia de espiras en el TAP 3 = 1280 espiras – 1247 espiras

Diferencia de espiras en el TAP 3 = 33 espiras

Diferencia de espiras TAP 4 = N° espiras escogidas TAP 4 – N° espiras escogidas TAP 5

Diferencia de espiras en el TAP 4 = 1247 espiras – 1214 espiras

Diferencia de espiras en el TAP 4 = 33 espiras

- **Dimensiones de la bobina de alta tensión 6300 V**

Factor Bocón = 1,020

Distancia final deseada = 13 mm

Espiras por capa escogidas = 129 espiras

Nº de capas escogidas = 11

Capas de papel de 0,25 mm = 1,5

La longitud de la bobina de alta tensión va a depender del número de espiras por capa y el diámetro del conductor escogido.

Longitud de bobina de A. T. = Esp. capas escog.\* Diámetro total conductor bobina \* F. bocón

Longitud de bobina de A. T. = 129 espiras \* 1,384 mm \* 1,020

Longitud de bobina de A. T. = 182 mm

El número de espiras por capa se calcula a partir del alto de la ventana del núcleo y la distancia final deseada en los aislamientos.

$$\text{Espiras por capa (tanteo)} = \frac{H(BC) * \text{distancia final deseada}}{\text{Factor bocón} * \text{diámetro total del conductor de la bobina}}$$

$$\text{Espiras por capa (tanteo)} = \frac{208 \text{ mm} * 13 \text{ mm}}{1,020 * 1,384 \text{ mm}}$$

Espiras por capa (tanteo) = 128,92 espiras

El número de capas de la bobina de alta tensión es una relación entre el número de espiras en el tap 1 puesto que es donde se considera el total de espiras y las espiras por capa escogidas.

$$\text{Nº de capas} = \frac{\text{Nº de espiras escogidas en el TAP 1}}{\text{Espiras por capa escogidas}}$$

$$\text{Nº de capas} = \frac{1345 \text{ espiras}}{129 \text{ espiras}}$$

Nº de capas = 10,43

$$\text{Voltaje entre capas} = \frac{1,05 * \text{voltaje en M. T.} * \text{espiras por capa escogidas} * 2}{\text{N}^{\circ} \text{ de espiras escogidas en el TAP 1}}$$

$$\text{Voltaje entre capas} = \frac{1,05 * 6300\text{v} * 129 \text{ espiras} * 2}{1345 \text{ espiras}}$$

$$\text{Voltaje entre capas} = 1268,90 \text{ v}$$

El factor de kV/mm no podrá ser superior a 3, dado que puede llegar a dañar los aislamientos del devanado de alta tensión.

$$\frac{\text{kV}}{\text{mm}} = \frac{\frac{\text{voltaje entre capas}}{1000}}{\text{capas de papel de } 25 \text{ mm} * 0,25 + 1 * (\text{dia. máx.} - \text{dia. desn. del conductor})}$$

$$\frac{\text{Kv}}{\text{mm}} = \frac{\frac{1268,90 \text{ v}}{1000}}{1,5 * 0,25 + 1 * (1,384 \text{ mm} - 1,290)}$$

$$\frac{\text{Kv}}{\text{mm}} = 2,706$$

**Tabla 15:** Aislamiento contra el yugo bobina 6300 V

Fuente: Los autores

| <b>Aislamiento contra el yugo<br/>Bobina 6300 V</b> |       |
|---|-------|
| Aislamiento del yugo:                               | 2 mm  |
| Separación de aceite:                               | 1 mm  |
| Collarín de A.T.                                    | 10 mm |
| Distancia final:                                    | 13 mm |

$$\text{Collarín de A. T.} = \frac{(\text{H(BC)} - 2) * (\text{aislamiento del yugo} + \text{separación de aceite}) - (\text{longitud de la bobina de A. T.})}{2}$$

$$\text{Collarín de A. T.} = \frac{(208 \text{ mm} - 2) * (2 \text{ mm} + 1 \text{ mm}) - (182 \text{ mm})}{2}$$

$$\text{Collarín de A. T.} = 10 \text{ mm}$$

**Tabla 16:** Capas de papel bobina 6300 V

Fuente: Los autores

| <b>Papel</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Total</b> | <b>Capas</b>    |
|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| 0,375        | 1               | 0,375        | (1RA Y 2DA)     |
| 0,375        | 1               | 3            | (2DA A 10AVA)   |
| 0,375        | 1               | 0,375        | (10AVA Y 11AVA) |

Nº de capas de la 1ra y 2da = (cantidad \* papel =  $(1 * 0.375) = 0.375$ )

Nº de capas de la 2da a la 12va = (Nº de capas escogidas – 3) \* (cantidad \* el papel)

Nº de capas de la 2da a la 12va =  $(11 - 3) * (1 * 0,375)$

Nº de capas de la 2da a la 12va = 3

Nº de capas de la 12ava y 13ava = (cantidad \* papel =  $(1 * 0.375) = 0.375$ )

### **3.7. Cálculo de la distancia entre ejes**

En este paso se consideran todos los elementos para sacar las medidas del eje transversal y longitudinal de la parte activa.

Eje Transversal:



**Figura 15:** Parte activa del transformador en el tanque

Fuente: Los autores

**Tabla 17:** Eje transversal  
Fuente: Los autores

| <b>Eje Transversal:</b>        |             |    |
|--------------------------------|-------------|----|
| Mitad de la columna (EU):      | 46,5        | mm |
| Papel contra el yugo:          | 1           | mm |
| Aceite:                        | 2           | mm |
| Cartón de molde:               | 1,5         | mm |
| 1/2 Bob. B.T. :                | 15,7        | mm |
| cabezal/canal dispersión (4mm) | 0           | mm |
| 10 capas papel 0,25            | 2,5         | mm |
| Bobina A.T.:                   | 18,0        | mm |
| Aislamiento A.T.               | 4,50        | mm |
| C. dispersión                  | 0           | mm |
| Derivaciones                   | 0           | mm |
| 1/2 Bob. B.T. :                | 0,0         | mm |
| Aislamiento 1/2 B.T.:          | 0           | mm |
| Papel final:                   | 0,5         | mm |
| Aceite entre Bob. y núcleo:    | 2           | mm |
|                                | 94,2        | mm |
| x                              | 2           |    |
| F. Bocón:                      | 188,38      | mm |
| x                              | <b>1,02</b> |    |
|                                | 192,14      |    |
| RADIAL T                       | 44,8224     |    |
| M ( 2xAC + 2xEU ):             | 194,14352   | mm |
| AC                             | 50          |    |

Mitad de la columna (EU)  $\approx$  Espesor (EU) del número de espiras de la bobina de B. T.

Mitad de la columna (EU) = 46.5 mm

$$\frac{1}{2} \text{Bobina de B. T.} = (\text{ancho conductor bobina de B. T.} * (\text{N}^\circ \text{ espiras long. bobina de B. T.} - 1)) * 2$$

$$\frac{1}{2} \text{Bobina de B. T.} = (0,327 \text{ mm} * (25. - 1)) * 2$$

$$\frac{1}{2} \text{Bobina de B. T.} = 15,7 \text{ mm}$$

Bobina de A. T. = diámetro máx. conduct. bobina de A. T \* N° de capas escogidas

Bobina de A. T. = 1,384 mm \* 13

Bobina de A. T. = 18,0 mm

Aislamiento de A. T.

= cantidad T. de papel en la 1ra y 2da capa

+ cantidad T. de papel en la 2da a 12va capa

+ cantidad T. de papel en la 12va y 13va capa

Aislamiento de A. T. = 0,375 + 3,75 + 0,375

Aislamiento de A. T. = 4,50 mm

Radial T = cartón de molde +  $\frac{1}{2}$  bobina de B. T. +  $\frac{\text{cabeza}}{\text{canal dispersión (4 mm)}}$

+ 10 capas de papel de 0,25 mm

+ bobina de A. T. + aislamiento de A. T. + C. dispersión

+ derivaciones + aislamiento de  $\frac{1}{2}$  bobina de B. T. + papel final

Radial T = 1,5 mm + 15,7 mm + 0 mm + 2,5 mm + 18,0 mm + 4,50 mm

+ 0 mm + 0 mm + 0 mm + 0,5 mm = 44.8224

**Tabla 18:** Eje Longitudinal

Fuente: Los autores

| <b>Eje Longitudinal.</b>       |        |    |
|--------------------------------|--------|----|
| Mitad del Núcleo:              | 65     | mm |
| Papel contra el yugo:          | 1      | mm |
| Aceite:                        | 1      | mm |
| Cartón de molde:               | 1,5    | mm |
| 1/2 Bob. B.T. :                | 15,7   | mm |
| cabezal/canal dispersión (4mm) | 4      | mm |
| 10 capas papel 0,25            | 2,5    | mm |
| Bobina A.T.:                   | 17,992 | mm |
| Aislamiento A.T.               | 4,5    | mm |
| C. dispersión 6 mm             | 0      | mm |

|                       |            |    |
|-----------------------|------------|----|
| Derivaciones          | 3          | mm |
| 1/2 Bob. B.T. :       | 0,0        | mm |
| Aislamiento 1/2 B.T.: | 0          | mm |
| Papel Final:          | <b>0,5</b> | mm |
|                       | 116,7      |    |
|                       | 2,0        |    |
|                       | 233,4      | mm |
| F. Bocón:             | 1,08       |    |
|                       | 252,05     |    |
| Rad Longt             | 52,1724    |    |
| K:                    | 1,3        |    |
| Tcc:                  | 0,85%      |    |
| Radial                | 44,8224    |    |

$$\text{Mitad del núcleo} = \frac{\text{ancho (BI)}}{2}$$

$$\text{Mitad del núcleo} = \frac{130 \text{ mm}}{2}$$

$$\text{Mitad del núcleo} = 65 \text{ mm}$$

**Tabla 19:** Calculo del TCC

Fuente: Los autores

| <b>Cálculo de Tcc.</b> |         |        |
|------------------------|---------|--------|
| D:                     | 11,27   | Cm     |
| b1:                    | 2,25    | Cm     |
| b2:                    | 3,14    | Cm     |
| b:                     | 0,25    | Cm     |
| T:                     | 57,48   | Cm     |
| X1+X2:                 | 15,8236 | Ohmios |
| Z base:                | 3870,96 | Ohmios |
| Tccx:                  | 0,41%   |        |
| R1+R2:                 | 24,07   | Ohmios |
| Tccr:                  | 0,75%   |        |
| Tcc:                   | 0,85%   |        |
| Tcc:                   | 203,9   | mm     |

**Tabla 20:** Detalle de longitud de las espiras de alta tensión.  
Fuente: Los autores

| <b>Espiras alta tensión</b>        |            |                        |            |
|------------------------------------|------------|------------------------|------------|
|                                    | Long.      | Ancho                  |            |
| <b>Interna</b>                     | 181.392 mm | 138.392 mm             |            |
| <b>Externa</b>                     | 226.376 mm | 183.376 mm             |            |
| <b>Media:</b>                      | 203.884 mm | 160.884 mm             |            |
| Espira media interior baja tensión |            | Espira media exterior: |            |
| Anc. medio:                        | 117.696 mm | Anc. medio:            | 183.376 mm |
| Long. media:                       | 156.696 mm | Long. media:           | 232.376 mm |

**Tabla 21:** Detalle de longitud de las espiras de baja tensión.  
Fuente: Los autores

| <b>Espiras baja tensión</b>               |           |           |           |
|---|-----------|-----------|-----------|
| <b>X1</b>                                 | 22.492 mm | <b>X2</b> | 15.696 mm |
| <b>Y1</b>                                 | 22.492 mm | <b>Y2</b> | 15.696 mm |
| <b>M1</b>                                 | 446 mm    | <b>M1</b> | 446 mm    |
| <b>M2</b>                                 | 69.238 mm | <b>M2</b> | 18.696 mm |
| <b>Longitud espira media interior B.T</b> |           | 504.735   | mm        |
| <b>Longitud espira media interior B.T</b> |           | 0.595     | m         |
| <b>Longitud espira media A.T</b>          |           | 663.519   | mm        |
| <b>Longitud espira media A.T</b>          |           | 0.663     | m         |

### 3.8. Cálculo del cobre bobina de baja tensión

**Tabla 22:** Detalle de espiras de baja tensión  
Fuente: Los autores

|                                   |       |    |
|-----------------------------------|-------|----|
| <b>Espira media interior:</b>     | 0.576 | m  |
| <b>Espira media exterior:</b>     | 0.000 | m  |
| <b>Peso total del cobre b.t.:</b> | 9.435 | kg |



$$\text{Espira media interior} = \frac{(\text{Ancho medio} * 2 + \text{long media} * 2) * 1.05}{1000}$$

$$\text{Espira media interior} = 0.576 \text{ m}$$

$$\text{Peso total del cobre BT} = \text{Long Total de platinas} * \text{Sección Total} * 8.9 * 0.001$$

$$\text{Peso total del cobre BT} = 29.78 * 35.6 * 8.9 * 0.001 = 9.435 \text{ kg}$$

### 3.9. Cálculo del cobre bobina de alta tensión

**Tabla 23:** Detalle de longitud y peso

Fuente: Los autores

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| <b>Longitud de espira media:</b>  | 0.766 m   |
| <b>Peso Total del cobre A.T.:</b> | 13.832 kg |

$$\begin{aligned} \text{Longitud de espira media} &= \frac{(\text{Long media} * 2 + \text{Ancho medio} * 2) * 1.05}{1000} \\ &= \frac{(203.9 * 2 + 160.9 * 2) * 1.05}{1000} = 0.766 \text{ m} \end{aligned}$$

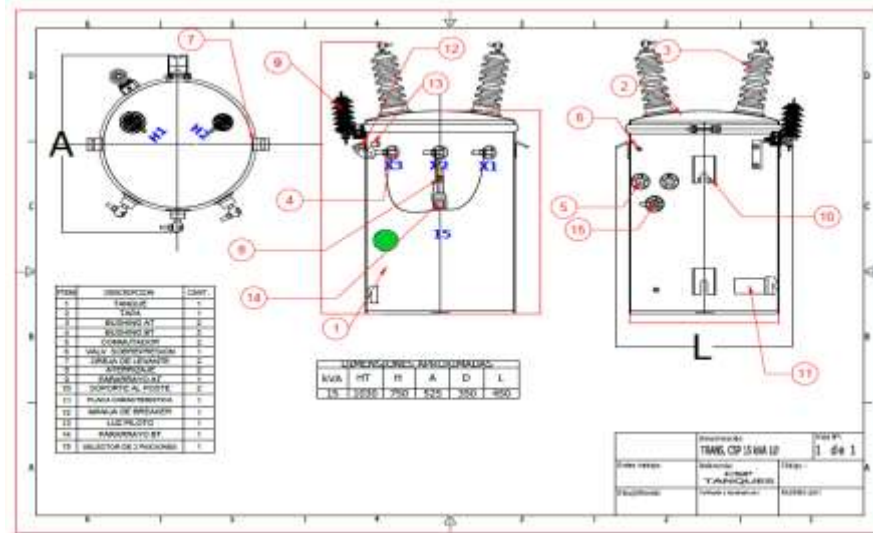
$$\text{Peso total del cobre} = (\text{LEM AT} * \#\text{Espiras escogidas} * \text{Seccion total alambre} * 8.9 * 0.001 * 1) + (\text{LEM AT} * \#\text{Espiras escogidas} * \text{Seccion aislamiento} * 5.98 * 0.001 * 1)$$

$$\text{Peso total del cobre} = (0.663 * 1627 * 1.306 * 8.9 * 0.001 * 1) + (0.663 * 1627 * 0.197 * 5.98 * 0.001 * 1) = 13.832 \text{ kg}$$

### 3.10. Cálculos para el dimensionamiento del tanque

$$\text{Longitud minima} = 3 * M (2xAC + 2xEU) + 60 = 3 * 194.14 + 60 = 642.43 \text{ mm}$$

$$\text{Ancho mínimo} = \text{Eje longitudinal de parte activa} + 110 = 252.05 + 110 = 362 \text{ mm}$$



**Figura 16:** Plano dimensional del transformador autoprotegido  
Fuente: Los autores

### 3.11. Cálculo de potencia a disipar a 85°C, posición 2

1) Pérdidas resistivas:

**Tabla 24:** Pérdidas resistivas AT

Fuente: Los autores

|  |                |                             |        |
|--|----------------|-----------------------------|--------|
| <b>Longitud total de alambre:</b>            | 1.053,67 m     | <b>Temperatura prueba</b>   | 30     |
| <b>Resistencia total a 20°C:</b>             | 13,898 Ohm     | <b>Resistencia primaria</b> | 14,443 |
| <b>Resistencia total a 85°C:</b>             | 17,447 Ohm     |                             |        |
| <b>Pérdidas resistivas puras (20°C):</b>     | 53,85 W        |                             |        |
| <b>Pérdidas resistivas puras (85°C):</b>     | 67,61 W        |                             |        |
| <b>Pérdidas parásitas resistivas (20°C):</b> | 1,62 W         | 3%                          |        |
| <b>Pérdidas parásitas resistivas (85°C):</b> | 1,29 W         |                             |        |
| <b>Pérdidas resistivas totales (20°C):</b>   | 55,47 W        |                             |        |
| <b>Pérdidas resistivas totales (85°C):</b>   | <b>68,90 W</b> |                             |        |

Long Total del alambre = Longitud espira media AT \* # espiras escogidas Tap 2

$$= 0.663 * 1588 = 1053.67 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Resistencia total a } 20^{\circ}\text{C} &= \frac{\text{Long Total del alambre} * \text{Res. } 20^{\circ}\text{C alambre AT}}{(1000 * \# \text{ conductores})} \\ &= \frac{1053.67 * 13.19}{1000 * 1} = 13.90 \text{ Ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Resistencia total a } 85^{\circ}\text{C} &= \frac{(85 + 234.5)}{(20 + 234.5)} * \text{Res. } 20^{\circ}\text{C} = \frac{(85 + 234.5)}{(20 + 234.5)} * 13.90 \\ &= 17.45 \text{ Ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas resistivas puras (} 20^{\circ}\text{C)} &= \text{Resistencia total a } 20^{\circ}\text{C} * \text{corriente AT}^2 \\ &= 13.90 * 1.97^2 = 53.85 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas resistivas puras (} 85^{\circ}\text{C)} &= \text{Resistencia total a } 85^{\circ}\text{C} * \text{corriente AT}^2 \\ &= 17.45 * 1.97^2 = 67.61 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas parásitas resistivas (} 20^{\circ}\text{C)} &= \text{Pérdidas resistivas puras (} 20^{\circ}\text{C)} * 0.03 \\ &= 53.85 * 0.03 = 1.62 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas parásitas resistivas (} 85^{\circ}\text{C)} &= \text{Pérdidas resistivas puras (} 85^{\circ}\text{C)} * 0.03 \\ &= 1.62 * \frac{(20 + 234.5)}{(85 + 234.5)} = 1.29 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas resistivas totales (} 20^{\circ}\text{C)} &= \text{Pérdidas resistivas puras (} 20^{\circ}\text{C)} + \\ &\text{pérdidas parásitas resistivas (} 20^{\circ}\text{C)} \end{aligned}$$

$$\text{Pérdidas resistivas totales (} 20^{\circ}\text{C)} = 53.85 + 1.62 = 55.47 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas Resistivas Totales (} 85^{\circ}\text{C)} &= \text{Pérdidas Resistivas Puras (} 85^{\circ}\text{C)} + \\ &\text{Pérdidas Parásitas Resistivas (} 85^{\circ}\text{C)} \end{aligned}$$

$$\text{Pérdidas Resistivas Totales (} 85^{\circ}\text{C)} = 67.61 + 1.29 = 68.90 \text{ W}$$

**Tabla 25:** Perdidas resistivas baja tensión  
Fuente: Los autores

|  |        |     |                               |        |
|--|--------|-----|-------------------------------|--------|
| <b>Longitud total de platinas:</b>           | 29,78  | m   | <b>Temperatura de prueba</b>  | 30     |
| <b>Resistencia total a 20°C:</b>             | 0,0144 | Ohm | <b>Resistencia secundaria</b> | 0,014  |
| <b>Resistencia total a 85°C:</b>             | 0,0181 | Ohm | <b>Resistencia secundaria</b> | 14,988 |
| <b>Pérdidas resistivas puras (20°C):</b>     | 56,34  | W   |                               |        |
| <b>Pérdidas resistivas puras (85°C):</b>     | 70,72  | W   |                               |        |
| <b>Pérdidas parásitas resistivas (20°C):</b> | 7,89   | W   | 14%                           |        |
| <b>Pérdidas parásitas resistivas (85°C):</b> | 6,28   | W   |                               |        |
| <b>Pérdidas resistivas totales (20°C):</b>   | 64,22  | W   |                               |        |
| <b>Pérdidas resistivas totales (85°C):</b>   | 77,01  | W   |                               |        |

$$\text{Long total de platinas} = \frac{(\text{Long esp media interior BT} * \# \text{ Espiras BT}) + \text{Espira Media Exterior} + \# \text{ Espiras BT}}{2}$$

$$\text{Long Total de Platinas} = (0.595 * 50) + \left(\frac{0 * 50}{2}\right) = 29.78 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Resistencia total a } 20^{\circ}\text{C} &= \frac{\text{Long total de platinas} * \text{Res. } 20^{\circ}\text{C fleje Cu}}{(1000 * \# \text{ de Flejes Cu})} \\ &= \frac{29.78 * 0.484}{1000 * 1} = 0.0144 \text{ Ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Resistencia total a } 85^{\circ}\text{C} &= \frac{(85 + 234.5)}{(20 + 234.5)} * \text{Res. } 20^{\circ}\text{C} = \frac{(85 + 234.5)}{(20 + 234.5)} * 0.0144 \\ &= 0.0181 \text{ Ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas resistivas puras (20°C)} &= \text{Resistencia total a } 20^{\circ}\text{C} * \text{corriente BT}^2 \\ &= 0.0144 * 62.50^2 = 56.34 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas resistivas puras (85°C)} &= \text{Resistencia total a } 85^{\circ}\text{C} * \text{corriente AT}^2 \\ &= 0.0181 * 62.50^2 = 70.72 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas parásitas resistivas (20°C)} &= \text{Pérdidas resistivas puras (20°C)} * 0.14 \\ &= 56.34 * 0.14 = 7.89 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas parásitas resistivas (85°C)} &= \text{Pérdidas resistivas puras (85°C)} * 0.14 \\ &= 7.89 * \frac{(20 + 234.5)}{(85 + 234.5)} = 6.28 \text{ W} \end{aligned}$$

Pérdidas resistivas totales (20°C) = Pérdidas resistivas puras (20°C) +  
pérdidas parásitas resistivas (20°C)

$$\text{Pérdidas resistivas totales (20°C)} = 56.34 + 7.89 = 64.22 \text{ W}$$

Pérdidas resistivas totales (85°C)

$$= \text{pérdidas resistivas puras (85°C)} + \text{pérdidas parásitas resistivas (85°C)}$$

$$\text{Pérdidas resistivas totales (85°C)} = 70.72 + 6.28 = 77.01 \text{ W}$$

**Tabla 26:** Perdidas resistivas totales A.T.+B.T.

Fuente: Los autores

|  |          |
|--|----------|
| <b>Pérdidas resistivas totales (20°C):</b> | 119,69 W |
| <b>Pérdidas resistivas totales (85°C):</b> | 145,90 W |

Pérdidas resistivas totales (20°C)

$$= \text{pérdidas resistivas totales AT (20°C)} + \text{pérdidas resistivas totales BT (20°C)}$$

$$\text{Pérdidas resistivas totales (20°C)} = 55.47 + 64.22 = 119.693 \text{ W}$$

Pérdidas resistivas totales (85°C)

$$= \text{pérdidas resistivas totales AT (85°C)} + \text{pérdidas resistivas totales BT (85°C)}$$

$$\text{Pérdidas resistivas totales (85°C)} = 68.90 + 77.01 = 145.90 \text{ W}$$

## 2) Pérdidas en el núcleo

$$\begin{aligned} \text{Pérdidas en el núcleo} &= \text{factor} \frac{\text{W}}{\text{kg}} \text{ H100} * \text{peso del núcleo} = 1.008 * 61 \\ &= 61.488 \text{ W} \end{aligned}$$

## 3) Pérdidas Adicionales

Las pérdidas adicionales son el 5% de las pérdidas resistivas a 85°C

$$\text{Pérdidas adicionales totales} = (\text{pérdidas resistivas totales (85°C)} * 0.05)$$

$$\text{Pérdidas adicionales totales} = (145.90 * 0.05) = 7.295 \text{ W}$$

$$\text{Pérdidas en el breaker} = 8.5 \text{ W}$$

Pérdidas totales a disipar a 85°C = Pérdidas resistivas totales (85°C) +  
pérdidas en el núcleo +  
pérdidas adicionales totales 5% de las pérdidas resistivas a 85°C +  
pérdidas en el breaker

$$\text{Pérdidas totales a disipar a 85°C} = 145.90 + 61.488 + 7.295 + 8.5 = 223.19 \text{ W}$$

## **Valores de pérdidas sin carga máximos admisibles Norma NTE INEN 2114**

Transformadores de distribución nuevos monofásicos. Valores de corriente sin carga, pérdidas y voltaje de cortocircuito [5]

La norma NTE INEN 2114 establece los valores máximos permisibles de corriente sin carga ( $I_0$ ), pérdidas sin carga ( $P_0$ ), pérdidas con carga a 85°C ( $P_c$ ), pérdidas totales ( $P_t$ ) y voltaje de cortocircuito a 85°C ( $U_{zn}$ ), para transformadores de distribución nuevos, monofásicos, autorrefrigerados y sumergidos en líquido refrigerante, sin contenido de PCB. [5]

### **Alcance**

Se aplica a transformadores monofásicos de distribución de 3 a 333 kVA, frecuencia 60 Hz clase medio voltaje 25 kV, de 15 a 333 kVA frecuencia 60 Hz, clase medio voltaje 25 kV, y 34,5 kV, clase bajo voltaje 1,2 kV [5].

**Según como indica [5], los requisitos:**

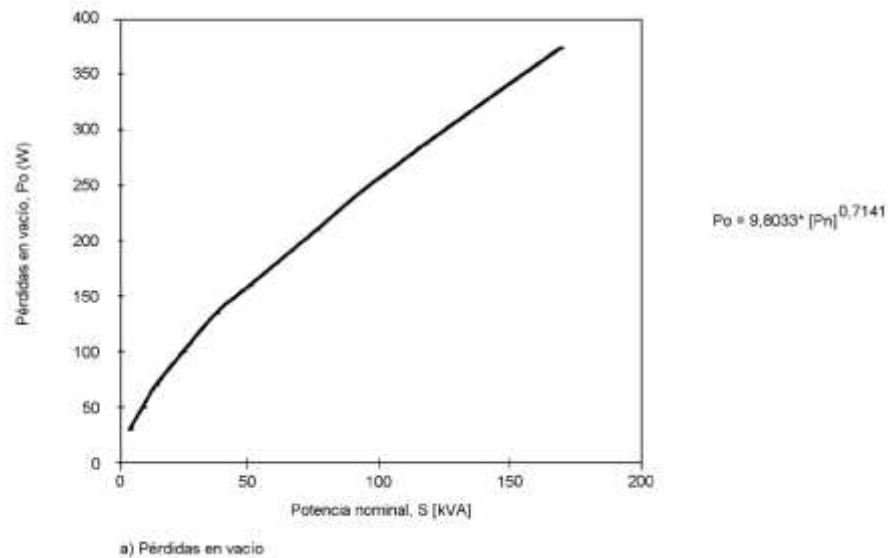
“Los valores máximos permisibles de  $I_o'$   $P_o'$   $P_c'$   $P_t$  y  $U_{zn}$  serán los indicados en las tablas 1 y 2, cuando se verifiquen de acuerdo con lo indicado en el Capítulo 5. A estos valores no se aplicará tolerancia.

Para aquellos transformadores que estén dentro del rango establecido en el numeral 2.1, pero que no estén con valores definidos, los valores máximos permisibles serán establecidos de acuerdo a las siguientes fórmulas:

Transformadores monofásicos de 3 a 167 kVA, clase medio voltaje  $\leq 15$  kV, clase bajo voltaje 1,2 kV”

a) Pérdidas en vacío

$$P_o = 9,8033(P_n)^{0,714}$$

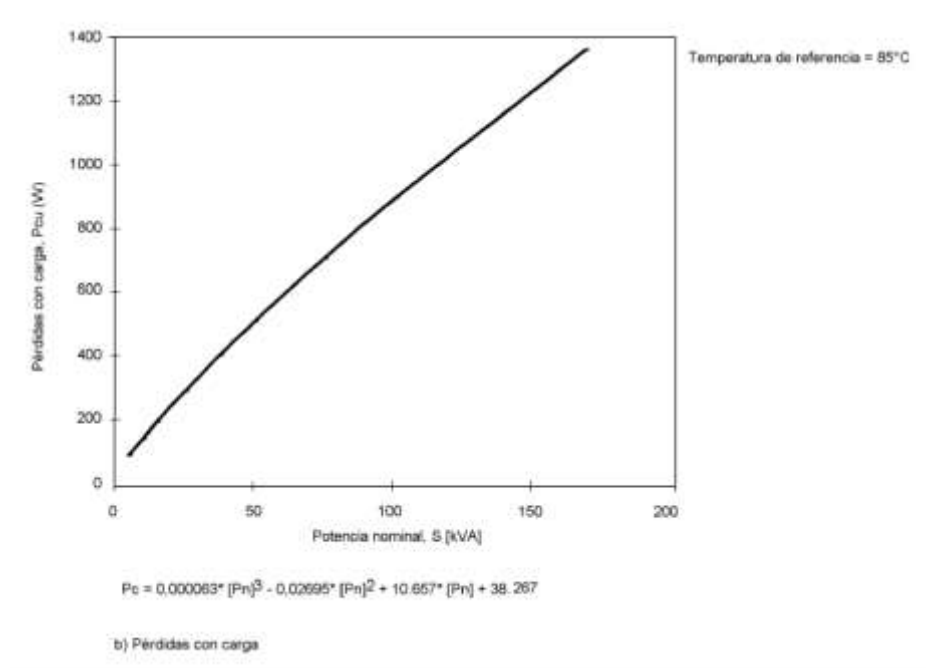


**Figura 17:** Pérdidas en vacío clase 15kV, potencia nominal

Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 818 [13]

b) Pérdidas con carga

$$P_c = 0,000063(P_n)^3 - 0,02695(P_n)^2 + 10,657(P_n) + 38,267$$



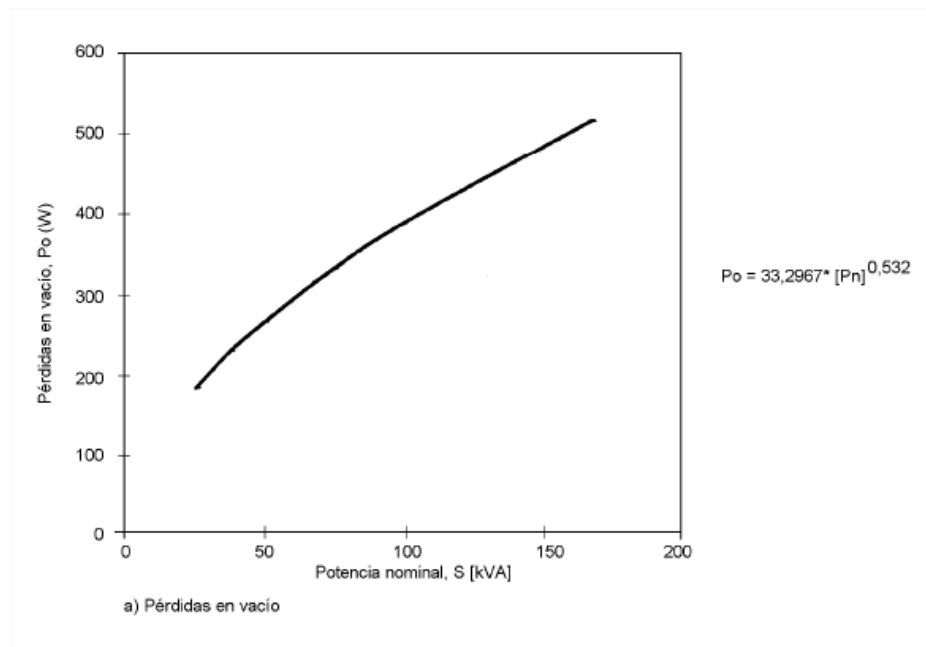
**Figura 18:** Pérdidas con carga clase 15kV, potencia nominal

Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 818 [13]

Transformadores monofásicos de 25 a 167 kVA, clase medio voltaje 25 kV, y 34,5 kV clase bajo voltaje 1,2 kV.

a) Pérdidas en vacío

$$P_o = 33,2967(P_n)^{0,532}$$



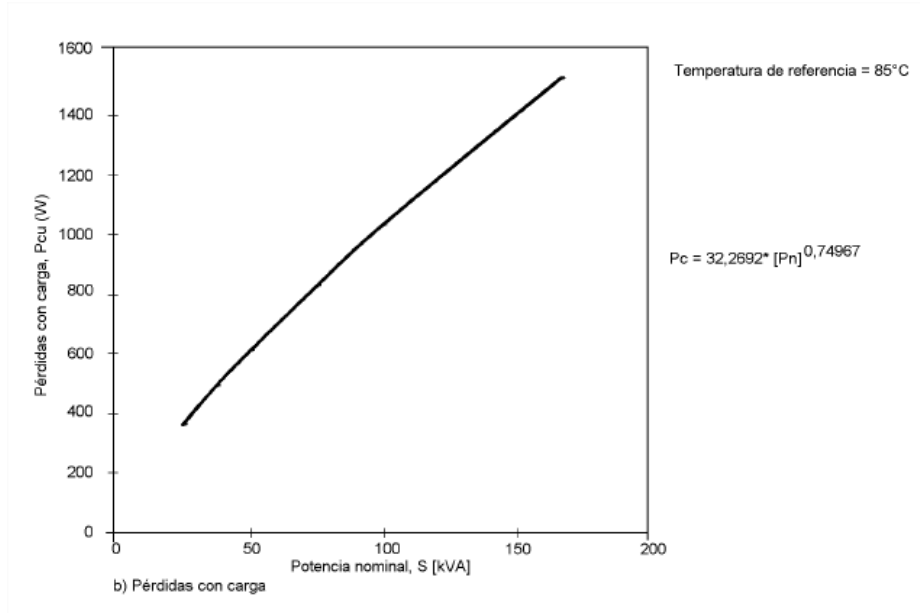
**Figura 19:** Pérdidas en vacío clase 25kV y 34.5kV, potencia nominal

Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 818 [13]



b) Pérdidas con carga

$$P_c = 33,2692(P_n)^{0,749}$$



**Figura 20:** Pérdidas con carga clase 25kV y 34.5kV, potencia nominal

Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 818 [13]

Los métodos de ensayo se deben realizar de acuerdo con la NTE INEN 2111 [5] [14].

**Tabla 27:** Transformadores monofásicos de 3 a 333KVA clase medio voltaje <25kV clase de voltaje < 1.2 kV referidos a 5ª C

Fuente: NTE INEN 2114 Tabla 1 [5]

| Potencia Nominal kVA | $I_o$ (% de $I_n$ ) | $P_o$ (W) | $P_s$ (W) | $P_i$ (W) | $U_{zn}$ (%) |
|----------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| 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       | 1 160     | 3,0          |
| 167*                 | 1,5                 | 379       | 1 360     | 1 739     | 3,0          |

\* Para potencias entre 167 kVA y 333 kVA, las pérdidas se determinarán en común acuerdo entre fabricante y comprador

a) Pérdidas en vacío

$$P_o = 9,8033(P_n)^{0,714} = 9,8033(15)^{0,714} = 68 \text{ W}$$

b) Pérdidas con carga

$$\begin{aligned}
 P_c &= 0,000063(P_n)^3 - 0,02695(P_n)^2 + 10,657(P_n) + 38,267 \\
 &= 0,000063(15)^3 - 0,02695(15)^2 + 10,657(15) + 38,267 \\
 &= 192 \text{ W}
 \end{aligned}$$

**Tabla 28:** Pérdidas del diseño monofásico

Fuente: Los autores

|                                |         |   |
|--------------------------------|---------|---|
| <b>Pcc norma NTE INEN 2114</b> | 192.000 | W |
| <b>Po norma NTE INEN 2114</b>  | 68.000  | W |
| <b>Pcc diseño</b>              | 161.698 | W |
| <b>Po diseño</b>               | 61.488  | W |
| <b>Po real 27ZH100</b>         | 67.637  | W |

Pcc Diseño = Pérdidas resistivas totales (85°C) + pérdidas adicionales totales + pérdidas en el breaker

$$Pcc \text{ Diseño} = 145.90 + 7.295 + 8.5 = 161.70 \text{ W}$$

$$Po \text{ Diseño} = \text{Factor} \frac{W}{KG} H100 * \text{Peso del núcleo} = 1.008 * 61 = 61.488 \text{ W}$$

$$\begin{aligned}
 Po \text{ Real H100} &= \text{Factor} \frac{W}{KG} H100 * \text{Peso del núcleo} = 1.008 * 61 * 1.10 \\
 &= 67.636 \text{ W}
 \end{aligned}$$

### 3.12. Bobinado

**Tabla 29:** Bobinado de baja tensión – 6300 / 7620V

Fuente: Los autores

|                   |    |         |
|-------------------|----|---------|
| <b>1ra. baja:</b> | 25 | Espiras |
| <b>2da. baja:</b> | 50 | Espiras |

**Tabla 30:** Bobinado de alta tensión – 6300 / 7620V

Fuente: Los autores

| <b>Descripción</b>   | <b>Cantidad</b> | <b>Tipo</b> |
|----------------------|-----------------|-------------|
| Dif. Esp. Tap1-Tap2: | 32              | Espiras     |
| Dif. Esp. Tap2-Tap3: | 33              | Espiras     |
| Dif. Esp. Tap3-Tap4: | 33              | Espiras     |
| Dif. Esp. Tap4-Tap5: | 33              | Espiras     |

|                      |    |         |
|----------------------|----|---------|
| Dif. Esp. Tap1-Tap2: | 39 | Espiras |
| Dif. Esp. Tap2-Tap3: | 40 | Espiras |
| Dif. Esp. Tap3-Tap4: | 40 | Espiras |
| Dif. Esp. Tap4-Tap5: | 40 | Espiras |

**Tabla 31:** Capas de bobinado de alta tensión – 6300 / 7620 V

Fuente: Los autores

|              |       |     |  |
|--------------|-------|-----|--|
| 1ra. Capa:   | 129   |     |  |
| 2da. Capa:   | 258   |     |  |
| 3ra Capa:    |       |     |  |
| Salida 2:    | 322   | 64  |  |
| Salida 3:    | 355   | 33  |  |
| Salida 4:    | 387   | 32  |  |
| 4ta. Capa:   |       |     |  |
| Salida 5:    | 387   | 0   |  |
| Salida 6:    | 420   | 33  |  |
| Salida 7:    | 453   | 33  |  |
| Fin de capa: | 516   | 63  |  |
| 5ta. Capa:   | 645   | 129 |  |
| 6ta. Capa:   |       |     |  |
| Salida 2:    | 695   | 50  |  |
| Salida 3:    | 735   | 40  |  |
| Salida 4:    | 774   | 39  |  |
| 7ma Capa:    |       |     |  |
| Salida 5:    | 774   | 0   |  |
| Salida 6:    | 814   | 40  |  |
| Salida 7:    | 854   | 40  |  |
| Fin de capa: | 903   | 49  |  |
| 8va Capa:    | 1,032 | 129 |  |
| 9na Capa:    | 1,161 | 129 | Final de capa 9 al común del selector                          |
| 10ma Capa:   | 1,290 | 129 | Inicio de capa 10 al 2 del selector                            |
| 11va Capa:   | 1,419 | 129 |  |
| 12va Capa:   | 1,443 | 24  | ESPIRA 24 DE LA CAPA 12 SOLDAR<br>UNA SALIDA AL 1 DEL SELECTOR |
|              | 1,548 | 105 | FINAL DE LA CAPA 12  |
| 13va Capa:   | 1,627 | 79  |  |

## **CAPÍTULO IV**

### **4. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN**

#### **4.1. Descripción**

Una vez que se ha desarrollado el diseño eléctrico del transformador y se ha elegido los materiales y materia prima acorde a la información técnica de cada uno, se emite una lista de materiales a usar para la producción de la parte activa y finalmente integrarlos junto con las partes y piezas en una unidad, el transformador.

En este capítulo se detalla el proceso de manufactura de cada línea de producción para las partes del transformador.

A continuación el detalle del proceso general:

1. Sección: corte, armado y recocido del núcleo.
2. Confección de las bobinas de baja y alta tensión.
3. Prensado y secado de las bobinas.
4. Ensamble, conexiones y secado de la parte activa.
5. Corte, armado, soldadura y pintura de la cuba o tanque.
6. Inmersión de la parte activa en la cuba.
7. Prueba de fugas y vacío de tanque del transformador.
8. Llenado de aceite del transformador
9. Pruebas de laboratorio.
10. Elaboración de la placa.
11. Demarcación y etiquetado del trafo.
12. Control de calidad.

El proceso general se elaboró y se implementó usando las instalaciones y maquinarias de la planta de C.A. MORETRAN de acuerdo con los pasos que se siguen para la fabricación de un transformador, dividiendo el trabajo por secciones ya que se realiza a la vez las diferentes partes que conforman un transformador, disminuyendo el tiempo en la fabricación, además que se lo hace de forma sistemática y de orden cronológico.

## **4.2. Construcción del transformador en C.A MORETRAN**

### **4.2.1. Corte, armado y recocido del núcleo**

En esta sección ingresan la materia prima flejes de acero al silicio 27ZH100 a ser cortado de acuerdo con el diseño eléctrico realizado en el capítulo 3 para en lo posterior armar el núcleo, a continuación los pasos que se siguen para el corte y armado del núcleo:

#### **Proceso de corte y armado del núcleo.**

1. Cálculo de la sección transversal núcleo
2. Plano integral de dimensiones del núcleo.
3. Modificación de matrices en las máquinas de corte uncore acorde al diseño del núcleo.
4. Corte de lámina de acero al silicio 27ZH100 completa que conforme el núcleo diseñado.
5. Armado de los cortes hasta formar el núcleo diseñado.
6. Verificación de dimensiones de acuerdo al plano para descartar errores.
7. Corte del 100% de láminas de acero al silicio para conformar el núcleo.
8. Ensamble del núcleo.
9. Con el núcleo totalmente armado, verificar las dimensiones totales.
10. Proceso de prensado del núcleo.
11. Proceso de recocido núcleo a 800 °C
12. Núcleo terminado.

El diseño y los cálculos previos para el núcleo, luego al operador de la máquina de corte uncore se le entrega un plano en el cual se detalla todos los datos que se requieren para el corte de las láminas para su posterior armado. Con el plano se procede a rectificar las medidas de las matrices las cuales se encuentran en la mesa de la cizalla donde se coloca la lámina a ser cortada, las matrices nos darán las distancias o medidas exactas para cortar el núcleo. Seguido a esto cortamos una pieza de cada una con la finalidad de comprobar que están dentro de las medidas adecuadas del plano, esto es muy importante observar ya que si se comete algún

error, a más del tiempo –desperdiciado- que lleva cortar y armar se debe considerar el costo del material.

Con las piezas cortadas se procede a armar el núcleo, esto se lo hace sobre una mesa completamente plana y con topes que ayudarán a armar el núcleo lo más cerrado entre láminas y con un apilado uniforme, es necesario que al poner lámina con lámina quede sin aberturas, y de acuerdo al modelo traslapar las mismas de tal forma que sea fácil sacar los cierres, montar las bobinas y volverlos a cerrar. Cuando se tiene el núcleo armado se comprueba nuevamente si está en las medidas adecuadas y de acuerdo al plano. Una vez terminado el armado del núcleo se procede a prensarlo para evitar que se desarme y sea fácil su transportación.



**Figura 21:** Proceso de corte, armado y recocido del núcleo  
Fuente: Los autores

El núcleo ingresa al horno para su proceso de recocido a una temperatura de 800 °C durante 30 horas, esto con el fin de que la materia prima, en este caso la lámina de acero, recupere sus propiedades constructivas dadas por el fabricante ya que al pasar por el proceso de corte en la máquina uncore es sometida a esfuerzos mecánicos.



**Figura 22:** Horno de secado de partes activas  
Fuente: Los autores

El núcleo ya terminado se lo pesa para de esta forma estimar las pérdidas del hierro, esta prueba se la hace por muestreo.

#### **4.2.2. Confección de las bobinas de baja y alta tensión.**

En esta línea de trabajo se construyen las bobinas de baja y alta tensión para los transformadores de distribución sean estos sumergidos en aceite o secos, a continuación el detalle del proceso:

1. Cálculo de la bobina.
2. Diagrama de la bobina.
3. Construcción o selección del carrete.
4. Montaje del carrete en la máquina bobinadora.
5. Adquisición en bodega de los materiales (aislamiento y cobre).
6. Confección del arrollamiento de baja tensión.
7. Montaje de aislamiento alta tensión contra BT.
8. Confección del arrollamiento de alta tensión.
9. Montaje de aislamientos de protección de alta tensión
10. Retirar el carrete con el bobinado de la máquina.
11. Retirar la el carrete de la bobina.
12. Bobina lista para montar en el núcleo.

Los cálculos eléctricos para el dimensionamiento de la bobina realizados en el capítulo 3 sirven para ubicar los materiales y medidas a utilizar en la construcción de los devanados de alta y baja tensión. Estos materiales deben ser cuantificados para de esta manera cumplir con el diseño del transformador.

Los datos de los cálculos, medidas, cantidad de espiras y capas de la bobina son entregados al bobinador, persona la cual se encarga de fabricar o seleccionar el carrete y la bobina de la siguiente manera:

- a).- Con los cálculos listos se procede a diseñar el tipo de bobina y el carrete que se va usar, el carrete no es nada más que una base de madera compuesta por dos piezas

las cuales tienen forma especial que permiten facilidad de sacar la bobina cuando esta esté elaborada, además que el carrete está asumiendo el papel de ser el tamaño del núcleo.



**Figura 23:** Selección del carrete para bobinas  
Fuente: Los autores

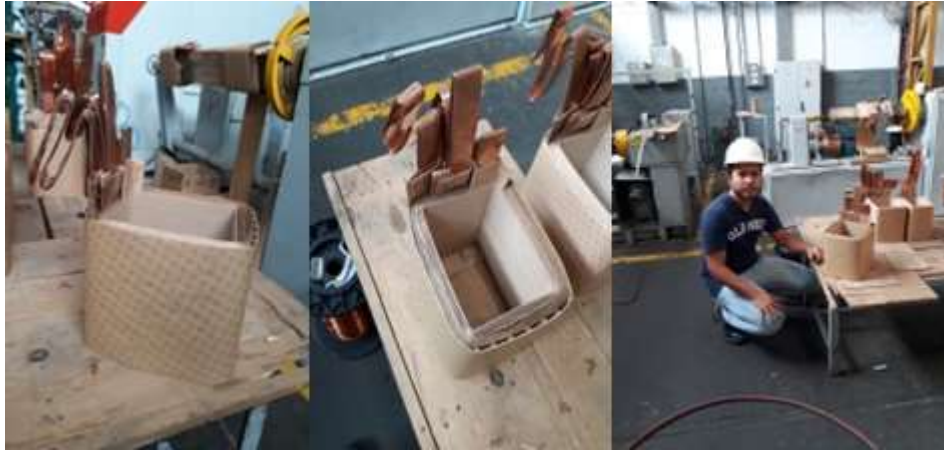
b).- El carrete seleccionado se lo monta en la máquina bobinadora de baja tensión asegurándose de que a más de estar centrada esté muy bien fijada ya que a medida que se va elaborando la bobina esta adquiere volumen y peso producto de los materiales con los que se construye el transformador.



**Figura 24:** Proceso de confección de arrollamiento de baja tensión  
Fuente: Los autores

Revisado todos estos aspectos se empieza a bobinar con lamina o láminas de cartón, esto con la finalidad de acerpar el trasformador y proteger de los esfuerzos mecánicos al momento de montar la bobina en el núcleo, el bobinador se ayuda de una estructura base 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.





**Figura 25:** Devanado de baja tensión

Fuente: Los autores

El bobinado tiene su principio, el mismo que sale a un extremo de la bobina, se empieza a envolver el conductor esmaltado debido a que los conductores van ligados entre espiras y pueden entrar en cortocircuito, de acuerdo con el diseño algunas bobinas tienen varias derivaciones, estas de igual forma salen a un mismo lado de la bobina.



**Figura 26:** Proceso de confección de arrollamiento de alta tensión

Fuente: Los autores

Como una bobina está constituida de varias espiras y varias capas el paso de una capa a otra no se bobina hasta los extremos ya que se debe poner un aislamiento con suficiente distancia que soporte las tensiones mecánicas, entonces se coloca un aislamiento (filamento llamado collarín) que está conformado de cartón en varias capas con un lado más ancho que el otro con la finalidad de montar el conductor de una capa a otra y así ir conformando las diferentes capas de cobre.

Entre capas de cobre arrollado en la bobina se aísla con papel Presspan impregnado con adhesivos epóxico, este aislamiento tiene el suficiente espesor para soportar el voltaje de ruptura entre capas según las normas. Una vez elaborada la bobina se procede a retirar de la máquina bobinadora, para luego extraer el carrete y en lo posterior montar la bobina en el núcleo.



**Figura 27:** Ensamble de devanados de alta y baja tensión  
Fuente: Los autores

#### 4.2.3. Elaboración del tanque

En la sección metalmecánica no solo se fabrica el tanque, también se elabora todo lo que es trabajos en metal como por ejemplo bridas, prensas, soportes, platinas, cajas para transformadores secos, etc.



**Figura 28:** Selección de la brida para el transformador  
Fuente: Los autores

Al igual que la bobina y el núcleo el tanque tiene su diseño de acuerdo al trabajo, potencia, nivel de tensión, condiciones de servicio, etc.; ya que de estos depende que

tenga una buena temperatura de operación continua, a continuación el detalle del proceso:

1. Diseño del tanque.
2. Plano del tanque.
3. Corte de láminas para la elaboración del tanque.
4. Doble o rolado de láminas para dar la forma al tanque.
5. Ensamblado y soldado de láminas a conformar el tanque
6. Perforación de la tapa y de la cuba.
7. Acople de válvulas de sobre presión.
8. Sellado del tanque.
9. Corte y soldado de acoples para la colocación de elementos de control, así como para los bushings de alta y baja tensión.
10. Pintura del tanque
11. Pruebas de vacío al tanque
12. Tanque terminado.

En este proceso se diseña y calcula las dimensiones del tanque teniendo la idea del tamaño que tiene la parte activa, con lo mencionado anteriormente se elabora el plano. Se compran las láminas del espesor indicado en el plano ya que es la medida apropiada para resistir el esfuerzo mecánico, se manda a cortar y a doblar ya que por su espesor necesita de máquinas adecuadas para el trabajo requerido.



**Figura 29:** Proceso de producción y rolado de tanque de lámina de acero al carbón  
Fuente: : Los autores

Una vez con las láminas cortadas y dobladas a medida se procede a ensamblar y soldar el cuerpo del tanque con un cordón, que tiene por características una gran resistencia mecánica y uniformidad para evitar fugas o rupturas del tanque, recuerde que el mismo está sujeto a grandes esfuerzos mecánicos.



**Figura 30:** Soldadura y uniones de tanque de lámina de acero al carbón  
Fuente: : Los autores

Soldado el tanque se coloca la tapa y se perfora los filos para en lo posterior sellar el tanque mediante pernos; Se elabora un empaque de caucho que irá entre la cuba y la tapa. El panel terminado debe ser probado, la prueba es de presión en la cual se somete a presión el panel y se le sumerge en agua para comprobar posibles fugas.

Listo el tanque con la tapa y el filo se prueba todo el tanque, la prueba es igual de presión en la cual sellamos el tanque y aplicamos presión aproximadamente 10 PSI., se comprueba en todas las partes donde puedan existir fugas.

Probado el tanque se retira la tapa, el empaque y perfora la cuba en las partes que van acoplados las salidas de alta y baja tensión del transformador así como elementos que permiten el control del transformador.

El tanque totalmente elaborado y con todos los orificios y acoples se procede a desoxidarlo, desengrasarlo y fosfatizarlo para liberar las impurezas del tanque, para proceder a pintar al horno con pinturas electrostática color gris claro similar a RAL serie 70 ya que la mayoría de equipos trabajan a la intemperie con situaciones climáticas adversas.

El tanque pasa al área de vacío durante 2 a 3 horas, una vez que se crea el vacío dentro del tanque se procede al llenado de aceite dieléctrico mineral libre de PCB'S.





**Figura 31:** Tanque terminado  
Fuente: : Los autores

#### **4.2.4. Montaje de las bobinas**

En esta parte del proceso se tiene elaborado el núcleo, la bobina y el tanque, entonces se procede a montar el bobinado en el núcleo, como se detalla a continuación.

1. Tener los dos elementos completamente elaborados (bobinas y núcleo)
2. Retirar las prensas superiores del núcleo.
3. Retirar los cierres del núcleo
4. Montar las bobinas en el núcleo.
5. Colocar los cierres al núcleo.
6. Colocar las prensas.

Para montar las bobinas en el núcleo se retira las prensas y los cierres del núcleo, para permitir el ingreso de la bobina, a continuación con la ayuda de un teclé se introduce la bobina en las piernas del núcleo, una vez montadas las bobinas se colocan los cierres del núcleo y las prensas para poder sujetar y transportar el núcleo con las bobinas.



**Figura 32:** Proceso de prensado de las bobinas de alta y baja tensión  
Fuente: : Los autores

Se colocan las prensas a la parte activa para que de esta forma se eviten deformaciones en el núcleo y quitar la humedad al papel, la parte activa entra al horno de secado para que el papel se adhiera a las capas de las bobinas con la resina que contiene.



**Figura 33:** Parte activa del transformador  
Fuente: : Los autores

#### **4.2.5. Conexiones**

En este proceso se realiza todas las conexiones que permiten el funcionamiento del transformador, aquí las bobinas y el núcleo se denominan como la parte activa del transformador. De acuerdo al propósito del transformador y el requerimiento del cliente se realiza los siguientes pasos:

1. Grupo de conexión
2. Identificación de las puntas salientes de cada bobina.
3. Conectar la baja tensión.
4. Conectar la alta tensión.
5. Conectar el neutro.
6. Conexiones del cambiador de derivaciones taps
7. Conexión del selector de voltaje de dos posiciones
8. Conectar las protecciones en alta y baja tensión del transformador
9. Aislamiento de conexiones
10. Pruebas a la parte activa.
11. Secado de la parte activa.

Antes de iniciar con cualquier unión de los conductores se debe conocer el grupo de conexión que debe tener el transformador el cual nos indica el cliente, entonces se da las debidas indicaciones (al encargado de esta área) a que grupo de conexión pertenecerá el nuevo transformador, entonces esta persona identifica todas las puntas salientes de cada bobina y procede a etiquetarlas.

Se identifica bobinado de baja tensión, alta tensión, neutro, tierra, y sacamos las puntas de estos de acuerdo a las medidas del tanque donde en lo posterior irán fijados a los respectivos elementos de acople (bushings). En la alta tensión el bobinado por lo general tiene derivaciones y está construido con dos bobinas del mismo tamaño de igual forma los principios irán a los bushings de alta y las derivaciones van al conmutador.- un conmutador es aquel elemento que permite variar posiciones, llegan todos los extremos para adquirir las diferentes posiciones de voltajes del transformador en la alta tensión.



**Figura 34:** Prueba de conexiones y resistencia de aislamiento  
Fuente: Los autores

Terminado las conexiones, se procede a aislar todos los conductores de tal forma que se pueda evitar el contacto de los mismos, el aislamiento se lo hace con papel crepe pegándolo con reometol y luego forrándole con tubo de papel, se debe sujetar todos los conductores para evitar que entren en vibración y puedan cortocircuitarse.

Aislado el transformador, se toma la relación fundamental de transformación con el TTR, el cual permite verificar si existe alguna falla o si esta correcto el conexionado.



**Figura 35:** Prueba de relación de transformación antes de encubar la parte activa al tanque del transformador  
Fuente: Los autores

Verificado y sin inconvenientes la parte activa entra al horno para el secado durante 12 horas ya que no debe contener humedad porque es perjudicial para el funcionamiento normal del equipo, en el horno va a evaporar toda la humedad, a medida que está secándose se le realizan pruebas de humedad por medio del



Megger, el cual nos demuestra que la parte activa está seca y se puede introducir al tanque para su posterior sellado.



**Figura 36:** Proceso de secado de la parte activa  
Fuente: Los autores

#### **4.2.6. Montaje de la parte activa en el tanque**

Una vez que la parte activa está libre de humedad, alto aislamiento  $> 5G\Omega$  según norma NTE INEN, comprobado la relación de transformación, se procede a introducir la parte activa al tanque como se indica a continuación:

1. Limpieza del tanque.
2. Introducir la parte activa en el tanque.
3. Sujeción de la parte activa en el tanque.
4. Acoplar los bushings tanto de alta, baja, neutro.
5. Acople de los conductores en los bushings
6. Acople de los conmutadores.
7. Acople de elementos de control.
8. Llenado de aceite aislante hasta el nivel indicado
9. Sellado del tanque.
10. Aplicación de presión negativa (vacío)
11. Pruebas de presión en el transformador.
12. Pruebas eléctricas del transformador

El tanque se encuentra pintado, pero hay que hacer una limpieza minuciosa en el interior para lo cual se utiliza aceite regenerado, mismo que se hace circular por las diferentes cavidades de los radiadores con el fin de retirar limallas, basuras, etc., se saca todo el aceite contaminado se seca todo el aceite, dejando completamente seco y limpio el tanque.

Preparado y terminado el tanque, con la ayuda del diferencial o tecele se introduce la parte activa en el tanque y se la fija tanto horizontal, vertical y axialmente, se ajusta de tal forma que se evite el posible movimiento tanto en funcionamiento como en el transporte.- La sujeción se la hace por medio de platinas que están acopladas en el tanque así también como en las prensas para poder sujetar la parte activa al tanque por medio de pernos.



**Figura 37:** Montaje de la parte activa al tanque  
Fuente: Los autores

Se coloca los bushings tanto de alta como baja tensión y con métodos de operación extrema, se procede a realizar el ajuste de los terminales del transformador, los diferentes elementos que nos permiten el control del transformador son colocados, tomando en cuenta que todos estos elementos deben tener su respectivo empaque para evitar fugas de aceite, ya colocados todos los elementos externos del transformadores se procede a llenar el tanque con aceite dieléctrico hasta el nivel indicado por el medidor y el tanque es sellado.

Sellado el tanque se extrae todo el aire que pueda haber dentro de la cavidad interna del transformador con vacío o presión negativa.



**Figura 38:** Proceso de encubado del transformador  
Fuente: Los autores

Luego pasa al campo de pruebas donde se le realizará todas las pruebas eléctricas, y todas estas pruebas constan en una hoja de protocolo la cual se entrega al cliente, según lo que indica la norma NTE INEN 2138:2013, luego se rellena esta cavidad con nitrógeno y se presuriza a 7 psi.



**Figura 39:** Pruebas eléctricas al transformador  
Fuente: Los autores

## **CAPÍTULO V**

### **5. PRUEBAS ELÉCTRICAS EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN**

#### **5.1 Pruebas eléctricas**

Las pruebas eléctricas en los transformadores de distribución son exigidas a todos los fabricantes dado un formato a cumplir con la normas NTE INEN 2138, esto se conoce como el protocolo de prueba emitido por el fabricante donde se comprueban los valores de diseño con los valores medidos en el laboratorio.

Estas pruebas son para comprobar los valores mínimos a cumplir acorde a la potencia del transformador, así como también los valores máximos de perdidas permitidas para transformadores monofásicos detallados en la tabla 1 de la norma NTE INEN 2114.

Las pruebas eléctricas se llevan a cabo para verificar que los transformadores cumplan con las especificaciones de diseño. Además ofrecen una serie inicial de pruebas de referencia que serán utilizados para propósitos de comparación contra las pruebas eléctricas de campo futuras.

El transformador diseñado y construido en este proyecto de titulación tiene dos voltajes de operación, por lo que es necesario emitir dos protocolos de prueba para detallar los valores medidos.

#### **5.2 Formato de protocolo de pruebas NTE INEN 2138:2013**

Esta norma establece la información mínima necesaria que debe contener el certificado de pruebas para transformadores monofásicos y trifásicos de distribución.

Este formato dispone la información mínima requerida que debe contener el certificado de pruebas para transformadores de distribución emitido por el fabricante.

| CERTIFICADO DE PRUEBAS PARA TRANSFORMADORES   |                                |                            |                                       |   |  |                                |                          |
|---|--------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|---|--|--------------------------------|--------------------------|
| Nombre del fabricante _____   |                                | Norma Aplicada _____       |                                       |   | Protocolo _____                          |                                |                          |
| Cliente _____   |                                | Periodo No _____           |                                       |   | Diseño No _____                          |                                |                          |
| Oferta No _____   |                                | Transformador _____        |                                       | Fabricante _____                            |  | No Serie _____                 |                          |
| Potencia _____ kVA  | Frecuencia _____ Hz            | Voltaje serie _____ kV     |                                       | Calent. Dev _____ °C                        | Alt. Diseño _____ (m)                    |                                |                          |
| Fases _____   |                                | Refrigeración _____        |                                       | NBA AV/BV _____ kV                          | Clase aisl _____ Fecha fabricación _____ |                                |                          |
| Valores nominales   | Derivados primario _____       | Voltaje (V) _____          | Despacho (V) _____                    | Derivaciones _____                          | Corriente (A) _____                      | Despacho (V) _____             |                          |
|   | secundario _____               |                            |                                       |   |  |                                |                          |
| Resultado de pruebas a _____ °C Posición conmutador _____                             |                                |                            |                                       |   |  |                                |                          |
| 1) Liquido aislante _____   |                                | Referencia _____           |                                       | Voltaje ruptura _____ kV                    |  | Método _____                   |                          |
| 2) Resistencia de aislamiento   |                                | Voltaje de Prueba _____ kV |                                       | AV contra tierra _____ MΩ                   | BV contra tierra _____ MΩ                | AV, BV y tierra _____ MΩ       |                          |
| Tiempo de lectura _____ s   |                                |                            |                                       |   |  |                                |                          |
| 3) Relación de transformación Fase – Fase Fase – Neutro Polaridad Grupo de conexión   |                                |                            |                                       |   |  |                                |                          |
| Posición  | Voltaje derivación             | Fase U                     | Fase V                                | Fase W                                      | Normal                                   | Mínima                         | Máxima                   |
| 1   | _____                          | _____                      | _____                                 | _____                                       | _____                                    | _____                          | _____                    |
| 2   | _____                          | _____                      | _____                                 | _____                                       | _____                                    | _____                          | _____                    |
| 3   | _____                          | _____                      | _____                                 | _____                                       | _____                                    | _____                          | _____                    |
| 4   | _____                          | _____                      | _____                                 | _____                                       | _____                                    | _____                          | _____                    |
| 5   | _____                          | _____                      | _____                                 | _____                                       | _____                                    | _____                          | _____                    |
| 4) Resistencia entre terminales   | Devanado Primario _____        | U – V _____                | V – W _____                           | W – U _____                                 | Promedio _____ Ω                         | Material de fabricación _____  |                          |
|   | Secundario _____               |                            |                                       |   | mΩ _____                                 |                                |                          |
| 5) Prueba de aislamiento  | Voltaje aplicado durante 60s   |                            |                                       | Voltaje inducido                            |  |                                |                          |
|   | BV contra AV y tierra _____ kV |                            |                                       | Voltaje _____ V                             |  | Tiempo _____ s                 |                          |
|   | AV contra BV y tierra _____ kV |                            |                                       | Frecuencia _____ Hz                         |  |                                |                          |
| 6) Prueba sin carga   | Voltaje (V) _____              | I <sub>x</sub> (A) _____   | I <sub>y</sub> (A) _____              | I <sub>z</sub> (A) _____                    | Promedio % _____                         | Garantía % _____               | Po Medido (W) _____      |
|   |                                |                            |                                       |   |  |                                | Po Garantizado (W) _____ |
| 7) Prueba de cortocircuito  | Pérdidas (w) _____             | Medidas _____              |                                       | Referencia a 85°C _____                     |  | Garantizada a _____ °C         |                          |
|   | I <sup>2</sup> R (W) _____     |                            |                                       |   |  |                                |                          |
|   | I <sub>cc</sub> = _____ (A)    | Impedancia (%) _____       |                                       |   |  |                                |                          |
|   | U <sub>cc</sub> = _____ (V)    |                            |                                       |   |  |                                |                          |
| 8) Regulación a plena carga y F.P = _____ %   |                                |                            |                                       | 9) Eficiencia a plena carga y F.P = _____ % |  |                                |                          |
| 10) Características mecánicas Masa total: _____ kg Volumen de liquido aislante: _____ |                                |                            |                                       |   |  |                                |                          |
| 11) Dimensiones externas del transformador (m)  |                                |                            |                                       | 12) Pintura:                                |  |                                |                          |
| Frente _____  |                                | Profundidad _____          |                                       | Altura _____                                |  | Color _____ Espesor: _____ (m) |                          |
| 13) Refrigeración Número de elementos : _____   |                                |                            |                                       | Largo: _____ (m)                            |  | Ancho: _____                   |                          |
| Observaciones: _____  |                                |                            |                                       |   |  |                                |                          |
| Cliente / interventor: _____  |                                |                            | Proveedor / control de calidad: _____ |   |  | Fecha: _____                   |                          |
| Matricula No: _____   |                                |                            | Matricula No: _____                   |   |  |                                |                          |
| Firma: _____  |                                |                            | Firma: _____                          |   |  |                                |                          |

**Figura 40:** Formato de certificado de pruebas para transformadores  
Fuente: NTE INEN 2138 [15]

### 5.3 Pruebas eléctricas requeridas en transformadores de distribución monofásicos.

Acorde a lo que se detalla en la norma NTE INEN 2111:2013 describe los métodos de las pruebas eléctricas a que deben someterse los transformadores de potencia y distribución. El alcance de esta norma aplica a todos los tipos de transformadores de

potencia y distribución, sumergidos en líquido aislante y refrigerante, sin contenido de PCB y seco.

Pruebas eléctricas. Las realizadas a los transformadores con el objeto de determinar su comportamiento eléctrico; las pruebas eléctricas se clasifican de la siguiente manera:

Según como se indica en [14]:

“Pruebas de rutina. Las pruebas de rutina son:

- a) Medición de la resistencia de los devanados.
- b) Medición de la relación de transformación, verificación de la polaridad y desplazamiento angular.
- c) Medición de los voltajes de cortocircuito.
- d) Medición de las pérdidas con carga.
- e) Medición de las pérdidas sin carga (en vacío) y corriente de excitación.
- f) Prueba de voltaje aplicado.
- g) Prueba de sobrevoltaje inducido.
- h) Medición de la resistencia de aislamiento con megaóhmetro para transformadores de distribución y medición del factor de potencia del aislamiento para transformadores de potencia.
- i) Prueba de la rigidez dieléctrica del líquido aislante y refrigerante.”

Se detallará cada parte del formato de Protocolo o Certificado de Pruebas acorde a la norma NTE INEN 2138:2013. Como el transformador propuesto funciona a dos voltajes primarios fue necesario hacer dos pruebas diferentes, las cuáles se van a detallar por separado.

## **5.4 Información general del transformador**

Para poder rastrear el proceso de producción y trazabilidad del producto se asigna un código, serie y nombre de diseño al transformador.

**Tabla 32:** Información general para producción del transformador

Fuente: Los autores

|             |  |        |                |            |         |                       |               |               |
|-------------|--|--------|----------------|------------|---------|-----------------------|---------------|---------------|
| Código:     | T  | 467804 | Oferta No:     | 46961      | Diseño: | Aquino - Zuñiga       | Protocolo N°: | L.A.T - 01001 |
| Fabricante: | C.A. MORETRAN                            |        | N° serie:      | L.A.T - 01 |         | Fecha de Fabricación: |               | 2017-10       |
|             | Universidad Politécnica Salesiana - Sede |        |                | NUEVO      |         |                       |               |               |
| Cliente:    | Guayaquil                                |        | Transformador: |            | Tipo:   | AUTOPROTEGIDO         | Pedido No:    |               |

## 5.5 Pruebas de rutina para el transformador autoprotegido 15kVA

Debido a que el transformador es conmutable, es decir opera a dos niveles de tensión eso cambia los valores nominales del devanado primario en el cuál se vaya a energizar el transformador. Por tanto se describen dos tablas de características eléctricas, una para 6300 V y otra para 7620 V.

En esta parte se detallan totalmente las características eléctricas de fabricación del transformador. Se hace una comparación entre los valores nominales de cálculo del transformador y los valores medidos y entregados en el producto terminado. También se detalla la altura de operación que es 3000 metros sobre nivel del mar. Al momento de realizar las pruebas de laboratorio hay que tener en cuenta la temperatura ambiente ya que estos valores hay que referirlos a lo que indica la norma.

Las pruebas pueden hacerse a los transformadores a cualquier temperatura ambiente comprendida entre 10°C y 40°C y a aquellos con enfriamiento por agua (si se requiere) a cualquier temperatura que no exceda de 25°C.

## Características eléctricas del transformador – 6300 V

**Tabla 33:** Características eléctricas del transformador – 6300 V

Fuente: Los autores

|                   |                |     |                |                 |                 |                         |               |       |                 |              |
|-------------------|----------------|-----|----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|---------------|-------|-----------------|--------------|
| Potencia:         | 15             | kVA | N° de Fases:   | 1               | Ø               | Frecuencia:             | 60            | Hz    | Norma aplicada: | INEN 2114:04 |
|                   | Nominal (V)    |     | Despacho (V)   | Nominal (A)     |                 | Despacho (A)            | Clase Pri     | (kV): | 15              |              |
| Voltaje Pri :     | 6300           |     | 6300           | Corriente Pri : |                 | 2.38                    | Clase Sec     | (kV): | 1.2             |              |
| Voltaje Sec :     | 240 /120       |     | 240 /120       | Corriente Sec : |                 | 62.50                   | BIL Pri.      | (kV): | 95              |              |
| Derivaciones:     | +1, -3 X 2.5 % |     | Refrigeración: | ONAN            | C. Aislamiento: | AO                      | BIL Sec.      | (kV): | 30              |              |
| Operación (msnm): | 3000           |     | Calentamiento: | 65              | °C              | Resultado de pruebas a: | 28            | °C    | Pos/conmutador  | B            |
|                   |                |     |                |                 |                 |                         | Temp. Diseño: | 20    | °C              |              |



## Características eléctricas del transformador – 7620 V

**Tabla 34:** Características eléctricas del transformador – 7620 V

Fuente: Los autores

|                   |                  |                |                  |                         |             |                   |              |
|-------------------|------------------|----------------|------------------|-------------------------|-------------|-------------------|--------------|
| Potencia:         | 15 kVA           | N° de Fases:   | 1 Ø              | Frecuencia:             | 60 Hz       | Norma aplicada:   | INEN 2114:04 |
|                   | Nominal (V)      |                | Despacho (V)     |                         | Nominal (A) |                   | Despacho (A) |
| Voltaje Pri :     | 13200 GRDY/ 7620 |                | 13200 GRDY/ 7620 | Corriente Pri :         | 1.97        |                   | 1.97         |
| Voltaje Sec :     | 240 /120         |                | 240 /120         | Corriente Sec :         | 62.50       |                   | 62.50        |
| Derivaciones:     | +1, -3 X 2.5 %   | Refrigeración: | ONAN             | C. Aislamiento:         | AO          | Pos/conmutador 1: | B            |
| Operación (msnm): | 3000             | Calentamiento: | 65 °C            | Resultado de pruebas a: | 28 °C       | Temp. Diseño:     | 20 °C        |
|                   |                  |                |                  |                         |             | Clase Pri (kV):   | 15           |
|                   |                  |                |                  |                         |             | Clase Sec (kV):   | 1.2          |
|                   |                  |                |                  |                         |             | BIL Pri. (kV):    | 95           |
|                   |                  |                |                  |                         |             | BIL Sec. (kV):    | 30           |

## 5.6 Líquido aislante.

**Tabla 35:** Resultados de la prueba de líquido aislante

Fuente: Los autores

|                      |                     |         |         |             |
|----------------------|---------------------|---------|---------|-------------|
| 1.- LIQUIDO AISLANTE | Tipo:               | ACEITE  | Clase:  | MINERAL     |
|                      | Tensión de Ruptura: | 45 kV   | Método: | ASTM D-1816 |
|                      | Referencia:         | HYTRANS |         |             |
|                      |                     |         |         |             |

Para la prueba del líquido aislante o aceite dieléctrico utilizado en los transformadores de distribución se los hace de acuerdo a la norma ASTM D-1816.

### 5.6.1 Método de prueba estándar para voltaje de ruptura dieléctrico de los líquidos aislantes usando electrodos Vde1.

Los procedimientos y métodos de ensayo se detallan en la norma ASTM D-1816, como indica [16]:

“Este método de ensayo cubre la determinación del dieléctrico Tensión de ruptura de los líquidos aislantes (aceites de petróleo Origen, fluidos de silicona, aislamiento eléctrico mineral de alto punto de inflamación Aceites, fluidos de ésteres sintéticos y fluidos de ésteres naturales).

Este método de ensayo es aplicable a los líquidos aislantes de uso común En cables, transformadores, cortacircuitos de aceite y aparatos similares Como medio de aislamiento y enfriamiento. Consulte Terminología D2864 para las definiciones utilizadas en este método de ensayo. Tanto la métrica como las unidades alternativas de pulgada-libra son aceptables.”



## **Significado y uso**

Como se indica en [16]: “La tensión de ruptura dieléctrica de un líquido aislante Es importante como medida de la capacidad del líquido para Soportar la tensión eléctrica sin falla. La ruptura dieléctrica Sirve para indicar la presencia de contaminantes, agentes tales como agua, suciedad, fibras celulósicas o partículas en el líquido, uno o más de los cuales pueden estar presentes en concentraciones significativas cuando los bajos voltajes de adquirido.

Sin embargo, una tensión de ruptura dieléctrica alta no necesariamente indica la ausencia de todos los contaminantes; puede simplemente indicar que las concentraciones de contaminantes que presentes en el líquido entre los electrodos no son suficientemente grandes para afectar perjudicialmente el voltaje de ruptura promedio del líquido cuando se prueban mediante este método de ensayo.

Este método de ensayo se utiliza en pruebas de laboratorio o de campo. Por los resultados del desglose de campo para ser comparable a los resultados de laboratorio, Todos los criterios, incluida la temperatura ambiente (20 a 30 ° C).”

## **Aparato eléctrico**

Como se indica en [16]: “Además de esta sección, use IEEE Standard 4 para Determinar otros requisitos necesarios para realizar la prueba de mediciones y mantenimiento de límites de error utilizando tensiones. Los procedimientos para asegurar la exactitud deben cumplir requisitos de la norma IEEE 4. La (s) calibración (es) a las normas nacionales deben ser verificadas anualmente o con mayor frecuencia para asegurar la exactitud de los resultados. La norma IEEE Standard 4 se requiere durante la fabricación del aparato de ensayo y debe de ser utilizada durante la calibración del equipo.

Voltaje de prueba: la tensión de prueba será una tensión alterna, la misma que tiene una frecuencia en el intervalo de 45 a 65 Hz, normalmente referido como voltaje de potencia-frecuencia. La forma de onda del voltaje debe aproximarse a una senoide con ambos ciclos similares, y debe tener una relación de pico a rms valores iguales a la raíz cuadrada de 2 dentro del 65%.

Precisión: la precisión combinada del voltímetro y circuito de división de tensión debe ser tal que no exceda del 3%. Para los equipos fabricados antes de 1995, el error permitido es 5%.”

## **Muestreo**

Como se indica en [16]: “Obtener una muestra del líquido aislante a ensayar utilizando un aparato apropiado de muestreo ASTM. Los procedimientos de muestreo de líquido aislante se detallan en la Práctica D923. La muestra se tomará en un lugar seco, limpio, no permeable. Se debe cerrar el equipo herméticamente y proteger de la luz hasta ser probado.

Las botellas de plástico son permeables y la humedad del contenido de la muestra puede cambiar, dando como resultado una diferencia en comparación con las muestras recogidas en contenedores antes de comenzar el ensayo, la muestra debe ser inspeccionada para detectar la presencia de humedad, lodos, partículas u otras materias extrañas. Si la muestra se evidencia libre de agua, debe descartarse la prueba de ruptura dieléctrica, y la muestra debe ser como insatisfactoria.”

## **Procedimiento de prueba**

Como se indica en [16]: “Dejar que la muestra y el recipiente de prueba se encuentren a temperatura ambiente. Los exámenes de laboratorio a temperatura ambiente (20 a 30°C).

Para asegurar una muestra homogénea, inviértala suavemente y remuévala varias veces. La agitación rápida es indeseable, ya que se puede introducir una cantidad excesiva de aire en el líquido. Dentro de 1 minuto después de la agitación, use una pequeña porción de la muestra para enjuagar la celda de prueba. Escurrir el enjuague. Dentro de los 30 s de Enjuague, llene la celda lentamente con la parte restante de la muestra. La celda debe estar llena al cerrar la tapa o el deflector no permitir el contacto del aire con el líquido aislante.

Espere al menos 3 minutos pero no más de 5 minutos entre llenando la copa y aplicando voltaje para la primera prueba. Para los aceites aislantes eléctricos de alto

punto de ignición, ésteres y ésteres sintéticos, el tiempo de espera antes de la aplicación de voltaje será de al menos 30 minutos. Se procede a aumentar el voltaje aumentando desde cero a la velocidad de 0,5 kV / s  $\pm$  5% hasta que el fallo se produce como se indica mediante el funcionamiento del equipo de circuito interrumpido; Registrar el valor de voltaje rms más alto que ocurrió inmediatamente antes de cada ruptura.

Ocasionalmente pueden producirse descargas momentáneas que no resulten en el funcionamiento del equipo de interrupción; éstos no se tendrán en cuenta hasta que el voltaje a través de la muestra colapsa a menos de 100 V.

Se debe llevar a cabo cuatro pruebas adicionales menores de 60V pero no mayores de 90V antes de aplicar de voltaje para averías sucesivas. (Durante los intervalos antes de la aplicación de tensión, entre averías, y en el momento que la tensión está siendo aplicada, en la hélice circulará el aislante líquido.)

Si se excede este rango y hay suficiente volumen de aceite de prueba, repetir el análisis con una nueva muestra de aceite. Si un volumen es insuficiente de la muestra de ensayo, el resultado se puede informar con un comentario adicional de que el rango de las averías excede el rango permitido.

Cuando se desea simplemente determinar si la fuerza del dieléctrico está por encima o por debajo de un nivel especificado, cinco desgloses son requeridos, siempre que los cinco valores estén todos arriba o abajo este nivel.”

### **Parámetros del informe**

Como se indica en [16]: “Incluir en el informe lo siguiente:

- El método de ensayo utilizado,
- Los voltios (valor eficaz) en cada avería y las media de todos los desgloses reportados a dos dígitos significativos,
- La temperatura aproximada del líquido aislante En el momento de la prueba, y
- Espaciado del electrodo.”



**Figura 41:** Equipo para medir la rigidez dieléctrica del aceite  
Fuente: High Voltage Inc. [17]

Instrumento a Utilizar: medidor de rigidez dieléctrica.

Marca: HVI

Modelo: DTS – 60A

### **5.7. Prueba de resistencia de aislamiento**

Para esta prueba no se tiene como referencia norma NTE INEN para niveles máximos o mínimos de medición de la resistencia de aislamiento de los transformadores de distribución sumergidos en aceite, en esta prueba se toma como referencia la norma internacional IEEE C57.12.90 Núm. 10.11 [18].

Como indica [19]: “Las pruebas de resistencia de aislamiento se realizarán cuando se especifique. Las pruebas son para determinar la resistencia de aislamiento de arrollamientos individuales a tierra o entre arrollamientos individuales. El aislamiento y la resistencia en tales pruebas se mide comúnmente en megaohms o puede calcularse a partir de mediciones de voltaje aplicado y corriente de fuga.”

**Nota 1:** Como se indica en [19]: “La resistencia de aislamiento de los aparatos eléctricos es de dudosa importancia en comparación con el dieléctrico fuerza. Está sujeto a una amplia variación en el diseño, temperatura, sequedad y limpieza de las piezas. Cuando el aislamiento y la resistencia caen por debajo de los valores

prescritos, puede, en la mayoría de los casos de buen diseño y donde no existe ningún defecto, ser llevado al estándar requerido al limpiar y secar el aparato.

La resistencia de aislamiento, por lo tanto, puede proporcionar una indicación útil si el aparato está en condiciones adecuadas para la aplicación de la prueba dieléctrica.”

**Nota 2:** Como se indica en [19]: “La importancia de los valores de las pruebas de resistencia de aislamiento generalmente requiere alguna interpretación, dependiendo del diseño y la sequedad y limpieza del aislamiento involucrado. Cuando un usuario decide hacer pruebas de resistencia de aislamiento, se recomienda que los valores de resistencia de aislamiento se midan periódicamente (durante el apagado de mantenimiento) y que estos valores periódicos sean graficados. Se deben investigar variaciones sustanciales en los valores trazados de resistencia de aislamiento por causa.”

**Nota 3:** Como se indica en [19]: “Las resistencias de aislamiento pueden variar con el voltaje aplicado y cualquier comparación debe hacerse con medidas a la misma tensión.”

**Nota 4:** Como se indica en [19]: “Bajo ninguna circunstancia se deben realizar pruebas mientras el transformador está bajo vacío.”

La norma IEEE Std C57.12.90 [19], indica:

#### **“Preparación para las pruebas**

La muestra de prueba debe tener lo siguiente:

- a) Todos los bobinados sumergidos en líquido aislante.
- b) Todos los devanados en cortocircuito.
- c) Todos los bujes en su lugar.
- d) Temperatura de los devanados y del líquido aislante cerca de la temperatura de referencia de 20 ° C.”

## Procedimiento

Como se indica en [19]: “Las pruebas de resistencia de aislamiento se deben realizar con todos los circuitos de igual voltaje sobre la tierra conectados entre sí.

Los circuitos o grupos de circuitos de diferentes tensiones sobre el suelo deben probarse por separado. Ejemplos de procedimientos incluyen lo siguiente:

- a) Alto voltaje a bajo voltaje y tierra, bajo voltaje a alto voltaje y tierra.
- b) El voltaje debe aumentarse en incrementos de 1 kV a 5 kV y mantenerse durante 1 minuto.
- c) La prueba debe discontinuarse inmediatamente si la corriente comienza a aumentar sin estabilizarse.
- d) Una vez completada la prueba, todos los terminales deben estar conectados a tierra durante el tiempo suficiente para permitir cualquier carga atrapada a decaer a un valor insignificante.”

### 5.7.1. Resultado De Prueba De Resistencia De Aislamiento



**Figura 42:** Equipo para medir la resistencia de aislamiento.  
Fuente: Megger [20]

Instrumento a utilizar: Medidor de aislamiento.

Marca: Megger

Modelo: MIT520/02 – MIT1020/2

## Procedimiento:

Práctico:

- Realizar ésta prueba a temperatura ambiente (20°C – 36°C) para obtener valores reales.
- Realizar esta prueba considerando una humedad relativa (<70%).
- Registrar la temperatura y humedad relativa.
- Acorde al equipo detallado, con el que se realizaron las pruebas, conectar los cables de la siguiente manera al transformador a medir.

### Alta tensión vs. Baja tensión

Colocar un puente entre los bushings H1 y H2 y otro puente entre X1 y X3

Conectar el cable “S” (Rojo) al puente de H1 y H2.

Conectar el cable de “Return” (Negro) al puente de X1 y X3

Conectar el cable de “Guard” (Azul) a la tierra del transformador.

### Alta tensión vs. Tierra.

Colocar un puente entre los bushings H1 y H2 y otro puente entre X1 y X3

Conectar el cable “S” (Rojo) al puente de H1 y H2.

Conectar el cable “Guard” (Azul) al puente de X1 y X3

Conectar el cable de “Return” (Negro) a la tierra del transformador.

### Baja Tensión vs. Tierra.

Colocar un puente entre los bushings H1 y H2 y otro puente entre X1 y X3

Conectar el cable “S” (Rojo) al puente de X1 y X3.

Conectar el cable “Guard” (Azul) al puente de H1 y H2

Conectar el cable de “Return” (Negro) a la tierra del transformador.

### Tabla 36: Resultados de la prueba de resistencia de aislamiento

Fuente: Los autores

| 2.- RESISTENCIA DE AISLAMIENTO | Tiempo de Lectura: | Voltaje de Prueba: | M.V. vs B.V. | M.V. vs Tierra | B.V. vs Tierra |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------|----------------|----------------|
|                                | 60 seg.            | 5 kV               | 53800 (MΩ)   | 34900 (MΩ)     | 29500 (MΩ)     |
|                                | 60 seg.            | 1 kV               | (MΩ)         | (MΩ)           | (MΩ)           |

Para esta prueba es necesario desconectar el pararrayo de media tensión, la prueba fue realizada con Megger MIT 520/2 a 5kV durante 60 segundos.

### **5.8. Prueba De Relación De Transformación**

Para esta prueba se toma como referencia lo indicado en la Norma NTE INEN 2117:2013. Esta norma describe la forma de efectuar la medición de la relación de transformación, verificar la polaridad y el desplazamiento angular en los transformadores de potencia y distribución.

La medición de la relación de transformación se hace a voltaje nominal o menor y a frecuencia nominal o mayor. Si se trata de un transformador con derivaciones, la medición debe efectuarse para todas las derivaciones [12].

#### **Tolerancias de la relación.**

La relación de espiras entre arrollamientos deberá ser tal que con el transformador sin carga y con el devanado de menor número de espiras alimentado, los voltajes de los demás devanados y todas las conexiones de los devanados deben estar dentro del 0,5 % de los voltajes de placa [12].

Cuando el voltaje por espira del devanado excede un 0,5 % del valor de placa, la relación de voltaje en todas las conexiones de los devanados deben ser lo más cercanas posibles [12].

#### **Procedimiento a realizar la prueba de laboratorio – relación de transformación**

El diseño del transformador fue realizado para operar a dos niveles de tensión primaria, por lo tanto se tienen dos resultados de pruebas de la relación de transformación. También se detallan las posiciones de los dos conmutadores y el selector de voltaje en cada prueba para que se cumpla la relación de transformación en cada una y que no pase de la tolerancia del 0.5%.





**Figura 43:** Equipo para medir la relación de transformación  
Fuente: TTR [21]

Instrumento a Utilizar: Medidor TTR

Marca: Megger

Modelo: TTR20 - 100 single-phase-transformer

**Práctico:**

- Realizar esta prueba a temperatura ambiente o superior sin alterar los resultados.
- El equipo de TTR posee 2 conjuntos de cables de salida, 3 cables con pinzas (H1-rojo, H2-amarillo y Gnd-verde) y 3 cables con pinzas (X1-rojo, X2-amarillo y X3-azul).
- Realizar la siguiente conexión, para probar la relación  $H1H2 - X1X3$  en transformadores monofásicos:
  1. Los cables con pinzas (H) conectarlos de la siguiente manera.
    - Rojo en H1.
    - Amarillo en H2 (Tierra).
    - Verde libre.
  2. Los cables con pinzas (X) conectarlos de la siguiente manera:
    - Rojo en X1.
    - Amarillo en X2.
    - Azul libre.
- Realizar la prueba colocando el tap en la siguiente secuencia:

**Tabla 37:** Conmutador de cinco posiciones 6300 V

Fuente: Los autores

| Tap |
|-----|
| 1   |
| 2   |
| 3   |
| 4   |
| 5   |

- Luego de haber conectado los cables a los respectivos terminales, proceder a realizar la prueba una vez configurado previamente para el tipo de conexión requerida, se registra estos valores en el formato de protocolo de pruebas en el punto 3.
- Repetir estas acciones en cada una de las posiciones del conmutador (TAP).
- Finalmente dejar en la posición nominal y comprobar.
- Estos valores obtenidos sirven para el cálculo del  $V_{BT}$  en cada una de las posiciones del TAP.

(Monofásico)  $V_{BT} = V_{AT} / R_t$

### **Criterio de Aprobación:**

La tolerancia para la relación de transformación, medida cuando el transformador está sin carga debe ser de +/- 0.5 % en todas sus derivaciones.

El coeficiente para aumentar o disminuir el voltaje de acuerdo al tap en el que se encuentra el transformador es 0,025.

### **5.8.1 Resultado de prueba de relación de transformación a 6300 V**

Para realizar esta prueba el conmutador 1 debe permanecer en la Posición A y el selector de voltaje en la posición 1. Para cambiar las derivaciones del voltaje 6300 V se maniobra el conmutador 2.

La columna Fase (H1) detalla los valores medidos en laboratorio.

La relación de transformación nominal se calcula con la formula

$$\text{Relación de transformación} = \frac{\text{Voltaje Primario}}{\text{Voltaje Secundario}} = \frac{6300}{240} = 26.250$$

Para sacar los valores mínimos y máximos de la relación de transformación, se hace acorde a la tolerancia detallada en la norma INEN 2117:2013 la cual indica que es del 0.5%

$$\text{Tolerancia mínima} = 26.250 * 0.995 = 26.119$$

$$\text{Tolerancia máxima} = 26.250 * 1.005 = 26.381$$

Los valores medidos en el laboratorio deben estar dentro de los valores de la tolerancia mínima y máxima para que el transformador cumpla la norma INEN 2117:2013 en la prueba de la relación de transformación.

**Tabla 38:** Resultados de la prueba de relación de transformación - 6300 V.

Fuente: Los autores

| 3- PRUEBA DE RELACION DE TRANSFORMACIÓN |       |         |                       |                      |           |           |         |  |        |                                       |  |
|---|-------|---------|-----------------------|----------------------|-----------|-----------|---------|--|--------|---------------------------------------|--|
| Polaridad:                              |       | Aditiva |                       | Grupo de conexiones: |           | Líó       |         | Fase-fase: <input checked="" type="checkbox"/> |        | fase-neutro: <input type="checkbox"/> |  |
| Conn1                                   | Conn2 | Select  | Voltaje de derivación | Fase (H1)            | Fase (H2) | Fase (H3) | Nominal | Mínima   | Máxima |                                       |  |
| A                                       | A     | 1       | 6457                  | 26.902               |           |           | 26.906  | 26.772   | 27.041 |                                       |  |
| A                                       | B     |         | 6300                  | 26.293               |           |           | 26.250  | 26.119   | 26.381 |                                       |  |
| A                                       | C     |         | 6142                  | 25.629               |           |           | 25.594  | 25.466   | 25.722 |                                       |  |
| A                                       | D     |         | 5985                  | 24.907               |           |           | 24.938  | 24.813   | 25.062 |                                       |  |
| A                                       | E     |         | 5827                  | 24.298               |           |           | 24.281  | 24.160   | 24.403 |                                       |  |

**Tabla 39:** Posición 1 del selector de voltaje – 6300 V.

Fuente: Los autores

| Selector de voltaje | Conmutador 2         | A      | B    | C      | D    | E      |
|---------------------|----------------------|--------|------|--------|------|--------|
| Posición 1          | Voltaje primario (v) | 6457.5 | 6300 | 6142.5 | 5985 | 5827.5 |

### 5.8.2 Resultado de prueba de relación de transformación a 7620 V

Para realizar esta prueba el conmutador 2 debe permanecer en la posición A y el selector de voltaje en la posición 2. Para cambiar las derivaciones del voltaje 6300 V se maniobra el conmutador 1.

La columna Fase (H1) detalla los valores medidos en laboratorio.

La relación de transformación nominal se calcula con la formula

$$\text{Relación de transformación} = \frac{\text{Voltaje Primario}}{\text{Voltaje Secundario}} = \frac{7620}{240} = 31.750$$

Para sacar los valores mínimos y máximos de la relación de transformación, lo hacemos acorde a la tolerancia detallada en la norma INEN 2117:2013 la cual indica que es del 0.5%

$$\text{Tolerancia mínima} = 31.750 * 0.995 = 31.591$$

$$\text{Tolerancia máxima} = 31.750 * 1.005 = 31.909$$

Los valores medidos en el laboratorio deben estar dentro de los valores de la tolerancia mínima y máxima para que el transformador cumpla la norma INEN 2117:2013 en la prueba de la relación de transformación.

**Tabla 40:** Resultados de la prueba de relación de transformación - 7620 V.

Fuente: Los autores

| 3.- PRUEBA DE RELACION DE TRANSFORMACIÓN |       |         |                       |                      |           |           |         |  |        |                                       |  |
|--|-------|---------|-----------------------|----------------------|-----------|-----------|---------|--|--------|---------------------------------------|--|
| Polaridad:                               |       | Aditiva |                       | Grupo de conexiones: |           | Li6       |         | Fase-fase: <input checked="" type="checkbox"/> |        | fase-neutro: <input type="checkbox"/> |  |
| Conn1                                    | Conn2 | Select  | Voltaje de derivación | Fase (H1)            | Fase (H2) | Fase (H3) | Nominal | Mínima   | Máxima |                                       |  |
| A  | A     | 2       | 7810.50               | 32.561               |           |           | 32.544  | 32.381   | 32.706 |                                       |  |
| B  | A     |         | 7620.00               | 31.777               |           |           | 31.750  | 31.591   | 31.909 |                                       |  |
| C  | A     |         | 7429.50               | 30.999               |           |           | 30.956  | 30.801   | 31.111 |                                       |  |
| D  | A     |         | 7239.00               | 30.195               |           |           | 30.163  | 30.012   | 30.313 |                                       |  |
| E  | A     |         | 7048.50               | 29.389               |           |           | 29.369  | 29.222   | 29.516 |                                       |  |

**Tabla 41:** Posición 2 del selector de voltaje – 7620 V.

Fuente: Los autores

| Selector de voltaje | Conmutador 1         | A      | B    | C      | D    | E      |
|---------------------|----------------------|--------|------|--------|------|--------|
| Posición 2          | Voltaje primario (v) | 7810.5 | 7620 | 7429.5 | 7239 | 7048.5 |

### 5.9. Resistencia entre terminales

Esta prueba tiene la finalidad de verificar la resistencia óhmica de los devanados. Con su aplicación se detectan los falsos contactos y espiras en cortocircuito al compararse con los datos de placa o con resultados anteriores de un registro histórico [22].

Para esta prueba se toma de referencia la norma NTE INEN 2118:2013, la resistencia de cada devanado, los terminales entre las mediciones y la temperatura de los devanados deben ser registrados. Para las mediciones se utiliza Corriente Directa DC. En todas las mediciones de la resistencia, se debe tener cuidado de que los efectos de autoinducción se reduzcan al mínimo [23].

Como se indica en [23]: “Las medidas de resistencia son de primordial importancia por los siguientes propósitos:

- a) Cálculo de las pérdidas en el conductor  $I^2R$ .
- b) Cálculo de temperatura de los devanados al finalizar una prueba de calentamiento.
- c) Como una prueba de control de calidad del proceso de fabricación
- d) Como una base para la evaluación de posibles daños.”

#### **Conversión de las medidas de resistencia.**

Según el INEN [23]: “Las medidas en frío de la resistencia del devanado son normalmente convertidas a una temperatura de referencia normalizada ( $T_s$ ) igual al calentamiento medio nominal más 20°C. Además, puede ser necesario convertir la medición de la resistencia a temperatura a la cual las mediciones de las pérdidas de impedancia fueron realizadas. Las conversiones se realizan de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$R_s = R_m \frac{T_s + T_k}{T_m + T_k}$$

Dónde:

$R_s$  la resistencia a la temperatura deseada  $T_s$  ( $\Omega$ )

$R_m$  la resistencia medida ( $\Omega$ )

$T_s$  la temperatura de referencia deseada ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_m$  la temperatura a la cual la resistencia fue medida ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_k$  234,5 $^{\circ}\text{C}$  para el cobre o 225 $^{\circ}\text{C}$  para el aluminio.”

Debido a que el transformador tiene el devanado primario que funciona a 6300 V y 7620 V esto afecta directamente a la medición de la resistencia entre terminales puesto que en el voltaje de 7620 V se consideran todas las espiras del devanado y en el voltaje de 6300 V básicamente se toma solamente una parte del devanado de alta tensión.

Por eso fue necesario realizar dos pruebas de resistencia entre terminales para conocer los valores en las dos posiciones del selector de voltaje. La resistencia es directamente proporcional al voltaje, es decir que a mayor voltaje será mayor el número de espiras y por ende la resistencia del devanado primario será mayor. Esto no sucede para el devanado de baja tensión puesto el voltaje siempre será el mismo en el secundario por tanto se mantiene la misma cantidad de espiras y la medición de la resistencia será igual para ambas posiciones del selector de voltaje.

## Procedimiento a realizar la prueba de laboratorio resistencia entre terminales



**Figura 44:** Equipo para medir la resistencia entre terminales  
Fuente: Micro-ohmmeter [24]

Instrumento a Utilizar: MICRO-OHMMETER

Marca: AEMC

Modelo: 6240

### Práctico:

- Realizar ésta prueba a temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C} - 36^{\circ}\text{C}$ ) para obtener valores reales.
- Para realizar esta prueba se debe realizar las siguientes conexiones con los cables de salida del Óhmetro conjunto de cables (Rojo C1-P1 y Negro P2-C2).

Primario: H1 – H2

Secundario: X1 – X2

X2 – X3

X1 – X3

- Colocar los cables en pares por colores en cada uno de los puntos de prueba señalados, así por ejemplo, la pinza roja en H1 y la pinza negra en H2 para la relación H1 – H2 del primario o viceversa y así también para las conexiones del secundario X1 – X2 , X2 – X3, X1 – X3.

**Tabla 42:** Conexión de cables para la prueba de medición de resistencia entre terminales

Fuente: Los autores

| Conexión de cables |             |               |
|--------------------|-------------|---------------|
|                    | (Rojo-Rojo) | (Negro-Negro) |
| Primario           | H1          | H2            |
|                    | -           | -             |
|                    | -           | -             |
| Secundario         | X1          | X2            |
|                    | X2          | X3            |
|                    | X1          | X3            |

- Ajustar la escala de acuerdo a la medición a realizar  $V_{BT}$  o  $V_{AT}$ .
- Activar el equipo y espere la presentación de la lectura en la pantalla del medidor.
- Registrar la medición de temperatura.

### 5.9.1. Resultado de prueba medición de resistencia entre terminales – 6300 V.

**Tabla 43:** Resultados de la prueba de medición de resistencia entre terminales – 6300 V

Fuente: Los autores

| 4.- RESISTENCIA ENTRE TERMINALES |         |         |         |          |                         |
|----------------------------------|---------|---------|---------|----------|-------------------------|
| Primario ( $\Omega$ )            | (H1-H2) | (H2-H3) | (H3-H1) | Promedio | Material de fabricación |
|                                  | 12.33   |         |         | 12.33    | Cobre                   |
| Secundario (m $\Omega$ )         | (X1-X2) | (X2-X3) | (X3-X1) |          |                         |
|                                  | 8.7     | 8.02    | 16.51   | 16.51    | Cobre                   |



## 5.9.2 Resultado de prueba medición de resistencia entre terminales – 7620 V

**Tabla 44:** Resultados de la prueba de medición de resistencia entre terminales – 7620 V  
Fuente: Los autores

| 4.- RESISTENCIA ENTRE TERMINALES |         |         |         |          |                         |
|----------------------------------|---------|---------|---------|----------|-------------------------|
| Primario ( $\Omega$ )            | (H1-H2) | (H2-H3) | (H3-H1) | Promedio | Material de fabricación |
|                                  | 17.47   |         |         | 17.47    | Cobre                   |
| Secundario (m $\Omega$ )         | (X1-X2) | (X2-X3) | (X3-X1) |          |                         |
|                                  | 8.73    | 8.04    | 16.51   | 16.51    | Cobre                   |

## 5.10 Prueba sin carga

Esta norma NTE INEN 2113:2013 describe el método para las pruebas a las cuales se deben someter los transformadores de distribución sumergidos en aceite y secos, para determinar sus pérdidas y corriente sin carga. Esta norma se aplica a transformadores de distribución sumergidos en aceite y secos.

Como indica en la norma INEN [25]: “Las pérdidas sin carga de un transformador, son las pérdidas que son incidentes en la excitación del transformador. Incluyen las pérdidas en el núcleo, pérdidas del dieléctrico, pérdidas en los conductores, pérdidas de los conductores en el bobinado debido a la corriente de excitación, y pérdidas del conductor debido a la circulación de corriente en devanados paralelos. Dichas pérdidas cambian con el voltaje de excitación.

Las pérdidas sin carga de un transformador, consisten principalmente de las pérdidas en el hierro del núcleo y son una función de la magnitud, frecuencia y forma de onda del voltaje aplicado.

La medición de las pérdidas sin carga también varían con la temperatura y son principalmente sensibles a diferencias en la forma de onda.”

## Procedimiento a realizar la prueba de laboratorio sin carga



**Figura 45:** Transformador utilizado para realizar la prueba sin carga  
Fuente: Hipotronics [26]

Instrumento a Utilizar: Instrumented peschel variable transformer.

Marca: Hipotronics

Modelo: 30A48-96Y19

### **Práctico:**

- Esta prueba se puede realizar a temperatura ambiente o superior sin alterar los resultados.
- Conectar los cables de poder al transformador de la siguiente manera:
  1. Conectar los cables de Fase Negro (L1) al bushing X1 y el cable Verde (N) Neutro al bushing X3.
  2. Conectar a tierra el transformador.
- Ajustar el medidor ION 7650 y los controles para prueba monofásica y aplicar el voltaje de baja respectivo al transformador que está sometido a prueba.
- Tomar lectura de los valores que aparecen en la pantalla del panel de medición y registre en el formato.
- Bajar el voltaje hasta desenergizar completamente el transformador y descargar cada uno de los terminales con el cable de puesta a tierra.

### **Criterios de Aprobación:**

Para conocer los valores de aceptación revise las Tabla 1 de Valores Máximos Permisibles para Transformadores de Distribución Monofásicos, NTE INEN 2114.

#### **5.10.1 Resultado de la prueba sin carga**

La prueba sin carga medida en laboratorio se realizó en el devanado de baja tensión. Se energiza con el voltaje nominal del secundario y se mide la corriente en este devanado.

La corriente medida en el secundario es apenas el 0.66% de la corriente nominal del transformador. Este valor no debe superar el 2.4% de la corriente nominal en el secundario. Es decir que si está por arriba de este porcentaje el transformador no cumple la norma de la prueba sin carga NTE INEN 2113:2013 [25].

Con el valor de la corriente sin carga se determina la potencia de pérdida sin carga del transformador es decir 65 W, y de acuerdo a la tabla 1 de pérdidas de la NTE INEN 2114 este valor tiene que ser menor o igual a 68 W.

**Tabla 45:** Resultado de la prueba sin carga

Fuente: Los autores

| 5.- Prueba sin carga | Voltaje (V) | $I_0$ (A) 1 | $I_0$ (A) 2 | $I_0$ (A) 3 | Promedio % | Garantía % | Po Medido (W) | Po Garantiz. (W) |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|---------------|------------------|
|                      | 240         | 0.41        |             |             | 0.66       | 2.4        | 65            | 68               |

#### **5.11. Prueba de sobre-excitación**

La prueba de sobre-excitación se hace con un 10% arriba del voltaje nominal secundario, se mide la corriente nominal y la perdida sin carga.

**Objetivo:** Determinar la corriente en vacío  $I_0$ ,  $E_l$  (% de  $I_n$ ) y la potencia  $P_0$  al aplicarse un 10% adicional del voltaje de baja tensión.

Instrumento a Utilizar: Instrumented peschel variable transformer.

Marca: Hipotronics

Modelo: 30A48-96Y19

### Teórico:

La potencia  $P_0$  representa las pérdidas en vacío del transformador, las cuales resultan de la suma de las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas en el núcleo, siendo de hecho el efecto térmico no considerable. Esta prueba se puede efectuar alimentando indiferentemente el bobinado primario o secundario del transformador, pero manteniendo el bobinado no utilizado abierto. Tal elección está en función de la tensión de alimentación disponible.

Para la regulación de la tensión es bueno utilizar un variador de tensión con inducción.

### Práctico:

- Realizar a temperatura ambiente o superior sin alterar los resultados.
- Conectar los cables de poder al transformador de la siguiente manera:
  1. Conecte los cables de Fase Negro (L1) al bushing X1 y el cable Verde (N) Neutro al bushing X3.
  2. Conectar a tierra el transformador.
- Ajustar el medidor ION 7650 y activar los breakers para prueba monofásica. Aplicar el voltaje de baja respectivo con un error de (+/- 2 %) más un 10% adicional del voltaje de baja tensión al transformador que está probando.
- Tomar lectura de los valores que aparecen en la pantalla del panel de medición y registrar en el formato los valores de :

**Tabla 46:** Panel de medición para la prueba sin carga  
Fuente: Los autores

| Panel de medición | Formato            |
|-------------------|--------------------|
| $V_{In_a}$        | Tensión (V)        |
| $I_a$             | $I_{(x1x3)A}$      |
| $W_a$             | Perd. Med. (W)     |
| FP sign $a$       | Factor de Potencia |

### 5.11.1 Resultado de la prueba de sobre-excitación

**Tabla 47:** Resultado de la prueba de sobre-excitación

Fuente: Los autores

| 6.- Prueba de sobre-excitación | Voltaje (V) | Io (A) 1 | Io (A) 2 | Io (A) 3 | Promedio % | Garantía % | Po Medido (W) | Po Garantiz. (W) |
|--------------------------------|-------------|----------|----------|----------|------------|------------|---------------|------------------|
|                                | 264         | 0.68     |          |          | 1.09       | -          | 85            |                  |

### 5.12. Prueba de cortocircuito

Las pérdidas con carga, como indica en la norma INEN [27]: “son aquellas que se producen debido a una carga específica conectada a un transformador. Las pérdidas con carga incluye las pérdidas  $I^2R$  en los bobinados y elementos de protección, si los hubiere, debido a la corriente de carga y, las pérdidas parásitas debido a las corrientes de Eddy inducidas por el flujo de dispersión en los bobinados, en el núcleo, en los protectores magnéticos, en las paredes del tanque y otras partes conductoras. Las pérdidas por dispersión también pueden ser causadas por corrientes circulantes en bobinados conectados en paralelo o traslapados.

El procedimiento para realizar la medición de las pérdidas con carga es cortocircuitando uno de los bobinados de alto o bajo voltaje, y aplicando un voltaje al otro bobinado para causar la circulación de una corriente específica en estos. Las pérdidas de potencia dentro del transformador bajo esas condiciones, son iguales a las pérdidas con carga del transformador a la temperatura de ensayo y a una corriente específica de carga”

#### **Procedimiento a realizar la prueba de laboratorio – cortocircuito**

El objetivo de realizar la prueba de cortocircuito es: determinar la resistencia equivalente del transformador y las variaciones de la tensión secundaria que se verifican en el paso de vacío a carga del transformador.

Instrumento a Utilizar: Instrumented peschel variable transformer.

Marca: Hipotronics

Modelo: 30A48-96Y19



**Figura 46:** Transformador utilizado para realizar la prueba de cortocircuito.  
Fuente: Hipotronics [26]

Realizar la conexión y cortocircuitar los dos devanados, alimentando el otro con una tensión regulable desde cero, hasta alcanzar el valor de la corriente nominal del bobinado. La tensión que se exige con tal fin puede ser de la orden del 4 al 10% del voltaje nominal del bobinado donde se efectúa la alimentación; tal tensión es definida tensión de corto circuito del transformador.

En esta prueba, la entera potencia absorbida corresponde a las solas pérdidas del cobre de los dos bobinados, ya que dada la baja tensión aplicada (en la prueba con corto circuito del transformador), la corriente magnetizante, el flujo en el núcleo y las consecuentes pérdidas.

A su vez se podrán entonces determinar las variaciones de la tensión secundaria que se verifican en el paso de vacío a carga del transformador. También en esta prueba es indiferente alimentar el bobinado primario o secundario. En tales condiciones se determina la resistencia equivalente del transformador.

#### **Práctico:**

- Realizar la prueba sólo en temperatura ambiente (20 °C – 36 °C)
- Colocar un puente que conecte los bujes de baja tensión X1- X3.
- Conectar los cables de poder al transformador de la siguiente manera:
  1. Conecte los cables de Fase Negro (L1) al bushing H1 y el cable Verde (N) Neutro al bushing H2.
- Calcular con la siguiente fórmula el amperaje  $I_{AT}$  que debe aplicar a la línea y regístrelo en ( I: ) en el punto 7 del Formato de protocolo de pruebas.

$$I_{AT} = \frac{P \times 1000}{V_{AT}}$$

$$I_{BT} = \frac{P \times 1000}{V_{BT}}$$

- En el acto práctico es necesario tener presente que es oportuno que las corrientes en juego alcancen el valor nominal de plena carga tanto en el lado del bobinado de alimentación  $I_{AT}$  y en el otro cerrado con corto circuito  $I_{BT}$ . El primer valor  $I_{AT}$  servirá para la elección de los instrumentos, mientras el segundo  $I_{BT}$  para la elección de la sección de los cables para usarse en las conexiones con corto circuito.
- Una vez conocidos los valores, energizar el transformador hasta alcanzar el valor de  $I_{AT}$ .
- Tomar las lecturas del panel y en el formato registre lo valores de:

**Tabla 48:** Panel de medición para prueba de cortocircuito

Fuente: Los autores

| Panel de medición    | Formato            |
|----------------------|--------------------|
| $V_{In_a}$           | Ucc:               |
| $W_a$                | Perd. Med. (W)     |
| FP sign <sub>a</sub> | Factor de Potencia |

**Tabla 49:** Criterios de aprobación al terminar la prueba de cortocircuito

Fuente: Los autores

| Intensidad de corriente | Criterio de aceptación  |
|-------------------------|---|
| Línea 1                 | Se aprueba el transformador si durante la prueba se obtienen valores de Intensidad de corriente iguales a $I_{AT}$ en ambas líneas. |
| Línea 2                 |   |

Para conocer los valores de aceptación revise la tabla 1 de valores máximos Permisibles para Transformadores de Distribución Monofásicos, NTE INEN 2114 [5].

### 5.12.1. Resultado de la prueba de cortocircuito – 6300 V

**Tabla 50:** Resultado de la prueba de cortocircuito – 6300 V

Fuente: Los autores

| 7.- PRUEBA DE CORTOCIRCUITO |      | Fact. Potencia       | 0.46 | Temp. (°C) | 28 | Ref. a 85 °C | Garantizadas a 85 °C |     |
|-----------------------------|------|----------------------|------|------------|----|--------------|----------------------|-----|
| I <sub>cc</sub> (A)         | 2.38 | Perdidas (W)         |      | 139        |    | 167.36       | Pérdidas (W)         | 192 |
| U <sub>cc</sub> (V)         | 127  | I <sup>2</sup> R (W) |      | 134.39     |    | 163.57       |                      |     |
|                             |      | Impedancia (%)       |      | 2.02       |    | 2.12         | Impedancia (%)       | 3   |

Una vez que el devanado de baja tensión se encuentra en cortocircuito, se alimenta el devanado primario con la corriente nominal, el voltaje de cortocircuito U<sub>cc</sub> es medido en laboratorio de acuerdo al transformador que se utiliza.

Cálculo para teórico de la prueba de cortocircuito:

$$I_{cc} = I_n = 2.38 \text{ A}$$

$$K_t(AT) = \frac{(85 + 234.5)}{(28 + 234.5)} = 1.217$$

$$K_t(BT) = \frac{(85 + 234.5)}{(28 + 234.5)} = 1.217$$

$$\text{Perdidas}(W)_{28^\circ\text{C}} = 139 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} I^2R(W)_{28^\circ\text{C}} &= (I_p^2 * R. \text{Prim. H1} - \text{H2}) + \left( I_s^2 * \frac{R. \text{Sec. X3} - \text{X1}}{1000} \right) \\ &= (2.38^2 * 12.33) + \left( 62.50^2 * \frac{16.51}{1000} \right) = 134.39 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\text{Perdidas adicionales}_{28^\circ\text{C}} = \text{Perdidas}_{28^\circ\text{C}} - I^2R_{28^\circ\text{C}} = 139 - 134 = 4.61 \text{ W}$$

$$\text{Perdidas adicionales}_{85^\circ\text{C}} = \frac{\text{Perdidas adicionales}_{28^\circ\text{C}}}{K_t} = \frac{4.61}{1.217} = 3.79 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \text{Perdidas}(W)_{85^\circ\text{C}} &= I^2R(W)_{85^\circ\text{C}} + \text{Perdidas adicionales}_{85^\circ\text{C}} \\ &= 163.57\text{W} + 3.79\text{W} = 167.36 \text{ W} \end{aligned}$$

$$I^2R(W)_{85^\circ\text{C}} = 134.39 \left( \frac{234.5 + 85}{234.5 + 28} \right) = 163.57 \text{ W}$$

$$\text{Impedancia} (\%) = \frac{U_{cc}}{\text{Voltaje Primario}} * 100 = \frac{127}{6300} * 100 = 2.02$$



### 5.12.2. Resultado de la prueba de cortocircuito – 7620 V

**Tabla 51:** Resultado de la prueba de cortocircuito – 7620 V

Fuente: Los autores

| 7.- PRUEBA DE CORTOCIRCUITO |      | Fact. Potencia | Temp. (°C) | Ref. a 85 °C | Garantizadas a 85 °C |     |
|-----------------------------|------|----------------|------------|--------------|----------------------|-----|
|                             |      | 0.42           | 28         |              |                      |     |
|                             |      |                | 134        | 162.38       |                      |     |
| I <sub>cc</sub> (A)         | 1.97 |                | 132.19     | 160.89       | Pérdidas (W)         | 192 |
| U <sub>cc</sub> (V)         | 160  |                | 2.10       | 2.19         | Impedancia (%)       | 3   |

Cálculo para teórico de la prueba de cortocircuito:

$$I_{cc} = I_n = 1.97 \text{ A}$$

$$K_t(AT) = \frac{(85 + 234.5)}{(28 + 234.5)} = 1.217$$

$$K_t(BT) = \frac{(85 + 234.5)}{(28 + 234.5)} = 1.217$$

$$P_{\text{Pérdidas}}(W)_{28^\circ\text{C}} = 134 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} I^2R(W)_{28^\circ\text{C}} &= (I_p^2 * R. \text{Prim. H1} - \text{H2}) + \left( I_s^2 * \frac{R. \text{Sec. X3} - X1}{1000} \right) \\ &= (1.97^2 * 17.47) + \left( 62.50^2 * \frac{16.51}{1000} \right) = 132.19 \text{ W} \end{aligned}$$

$$P_{\text{Pérdidas adicionales}}_{28^\circ\text{C}} = P_{\text{Pérdidas}}_{28^\circ\text{C}} - I^2R_{28^\circ\text{C}} = 134 - 132.19 = 1.81 \text{ W}$$

$$P_{\text{Pérdidas adicionales}}_{85^\circ\text{C}} = \frac{P_{\text{Pérdidas adicionales}}_{28^\circ\text{C}}}{K_t} = \frac{1.81}{1.217} = 1.49 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{Pérdidas}}(W)_{85^\circ\text{C}} &= I^2R(W)_{85^\circ\text{C}} + P_{\text{Pérdidas adicionales}}_{85^\circ\text{C}} \\ &= 160.89\text{W} + 1.49\text{W} = 162.38 \text{ W} \end{aligned}$$

$$I^2R(W)_{85^\circ\text{C}} = 132.19 \left( \frac{234.5 + 85}{234.5 + 28} \right) = 160.89 \text{ W}$$

$$\text{Impedancia (\%)} = \frac{U_{cc}}{\text{Voltaje Primario}} * 100 = \frac{127}{7620} * 100 = 2.10$$

### **5.13. Ensayo de aislamiento**

Para revisar el ensayo de aislamiento se debe tener en cuenta los valores mínimos, la norma NTE INEN 2125:2013 describe los métodos de prueba, para determinar el nivel de aislamiento en los transformadores de potencia y distribución, tipo seco y sumergidos en aceite. Estas pruebas deben darse donde sea aplicable y no se acuerde lo contrario [28].

Como indica la norma INEN [28]: “Los transformadores destinados a funcionar a una altitud no mayor de 1 000 m.s.n.m. deben cumplir con los requisitos establecidos en los numerales 4.1 y 4.2 de la NTE INEN 2127. Los transformadores que se van a utilizar a altitudes mayores de 1 000 m.s.n.m., cumplirán con los requisitos establecidos en el numeral 4.3 de la NTE INEN 2127.”

#### **Procedimiento a realizar la prueba de aislamiento**

##### **Prueba de Voltaje aplicado**

La prueba de voltaje aplicado se realizó en bajo y medio voltaje, la relación del transformador elevador monofásico de voltaje para la prueba es de 200:1, es decir que en la prueba en el lado de medio voltaje se mide en el transformador 130 V. Para la prueba en el lado de bajo voltaje se mide en el transformador 50 V. Ambas pruebas se realizan durante 60 segundos.

**Objetivo:** Verificar el aislamiento entre los cuerpos.

Instrumento a Utilizar: Transformador elevador.

Marca: Moretran

Modelo: Monofásico

#### **Procedimiento práctico prueba tensión aplicada a transformadores monofásicos.**

Para éste tipo de transformadores, realizar la conexión de la siguiente manera:

- Conectar el transformador a tierra.
- Conectar la alimentación de energía al transformador elevador en el bushing X1.
- Conectar el cable desde el bushing de salida del transformador elevador al bushing de baja X1 o X3 del transformador monofásico autoprotegido, el cual se ha puesto en corto conectando un cable entre X1 – X3.

- Conectar un puente entre los bushing de alta tensión H1 – H2 y de éstos a tierra.
- Usando el Hipotronics como fuente de poder, suministrar al transformador elevador 50 voltios en la entrada para obtener 10 kV a la salida que serán aplicados en el bushing de baja puenteado, para comprobar así el correcto funcionamiento del aislamiento interno durante un tiempo máximo de 60 seg. en baja tensión.
- Luego para probar alta tensión, conectar el cable desde el bushing de salida del transformador elevador al bushing de alta H1 – H2 del transformador monofásico autoprotegido, el cual previamente debe haber sido puesto en corto conectando un cable entre los dos bushings.
- Después, suministrar al transformador elevador 130 voltios en la entrada para obtener 26 kV a la salida que serán aplicados en el bushing de baja puenteado, para comprobar así el correcto funcionamiento del aislamiento interno durante un tiempo máximo de 60 seg. en alta tensión.
- En transformadores autoprotegidos realizar esta prueba tanto en alta como en baja tensión.
- Registrar los datos de los voltajes o corrientes utilizados en el formato, indicando si pasa o no la prueba.
- Informar al jefe de laboratorio inmediatamente en el caso de producirse cualquier novedad o una descarga a tierra.

**Tabla 52:** Criterios de aprobación o rechazo para la prueba de voltaje aplicado

Fuente: Los autores

| <b>Voltaje aplicado<br/>(1 minuto)</b> | <b>Criterio<br/>de aceptación</b>   | <b>Criterio<br/>de rechazo</b>                                     |
|--|---|--|
| 10 kV                                  | Se aprueba el transformador si no se presentan descargas de voltaje o sobrecarga en los breakers. | Se rechaza si se presentan descargas o sobrecarga en los breakers. |
| 26 kV                                  | Se aprueba el transformador si no se presentan descargas de voltaje o sobrecarga en los breakers. | Se rechaza si se presentan descargas o sobrecarga en los breakers. |

### Prueba de voltaje inducido.

**Objetivo:** Verificar los aislamientos de las bobinas entre espiras y entre capas.

Instrumento a utilizar: Panel de control de ensayo - tensión inducida a 400 Hz.

#### Práctico:

- Realizar esta prueba a temperatura ambiente o superior sin alterar los resultados.
- Conectar el equipo y el transformador de la siguiente manera:
- Conecte los cables de salida de energía del generador a 400Hz – 418Hz. así, el cable Rojo al bushing X1 del transformador CSP o PAD, el cable azul al bushing X3 del transformador.
- Calcule el voltaje que deberá alcanzar en la Consola de Control del generador con la siguiente fórmula:

Voltaje a inducir:  $2 \times V_{BT}$

Aplicando este voltaje al generador desde la consola de control, este entregará al transformador un voltaje igual a  $V_{BT}$ , pero a 400 Hz – 418 Hz. Conocido el voltaje, energice el circuito durante 18 seg – 17 seg, observe si no ocurren descargas a tierra. Informe cualquier novedad durante el ensayo al jefe de laboratorio.

Registre los voltajes inducidos y las novedades presentadas, principalmente la aprobación o rechazo del transformador en el punto 8 del formato de protocolo de pruebas.

**Tabla 53:** Criterios de aprobación o rechazo para la prueba de voltaje inducido

Fuente: Los autores

| <b>Voltaje inducido<br/>(17 - 18 segundos)</b> | <b>Criterio<br/>de aceptación</b>   | <b>Criterio<br/>de rechazo</b>                                     |
|--|---|--|
| $(2 \times V_{BT})$                            | Se aprueba el transformador si no se presentan descargas de voltaje o sobrecarga en los breakers. | Se rechaza si se presentan descargas o sobrecarga en los breakers. |

En el devanado de bajo voltaje se alimenta con dos veces el voltaje nominal en el secundario pero a 400 Hz durante 18 segundos.

### 5.13.1. Resultados de la pruebas de aislamiento

**Tabla 54:** Resultado de las pruebas de aislamiento

Fuente: Los autores

| 8.- PRUEBA DE AISLAMIENTO | Voltaje Aplicado en (60 seg) |             | Voltaje Inducido |                    |
|---------------------------|------------------------------|-------------|------------------|--------------------|
|                           | MV - BV y Tierra:            | 26 kV       | Voltímetro:      | 130 V              |
| BV - MT y Tierra:         | 10 kV                        | Voltímetro: | 50 V             | Voltímetro (V) 96  |
|                           |                              |             |                  | Frecuencia: 400 Hz |
|                           |                              |             |                  | Tiempo: 18 seg     |

### 5.14. Regulación a plena carga a $fp = 0,8$ (%).

Para obtener la regulación a plena carga se toma como base lo detallado en la norma NTE INEN 2394:2007 [29] y en la norma NTC 1005 [30]. Este resultado es netamente teórico y los datos para realizar el cálculo se toman de las pruebas de pérdidas a vacío y en cortocircuito realizadas en el laboratorio.

Se indica en la norma INEN [29]: “El costo de la energía por regulación es bastante pequeño (menos del 3.5%), si se lo compara con la inversión total del transformador y con los costos por pérdidas de potencia; en la mayoría de los casos son ignorados en la evaluación de pérdidas. Cuando se consideran se utiliza la siguiente fórmula para calcular su valor:

$$REG = R * \text{Cos}\phi + X * \text{Sen}\phi + \frac{(X * \text{Cos}\phi - R * \text{Sen}\phi)^2}{200}$$

Dónde:

REG: Regulación (p.u)

R: Resistencia del transformador (p.u)

X: Reactancia del transformador (p.u)”

En la norma NTC 10005 [30]: “se detallan los cálculos para obtener la regulación a plena carga y factor de potencia de 0.8

$$U_{r(85^{\circ}\text{C})} = \frac{P_{cu(85^{\circ}\text{C})}}{P_n} * 100 = .. [\%]$$

$$U_{r(\text{ta})} = \frac{P_{cu}}{P_n} * 100 = .. [\%]$$

$$U_z = \frac{U_{cc}}{U_n} * 100 = \dots [\%]$$

$$U_x = \sqrt{U_z^2 - U_{r_{(ta)}}^2} = \dots [\%]$$

$$U_{z_{(85^\circ C)}} = \sqrt{U_x^2 - U_{r_{(85^\circ C)}}^2} = \dots [\%]$$

$$\text{Regulación} = U_x * \sin(\phi) + U_r * \cos(\phi) + \frac{[U_x * \cos(\phi) - U_r * \sin(\phi)]^2}{200}$$

Dónde:

P<sub>cu</sub>: Pérdidas en el cobre

P<sub>n</sub>: Potencia nominal del transformador [ VA ]

U<sub>n</sub>: Tensión nominal del devanado por donde se energizó [ V ]

U<sub>x</sub>: Componente reactiva de la impedancia de cortocircuito [ % ]

U<sub>r</sub>: Componente resistiva de la impedancia de cortocircuito [ % ]

φ: Angulo de la carga"

$$\cos^{-1} 0.8 = 36.8699$$

$$\sin 36.8699 = 0.6$$

### 5.14.1. Resultado de la regulación a plena carga fp=0.8 (%) - 6300 V

**Regulación a plena carga**

$$U_{r_{28^\circ C}} = \frac{P_{cu_{28^\circ C}}}{kVA * 1000} * 100 = \frac{139}{15 * 1000} * 100 = 0.926$$

$$U_{r_{85^\circ C}} = \frac{P_{cu_{85^\circ C}}}{kVA * 1000} * 100 = \frac{167.36}{15 * 1000} * 100 = 1.115$$

$$U_{z_{28^\circ C}} = \frac{U_{cc}}{V_p} * 100 = \frac{127}{6300} * 100 = 2.015$$

$$U_x = \sqrt{U_{z_{28^\circ C}}^2 - U_{r_{28^\circ C}}^2} = \sqrt{2.015^2 - 0.926^2} = 1.79$$

$$U_{z_{85^{\circ}\text{C}}} = \sqrt{U_x^2 + U_{r_{85^{\circ}\text{C}}}^2} = \sqrt{1.79^2 + 1.115^2} = 2.109$$

$$\text{Reg} = ((U_x * 0.6) + (U_{r_{85^{\circ}\text{C}}} * 0.8)) + \frac{((U_x * 0.8) - (U_{r_{85^{\circ}\text{C}}} * 0.6))}{200}$$

$$\text{Reg} = ((1.79 * 0.6) + (1.115 * 0.8)) + \frac{((1.79 * 0.8) - (1.115 * 0.6))}{200}$$

$$\text{Reg} = 1.97$$

**Tabla 55:** Resultado de regulación a plena carga a fp=0.8 – 6300 V

Fuente: Los autores

|   |      |
|---|------|
| 9.- REGULACIÓN A PLENA CARGA A fp = 0,8 (%) | 1.97 |
|---|------|

#### 5.14.2. Resultado de la regulación a plena carga fp=0.8 (%) - 7620 V

**Regulación a plena carga**

$$U_{r_{28^{\circ}\text{C}}} = \frac{P_{cu_{28^{\circ}\text{C}}}}{\text{kVA} * 1000} * 100 = \frac{134}{15 * 1000} * 100 = 0.893$$

$$U_{r_{85^{\circ}\text{C}}} = \frac{P_{cu_{85^{\circ}\text{C}}}}{\text{kVA} * 1000} * 100 = \frac{162.38}{15 * 1000} * 100 = 1.082$$

$$U_{z_{28^{\circ}\text{C}}} = \frac{U_{cc}}{V_p} * 100 = \frac{160}{7620} * 100 = 2.099$$

$$U_x = \sqrt{U_{z_{28^{\circ}\text{C}}}^2 - U_{r_{28^{\circ}\text{C}}}^2} = \sqrt{2.099^2 - 0.893^2} = 1.90$$

$$U_{z_{85^{\circ}\text{C}}} = \sqrt{U_x^2 + U_{r_{85^{\circ}\text{C}}}^2} = \sqrt{1.90^2 + 1.082^2} = 2.186$$

$$\text{Reg} = ((U_x * 0.6) + (U_{r_{85^{\circ}\text{C}}} * 0.8)) + \frac{((U_x * 0.8) - (U_{r_{85^{\circ}\text{C}}} * 0.6))}{200}$$

$$\text{Reg} = ((1.90 * 0.6) + (1.082 * 0.8)) + \frac{((1.90 * 0.8) - (1.082 * 0.6))}{200}$$

$$\text{Reg} = 2.01$$

**Tabla 56:** Resultado de regulación a plena carga a fp=0.8 – 7620 V

Fuente: Los autores

|   |      |
|---|------|
| 9.- REGULACIÓN A PLENA CARGA A fp = 0,8 (%) | 2.01 |
|---|------|

### **5.15. Rendimiento a plena carga a $f_p = 0,8$ (%)**

Para esta prueba se toma como base lo que indica el reglamento técnico ecuatoriano RTE INEN 141 “Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución” [31].

El Reglamento Técnico Ecuatoriano [31] establece:

#### **“Métodos de ensayo aplicables a eficiencia energética**

Para verificar las características de eficiencia energética se debe cumplir con lo siguiente:

- a) Para las pruebas de pérdidas en vacío, los transformadores de distribución deben cumplir con lo establecido en las normas NTE INEN 2113 y NTE INEN 2111 vigentes.
- b) Para las pruebas de pérdidas debidas a la carga, los transformadores de distribución deben cumplir con lo establecido en las normas NTE INEN 2116 y NTE INEN 2111 vigentes.”

#### **Cálculo de la eficiencia.**

El cálculo teórico se obtuvo a través de la resolución del Reglamento Técnico Ecuatoriano [31]: “Para la determinación de la eficiencia se deben considerar las pérdidas en vacío y debidas a la carga, referidas a un factor de carga del 80% derivadas de la medición de las pérdidas al 100% de la carga y corregidas (a 85°C) y un factor de potencia unitario de acuerdo a la fórmula siguiente:

$$\%E = \frac{100 \times (P \times \text{kVA} \times 1000)}{(P \times \text{kVA} \times 1000) + \text{NL} + (\text{LL} \times P^2 \times T)}$$

Donde,

P = Carga por unidad

kVA = kVA (nominal)

NL = Pérdidas en vacío a temperatura ambiente W

LL = Pérdidas debidas a la carga a temperatura de referencia (a 85°C,) W

T = Factor de corrección para las pérdidas de carga a 70 °C (0,952332)



Nota: La capacidad nominal (voltamperes) debe estar en función de los valores de tensión, frecuencia y corriente eléctricas nominales que se utilizaron para el cálculo de las pérdidas y considerando un factor de potencia unitario.”

### 5.15.1. Resultado de rendimiento a plena carga a fp=0,8 (%) – 6300 V

Teórico:

$$\%E = \frac{100x(P \times KVA \times 1000)}{(P \times KVA \times 1000) + NL + (LL \times P^2 \times T)}$$

$$\%E = \frac{100x(0.8 \times 15 \times 1000)}{(0.8 \times 15 \times 1000) + 65 + (167.36 \times 0.8^2 \times 0.952332)}$$

$$\%E = 98.63$$

**Tabla 57:** Resultado de rendimiento a plena carga a fp=0.8 – 6300 V

Fuente: Los autores

|   |       |
|---|-------|
| 10.- RENDIMIENTO A PLENA CARGA A fp = 0,8 (%) | 98.63 |
|---|-------|

### 5.15.2. Resultado de rendimiento a plena carga a fp=0,8 (%) – 7620 V

Teórico:

$$\%E = \frac{100x(P \times KVA \times 1000)}{(P \times KVA \times 1000) + NL + (LL \times P^2 \times T)}$$

$$\%E = \frac{100x(0.8 \times 15 \times 1000)}{(0.8 \times 15 \times 1000) + 65 + (162.38 \times 0.8^2 \times 0.952332)}$$

$$\%E = 98.65$$

**Tabla 58:** Resultado de rendimiento a plena carga a fp=0.8 – 7620 V

Fuente: Los autores

|   |       |
|---|-------|
| 10.- RENDIMIENTO A PLENA CARGA A fp = 0,8 (%) | 98.65 |
|---|-------|

## 5.16. Características mecánicas

En esta parte se detalla características físicas del transformador tales como su peso, volumen de aceite, diámetro del tanque, alto, tipo de pintura, color y espesor de la pintura.

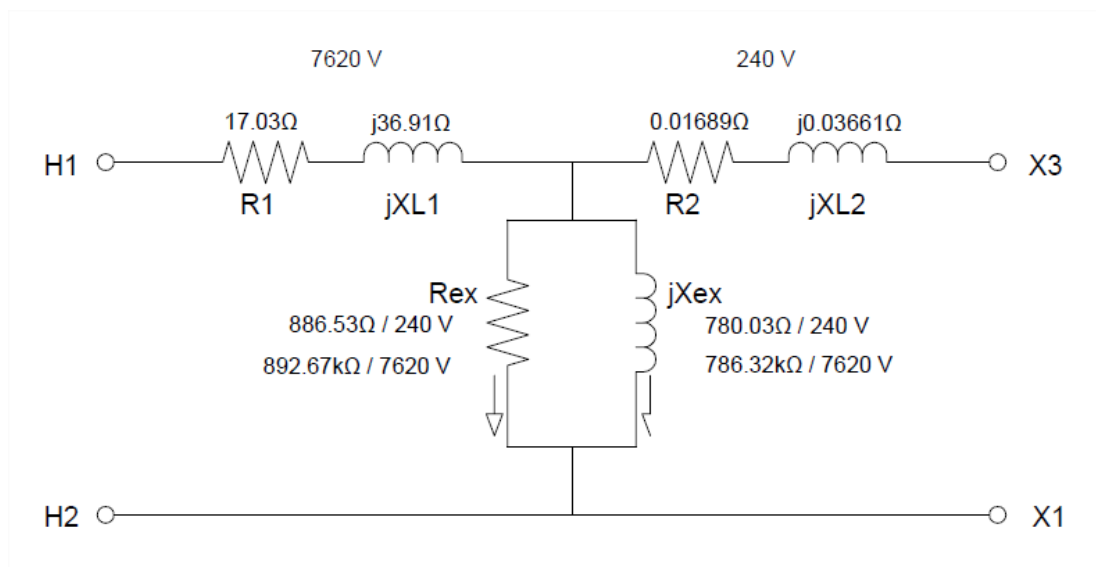
**Tabla 59:** Características mecánicas del transformador

Fuente: Los autores

| 11.- CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS |            |               |           |                |       |              |
|--------------------------------|------------|---------------|-----------|----------------|-------|--------------|
| Peso Total (kg)                | Aceite (l) | Diámetro (mm) | Alto (mm) | Pintura        | Color | Espesor (um) |
| 167                            | 41.58      | 345           | 1020      | ELECTROSTATICA | GRIS  | > 100        |

### 5.17 Modelo real del transformador / 7620 V

El modelo real del transformador se obtuvo con los datos de la prueba de circuito abierto y de cortocircuito realizada en el laboratorio de C.A Moretran y detallados en el protocolo de pruebas del equipo.



**Figura 47:** Valores en Alta Tensión, Baja Tensión reales  
Fuente: Los autores

A. Datos de la prueba de circuito abierto en baja tensión

$V_{oc} = 240\text{ V}$

$I_{oc} = 0.41\text{ A}$

$P_{oc} = 65\text{ W}$

B. Datos de la prueba de cortocircuito en baja tensión

$V_{sc} = 160\text{ V}$

$I_{sc} = 1.97\text{ A}$

$P_{sc} = 132\text{ W}$

C.  $a = RFT = \frac{7620}{240} = 31.75$

## 1. Prueba de cortocircuito / 7620V

Factor de potencia

$$F_p = \cos \theta = \frac{P_{sc}}{V_{sc} * I_{sc}} = \frac{132}{160 * 1.97} = 0.4187$$

Impedancia de cortocircuito

$$\begin{aligned} Z_{cc} &= \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \angle -\cos^{-1} F_p = \frac{169}{1.97} \angle -\cos^{-1} 0.4187 = 81.21 \angle 65.24^\circ \\ &= 34.01 + j73.75 \Omega \end{aligned}$$

Impedancia de alta tensión / 7620 V

$$Z_{AT} = \frac{Z_{cc}}{2} = \frac{81.21 \angle 65.24^\circ}{2} = 40.61 \angle 65.24^\circ = 17.03 + j36.91 \Omega$$

$$R_1 = R_2 = 17.03 \Omega / 7620 V$$

$$jXL_1 = jXL_2 = 36.91 \Omega / 7620 V$$

$$R_1 = R_2 = 0.01689 \Omega / 240 V$$

$$jXL_1 = jXL_2 = 0.036615 \Omega / 240 V$$

Impedancia de baja tensión / 240 V

$$Z_{BT} = \frac{Z_{cc}}{2} = \frac{81.21 \angle 65.24^\circ}{2} = 40.61 \angle 65.24^\circ = 17.03 + j36.88 \Omega$$

$$Z_{BT} = Z_{BT1} + Z_{BT2}$$

$$Z_{BT1} = \frac{Z_{cc}}{4} = \frac{81.21 \angle 65.24^\circ}{4} = 20.30 \angle 65.24^\circ = 8.52 + j18.43 \Omega$$

$$Z_{BT2} = \frac{Z_{cc}}{4} = \frac{81.21 \angle 65.24^\circ}{4} = 20.30 \angle 65.24^\circ = 8.52 + j18.43 \Omega$$

## 2.- Prueba de Circuito Abierto / 240 V

Factor de potencia

$$F_p = \cos \theta = \frac{P_{oc}}{V_{oc} * I_{oc}} = \frac{65}{240 * 0.41} = 0.660569$$

Admitancia

$$Y_{CA} = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \angle -\cos^{-1} F_p = \frac{0.41}{240} \angle -\cos^{-1} 0.660569 = 0.001708 \angle -48.6567^\circ \Omega$$
$$= 0.001128 + j0.001282$$

Resistencia de excitación / 240 V

$$R_{ex} = \frac{1}{0.001128} = 886.525 \Omega / 240 V$$

Inductancia de excitación / 240 V

$$X_{ex} = \frac{1}{0.001282} = 780.031 \Omega / 240 V$$

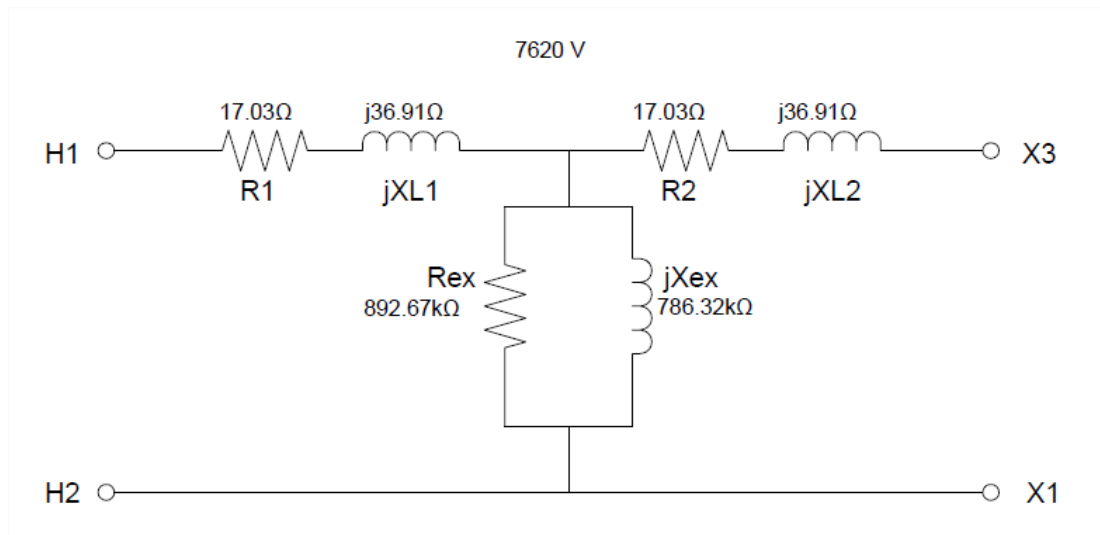
Resistencia de excitación / 7620 V

$$R_{ex} = (886.525) (a^2) = (886.525)(31.75^2) = 892.67 \text{ k}\Omega / 7620V$$

Inductancia de excitación / 7620 V

$$X_{ex} = (780.031) (a^2) = (780.031)(31.75^2) = 786.32 \text{ k}\Omega / 7620 V$$

**MODELO REAL / 7620 V**



**Figura 48:** Modelo real - 7620 V  
Fuente: Los autores

## MODELO REAL / 240 V

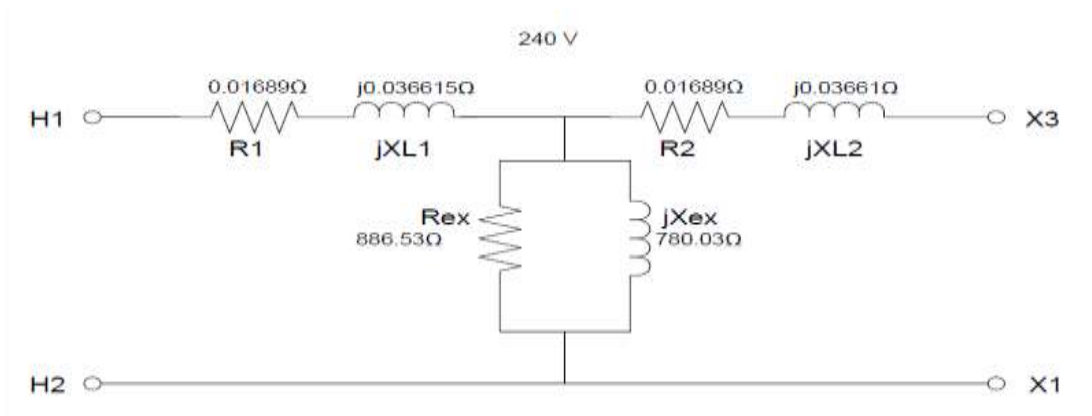


Figura 49: Modelo real - 240 V

Fuente: Los autores

## MODELO REAL – VALORES REALES

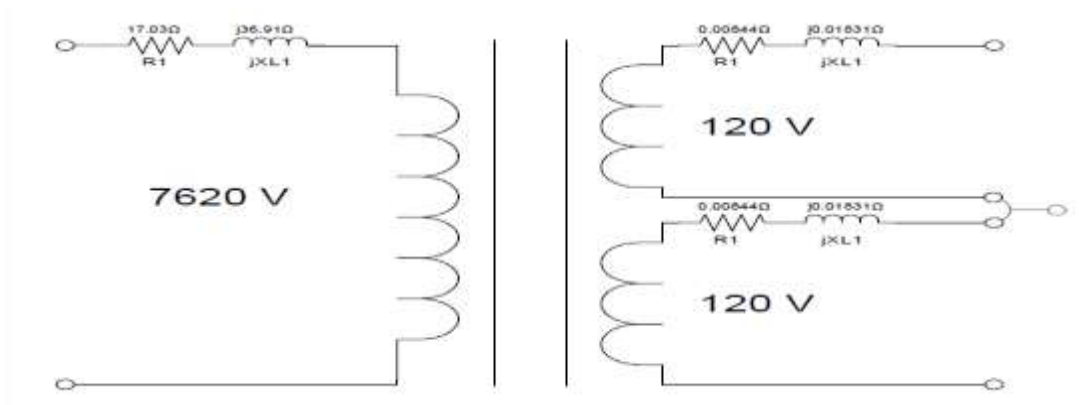


Figura 50: Modelo real / valores reales

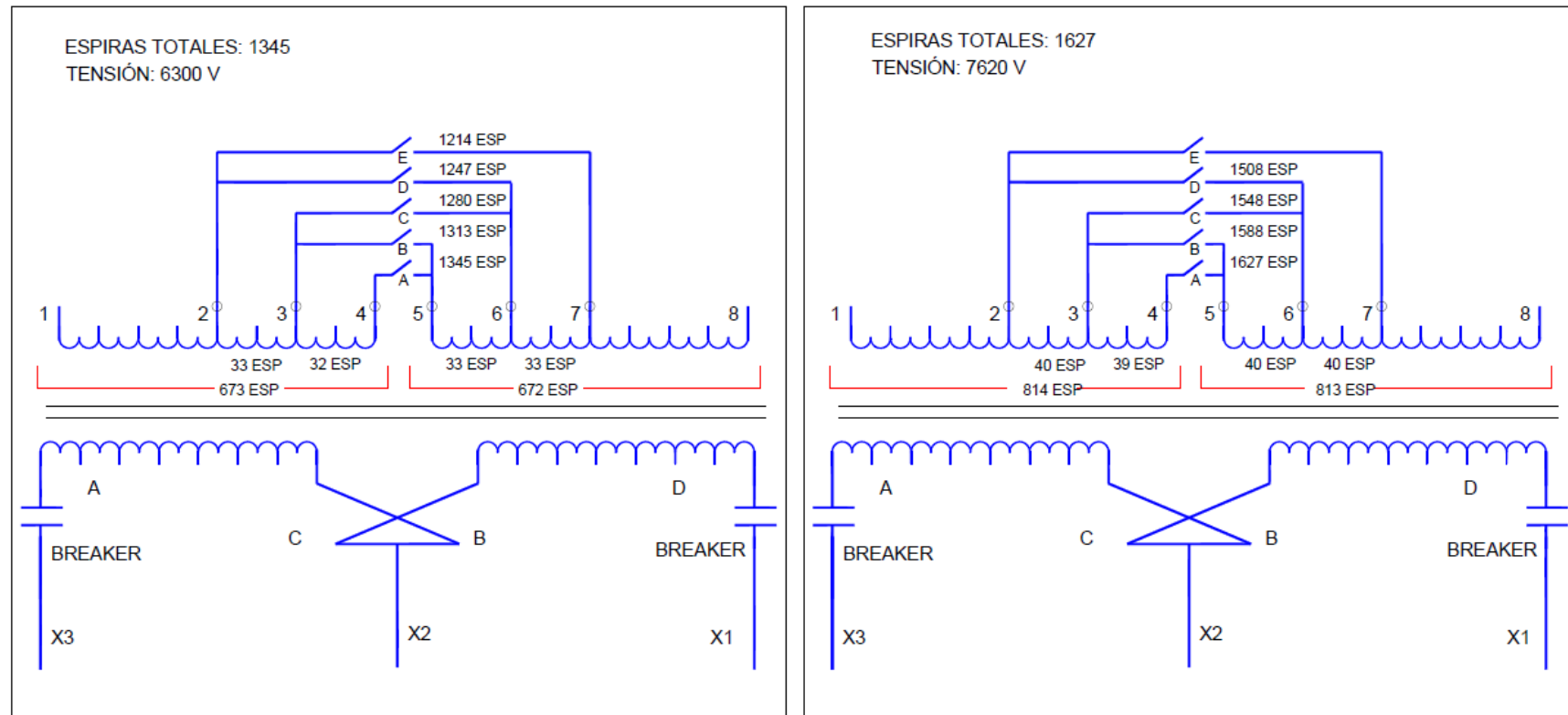
Fuente: Los autores

### 5.18 Resumen del funcionamiento de los dos conmutadores del transformador.

El transformador diseñado y construido puede operar a dos niveles de tensión 6300 V y 7620 V esto se logra a partir de un selector de voltaje de 2 posiciones y de 2 conmutadores de 5 posiciones que sirven para la regulación del voltaje primario.

El funcionamiento de los conmutadores y selector de voltaje se explican en las tablas 60 y 61 para que de esta forma se entienda como operar el transformador y cumplir la relación fundamental de transformación.

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO 15KVA



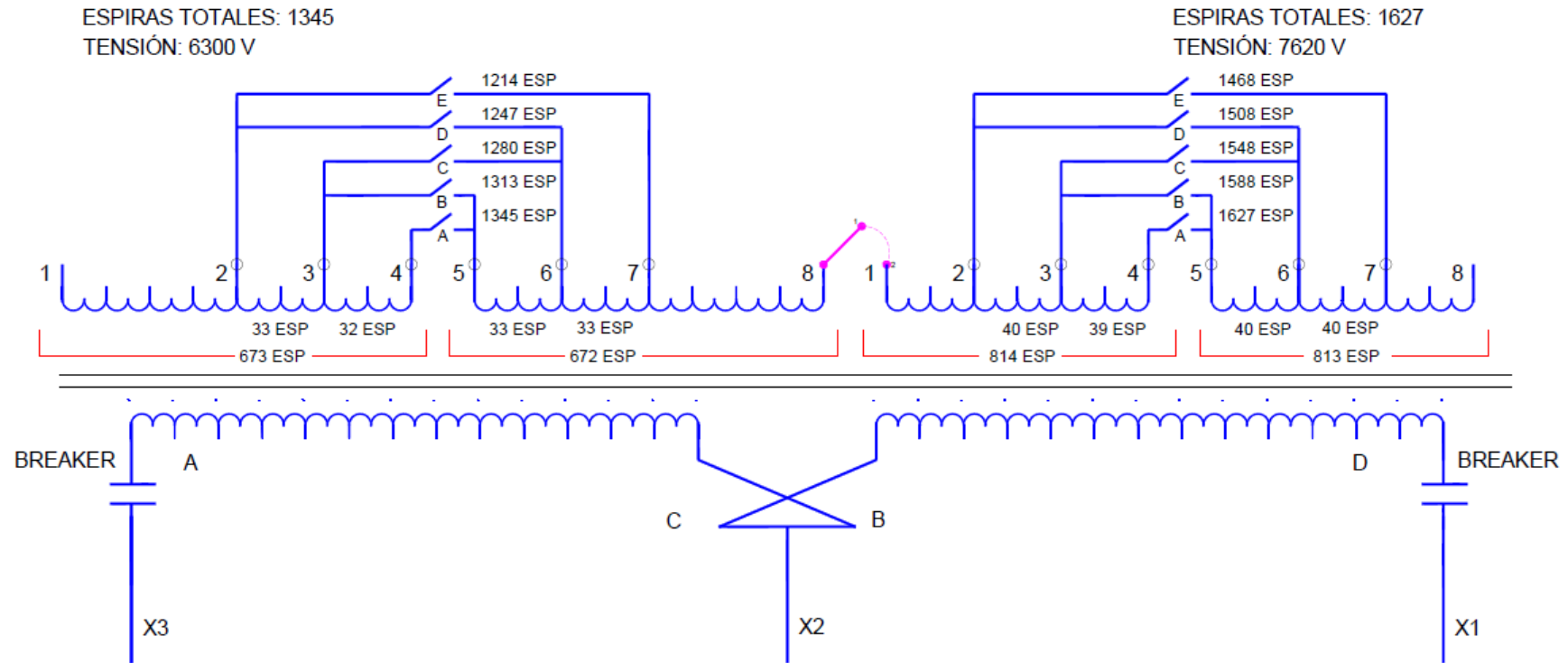
**Figura 51:** Funcionamiento de los dos conmutadores de cinco posiciones  
Fuente: Los autores

**Tabla 60:** Funcionamiento del selector de voltaje en posición 1 – 2.

Fuente: Los autores

| Selector de voltaje        |                  |                                    |           |           |           |           |             |                            |                            |                  |                            |             |                            |                         |
|----------------------------|------------------|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|----------------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------------------|
| Posición 1                 |                  |                                    |           |           |           |           |             |                            | Posición 2                 |                  |                            |             |                            |                         |
| Posición del conmutador #1 | % reg de voltaje | Contactos de regulación de voltaje |           |           |           |           | Tensión (v) | N. De espiras alta tensión | Posición del conmutador #1 | % reg de voltaje | N. De espiras alta tensión | Tensión (v) | Posición del conmutador #2 | % Regulación de voltaje |
|                            |                  | A                                  | B         | C         | D         | E         |             |                            |                            |                  |                            |             |                            |                         |
| 1                          | 2.50%            | <b>ON</b>                          | OFF       | OFF       | OFF       | OFF       | 6457.5      | 1345                       | 1                          | 2.50%            | 1345                       | 6457.5      | 1                          | 2.50%                   |
| 2                          | 0                | OFF                                | <b>ON</b> | OFF       | OFF       | OFF       | 6300        | 1313                       | 1                          | 2.50%            | 1345                       | 6457.5      | 2                          | 0                       |
| 3                          | -2.50%           | OFF                                | OFF       | <b>ON</b> | OFF       | OFF       | 6142.5      | 1280                       | 1                          | 2.50%            | 1345                       | 6457.5      | 3                          | -2.50%                  |
| 4                          | -5.00%           | OFF                                | OFF       | OFF       | <b>ON</b> | OFF       | 5985        | 1247                       | 1                          | 2.50%            | 1345                       | 6457.5      | 4                          | -5.00%                  |
| 5                          | -7.50%           | OFF                                | OFF       | OFF       | OFF       | <b>ON</b> | 5827.5      | 1214                       | 1                          | 2.50%            | 1345                       | 6457.5      | 5                          | -7.50%                  |

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO 15KVA 6300 / 7620V



**Figura 52:** Funcionamiento de conmutador de 5 posiciones 15KVA 6300 / 7620 V  
Fuente: Los autores



**Tabla 61:** Selector de voltaje en posición 2.

Fuente: Los autores

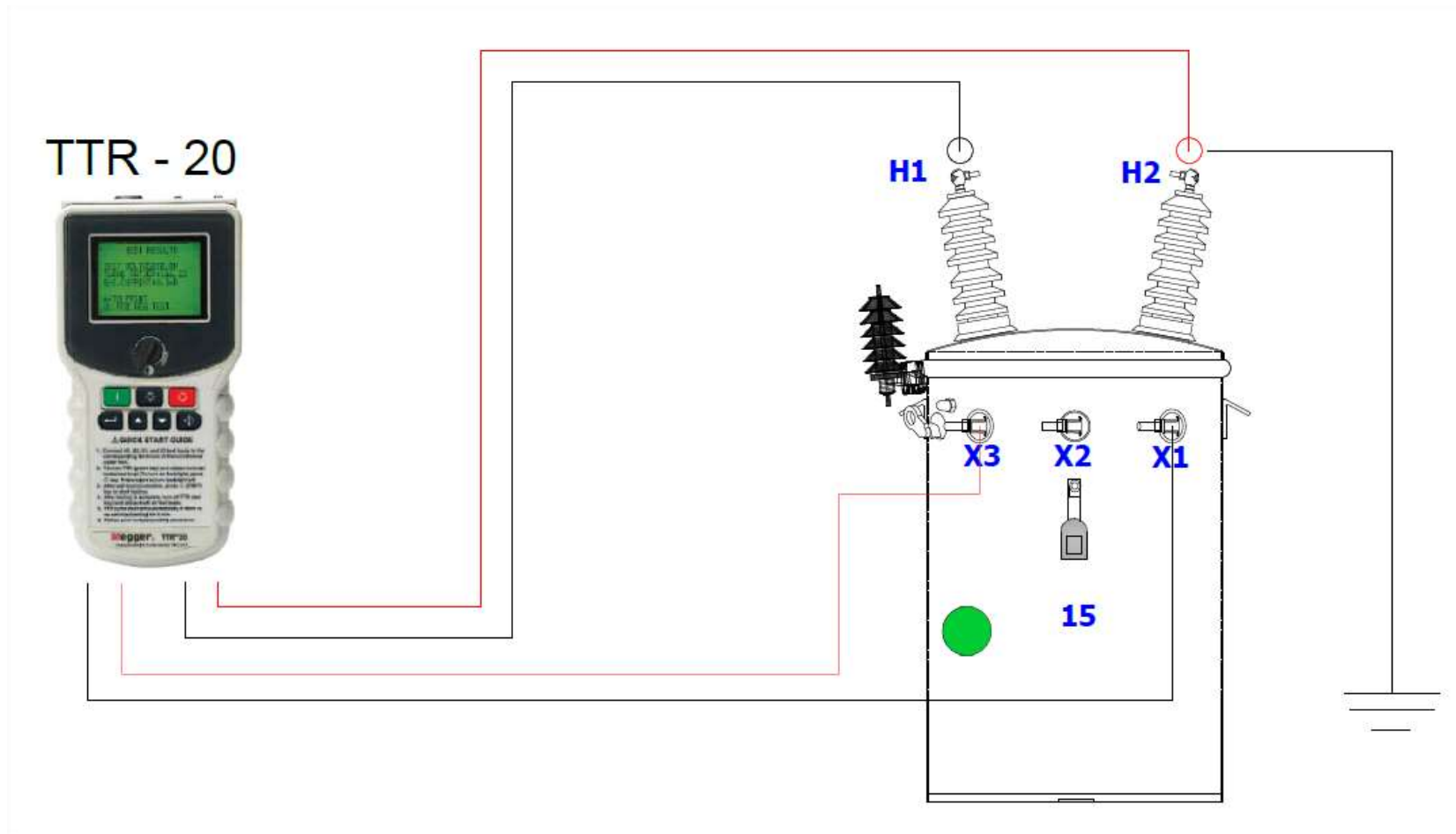
| Posición 2                 |                         |                       |              |                            |                         |                                    |     |     |     |     |              |                   |                        |                         |
|----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------|----------------------------|-------------------------|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|--------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| Posición del conmutador #1 | % regulación de voltaje | Número de espiras (a) | Tensión (va) | Posición del conmutador #2 | % regulación de voltaje | Contactos de regulación de voltaje |     |     |     |     | Tensión (vb) | N. De espiras (b) | Alta tensión vat=va+vb | N. De espiras n.at= a+b |
|                            |                         |                       |              |                            |                         | A                                  | B   | C   | D   | E   |              |                   |                        |                         |
| 1                          | 2.50%                   | 1345                  | 6458         | 1                          | 2.50%                   | ON                                 | OFF | OFF | OFF | OFF | 1353         | 282               | 7810.5                 | 1627                    |
|                            |                         |                       |              | 2                          | 0                       | OFF                                | ON  | OFF | OFF | OFF | 1162.5       | 243               | 7620                   | 1588                    |
|                            |                         |                       |              | 3                          | -2.50%                  | OFF                                | OFF | ON  | OFF | OFF | 972          | 203               | 7429.5                 | 1548                    |
|                            |                         |                       |              | 4                          | -5.00%                  | OFF                                | OFF | OFF | ON  | OFF | 781.5        | 163               | 7239                   | 1508                    |
|                            |                         |                       |              | 5                          | -7.50%                  | OFF                                | OFF | OFF | OFF | ON  | 591          | 123               | 7048.5                 | 1468                    |

En la tabla 62 se detalla la prueba de relación fundamental de transformación y el cumplimiento de la norma NTE INEN 2117:2013. Los resultados muestran que los valores obtenidos teóricos y medidos en laboratorio cumplen la tolerancia máxima de la relación de transformación de 0.5%.

**Tabla 62:** Relación fundamental de transformación valores de laboratorio y teóricos

Fuente: Los autores

| <b>RELACION FUNDAMENTAL DE TRANSFORMACION</b> |                                   |                                   |              |              |              |              |              |              |                      |                      |                      |                           |                                |                      |                     |
|---|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------|
| <b>S (KVA)</b>                                | <b>POSICION DEL CONMUTADOR #1</b> | <b>POSICION DEL CONMUTADOR #2</b> | <b>V. AT</b> | <b>N. AT</b> | <b>V. BT</b> | <b>N. BT</b> | <b>I. AT</b> | <b>I. BT</b> | <b>a= V.AT/V. BT</b> | <b>a= N.AT/N. BT</b> | <b>a= I.BT/I. AT</b> | <b>a PROMEDIO TEORICO</b> | <b>a MEDIDO EN LABORATORIO</b> | <b>Mini mo -0.5%</b> | <b>Máxima +0.5%</b> |
| <b>6300 V</b>                                 |                                   |                                   |              |              |              |              |              |              |                      |                      |                      |                           |                                |                      |                     |
| 15  | 1                                 | 1                                 | 6458         | 1345         | 240          | 50           | 2.32         | 62.5         | 26.91                | 26.90                | 26.94                | 26.92                     | 26.90                          | 26.77                | 27.04               |
|   | 2                                 | 1                                 | 6300         | 1313         | 240          | 50           | 2.38         | 62.5         | 26.25                | 26.26                | 26.26                | 26.26                     | 26.29                          | 26.12                | 26.38               |
|   | 3                                 | 1                                 | 6143         | 1280         | 240          | 50           | 2.44         | 62.5         | 25.59                | 25.60                | 25.61                | 25.60                     | 25.63                          | 25.47                | 25.72               |
|   | 4                                 | 1                                 | 5985         | 1247         | 240          | 50           | 2.51         | 62.5         | 24.94                | 24.94                | 24.90                | 24.93                     | 24.91                          | 24.81                | 25.06               |
|   | 5                                 | 1                                 | 5828         | 1214         | 240          | 50           | 2.57         | 62.5         | 24.28                | 24.28                | 24.32                | 24.29                     | 24.30                          | 24.16                | 24.40               |
| <b>7620 V</b>                                 |                                   |                                   |              |              |              |              |              |              |                      |                      |                      |                           |                                |                      |                     |
| 15  | 1                                 | 1                                 | 7811         | 1627         | 240          | 50           | 1.92         | 62.5         | 32.54                | 32.54                | 32.55                | 32.55                     | 32.56                          | 32.38                | 32.71               |
|   | 1                                 | 2                                 | 7620         | 1588         | 240          | 50           | 1.97         | 62.5         | 31.75                | 31.76                | 31.73                | 31.75                     | 31.78                          | 31.59                | 31.91               |
|   | 1                                 | 3                                 | 7430         | 1548         | 240          | 50           | 2.02         | 62.5         | 30.96                | 30.96                | 30.94                | 30.95                     | 31.00                          | 30.80                | 31.11               |
|   | 1                                 | 4                                 | 7239         | 1508         | 240          | 50           | 2.07         | 62.5         | 30.16                | 30.16                | 30.19                | 30.17                     | 30.20                          | 30.01                | 30.31               |
|   | 1                                 | 5                                 | 7049         | 1468         | 240          | 50           | 2.13         | 62.5         | 29.37                | 29.36                | 29.34                | 29.36                     | 29.39                          | 29.22                | 29.52               |



**Figura 53:** Prueba de relación fundamental de transformación realizada con instrumento TTR-20  
 Fuente: Los autores

**Tabla 63:** Prueba de laboratorio – Megger TTR 20

Fuente: Los autores

| Prueba de laboratorio - MEGGER TTR 20 |                            |                            |       |       |       |       |              |              |                    |                         |               |               |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------|--------------|--------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| S (KVA)                               | Posición del conmutador #1 | Posición del conmutador #2 | V. AT | N. AT | V. BT | N. BT | a= V.AT/V.BT | a= N.AT/N.BT | a Promedio Teórico | a Medido en laboratorio | Mínimo -0.05% | Máxima +0.05% |
| <b>6300 V</b>                         |                            |                            |       |       |       |       |              |              |                    |                         |               |               |
| 15                                    | 1                          | 1                          | 8     | 1345  | 0.30  | 50    | 26.90        | 26.90        | 26.90              | 26.90                   | 26.77         | 27.04         |
|                                       | 2                          | 1                          | 8     | 1313  | 0.30  | 50    | 26.26        | 26.26        | 26.26              | 26.29                   | 26.12         | 26.38         |
|                                       | 3                          | 1                          | 8     | 1280  | 0.31  | 50    | 25.60        | 25.60        | 25.60              | 25.63                   | 25.47         | 25.72         |
|                                       | 4                          | 1                          | 8     | 1247  | 0.32  | 50    | 24.94        | 24.94        | 24.94              | 24.91                   | 24.81         | 25.06         |
|                                       | 5                          | 1                          | 8     | 1214  | 0.33  | 50    | 24.28        | 24.28        | 24.28              | 24.30                   | 24.16         | 24.40         |
| <b>7620 V</b>                         |                            |                            |       |       |       |       |              |              |                    |                         |               |               |
| 15                                    | 1                          | 1                          | 8     | 1627  | 0.25  | 50    | 32.54        | 32.54        | 32.54              | 32.56                   | 32.38         | 32.71         |
|                                       | 1                          | 2                          | 8     | 1588  | 0.25  | 50    | 31.76        | 31.76        | 31.76              | 31.78                   | 31.59         | 31.91         |
|                                       | 1                          | 3                          | 8     | 1548  | 0.26  | 50    | 30.96        | 30.96        | 30.96              | 31.00                   | 30.80         | 31.11         |
|                                       | 1                          | 4                          | 8     | 1508  | 0.27  | 50    | 30.16        | 30.16        | 30.16              | 30.20                   | 30.01         | 30.31         |
|                                       | 1                          | 5                          | 8     | 1468  | 0.27  | 50    | 29.36        | 29.36        | 29.36              | 29.39                   | 29.22         | 29.52         |

## CONCLUSIONES

Este proyecto de grado contiene el diseño eléctrico y construcción de un transformador monofásico de distribución, se consideran todas las características eléctricas y valores mínimos para que el transformador a construir cumpla con las especificaciones técnicas exigidas en la norma NTE INEN 2120 [32].

Se hace referencia a las normas nacionales vigentes, con lo que se garantiza un buen funcionamiento del transformador.

El diseño eléctrico del transformador conmutable fue realizado, probado y medido en laboratorio de tal forma que los indicadores de los protocolos cumplen las normas vigentes a las que se hace referencia en el desarrollo de nuestro proyecto, el transformador puede dar servicio a los dos niveles de tensión planteados. El diseño eléctrico de un transformador necesariamente no siempre será el mismo, esto va a depender de las materias primas utilizadas en el diseño y la construcción, esto varía acorde al proveedor, procedencia, calidad, y materiales asignados en el diseño. Aun cuando se utilicen diversos materiales el transformador debe cumplir con lo detallado en las normas INEN para que sea aprobado.

- El cumplimiento de la tolerancia permitida (0.05%) para la prueba de relación de transformación NTE INEN 2117:2013 [12], se cumplió una vez analizado el diseño individual para un solo nivel de tensión 6300 V y 7620 V, a partir de esto se evidenció que era necesaria la utilización de dos conmutadores y un selector de voltaje para poder cumplir lo requerido por la norma.
- El proceso de producción fue realizado en las instalaciones de C.A. MORETRAN concluimos que en el diseño eléctrico y en el proceso de manufactura existen variables a considerar al momento de escoger materias primas y fabricantes, puesto que no siempre se cumple lo que los proveedores garantizan en sus fichas técnicas.
- Las pruebas realizadas en el laboratorio de C.A. MORETRAN se compararon con los datos teóricos calculados en el diseño eléctrico, obteniendo los resultados esperados a tal punto que el transformador cumple todas las normas INEN 2120 [32].

## RECOMENDACIONES

Para tener el transformador como producto terminado, se siguen diferentes procesos de producción detallados también en este proyecto de grado, cada proceso es indispensable para que el transformador cumpla las normas y valores admisibles.

- Se recomienda revisar y confirmar las especificaciones técnicas de las materias primas que otorgan los proveedores, si no se compromete el cumplimiento de las normas INEN y el transformador no estaría bien diseñado y fabricado. Si el diseño del transformador conmutable será para distintas clases de voltaje, es decir 15kV y 25kV se recomienda dimensionar el pararrayo de media tensión siempre para el voltaje superior. De tal forma que la protección de alta tensión este acorde para ambos voltajes. En este caso como los voltajes nominales son 6.3kV y 7.62kV se dimensiono el pararrayo para clase 15kV.
- Para operar un transformador conmutable es necesario revisar la placa del equipo y su protocolo de pruebas puesto que no existe un solo diseño para estos transformadores, esto quiere decir que pueden existir varias formas de maniobrar los conmutadores.
- Se recomienda que las pruebas sean realizadas en un laboratorio certificado y que cuente con equipos calibrados para que no exista diferencia en la medición de los valores durante las pruebas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. A. Pérez, Transformadores de distribución (Teoría, cálculo, construcción y prueba), México D.F.: REVERTÉ, 2008.
- [2] C.A. Moretran, Octubre 2017. [En línea]. Available: [www.moretran.ec](http://www.moretran.ec).
- [3] M. d. E. y. E. Renovables, «Transformadores monofásicos - autoprotegidos,» 08 06 2011. [En línea]. Available: <http://www.unidadesdepropiedad.com/pdf/2d/Secc3-EspTec/Transformadoresmonofasicosautoprotegidos.pdf>.
- [4] Empresa Eléctrica de Guayaquil, NATSIM (Normas de Acometidas, Cuartos de transformadores y Sistemas de Medición para el suministro de Electricidad), Guayaquil, 2012.
- [5] I. E. d. Normalización, «NTE INEN 2114: 2004,» 05 Octubre 2012. [En línea]. Available: <http://181.112.149.203/buzon/normas/2114-2.pdf>.
- [6] I. E. d. Normalización, «NTE INEN 2139: 2013,» 04 Junio 2013. [En línea]. Available: [http://apps.normalizacion.gob.ec/filesserver/2018/nte\\_inen\\_2139-1.pdf](http://apps.normalizacion.gob.ec/filesserver/2018/nte_inen_2139-1.pdf).
- [7] I. E. d. Normalización, «NTE INEN 2133: 98,» 12 Febrero 1992. [En línea]. Available: <https://archive.org/details/ec.nte.2133.1998>.
- [8] I. E. d. Normalización, «NTE INEN 2130: 2013,» 04 Junio 2013. [En línea]. Available: [http://apps.normalizacion.gob.ec/filesserver/2018/nte\\_inen\\_2130-1.pdf](http://apps.normalizacion.gob.ec/filesserver/2018/nte_inen_2130-1.pdf).
- [9] I. E. d. Normalización, «NTE INEN 2127: 2013,» 04 Junio 2013. [En línea]. Available: [http://apps.normalizacion.gob.ec/filesserver/2018/nte\\_inen\\_2127-1.pdf](http://apps.normalizacion.gob.ec/filesserver/2018/nte_inen_2127-1.pdf).
- [10] I. E. d. Normalización, «NTE INEN 2110: 98,» 12 Febrero 1998. [En línea]. Available: <https://ia801604.us.archive.org/0/items/ec.nte.2110.1998/ec.nte.2110.1998.pdf>.
- [11] N. S. Corporation, Grain-Oriented Electrical Steel Sheets, Tokyo, 2004.
- [12] I. E. d. Normalización, «NTE INEN 2117: 2013,» 04 Junio 2013. [En línea]. Available: [http://apps.normalizacion.gob.ec/filesserver/2018/nte\\_inen\\_2117-](http://apps.normalizacion.gob.ec/filesserver/2018/nte_inen_2117-)

1.pdf.

- [13] I. C. d. N. T. y. Certificación, *NTC 818*, Bogotá, 1995.
- [14] I. E. d. Normalización, «NTE INEN 2111: 2013,» 04 Junio 2013. [En línea]. Available: [http://181.112.149.203/buzon/normas/nte\\_inen\\_2111-2.pdf](http://181.112.149.203/buzon/normas/nte_inen_2111-2.pdf).
- [15] I. E. d. Normalización, «NTE INEN 2138: 2013,» 04 Junio 2013. [En línea]. Available: [http://apps.normalizacion.gob.ec/filesserver/2018/nte\\_inen\\_2138-1.pdf](http://apps.normalizacion.gob.ec/filesserver/2018/nte_inen_2138-1.pdf).
- [16] A. INTERNATIONAL, «ASTM D1816 - 04: Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE Electrodes,» 2004. [En línea]. Available: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D1816-04.htm>.
- [17] HIGH VOLTAJE, INC, Noviembre 2017. [En línea]. Available: <http://hvinc.com/products/oil-dielectric-test-sets/dts-60a/>.
- [18] IEE, «IEEE Standars Association,» [En línea]. Available: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/C57.12.00-2015.html>. [Último acceso: 15 Enero 2018].
- [19] I. Std, «IEEE Std C57.12.90,» 26 Junio 1999. [En línea]. Available: <https://www.ieee.org/index.html>.
- [20] MEGGER, «Insulation Resistance Testers,» [En línea]. Available: [https://www.instrumart.com/assets/MIT5\\_and\\_MIT10\\_spec\\_sheet.pdf](https://www.instrumart.com/assets/MIT5_and_MIT10_spec_sheet.pdf).
- [21] MEGGER, «Handheld TTR,» [En línea]. Available: [https://content.megger.com/getattachment/6afd7cda-fde8-46b6-9838-4a4c7c61eb2a/Datasheet-TTR20-1.pdf?\\_ga=2.105548419.184909416.1521835429-1103542008.1512444755](https://content.megger.com/getattachment/6afd7cda-fde8-46b6-9838-4a4c7c61eb2a/Datasheet-TTR20-1.pdf?_ga=2.105548419.184909416.1521835429-1103542008.1512444755).
- [22] S. S.A, «SYSE,» [En línea]. Available: [http://www.syse.com.mx/pruebas\\_resistencias\\_ohmica\\_transformadores.html](http://www.syse.com.mx/pruebas_resistencias_ohmica_transformadores.html).
- [23] I. E. d. Normalización, «NTE INEN 2118: 2013,» 04 Junio 2013. [En línea]. Available: [http://apps.normalizacion.gob.ec/filesserver/2018/nte\\_inen\\_2118-1.pdf](http://apps.normalizacion.gob.ec/filesserver/2018/nte_inen_2118-1.pdf).
- [24] Micro-Ohmmeters, «AEMC,» [En línea]. Available: <https://www.aemc.com/userfiles/files/resources/datasheets/Micro->



Ohmmeter/2129-80.pdf.

- [25] I. E. d. Normalización, «NTE INEN 2113: 2013,» 04 Junio 2013. [En línea]. Available: [http://181.112.149.203/buzon/normas/nte\\_inen\\_2113-1.pdf](http://181.112.149.203/buzon/normas/nte_inen_2113-1.pdf).
- [26] HAEFELY HIPOTRONICS, Diciembre 2017. [En línea]. Available: [http://www.haefely-hipotronics.com/\\_em-asset/PVT\\_DS.pdf](http://www.haefely-hipotronics.com/_em-asset/PVT_DS.pdf).
- [27] I. E. d. Normalización, «NTE INEN 2116: 2013,» 04 Junio 2013. [En línea]. Available: [http://181.112.149.203/buzon/normas/nte\\_inen\\_2116-1.pdf](http://181.112.149.203/buzon/normas/nte_inen_2116-1.pdf).
- [28] I. E. d. Normalización, «NTE INEN 2125: 2013,» 04 Junio 2013. [En línea]. Available: [http://181.112.149.203/buzon/normas/nte\\_inen\\_2125-1.pdf](http://181.112.149.203/buzon/normas/nte_inen_2125-1.pdf).
- [29] I. E. d. Normalización, «NTE INEN 2394: 2007,» 31 Enero 2007. [En línea]. Available: <http://181.112.149.203/buzon/normas/2394.pdf>.
- [30] I. C. d. N. T. y. Certificación, *NTC 1005*, Bogotá, 2003.
- [31] M. d. I. y. Productividad, *RTE 141 INEN: Requisitos de Seguridad y Eficiencia Energética para Transformadores de Distribución*, Quito, 2014.
- [32] I. E. d. Normalización, «NTE INEN 2120: 98,» 12 FEBRERO 1998. [En línea]. Available: <http://181.112.149.203/buzon/normas/2120.pdf>.

**ANEXOS**

**PROTOCOLOS DE PRUEBAS DE  
LABORATORIO A TRANSFORMADOR**

**CERTIFICADO DE PRUEBAS TRANSFORMADOR MONOFÁSICO** FOR LAB 03 VER 10 10 10

ESTE PRODUCTO HA SIDO MANUFACTURADO BAJO LOS PROCEDIMIENTOS ESTABLECIDOS POR UN SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD QUE CUMPLE CON LOS REQUISITOS DE ISO 9001:2015. SU CALIDAD HA SIDO CERTIFICADA POR AFNOR - NAF 80400 EN INTERNACIONAL EC2004

Código: T 467804 Cliente No: 40901 Modelo: Luzera - Zujiga Proyecto N°: L.A.T.-21001  
Fabricante: C.A. MORETRAN N° serie: L.A.T.-01 Fecha de Fabricación: 2017-10  
Universidad Politécnica Salesiana - Sede Guayaquil Transformador: NUEVO Tipo: AUTOPROTEGIDO Pedido No:

Potencia: 15 MVA N° de Fases: 1 Ø Frecuencia: 60 Hz Norma aplicada: IEC 2114:04  
Nivel (V): Despecho (V): 8000 Despecho (A): 1.5 Clase P11 (kV): 15  
Volaje P11: 8000 Clase S10 (kV): 1.7  
Volaje Sec.: 240 /120 Contente P11: 2.38 2.38 BIL P11 (kV): 90  
Derivaciones: +1, 3, 3, 3, 3 % Refrigeración: ONAN C. Ambiente: 40 Contente Sec.: 03 50' 62.55 BIL Sec. (kV): 30  
Operación (max): 3000 Calentamiento: 65 °C Resultado de pruebas: 25 °C Pas/condensador D: 8  
Temp. Diseño: 25 °C

1.- LIQUIDO AISLANTE Tipo: ACEITE Clase: GENERAL  
Terminó de Ruptura: Referencia: HYTRANS 48 Método: ASTM D-1416

2.- RESISTENCIA DE AISLAMIENTO Tiempo de Lectura: Volaje de Prueba: S.V. vs B.V. S.V. vs Tierra S.V. vs Tierra  
60 seg. 5 kV 1500 (MΩ) 2400 (MΩ) 2400 (MΩ)  
60 seg. 1 kV (MΩ) (MΩ) (MΩ)

3.- PRUEBA DE RELACION DE TRANSFORMACION Potencia: 15 MVA Grupo de conexiones: Y/Δ Fase (sec): 1 Non-recto:

| Conexión | Conexión | Volaje de derivación | Fase (P1) | Fase (H2) | Fase (H3) | Medida | Medida | Medida |
|----------|----------|----------------------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|--------|
| A        | A        | 8000                 | 25.502    | 25.502    | 25.502    | 25.172 | 25.541 | 25.541 |
| A        | B        | 8000                 | 25.505    | 25.505    | 25.505    | 25.179 | 25.548 | 25.548 |
| A        | C        | 8000                 | 25.509    | 25.509    | 25.509    | 25.186 | 25.555 | 25.555 |
| A        | D        | 8000                 | 24.607    | 24.607    | 24.607    | 24.015 | 24.022 | 24.022 |
| A        | E        | 8000                 | 24.298    | 24.298    | 24.298    | 24.180 | 24.402 | 24.402 |

4.- RESISTENCIA ENTRE TERMINALES

| Prueba (Ω)      | (H1-H2)     | (H2-H3)      | (H3-H1)      | Procedido | Materia de fabricación |
|-----------------|-------------|--------------|--------------|-----------|------------------------|
| 12.33           | 12.33       | 12.33        | 12.33        | 12.33     | Cable                  |
| Secundario (mΩ) | (K1-K2) 6.7 | (K2-K3) 6.02 | (K3-K1) 6.31 | 18.01     | Cable                  |

5.- Prueba sin carga Volaje (V) Is (A) 1 Is (A) 2 Is (A) 3 Procedido % Garantía % Po Medido (W) Po Garantía (W)  
240 0.41 0.41 0.41 0.98 2.4 80 88

6.- Prueba de auto-excitación 284 0.68 1.08 80

7.- PRUEBA DE CORTOCIRCUITO Fact. Potencia: 0.46 Temp. (°C) 29 Ref. a 65 °C Garantías a 65 °C  
Pérdidas (W) 130 187.36  
Isc (A) 3.33 7.98 (W) 134.98 105.57 Pérdidas (W) 192  
Isc (V) 117 Impedancia (%) 2.52 2.52 Impedancia (%) 3

8.- PRUEBA DE AISLAMIENTO Volaje Aplicado en (60 seg) Volaje de prueba  
MV - BV y Tierra: 25 kV Voltmetro: 150 V Voltmetro (V) 480  
RV - MT y Tierra: 10 kV Voltmetro: 50 V Voltmetro (V) 96  
Frecuencia: 60 Hz Tiempo: 18 seg

9.- REGULACIÓN A PLENA CARGA A Is = 0.8 (%) 1.97  
10.- RENDIMIENTO A PLENA CARGA A Is = 0.8 (%) 90.53

11.- CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

| Peso Total (kg) | Ancho (mm) | Diámetro (mm) | Alto (mm) | Peso           | Color | Espesor (mm) |
|-----------------|------------|---------------|-----------|----------------|-------|--------------|
| 587             | 41.58      | 54            | 1220      | ELECTROSTATICA | GRIS  | +100         |

PÉRDIDAS TOTALES (Po + Pj) (W) 232 OBSERVACIONES: Fecha de Prueba: AAAA-MM-DD  
2017-03-04

Clase / Interventor: Control de calidad: DEPARTAMENTO DE CALIDAD COMPARTIA ANONIMA MORETRAN  
Firma: Firma Autorizada

Bello de Calidad INEN NTC INEN 2125

Figura 54: Protocolo de pruebas a transformador – 6300 V  
Fuentes: Los autores

**CERTIFICADO DE PRUEBAS TRANSFORMADOR MONOFÁSICO** FOR LAB 03 VER 14 10 10

Código: T 407004 Oferta No.: 4090 Cliente: Agustin Zuffiga  
Fabricante: C.A. MORETRAN N° serie: L.A.T.-01 Protocolo N°: L.A.T.-2001  
Universidad Politécnica Fecha de Fabricación: 2017-10  
Sede: Guayaquil Transformador: NUEVO Tipo: AUTOPROTEGIDO Pedido No.:

Potencia: 15 kVA N° de Fases: 1 Ø Frecuencia: 60 Hz Norma aplicada: IEC 2114-04  
Nivel (V) Despecho (V) Nivel (A) Despecho (A) Clase Pri (kV): 15  
Clase Sec (kV): 1.2  
Vltaje Pri.: 13200 (GRD) 7500 13200 (GRD) 1000 Corriente Pri.: 1.97 1.27 DL Pri. (kV): 55  
Vltaje Sec.: 240 (120) 240 (120) Corriente Sec.: 33.33 62.50 DL Sec. (kV): 55  
Derivación: +1, -2 X 2.5 % Refrigeración: ONAN C. Alimentación: AO Puntos de conexión: 2  
Operación (meses): 2000 Calentamiento: 15 °C Resultado de pruebas a: 33 °C Temp. Ambiente: 33 °C

1- LIGANDO AISLANTE Tipo: ACEITE Clase: MINERAL  
Tensión de ruptura Referencia: 45 kV Referencia: HYTRANS Método: ASTM D-1818

2- RESISTENCIA DE AISLAMIENTO Tiempo de Lectura: Voltaje de Prueba: M.V. vs E.V. M.V. vs Tierra B.M. vs Tierra  
60 seg. 50V 5000 (MO) 5000 (MO) 25000 (MO)  
30 seg. 1.2V 5000 (MO) 5000 (MO)

3- PRUEBA DE RELACION DE TRANSFORMACION Polaridad: Activa Grupo de conexiones: 1-0 Fase tipo: Y-0 fase neutro:

| Conexión | Conexión | Señal | Voltaje de derivación | Fase (H) | Fase (N) | Fase (C) | Nivel (kV) | Módulo | Máxima |
|----------|----------|-------|-----------------------|----------|----------|----------|------------|--------|--------|
| A        | A        | I     | 7110.50               | 37.501   |          |          | 37.544     | 37.341 | 38.708 |
| B        | A        | I     | 7020.00               | 37.777   |          |          | 37.760     | 37.521 | 37.909 |
| C        | A        | I     | 7020.50               | 37.999   |          |          | 37.956     | 37.821 | 37.911 |
| D        | A        | I     | 7020.50               | 38.025   |          |          | 38.163     | 37.912 | 38.313 |
| E        | A        | I     | 7042.50               | 38.339   |          |          | 38.369     | 38.222 | 38.318 |

4- RESISTENCIA ENTRE TERMINALES

| Primario (Ω) | SEC (Ω) | IND (Ω) | PROX (Ω) | Resistencia de bobinado |
|--------------|---------|---------|----------|-------------------------|
| 17.47        | 171.320 | 102.370 | 103.371  | Color                   |
| 8.75         | 8.64    | 16.51   | 16.31    | Color                   |

5- Prueba sin carga Voltaje (V) Ia (A) 1 Ia (A) 2 Ia (A) 3 P promedio % Sierbente % Po Medido (W) Po Garantía (W)  
340 0.41 0.41 0.41 0.96 2.4 80 88

6- Prueba de salida excitación Voltaje (V) Ia (A) 1 Ia (A) 2 Ia (A) 3 P promedio % Sierbente % Po Medido (W) Po Garantía (W)  
304 0.64 0.64 0.64 1.08 - 80

7- PRUEBA DE CORTOCIRCUITO Frec. Potencia 0.42 Temp. (°C) 33 Ref. a 95 °C Garantías a 95 °C  
Ind (Ω) 1.37 P/N (W) 1.34 100.25 Pérdida (W) 102  
Imp (Ω) 180 P/N (W) 112.19 100.85 Pérdida (W) 102  
Impedancia (%) 1.10 1.10 1.10 Impedancia (%) 3

8- PRUEBA DE AISLAMIENTO Voltaje Aplicado en (V) (seg) Voltaje Inducido 480  
M.V. - B.V. y Tierra: 25 kV Voltaje: 130 V Voltaje (V) 99  
B.V. - B.T. y Tierra: 10 kV Voltaje: 50 V Voltaje (V) 99  
Frecuencia: 100 Hz Tiempo: 10 seg.

9- REGULACIÓN A PLENA CARGA A I<sub>p</sub> = 0.8 (N) 0.91  
10- RENDIMIENTO A PLENA CARGA A I<sub>p</sub> = 0.8 (N) 90.00

11- CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

| Peso Total (kg) | Acero (g) | Diámetro (mm) | Alt (mm) | Material       | Color | Espesor (mm) |
|-----------------|-----------|---------------|----------|----------------|-------|--------------|
| 187             | 41.08     | 245           | 100      | ELECTRORRÁTICA | GRIS  | > 100        |

PÉRDIDAS TOTALES (Po + Pj) (W) 227 OBSERVACIONES: Fecha de Prueba: AAAA-MM-DD  
2017-10-04

Cliente / Interventor: Control de calidad: Firma: DEPARTAMENTO DE CALIDAD  
COMPAÑIA ANÓNIMA MORETRAN  
Firma Autorizada

Bello de Calidad IEN NTE IEN 2130

Figura 55: Protocolo de pruebas a transformador – 7620 V  
Fuentes: Los autores