

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS**

### **CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA ESFOT**

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

**CAIZA PILATAXI CARLOS FERNANDO**

carlosfernando\_pilataxi@outlook.com

**JUIÑA ANAGUANO VÍCTOR HUGO**

vhjan13@hotmail.com

**DIRECTORA: ING. GABRIELA ARAUJO VIZUETE MSc.**

**CODIRECTOR: ING. CARLOS ROMO HERRERA**

**Quito, Mayo 2018**

# CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Caiza Pilataxi Carlos Fernando y Juiña Anaguano Víctor Hugo, bajo mi supervisión.

---

**MSc. Ing. Gabriela Araujo Vizuite**  
**DIRECTORA DEL PROYECTO**

---

**Ing. Carlos Romo Herrera**  
**CODIRECTOR DEL PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Caiza Pilataxi Carlos Fernando y Juiña Anaguano Víctor Hugo, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

---

Caiza Pilataxi Carlos Fernando

---

Juiña Anaguano Víctor Hugo

## **DEDICATORIA**

A mi familia por su apoyo y consejos, a mis amigos por su sincera amistad que me brindaron en el trayecto de mi formación personal y profesional.

**Carlos Fernando Caiza Pilataxi**

A mis padres que me enseñaron a superarme y aprender hasta de mis propios errores.

**Víctor Hugo Juiña Anaguano**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme la vida.

A mis padres Carlos Alfredo y Gloria Cecilia por su apoyo incondicional, por su ejemplo de sacrificio que día con día fueron mi motivación para seguir.

A mis Hermanos Oscar y Jonathan por estar conmigo en los buenos y malos momentos.

A la Escuela de Formación de Tecnólogos por darme la oportunidad de prepararme y crecer como persona.

**Carlos Fernando Caiza Pilataxi**

A mis padres, Víctor Aníbal Juiña y Marcela Guadalupe Anaguano, por toda la paciencia y apoyo para cumplir con mi desarrollo personal en la Escuela Politécnica Nacional.

A mis hermanos que han sido inspiración para lograr mis objetivos, además de ser un apoyo en los momentos de dificultad.

Al Jefe del laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica por la colaboración en el desarrollo de este proyecto.

**Víctor Hugo Juiña Anaguano**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Definición del problema</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Justificación del proyecto</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3. Alcance</b> .....	<b>2</b>
<b>1.4. Objetivos</b> .....	<b>3</b>
1.4.1. Objetivo General .....	3
1.4.2. Objetivos Específicos .....	3
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1. Marco teórico</b> .....	<b>4</b>
2.1.1. Transformador eléctrico .....	4
Principio de funcionamiento transformador monofásico .....	4
Transformador ideal .....	5
Transformador no ideal .....	8
2.1.2. Parámetros de un transformador.....	18
Polaridad de un transformador eléctrico.....	18
Prueba de circuito abierto. ....	19
Prueba de corto circuito. ....	21
2.1.3. Conexiones trifásicas de transformadores.....	23
Conexión delta – delta.....	23
Conexión estrella – estrella .....	25
Conexión delta - estrella.....	26
Conexión estrella – delta.....	28
2.1.4. Otras aplicaciones.....	30
Autotransformador .....	30
Transformador elevador .....	31
Transformador Reductor .....	32
2.1.5. Amplificadores operacionales.....	32
Amplificador operacional ideal.....	32
Amplificador operacional real .....	33
Alimentación del amplificador operacional.....	34
Protección de los amplificadores operacionales .....	34
2.1.6. Aplicaciones lineales para amplificadores operacionales .....	35
Amplificador inversor.....	35
Amplificador no inversor.....	35

2.1.7.	Aplicaciones no lineales .....	36
	Rectificador de media onda con salida negativa.....	36
	Rectificador de onda completa con amplificador operacional .....	37
	Convertidor CA a CD.....	38
2.1.8.	Microcontrolador. ....	39
	Definición .....	39
	Función .....	40
2.1.9.	Arduino Mega.....	40
	Estructura.....	40
	Especificaciones técnicas ARDUINO MEGA.....	41
	Alimentación .....	41
	Entradas y salidas .....	42
	Distribución de pines .....	43
2.1.10.	Entorno de Arduino .....	43
	Librerías .....	43
2.1.11.	Pantalla.....	44
	Display LCD TFT gráfico .....	44
	Touch LCD Shield para pantallas TFT .....	45
	Shield.....	45
2.1.12.	Sensor de corriente YHDC SCT-013-000.....	46
<b>2.2.</b>	<b>Metodología de diseño del módulo.....</b>	<b>48</b>
2.2.1.	Diseño de transformadores monofásicos .....	48
	Cálculo de parámetros de transformadores monofásicos.....	48
	Cálculo de la potencia aparente. ....	48
	Sección transversal del núcleo.....	49
	Elección de la chapa para el núcleo.....	50
	Elección del carrete.....	51
	Número de chapas.....	52
	Cálculo de vueltas para bobinados.....	52
	Sección de conductores primario y secundario. ....	53
2.2.2.	Diseño del dispositivo de medición.....	55
	Fuentes de alimentación DC.....	55
	Dispositivo de medición de corriente.....	57
	Acondicionamiento para la lectura de la señal de corriente.....	58
	Relación entre la corriente de entrada y el voltaje de salida.....	58
	Dispositivo de medición de voltajes.....	59
	Acondicionamiento para la lectura de la señal de voltaje .....	59

Relación entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida.....	60
Convertidor CA a CD para señales de voltaje y corriente.....	61
Asignación de pines para las señales analógicas en Arduino.....	63
Diagrama de flujo para captar las señales analógicas.....	63
Medición del factor de potencia.....	64
Acondicionamiento de las señales para el detector de cruce por cero. ....	64
Obtención del ángulo de desfase. ....	66
Diagrama de flujo Factor de Potencia .....	67
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>68</b>
<b>3.1. Implementación del módulo de transformadores .....</b>	<b>68</b>
3.1.1. Construcción de transformadores .....	68
Construcción del carrete .....	68
Elaboración de Bobinados .....	69
Armado del núcleo magnético.....	70
3.1.2. Implementación del dispositivo de medición.....	71
Diseño de las pistas a través del programa ARES. ....	71
Exportación de circuitos .....	72
PCB de fuente de alimentación DC .....	72
Montaje del dispositivo de medición .....	73
3.1.3. Implementación terminada. ....	74
<b>3.2. Pruebas y análisis de resultados .....</b>	<b>75</b>
3.2.1. Pruebas del sistema de medición.....	76
Cálculo porcentaje de error.....	76
Pruebas para el sensor de voltaje .....	76
Pruebas para el sensor de corriente.....	77
Prueba de cosfímometro .....	79
3.2.2. Pruebas de transformadores monofásicos .....	80
Pruebas de vacío .....	80
Pruebas de cortocircuito.....	81
Pruebas como transformador elevador .....	82
Pruebas como transformador reductor .....	83
Pruebas como autotransformador elevador.....	84
Pruebas como autotransformador reductor .....	85
Grupo de conexión yy0 con neutro.....	86
Grupo de conexión dd0 .....	87
Pruebas de polaridad .....	88
<b>4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>89</b>

RECOMENDACIONES .....	90
<b>5. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>91</b>
<b>6. ANEXOS .....</b>	<b>92</b>
Anexo 1 Amplificador operacional TI 082. ....	92
Anexo 2 Sensor de corriente efecto Hull. ....	94
Anexo 3 Plataforma Arduino mega. ....	95
Anexo 4 Ensayo de vacío transformador T1. ....	97
Anexo 5 Ensayo de vacío transformador T2. ....	98
Anexo 6 Ensayo de vacío transformador T3. ....	99
Anexo 7 Ensayo de vacío transformador T4. ....	100
Anexo 8 Ensayo de vacío transformador T5. ....	101
Anexo 9 Ensayo de vacío transformador T6. ....	102
Anexo 10 Ensayo de cortocircuito transformador T1. ....	103
Anexo 11 Ensayo de cortocircuito transformador T2. ....	104
Anexo 12 Ensayo de cortocircuito transformador T3. ....	105
Anexo 13 Ensayo de cortocircuito transformador T4. ....	106
Anexo 14 Ensayo de cortocircuito transformador T5. ....	107
Anexo 15 Ensayo de cortocircuito transformador T6. ....	108
Anexo 16 Transformador elevador. ....	109
Anexo 17 Transformador reductor. ....	110
Anexo 18 Autotransformador elevador. ....	111
Anexo 19 Autotransformador reductor. ....	112
Anexo 20 Conexión y –y sin neutro. ....	113
Anexo 21 Conexión y-y con neutro. ....	114
Anexo 22 Conexión yy – yy sin neutro. ....	115
Anexo 23 Conexión yy – yy con neutro. ....	116
Anexo 24 Conexión D-D en T1, T2, T3. ....	117
Anexo 25 Conexión D-D en T4, T5, T6. ....	118
Anexo 26 Conexión delta abierta en T4, T5, T6. ....	119
Anexo 27 Prueba de polaridad. ....	120

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Transformador monofásico acorazado.....	4
<b>Figura 2.</b> Transformador ideal sin carga. ....	5
<b>Figura 3.</b> Transformador ideal con carga.....	6
<b>Figura 4.</b> Transformador ideal con resistencias del devanado modeladas como resistencias agregadas.....	9
<b>Figura 5.</b> Transformador con flujos de dispersión y flujo mutuo.....	10
<b>Figura 6.</b> Devanados hipotéticos que muestran los flujos de dispersión y mutuo por separado.....	10
<b>Figura 7.</b> Transformador no ideal representado en términos de un transformador ideal con resistencias del devanado y reactancias de dispersión.. ....	11
<b>Figura 8.</b> Circuito equivalente de un transformador ideal.....	12
<b>Figura 9.</b> Circuito equivalente exacto de un transformador práctico.....	13
<b>Figura 10.</b> Circuito equivalente exacto desde el lado primario del transformador.....	14
<b>Figura 11.</b> Circuito equivalente exacto desde el lado secundario del transformador.....	14
<b>Figura 12.</b> Diagrama fasorial de un transformador no ideal. ....	15
<b>Figura 13.</b> Circuito equivalente aproximado de un transformador que incorpora un transformador ideal. ....	16
<b>Figura 14.</b> Circuito equivalente aproximado observado desde el lado primario.....	17
<b>Figura 15.</b> Circuito equivalente aproximado de un transformador observado desde el lado secundario.....	17
<b>Figura 16.</b> Pruebas de polaridad para un transformador.....	18
<b>Figura 17.</b> Prueba de circuito abierto transformador de dos devanados. ....	19
<b>Figura 18.</b> Circuito equivalente aproximado de transformador prueba de circuito abierto....	19
<b>Figura 19.</b> Diagrama fasorial en la prueba de circuito abierto. ....	20
<b>Figura 20.</b> Esquema para realizar la prueba de cortocircuito.....	21
<b>Figura 21.</b> Circuito equivalente aproximado.....	22
<b>Figura 22.</b> Conexión delta balanceada. ....	23
<b>Figura 23.</b> Diagrama fasorial de las corrientes ....	24
<b>Figura 24.</b> Diagrama de conexiones Y – Y.....	25
<b>Figura 25.</b> Diagrama vectorial de voltajes. ....	25
<b>Figura 26.</b> Diagrama de conexión D – Y.....	26
<b>Figura 27.</b> Diagramas vectoriales de voltaje en D-Y.. ....	27
<b>Figura 28.</b> Desfase entre los voltajes primario y secundario en D-Y.. ....	27
<b>Figura 29.</b> Diagramas vectoriales de corriente en D-Y.....	27
<b>Figura 30.</b> Desfase entre las corrientes primaria y secundaria en D-Y.....	28

<b>Figura 31.</b> Diagrama de conexiones Y – D..	29
<b>Figura 32.</b> Diagramas vectoriales de voltaje en Y-D..	29
<b>Figura 33.</b> Desfase entre los voltajes primario y secundario en Y - D..	29
<b>Figura 34.</b> Diagramas vectoriales de corrientes en Y - D..	30
<b>Figura 35.</b> Desfase entre las corrientes primaria y secundaria en Y - D.....	30
<b>Figura 36.</b> Autotransformador reductor y elevador.....	31
<b>Figura 37.</b> Transformador elevador.....	31
<b>Figura 38.</b> Transformador reductor. ....	32
<b>Figura 39.</b> Concepto amplificador operacional.....	32
<b>Figura 40.</b> Circuito equivalente del amplificador operacional..	33
<b>Figura 41.</b> Función característica del amplificador operacional ideal.....	33
<b>Figura 42.</b> Curva característica del amplificador operacional no ideal.....	34
<b>Figura 43.</b> Alimentación del amplificador operacional. ....	34
<b>Figura 44.</b> Protección de entrada diferencial.....	35
<b>Figura 45.</b> Esquema de un amplificador inversor.....	35
<b>Figura 46.</b> Esquema de un amplificador no inversor. ....	36
<b>Figura 47.</b> Esquema del rectificador de media onda con amplificador operacional..	36
<b>Figura 48.</b> Onda de salida en el circuito rectificador de media onda. ....	37
<b>Figura 49.</b> Rectificador de onda completa.....	37
<b>Figura 50.</b> Representación de la rectificación de una onda senoidal. ....	38
<b>Figura 51.</b> Circuito convertidor CA a CD con capacitor.....	38
<b>Figura 52.</b> Representación del rizado por medio de capacitor.....	39
<b>Figura 53.</b> Representación de un CPU. ....	39
<b>Figura 54.</b> Esquema Arduino Mega .....	40
<b>Figura 55.</b> Distribución de pines plataforma Arduino.....	43
<b>Figura 56.</b> Pantalla TFT para Arduino .....	44
<b>Figura 57.</b> Acople de pantalla, shield y Arduino.....	45
<b>Figura 58.</b> Shield Arduino 3.2" para TFT LCD Touch. ....	46
<b>Figura 59.</b> Sensor de efecto hall. ....	46
<b>Figura 60.</b> Circuito equivalente del sensor de corriente .....	47
<b>Figura 61.</b> Triángulo de Potencias de transformadores.....	48
<b>Figura 62.</b> Sección del núcleo con sus medidas.....	49
<b>Figura 63.</b> Representación del ancho de chapa.....	51
<b>Figura 64.</b> Sección del núcleo con sus medidas. ....	51
<b>Figura 65.</b> Circuito implementado para la fuente $\pm 9$ V. ....	56
<b>Figura 66.</b> Cargador 5Vdc. ....	57
<b>Figura 67.</b> Circuito equivalente del sensor de corriente. ....	58

<b>Figura 68.</b> Circuito divisor de voltaje.....	59
<b>Figura 69.</b> Onda rectificada para 5 Vrms.....	61
<b>Figura 70.</b> Circuito implementado para el acondicionamiento de la señal.....	62
<b>Figura 71.</b> Diagrama de flujo general.....	63
<b>Figura 72.</b> Forma de onda cuadrada del circuito detector de cruce por cero.....	64
<b>Figura 73.</b> Circuito detector de cruce por cero.....	65
<b>Figura 74.</b> Diagrama de flujo para obtener el ángulo de desfase.....	67
<b>Figura 75.</b> Representación de las bobinas.....	68
<b>Figura 76.</b> Carrete de papel parafinado.....	69
<b>Figura 77.</b> Elaboración de bobinas.....	69
<b>Figura 78.</b> Aislamiento de cada bobina.....	69
<b>Figura 79.</b> Bobinado completo primarios y secundarios.....	69
<b>Figura 80.</b> Láminas de Hierro.....	70
<b>Figura 81.</b> Núcleo Armado.....	70
<b>Figura 82.</b> Barniz para bobinas y núcleo.....	70
<b>Figura 83.</b> Estructura principal del módulo.....	70
<b>Figura 84.</b> Delimitación del área de trabajo.....	71
<b>Figura 85.</b> Colocación de elementos en la placa.....	72
<b>Figura 86.</b> Ruteo de pistas en ARES.....	72
<b>Figura 87.</b> Fitolítico de las pistas cara inferior.....	73
<b>Figura 88.</b> Plantilla de la cara superior.....	73
<b>Figura 89.</b> Placa sujeta con tornillería.....	73
<b>Figura 90.</b> Ubicación interna de todos los componentes.....	74
<b>Figura 91.</b> Módulo de transformadores.....	74
<b>Figura 92.</b> Diagrama para obtener diferentes voltajes.....	77
<b>Figura 93.</b> Diagrama para obtener diferentes niveles de corriente.....	78
<b>Figura 94.</b> Diagrama de conexión para la prueba de vacío.....	80
<b>Figura 95.</b> Diagrama de conexión para la prueba de cortocircuito.....	81
<b>Figura 96.</b> Diagrama de conexión como transformador elevador.....	82
<b>Figura 97.</b> Diagrama de conexión como transformador reductor.....	83
<b>Figura 98.</b> Diagrama de conexión como autotransformador elevador.....	84
<b>Figura 99.</b> Diagrama de conexión como autotransformador reductor.....	85
<b>Figura 100.</b> Diagrama de Conexión Yy0.....	86
<b>Figura 101.</b> Diagrama de conexión Dd0.....	87
<b>Figura 102.</b> Esquema prueba de polaridad.....	88

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Puertos principales tarjeta Arduino mega.....	40
<b>Tabla 2.</b> Especificaciones Técnicas.....	41
<b>Tabla 3.</b> Especificaciones de los puertos Arduino Mega.....	42
<b>Tabla 4.</b> Especificaciones Técnicas del sensor de corriente.....	47
<b>Tabla 5.</b> Parámetros transformadores.....	48
<b>Tabla 6.</b> Valores de coeficiente del hierro para chapa de buena calidad.....	50
<b>Tabla 7.</b> Dimensión de chapas.....	50
<b>Tabla 8.</b> Densidad de corriente.....	53
<b>Tabla 9.</b> Tabla de conductores AWG.....	55
<b>Tabla 10.</b> Elementos utilizados para la fuente $\pm 9$ V.....	56
<b>Tabla 11.</b> Elementos utilizados en el convertidor CA a CD.....	62
<b>Tabla 12.</b> Asignación de pines.....	63
<b>Tabla 13.</b> Asignación de pines digitales.....	66
<b>Tabla 14.</b> Ciclos de una onda alterna.....	66
<b>Tabla 15.</b> Materiales y equipos utilizados.....	68
<b>Tabla 16.</b> Recursos para realizar las pruebas.....	75
<b>Tabla 17.</b> Especificaciones técnicas del Fluke 337.....	76
<b>Tabla 18.</b> Especificaciones técnicas analizador de red Fluke 434.....	76
<b>Tabla 19.</b> Comparación de voltajes entre el elemento referencia y el diseñado.....	77
<b>Tabla 20.</b> Comparación de corrientes entre el elemento de referencia y el diseñado.....	78
<b>Tabla 21.</b> Porcentaje de error prueba de cosfímetro.....	79
<b>Tabla 22.</b> Datos de las pruebas de vacío referidas a la bobina 1.....	80
<b>Tabla 23.</b> Datos de las pruebas de cortocircuito referidas a las bobinas 1 y 3.....	81
<b>Tabla 24.</b> Datos de la prueba de transformador elevador.....	82
<b>Tabla 25.</b> Datos de la prueba de transformador reductor.....	83
<b>Tabla 26.</b> Datos de las pruebas autotransformador elevador.....	84
<b>Tabla 27.</b> Datos de las pruebas autotransformador reductor.....	85
<b>Tabla 28.</b> Resultados de la conexión YY0 con neutro.....	86
<b>Tabla 29.</b> Resultados en conexión Dd0.....	87

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad implementar un módulo de transformadores monofásicos que permitan complementar los conocimientos impartidos en la asignatura de Máquinas Eléctricas correspondiente al pensum de la carrera de Tecnología Electromecánica de la Escuela de Formación de Tecnólogos de la Escuela Politécnica Nacional, para mejorar el equipamiento de los laboratorios de la Institución.

Para lo cual se detalla en tres partes del documento como son: i) introducción, ii) marco teórico, diseño e implementación, iii) pruebas y análisis de resultados.

El marco teórico detalla las referencias teóricas necesarias enfocadas al cumplimiento de los objetivos planteados. Dentro de diseño se define la metodología utilizada para definir los parámetros de diseño como: cálculo para la construcción de transformadores monofásicos, sistema de medición de voltajes, corrientes y factor de potencia a través de la plataforma Arduino. La implementación contiene el proceso de ejecución del proyecto aplicando las referencias teóricas y prácticas. Como resultados se expone el correcto funcionamiento del módulo en función a las diferentes pruebas aplicadas al mismo.

Para finalizar en las conclusiones se expone el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

Palabras claves: Módulo de transformadores, sistema de medición, parámetro de diseño, construcción de transformadores, Arduino.

## **ABSTRACT**

The purpose of this project is to implement a single-phase transformer module that will complement the knowledge taught in the subject of Electrical Machines corresponding to the career of Electromechanical Technology of the Escuela de Formación de Tecnólogos of the Escuela Politécnica Nacional, to improve the equipment of the laboratories of the Institution.

The present inform is detailed in three parts such as: i) introduction, ii) theoretical framework, design and implementation, iii) testing and analysis of results.

The theoretical framework details the references necessary to get the objectives set. In the design phase, the methodology used to define the design parameters is defined as: calculation for the construction of single-phase transformers, measurement system for voltages, currents and power factor through the Arduino platform. The implementation contains the project execution process applying the theoretical and practical references. The results show the correct performance of the module according to the different tests applied to it.

To finalize the conclusions, the fulfillment of the project's objectives is exposed.

Keywords: Transformer module, measurement system, design parameters, construction of transformers, Arduino.

# 1. INTRODUCCIÓN

La importancia de los transformadores se debe a que, gracias a ellos, ha sido posible el desarrollo de la industria eléctrica. Su utilización hizo posible la realización práctica y económica del transporte de energía eléctrica a grandes distancias.

La implementación del módulo de transformadores monofásicos como parte del laboratorio de Máquinas Eléctricas para la Escuela de Formación de Tecnólogos constituye una necesidad ya que el perfil de Tecnólogo Electromecánico está encaminado en adecuar y optimizar sistemas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

Actualmente la carrera de Tecnología en Electromecánica no cuenta con un laboratorio para realizar prácticas, en lo referente a la asignatura de Maquinas Eléctricas, estas son realizadas en el laboratorio de la Facultad Ingeniería Eléctrica.

El presente proyecto propone, proveer parte del equipamiento para el laboratorio de Máquinas Eléctricas, mediante la implementación de equipos enfocados al estudio de transformadores monofásicos

Consecuentemente para la implementación del módulo de transformadores es necesario determinar los parámetros para el cumplimiento de las prácticas requeridas en el área de estudio.

## 1.1. Definición del problema

La ESFOT tiene como misión la formación de tecnólogos que tengan una sólida formación académica tanto conceptual como práctica, cuyo aporte promueva el desarrollo tecnológico del país, para viabilizar el proceso tecnológico y transferirlo al medio productivo.

Es por ello que es importante que dicha entidad cuente con el equipamiento adecuado que promueva el aprendizaje práctico de los estudiantes, principalmente en las áreas relacionadas con Máquinas Eléctricas.

“Los transformadores son un tópico de gran importancia, y, al mismo tiempo dar un conocimiento adicional adecuado sobre la teoría de circuitos magnéticos”. [1]

El estudio de transformadores constituye uno de los tópicos más importantes y útiles, tanto en la vida estudiantil como profesional. Ya que la ESFOT no cuenta con un laboratorio, el presente proyecto pretende realizar la construcción de un módulo didáctico de transformadores monofásicos de tal forma que sea posible la realización de prácticas,

permitiendo así que el estudiante disponga de los instrumentos suficientes y adecuados para cumplir con los objetivos de aprendizaje.

## **1.2. Justificación del proyecto**

Esta propuesta surge como una oportunidad de proveer equipamiento para el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la ESFOT a implementarse mediante la construcción de equipos enfocados al estudio de transformadores monofásicos.

Al proporcionar el equipamiento será posible realizar todo tipo de conexiones, logrando cumplir con los objetivos de las prácticas que se requieren para la formación del perfil profesional de Tecnología Electromecánica.

## **1.3. Alcance**

El proyecto tiene como fin alcanzar los objetivos de las diferentes prácticas establecidas en la asignatura de Laboratorio de Máquinas Eléctricas enfocada al estudio de transformadores monofásicos.

Para el desarrollo del proyecto se analizaron guías de prácticas establecidas como: pruebas de polaridad, pruebas en transformadores monofásicos cortocircuito y circuito abierto, banco de transformadores trifásico, autotransformador elevador y reductor, a fin de especificar las características técnicas de los equipos a implementar estableciendo la mejor opción que cumpla con las necesidades.

Junto con los transformadores se desarrollará un instrumento de medición que sea capaz de obtener voltajes, corrientes y factor de potencia, para ello se implementará circuitos de tratamiento de señales empleando amplificadores operacionales, divisor de voltaje, sensor de corriente no invasivo y detector de cruces por cero, con el fin de proveer a un sistema basado en Arduino las magnitudes que serán procesadas.

Para todo esto se acoplará un dispositivo GLCD y TFT Touch los cuales permitirán seleccionar y presentar la magnitud deseada al usuario.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

- Construir un módulo didáctico de transformadores monofásicos para el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la ESFOT.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Establecer la potencia nominal de los transformadores requeridos para la realización de las distintas prácticas.
- Definir los parámetros constructivos tanto del sistema eléctrico como magnético de los transformadores monofásicos.
- Construir los transformadores monofásicos y la estructura de soporte del equipamiento completo.
- Implementar el sistema de medición y presentación de datos (medición de voltajes y corrientes) a través de la plataforma Arduino.

## 2. METODOLOGÍA

El desarrollo de este proyecto se basa en la investigación aplicada la cual busca la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad o el sector productivo. Por lo que es necesario comprender los conceptos y fundamentos que sustentan la implementación del módulo.

### 2.1. Marco teórico

En el presente capítulo se detalla los conceptos básicos, los cuales facilitan el entendimiento de lo aplicado en el desarrollo del proyecto.

#### 2.1.1. Transformador eléctrico

El término transformador se aplica a ciertos dispositivos basados en los efectos físicos de dos o más bobinas estacionarias acopladas por un campo magnético mutuo. “Los transformadores pueden tener núcleo de aire, ferrita o material ferroso.”

#### Principio de funcionamiento transformador monofásico

Al conectar una tensión alterna  $V_1$  al primario  $N_1$  en la Figura 1, circula una corriente que genera un flujo alterno en el núcleo magnético. “Este flujo magnético, en virtud de la ley de Faraday, induce en el secundario una fuerza electromotriz (f.e.m.)  $E_2$  que da lugar a una tensión  $V_2$  en los bornes de  $N_2$ . De esta manera se consigue transformar una tensión de valor eficaz  $V_1$  en otra de valor eficaz  $V_2$ .” [2]

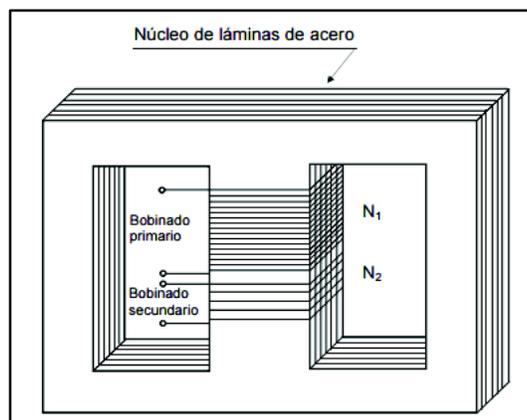
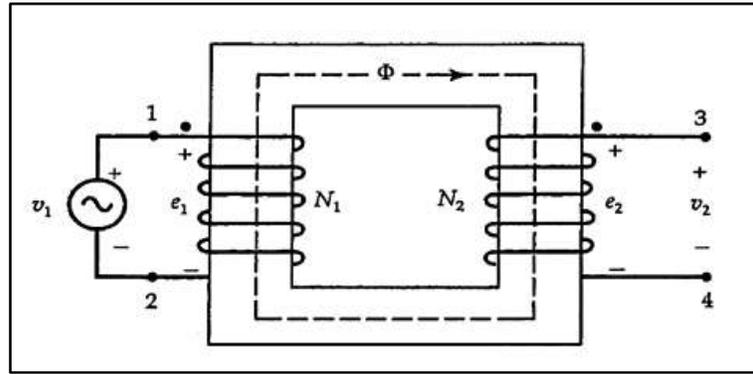


Figura 1. Transformador monofásico acorazado. [3]

## Transformador ideal

En la Figura 2 se muestra un transformador con dos devanados que operan cada uno como parte de un circuito eléctrico diferente. Sean  $N_1$  y  $N_2$  el número de vueltas en los devanados primario y secundario.



**Figura 2.** Transformador ideal sin carga. [4]

El devanado primario está conectado a una fuente de voltaje variable en el tiempo  $v_1$ , mientras que el devanado secundario se dejó abierto. Para entenderlo mejor, considérese primero un transformador ideal en el que no hay pérdidas ni flujo de dispersión se tiene:

- El núcleo del transformador es sumamente permeable en el sentido de que requiere una fuerza magnetomotriz (fmm) pequeña, para establecer el flujo  $\Phi$  que se encuentra en la Figura 2.
- En el núcleo no se aprecian corrientes parásitas ni pérdidas por histéresis.
- Todo el flujo está restringido a circular dentro del núcleo.
- La resistencia de cada devanado es despreciable.

De acuerdo con la Ley de inducción de Faraday, el flujo magnético  $\Phi$  en el núcleo induce una fem  $e_1$  en el devanado primario que se opone al voltaje aplicado  $v_1$ . Para las polaridades del voltaje aplicado y la fem inducida, se indica en la Figura 2, para el devanado primario se define en la ecuación 1.

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde:

- $e_1$  = Fuerza electromotriz
- $N_1$  = número de espiras primario
- $d\Phi$  = derivada del flujo
- $dt$  = derivada del tiempo

En forma semejante, la fem inducida en el devanado secundario se expresa en la Ec.2.

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde:  
 $e_2$  = Fuerza electromotriz  
 $N_2$  = número de espiras primario  
 $d\Phi$  = derivada del flujo  
 $dt$  = derivada del tiempo

En el caso ideal supuesto, las fem inducidas  $e_1$  y  $e_2$  son iguales a los voltajes  $v_1$  y  $v_2$ , luego de las ecuaciones 1 y 2 se obtiene.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{Ec. 3})$$

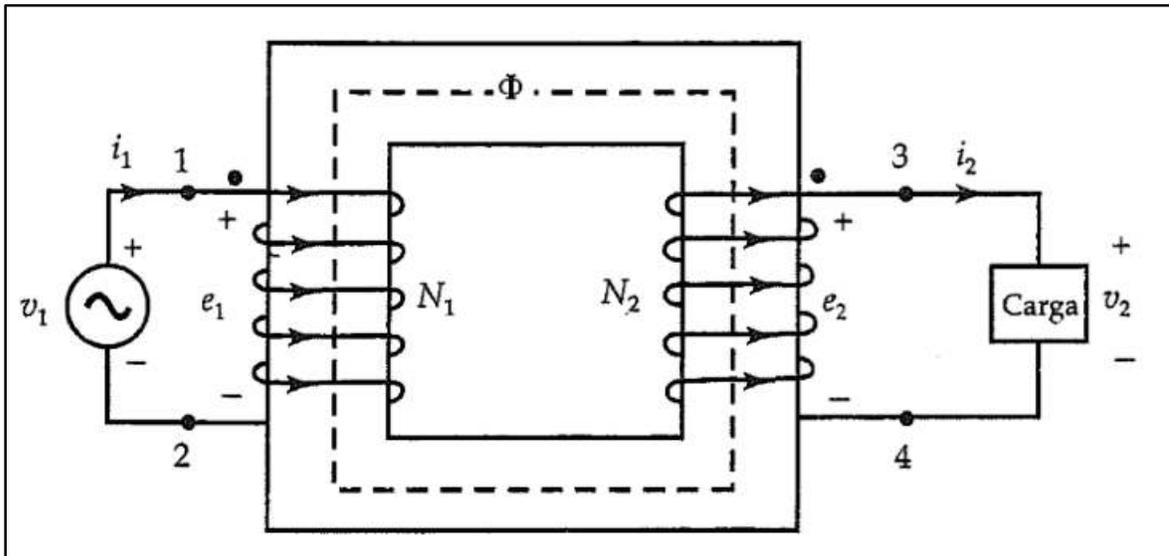
Establece que la relación en las fem inducidas primaria y secundaria es igual a la relación entre número de vueltas del primario y el secundario.

La relación entre las vueltas del primario y secundario se conoce como relación de transformación, como muestra la ecuación 4.

$$\frac{N_1}{N_2} = a \quad (\text{Ec. 4})$$

$a$  = Relación de transformación

Sea  $i_2$  la corriente a través del devanado secundario cuando se conecta una carga, como aparece en la Figura 3. La magnitud de  $i_2$  depende de la impedancia de la carga; sin embargo, su dirección es tal que tiende a debilitar el flujo en el núcleo  $\Phi$  y a disminuir la fem inducida en el primario  $e_1$ . Para el transformador ideal,  $e_1$  siempre debe ser igual a  $v_1$ .



**Figura 3.** Transformador ideal con carga. [4]

En otras palabras, el flujo en el núcleo siempre debe ser igual a su valor original sin carga, la fuente  $v_1$  establece una corriente  $i_1$  en el devanado primario, como se indica en la Figura 3 de acuerdo con los supuestos, la fmm de la corriente primaria  $N_1 i_1$  debe ser igual y opuesta a la fmm de la secundaria  $N_2 i_2$ , como se aprecia en la ecuación 5.

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (\text{Ec. 6})$$

$i_1$  = Corriente en el devanado primario

$i_2$  = Corriente en el devanado secundario

Se establece que las corrientes primaria y secundaria se transforman en relación inversa al número de vueltas. Con base a las ecuaciones 3 y 6 se tiene que:

$$v_1 i_1 = v_2 i_2 \quad (\text{Ec. 7})$$

La ecuación 7 confirma el supuesto de que no hay pérdidas en un transformador ideal en cualquier instante la potencia de salida es igual a la potencia de entrada, para variaciones senoidales en el voltaje aplicado el flujo magnético en el núcleo también varía senoidalmente en condiciones ideales. El flujo en el núcleo en cualquier instante  $t$  está a través de la ecuación 8.

$$\Phi = \Phi_m \text{ sen } \omega t \quad (\text{Ec. 8})$$

$\Phi$  = Flujo magnético

$\Phi_m$  = Amplitud del flujo

$\omega$  = es la frecuencia angular

Se reemplaza la ecuación 8 en la 1, la fem inducida en el primario se muestra en la ecuación 9.

$$e_1 = N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t \quad (\text{Ec. 9})$$

La ecuación 9 puede expresarse en forma fasorial en términos de su valor eficaz:

$$\begin{aligned} \bar{E}_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}} N_1 \omega \Phi_m \angle 0^\circ \\ \bar{E}_1 &= 4.44 f N_1 \Phi_m \angle 0^\circ \end{aligned} \quad (\text{Ec. 10})$$

$\bar{E}_1$  = Fem inducida en el primario valor eficaz, fasor

Con base en las ecuaciones 9 y 10 se obtiene la ecuación 11.

$$\frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_2} = \frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (\text{Ec. 11})$$

$\bar{V}_1$  = Voltaje eficaz de la fuente, fasor

$\bar{V}_2$  = Voltaje eficaz salida del secundario, fasor

$\bar{E}_2$  = Fem inducida en el secundario valor eficaz, fasor

$\bar{V}_1 = \bar{E}_1$  y  $\bar{V}_2 = \bar{E}_2$  se encuentran en condiciones ideales. De la ecuación 11 es evidente que las fem inducidas se encuentran en fase. para un transformador ideal los voltajes en las terminales también están en fase. Es posible deducir que:

$$\frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (\text{Ec. 12})$$

$\bar{I}_2$  = Corriente eficaz en el secundario, fasor

$\bar{I}_1$  = Corriente eficaz en el primario, fasor

Donde  $\bar{I}_1$  e  $\bar{I}_2$  son las corrientes en forma de fasor a través de los devanados primario y secundario, la ecuación 12 define que para un transformador ideal  $\bar{I}_1$  e  $\bar{I}_2$  deben estar en fase. La ecuación 7 puede expresarse en términos de cantidades fasoras y se representa en la ecuación 13.

$$\bar{V}_1 \bar{I}_1^* = \bar{V}_2 \bar{I}_2^* \quad (\text{Ec. 13})$$

Es decir, la potencia compleja que suministra la fuente al devanado primario es igual a la potencia compleja que suministra el devanado secundario a la carga. en términos de las potencias aparentes, la ecuación 13 se transforma en:

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (\text{Ec. 14})$$

Si  $\bar{Z}_2$  es la impedancia de la carga en el lado secundario (ecuación 15), entonces

$$\bar{Z}_2 = \frac{\bar{V}_2}{\bar{I}_2} = \frac{1}{a^2} \frac{\bar{V}_1}{\bar{I}_1} \quad (\text{Ec. 15})$$

Resolviendo la ecuación 15:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_2 &= \frac{1}{a^2} \bar{Z}_1 \\ \bar{Z}_1 &= a^2 \bar{Z}_2 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 16})$$

$\bar{Z}_1$  = Impedancia primario

$\bar{Z}_2$  = Impedancia secundario

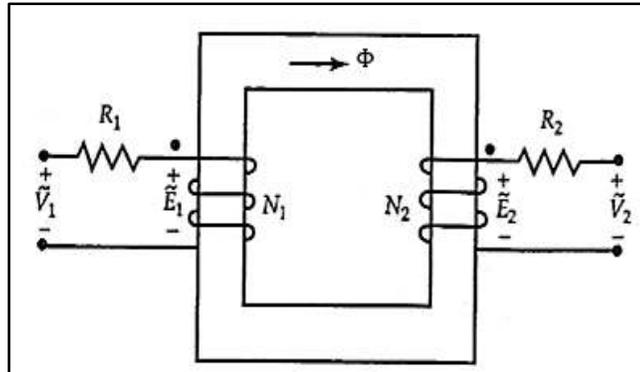
La ecuación 16 establece que la impedancia de la carga en el lado primario es igual a  $a^2$  veces la impedancia real de la carga en el lado secundario. Esta ecuación indica que un transformador también puede utilizarse para equiparar las impedancias

## Transformador no ideal

Anteriormente se establecieron muy pocas restricciones para obtener relaciones útiles para un transformador ideal. A continuación, el objetivo es aumentar las restricciones para desarrollar el circuito equivalente para un transformador no ideal.

### a) Resistencia del devanado

Todo devanado presenta alguna resistencia, sin importar cuán pequeña pueda ser. No obstante, es posible reemplazar un transformador no ideal por otro ideal agregando una resistencia en serie con cada devanado, igual a la resistencia de éste. En la Figura 4, se observa las resistencias de los devanados primario y secundario  $R_1$  y  $R_2$ , respectivamente.



**Figura 4.** Transformador ideal con resistencias del devanado modeladas como resistencias agregadas. [4]

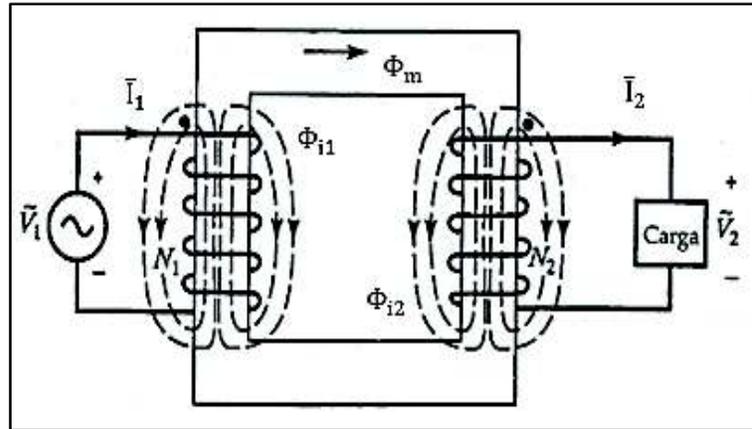
La inclusión de los devanados define que:

- La potencia de entrada debe ser mayor que la potencia de salida.
- El voltaje en las terminales no es igual a la fem inducida.
- La eficiencia (la razón de la potencia de salida a la potencia de entrada) de un transformador no ideal es menor que 100%.

### b) Flujos de dispersión

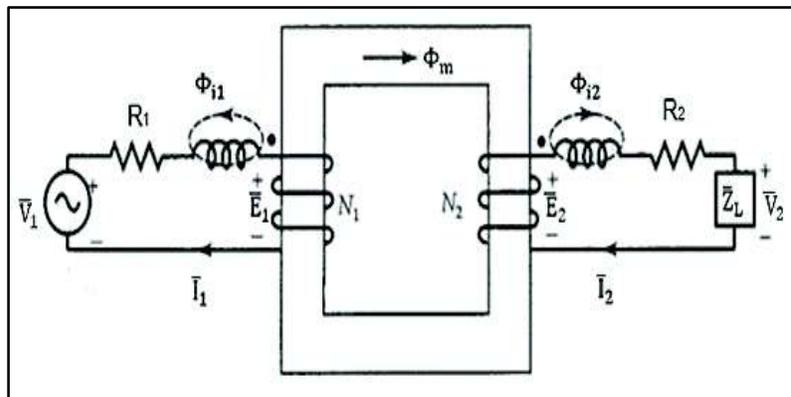
No todo el flujo que crea un devanado se confina al núcleo magnético en el que está el devanado. Una parte del flujo, conocida como flujo de dispersión, sigue su camino a través del aire, por lo tanto, cuando ambos devanados de un transformador conducen corrientes cada uno crea su propio flujo de dispersión como se ilustra en la Figura 5. El flujo de dispersión primario, establecido por el primario, no enlaza al secundario. De manera similar, el flujo de dispersión secundario se restringe al secundario y no enlaza al primario. El flujo común que circula en el núcleo y llega a ambos devanados se denomina flujo mutuo. Aunque el flujo de dispersión es una pequeña fracción del flujo total que crea un devanado, afecta al rendimiento del transformador es posible modelar un devanado como si tuviera

dos devanados: uno responsable de crear el flujo de dispersión hacia el aire y el otro de circundar el núcleo.



**Figura 5.** Transformador con flujos de dispersión y flujo mutuo. [4]

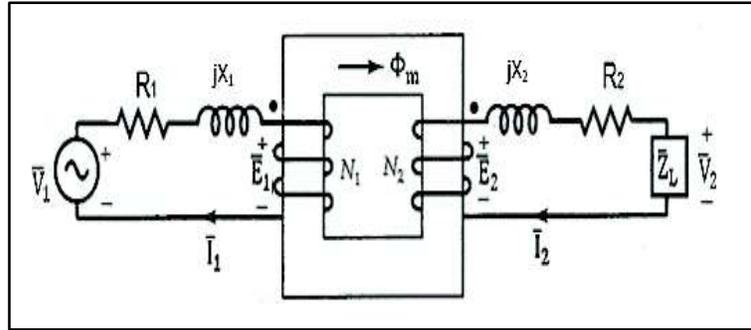
En la Figura 6 se muestra una disposición hipotética de los devanados en la forma descrita para un transformador de dos devanados. Como puede observarse, los dos devanados que envuelven al núcleo satisfacen las condiciones de transformador ideal.



**Figura 6.** Devanados hipotéticos que muestran los flujos de dispersión y mutuo por separado. [4]

El flujo de dispersión asociado con cualquier devanado es responsable de la caída de voltaje a través de él. Por lo tanto, es posible representar la caída de voltaje debida al flujo de dispersión con una reactancia de dispersión.

Si  $X_1$  y  $X_2$  son las reactancias de dispersión de los devanados primario y secundario, un transformador práctico puede representarse en términos de un transformador ideal con resistencias de devanado y reactancias de dispersión, según se ilustra en la Figura 7.



**Figura 7.** Transformador no ideal representado en términos de un transformador ideal con resistencias del devanado y reactancias de dispersión. [4]

En el caso de un transformador no ideal las relaciones fundamentales se expresan en las ecuaciones 17, 18 y 19.

$$\frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (\text{Ec. 17})$$

$$\bar{V}_1 = \bar{E}_1 + (R_1 + jX_1)\bar{I}_1 \quad (\text{Ec. 18})$$

$$\bar{V}_2 = \bar{E}_2 - (R_2 + jX_2)\bar{I}_2 \quad (\text{Ec. 19})$$

Dónde:

- $R_1$  = Resistencia devanado primario
- $R_2$  = Resistencia devanado secundario
- $jX_1$  = Reactancia de dispersión primario
- $jX_2$  = Reactancia de dispersión secundario

Obsérvese que en un transformador no ideal,  $\bar{V}_1 \neq \bar{E}_1$  y  $\bar{V}_2 \neq \bar{E}_2$ .

### c) Permeabilidad finita

El núcleo de un transformador no ideal tiene permeabilidad finita y pérdida en el núcleo, aun cuando se deje abierto el secundario (sin carga), el devanado primario toma de la fuente algo de corriente, conocida como corriente de excitación. La corriente de excitación,  $\bar{I}_\Phi$ , es la suma de dos corrientes: la corriente de pérdida en el núcleo,  $\bar{I}_c$ , y la corriente de magnetización,  $\bar{I}_m$ , como se expresa en la ecuación 20.

$$\bar{I}_\Phi = \bar{I}_c + \bar{I}_m \quad (\text{Ec. 20})$$

$\bar{I}_\Phi$  = Corriente de excitación

$\bar{I}_c$  = Corriente de pérdida en el núcleo

$\bar{I}_m$  = Corriente de magnetización

La componente de pérdida en el núcleo de la corriente de excitación explica la pérdida magnética (pérdida por histéresis y por corrientes parásitas) en el núcleo del transformador. Si  $\bar{E}_1$  es la fem inducida en el lado primario y  $R_{C1}$  es la resistencia equivalente de la pérdida en el núcleo, se tiene que la corriente de pérdida en el núcleo,  $\bar{I}_c$ , está en la ecuación 21.

$$\bar{I}_c = \frac{\bar{E}_1}{R_{C1}} \quad (\text{Ec. 21})$$

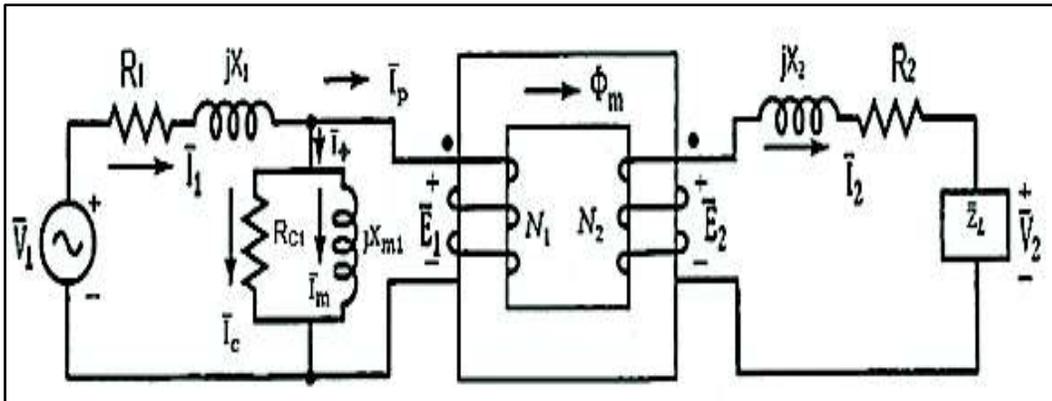
Dónde:

- $\bar{I}_c$  = Corriente de pérdida en el núcleo
- $\bar{E}_1$  = Fem inducida en el lado primario
- $R_{C1}$  = Resistencia equivalente de la pérdida en el núcleo

La componente de magnetización de la corriente de excitación es la responsable de establecer el flujo mutuo en el núcleo. Como una bobina que transporta corriente forma un inductor, la corriente de magnetización,  $\bar{I}_m$ , da lugar a una reactancia de magnetización,  $X_{m1}$ . Se expresa en la ecuación 22.

$$X_{m1} = \frac{\bar{E}_1}{j\bar{I}_m} \quad (\text{Ec. 22})$$

$X_{m1}$  = Reactancia de magnetización  
 $j\bar{I}_m$  = Corriente de magnetización



**Figura 8.** Circuito equivalente de un transformador que incluye resistencias del devanado reactancia de dispersión, resistencia de pérdida en el núcleo, reactancia de magnetización y un transformador ideal. [4]

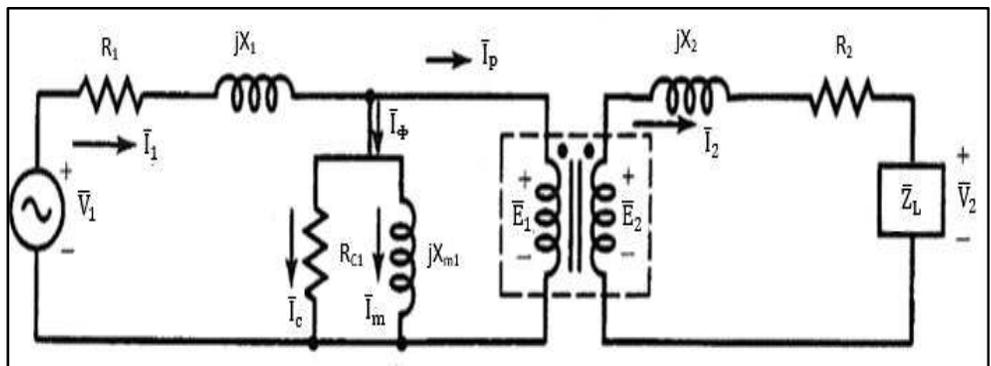
Ahora es posible modificar el circuito equivalente de la Figura 7 para que incluya ya la resistencia de la pérdida en el núcleo y la reactancia de magnetización. En la Figura 8 se muestra un circuito sin esas características.

Al aumentar la carga en el transformador ocurre lo siguiente:

- a) La corriente en el devanado secundario se incrementa.
- b) La corriente suministrada por la fuente aumenta.
- c) La caída de voltaje a través de la impedancia del devanado primario  $\bar{Z}_1$  se incrementa.
- d) La fem inducida  $\bar{E}_1$  desciende.
- e) Finalmente, el flujo mutuo disminuye debido al decremento en la corriente de magnetización.

Sin embargo, en un transformador bien diseñado, la disminución del flujo mutuo al pasar de una condición sin carga a otra de plena carga es de 1 a 3%, aproximadamente. Por lo tanto, para todo fin práctico puede suponerse que  $\bar{E}_1$  permanece esencialmente sin cambio. En otras palabras, el flujo mutuo es fundamentalmente el mismo en condiciones normales de carga; por ello no hay un cambio apreciable en la corriente de excitación.

En la representación del circuito equivalente de un transformador rara vez se muestra el núcleo. A veces se dibujan líneas paralelas entre las dos bobinas para señalar la presencia de un núcleo magnético. Se utilizará una representación como ésta del circuito equivalente. Si las líneas paralelas entre los dos devanados no existen, la interpretación es que el núcleo es no magnético. Con tal supuesto, el circuito equivalente exacto de un transformador práctico se muestra en la Figura 9, donde también se aprecia un cuadro punteado para indicar que el circuito encerrado por él es el llamado transformador ideal.



**Figura 9.** Circuito equivalente exacto de un transformador práctico. Los devanados acoplados en el cuadro punteado representan un transformador ideal con núcleo magnético. [4]

Todas las relaciones del transformador ideal se aplican a este circuito. La corriente de carga  $\bar{I}_2$  en el lado secundario está representada en lado primario como  $\bar{I}_p$ .

La corriente de excitación se define en la ecuación 23.

$$\bar{I}_\Phi = \bar{I}_1 - \bar{I}_p = \bar{I}_1 - \frac{\bar{I}_2}{a} \quad (\text{Ec. 23})$$

Es posible representar un transformador mediante un circuito equivalente que no utilice un transformador ideal.

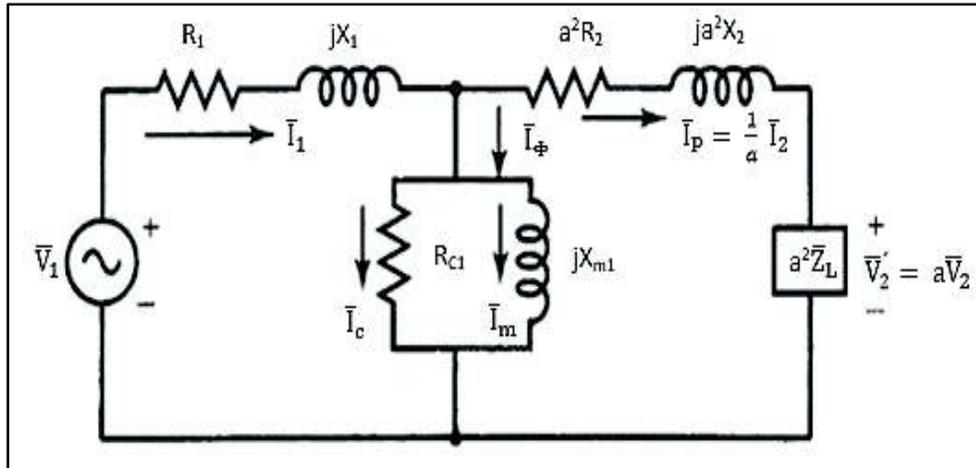


Figura 10. Circuito equivalente exacto desde el lado primario del transformador. [4]

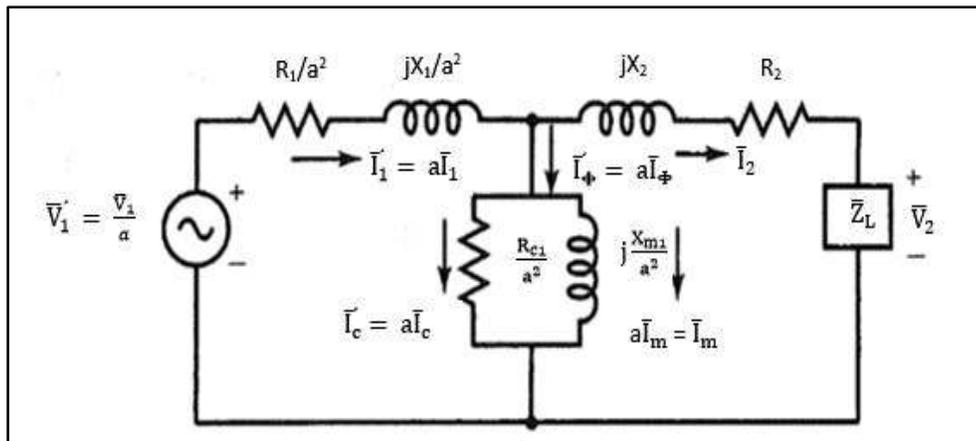


Figura 11. Circuito equivalente exacto desde el lado secundario del transformador. [4]

Tales circuitos equivalentes se trazan con referencia a un circuito específico. La Figura 10 muestra un circuito equivalente como se observa desde el lado primario. Los elementos del circuito que estaban en el lado secundario en la Figura 9 se han transformado en el lado primario en la Figura 10. En la Figura 11 aparece el circuito equivalente del mismo transformador referido al lado secundario.

#### d) Diagrama fasorial

Cuando un transformador opera en condiciones de estado estable, sus corrientes, voltajes y ángulos de fase se comprenden mejor en su diagrama fasorial. Si bien es posible desarrollar un diagrama fasorial tomando como referencia cualquier cantidad fasora, se utiliza el voltaje de la carga porque casi siempre se trata de una cantidad conocida.

Sea  $\bar{V}_2$  el voltaje a través de la impedancia de la carga  $\bar{Z}_L$  e  $\bar{I}_2$  la corriente de carga. Según  $\bar{Z}_L$ ,  $\bar{I}_2$  puede estar en adelanto, en fase o en atraso respecto de  $\bar{V}_2$  en este caso, se supone que  $\bar{I}_2$  se atrasa respecto de  $\bar{V}_2$  por un ángulo  $\theta_2$ . Primero se traza una línea horizontal desde el origen de la magnitud  $\bar{V}_2$  para representar el fasor  $\bar{V}_2$ , como se observa en la Figura 12. Ahora se traza la corriente  $\bar{I}_2$  atrasada respecto de  $\bar{V}_2$  en  $\theta_2$ .

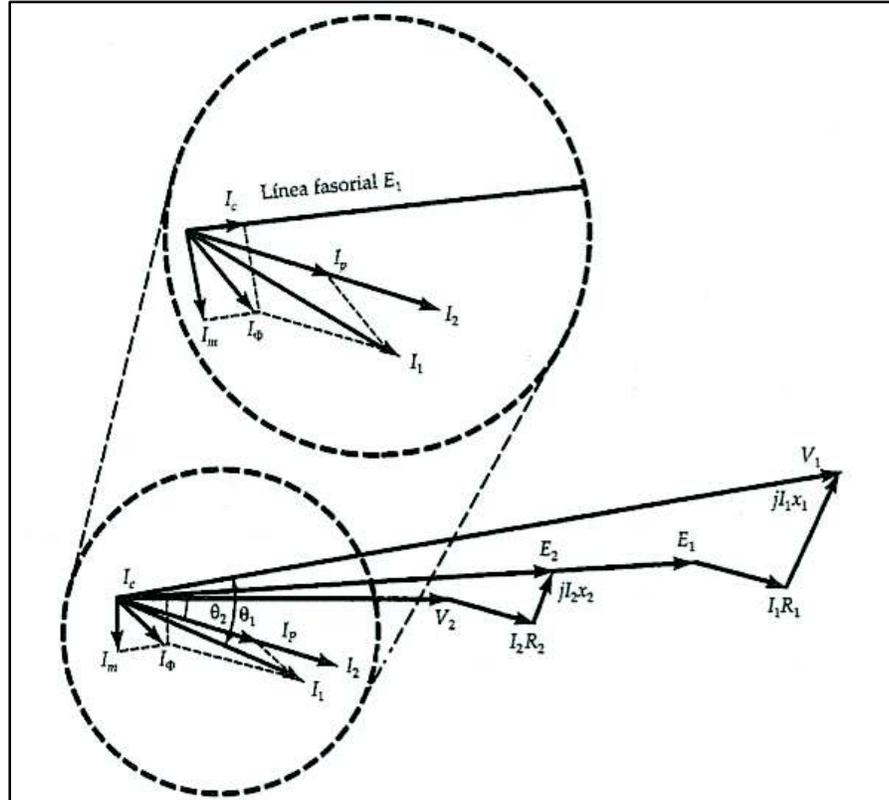


Figura 12. Diagrama fasorial de un transformador no ideal. [4]

Del circuito equivalente (Figura 9) se tiene la ecuación 24.

$$\bar{E}_2 = \bar{V}_2 + \bar{I}_2 R_2 + j\bar{I}_2 X_2 \quad (\text{Ec. 24})$$

Se construye el diagrama fasorial para  $E_2$ , como la caída de voltaje  $\bar{I}_2 R_2$  está en fase con  $\bar{I}_2$  y va a sumarse a  $\bar{V}_2$ , se traza una línea de magnitud  $I_2 R_2$  que comienza en el extremo de  $V_2$  y es paralela a la  $I_2$ . La longitud de la línea desde el origen hasta el extremo de  $I_2 R_2$  representa la suma de  $\bar{V}_2$ , e  $\bar{I}_2 R_2$ . ahora puede sumarse la caída de voltaje  $j\bar{I}_2 X_2$  al extremo de  $I_2 R_2$  trazando una línea de igual magnitud y en adelanto respecto de  $\bar{I}_2$  en  $90^\circ$ . Una línea del origen al extremo de  $j\bar{I}_2 X_2$  representa la magnitud de  $\bar{E}_2$ . Con esto se concluye el diagrama fasorial para el devanado secundario.

Como  $\bar{E}_1 = a\bar{E}_2$ , la magnitud de la fem inducida en el lado primario depende de la relación  $a$ . Se supone que ésta es mayor que la unidad, en ese caso,  $\bar{E}_1$  es mayor que  $\bar{E}_2$  y puede representarse extendiendo  $E_2$ .

La corriente  $\bar{I}_c$  está en fase con  $\bar{E}_1$ , e  $\bar{I}_m$  en atraso con  $\bar{E}_1$  en  $90^\circ$ . Estas corrientes se trazan desde el origen, y su suma da lugar a la corriente de excitación  $\bar{I}_\phi$ , e  $\bar{I}_2/a$ . A continuación, se suma la caída de voltaje a través de la impedancia del devanado primario  $\bar{Z}_1 = R_1 + jX_1$  para obtener el fasor  $\bar{V}_1$ . Con esto, el diagrama fasorial queda concluido. En este caso, la corriente de la fuente  $\bar{I}_1$  está en atraso respecto del voltaje de la fuente  $\bar{V}_1$  en un  $\theta$ .

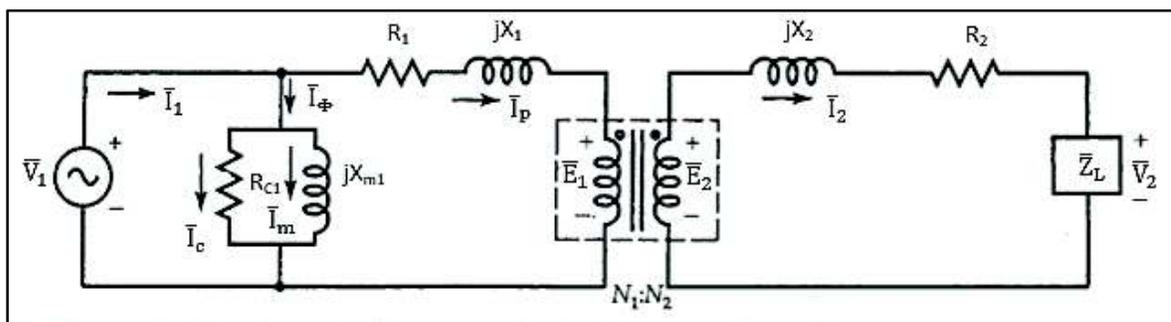
### e) Circuitos equivalentes aproximados

En un transformador bien diseñado las resistencias de los devanados, las reactancias de dispersión y la pérdida en el núcleo se mantienen tan bajas como sea posible. Una pérdida baja en el núcleo implica una resistencia elevada de la pérdida en el núcleo.

Una permeabilidad alta del núcleo asegura una reactancia de magnetización elevada.

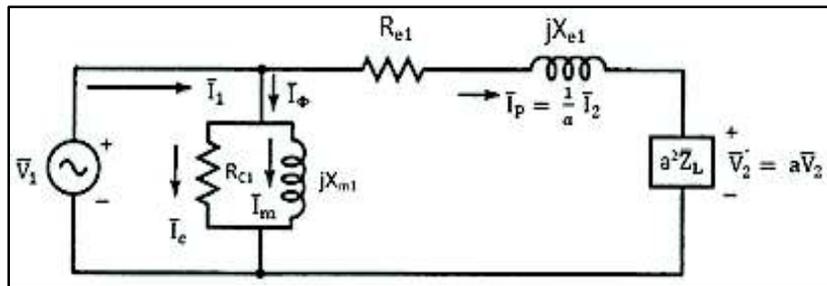
Por lo tanto, la impedancia de la llamada rama paralela ( $R_{C1}$  en paralelo con  $jX_{m1}$ ) a través del primario es muy alta en comparación con  $\bar{Z}_1 = R_1 + jX_1$  y  $\bar{Z}_2 = R_2 + jX_2$ . La impedancia elevada de la rama paralela asegura una baja corriente de excitación.

Como  $\bar{Z}_1$  se mantiene baja, la caída de voltaje a través suyo también es baja en comparación con el voltaje aplicado. Puede suponerse que la caída de voltaje a través de la rama paralela es la misma que el voltaje aplicado, sin que ello comporte ningún error apreciable en los cálculos. Tal suposición permite mover la rama paralela como si indica en la Figura 13 para el circuito equivalente de un transformador que incorpora un transformador ideal. Esto se conoce como circuito equivalente aproximado de un transformador.



**Figura 13.** Circuito equivalente aproximado de un transformador que incorpora un transformador ideal. [4]

En la Figura 14 se aprecia el circuito equivalente aproximado como se observa desde el lado primario.



**Figura 14.** Circuito equivalente aproximado observado desde el lado primario. [4]

Se obtiene:

$$\bar{Z}_{e1} = R_{e1} + jX_{e1} \quad (\text{Ec. 25a})$$

$$R_{e1} = R_1 + a^2 R_2 \quad (\text{Ec. 25b})$$

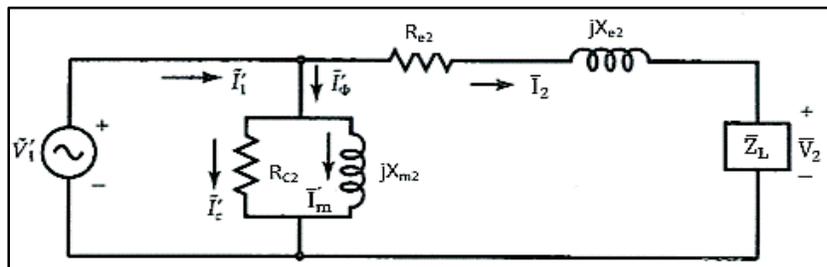
$$X_{e1} = X_1 + a^2 X_2 \quad (\text{Ec. 25c})$$

$\bar{Z}_{e1}$  = Impedancia equivalente vista desde el primario

$R_{e1}$  = Resistencia equivalente vista desde el primario

$X_{e1}$  = Reactancia equivalente vista desde el primario

En forma semejante, en la Figura 15 se ilustra el circuito equivalente aproximado referido al lado secundario del transformador.



**Figura 15.** Circuito equivalente aproximado de un transformador observado desde el lado secundario. [4]

De la Figura 15 se tiene que:  $\bar{Z}_{e2} = R_{e2} + jX_{e2} \quad (\text{Ec. 26a})$

$$R_{e2} = R_2 + \frac{R_1}{a^2} \quad (\text{Ec. 26b})$$

$$X_{e2} = X_2 + \frac{X_1}{a^2} \quad (\text{Ec. 26c})$$

$$R_{c2} = \frac{R_{c1}}{a^2} \quad (\text{Ec. 26d})$$

$$X_{m2} = \frac{X_{m1}}{a^2} \quad (\text{Ec. 26d})$$

Dónde:

- $\bar{Z}_{e2}$  = Impedancia equivalente vista desde el secundario
- $R_{e2}$  = Resistencia equivalente vista desde el secundario
- $X_{e2}$  = Reactancia equivalente vista desde el secundario
- $R_{c2}$  = Resistencia de pérdida en el núcleo vista desde el secundario
- $X_{m2}$  = Reactancia de magnetización vista desde el secundario

### 2.1.2. Parámetros de un transformador

El circuito equivalente de un transformador puede determinarse si se efectúan las pruebas de: polaridad, circuito abierto y cortocircuito.

#### Polaridad de un transformador eléctrico

La polaridad indica los polos positivos o negativos de los terminales del transformador en un determinado instante. Para poder determinar la polaridad de los transformadores es necesario conectar una fuente en el primario, como se detalla en la Figura 16, y un cable puente entre los terminales adyacentes de primario y secundario. Mientras que en los terminales adyacentes restantes se debe conectar un voltímetro. Se considera polaridad aditiva si el voltaje registrado es mayor que la fuente, y sustractivo si es menor o cero.

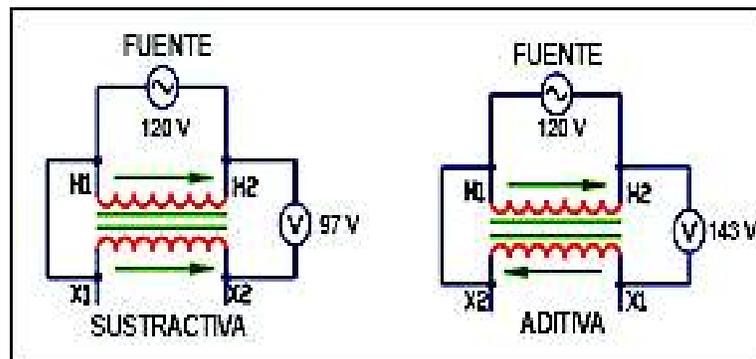


Figura 16. Pruebas de polaridad para un transformador. [4]

“La importancia de marcar la polaridad, es para poder conectar los transformadores en paralelo o para poder utilizarlos adecuadamente como autotransformadores.” [4]

## Prueba de circuito abierto

Según la Figura 17, consiste en dejar abierto un devanado del transformador mientras el otro se excita aplicando el voltaje especificado. “La frecuencia del voltaje que se aplica debe ser la frecuencia especificada del transformador. Es más seguro realizar la prueba en el lado bajo voltaje.” [4]

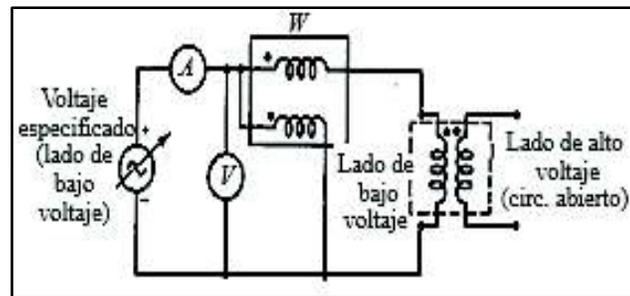


Figura 17. Prueba de circuito abierto transformador de dos devanados. [4]

Se supone que la pérdida de potencia en condiciones sin carga en el devanado de bajo voltaje es despreciable, entonces el circuito equivalente es:

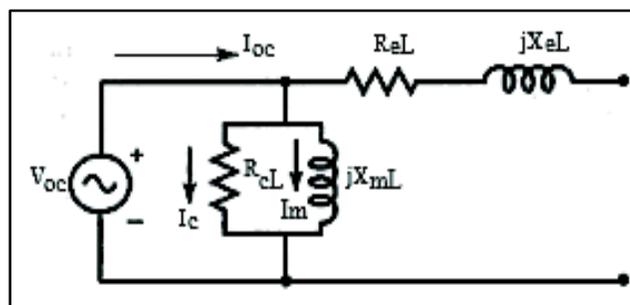
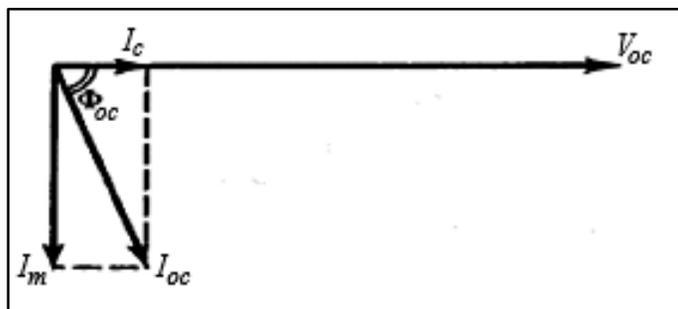


Figura 18. Circuito equivalente aproximado de transformador prueba de circuito abierto. [5]

En la Figura 18 se muestra el equivalente aproximado del transformador referido al lado de bajo voltaje, es evidente que la fuente suministra la corriente de excitación en condiciones sin carga. Un componente de la corriente de excitación es el responsable de la pérdida en el núcleo, en tanto que el otro responde por el establecido del flujo requerido en el núcleo magnético. Como la única pérdida es la del núcleo, el vatímetro mide la pérdida en él núcleo del transformador.

La componente de pérdida en el núcleo de la corriente de excitación está en fase con el voltaje aplicado, mientras que la corriente de magnetización está en atraso de  $90^\circ$  respecto al voltaje aplicado según la Figura 19.



**Figura 19.** Diagrama fasorial en la prueba de circuito abierto. [5]

Entonces se tiene que la potencia aparente sin carga es:

$$S_{oc} = V_{oc} I_{oc} \quad (\text{Ec. 27})$$

Con un ángulo de atraso:

$$\varphi_{oc} = \cos^{-1} \left[ \frac{P_{oc}}{S_{oc}} \right] \quad (\text{Ec. 28})$$

Las corrientes de pérdida en el núcleo y de magnetización son:

$$I_c = I_{oc} \cos(\varphi_{oc}) \quad (\text{Ec. 29})$$

$$I_m = I_{oc} \sin(\varphi_{oc}) \quad (\text{Ec. 30})$$

Dónde:

- $v_{oc}$  = voltaje especificado que se aplica al lado de bajo voltaje
- $I_{oc}$  = es la corriente de excitacion obtenida en el amperimetro
- $P_{oc}$  = potencia q registra el vatímetro
- $S_{oc}$  = potencia aparente en vacío
- $\varphi_{oc}$  = ángulo de atraso
- $I_c$  = corriente de exitación
- $I_m$  = corriente de magnetización

Luego la resistencia de pérdida en el núcleo y la reactancia de magnetización observada desde el lado de bajo voltaje quedan expresadas en las ecuaciones 31,32 y 33.

$$R_{cL} = \frac{V_{oc}}{I_c} = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} \quad (\text{Ec. 31})$$

$$X_{mL} = \frac{V_{oc}}{I_m} = \frac{V_{oc}^2}{Q_{oc}} \quad (\text{Ec. 32})$$

$$Q_{oc} = \sqrt{S_{oc}^2 - P_{oc}^2} \quad (\text{Ec. 33})$$

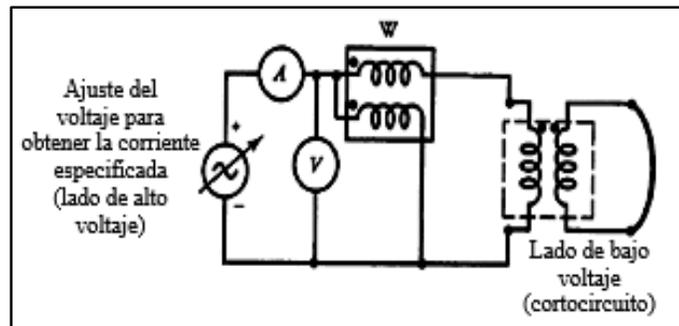
Dónde:

- $R_{cL}$  = Resistencia de pérdida en el núcleo
- $X_{mL}$  = Reactancia de magnetización
- $Q_{oc}$  = Potencia reactiva

## Prueba de corto circuito

Se usa para determinar las resistencias del devanado y las reactancias de dispersión, se realiza cortocircuitando un devanado y alimentando el otro con una fuente de voltaje variable (Figura 20), el cual se ajusta cuidadosamente hasta que cada devanado conduzca su corriente especificada o nominal. Esto asegura la simulación adecuada del patrón de flujo de dispersión asociado con el devanado correspondiente.

El cortocircuito restringe la potencia de salida a cero, la potencia de entrada al transformador es baja. La baja potencia de entrada con la corriente especificada implica que el voltaje aplicado es una fracción del voltaje especificado o nominal. (Para mayor seguridad la prueba debe realizarse en el lado de bajo voltaje).



**Figura 20.** Esquema para realizar la prueba de cortocircuito. [5]

Como el voltaje aplicado es una fracción pequeña del voltaje nominal, tanto “la corriente por pérdida en el núcleo como la corriente de magnetización se consideran despreciables, pérdida en el núcleo cero y la reactancia de magnetización es infinita. En este caso, el vatímetro registra la pérdida del cobre a plena carga.” [5]

Si  $V_{sc}$ ,  $I_{sc}$  y Si  $P_{sc}$  son lecturas del voltímetro, amperímetro y vatímetro, entonces:

$$R_{eH} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad (\text{Ec. 34})$$

$R_{eH}$  = resistencia total de los dos devanados referida al lado de alto voltaje

La magnitud de la impedancia referida al lado de alto voltaje.

$$Z_{eH} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (\text{Ec. 35})$$

$Z_{eH}$  = impedancia referida al lado de alto voltaje

$$X_{eH} = \sqrt{Z_{eH}^2 - R_{eH}^2} \quad (\text{Ec. 36})$$

$X_{eH}$  = reactancia de dispersión total referida al lado de alto voltaje

Se define la relación de transformación en la ecuación 37.

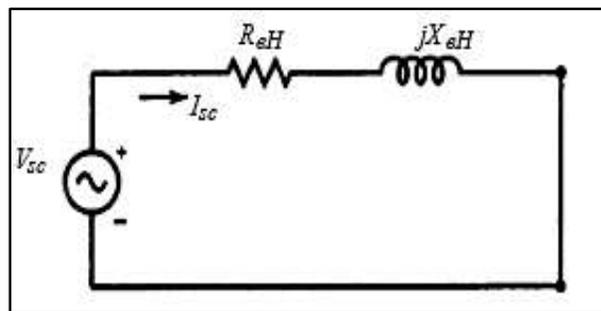
$$a = \frac{N_H}{N_L} \quad (\text{Ec. 37})$$

$a$  = relación de transformación

$N_H$  = número de espiras devanado primario

$N_L$  = número de espiras devanado secundario

A continuación, en la Figura 21 se muestra el circuito equivalente aproximado de un transformador de dos devanados en condiciones de cortocircuito.



**Figura 21.** Circuito equivalente aproximado [4]

Entonces:  $R_{eH} = R_H + a^2 R_L$  (Ec. 38)

$X_{eH} = X_H + a^2 X_L$  (Ec. 39)

Dónde:

$R_H$  = es la resistencia del devanado de alto voltaje.

$R_L$  = es la resistencia del devanado de bajo voltaje.

$X_H$  = es la reactancia de dispersión del devanado de alto voltaje

$X_L$  = es la reactancia de dispersión del devanado de bajo voltaje

Se supondrá que el transformador es diseñado de modo que la pérdida de potencia en el lado de alto voltaje sea igual a la que ocurre en el lado de bajo voltaje. Criterio de diseño óptimo, entonces:

$$I_H^2 R_H = I_L^2 R_L \quad (\text{Ec. 40})$$

Luego  $R_H = a^2 R_L = 0.5 R_{eH}$  (Ec. 41)

En forma semejante puede suponerse que:

$$X_H = a^2 X_L = 0.5 X_{eH} \quad [4] \quad (\text{Ec. 42})$$

### 2.1.3. Conexiones trifásicas de transformadores

En los sistemas de potencia, es necesario a menudo instalar bancos de transformadores monofásicos en conexiones trifásicas, de acuerdo con las necesidades que presenten. En sistemas trifásicos, pueden usarse dos o tres transformadores en banco para este fin. Las principales condiciones para la conexión en banco de transformadores monofásicos son:

- Que los transformadores tengan la misma capacidad en KVA (o semejante).
- Que sus voltajes primario y secundario sean iguales.
- Que tengan idénticas marcas de polaridad.

#### Conexión delta – delta

La conexión delta-delta de transformadores monofásicos se usa generalmente en sistemas cuyos voltajes no son muy elevados; especialmente en aquellos casos que se debe mantener la continuidad de un sistema.

“En caso de falla o reparación la conexión delta-delta se puede convertir en una conexión delta abierta-delta abierta.” [6]

Las relaciones fundamentales de voltajes y corrientes de esta conexión están representadas en la Figura 22 y su correspondiente diagrama fasorial de corrientes en la Figura 23.

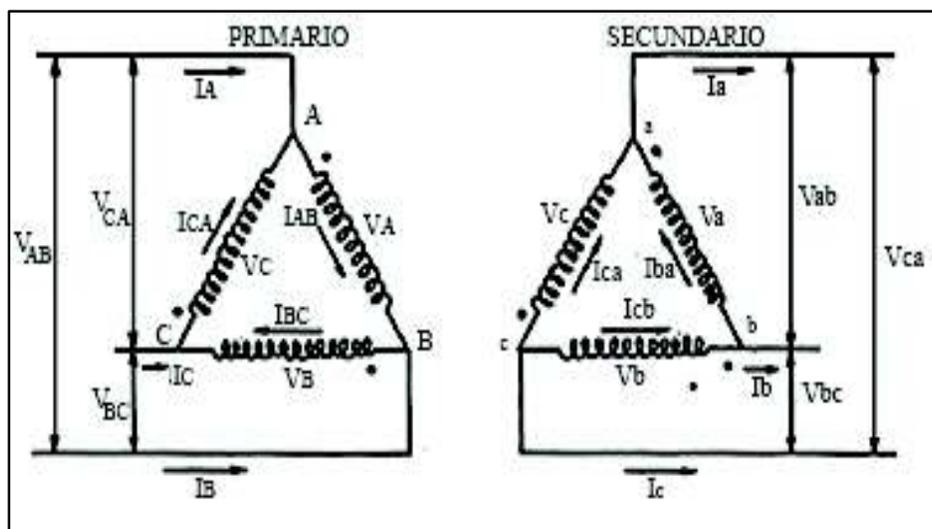
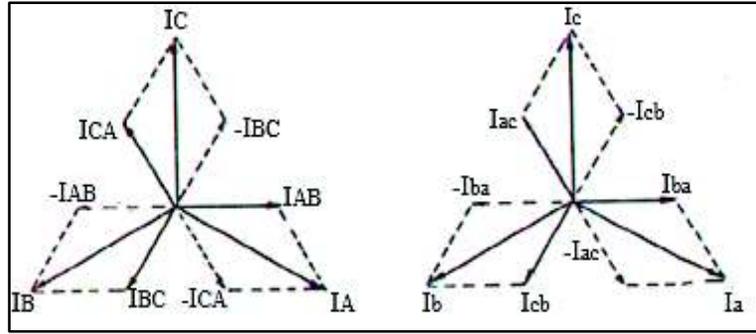


Figura 22. Conexión delta balanceada [6]



**Figura 23.** Diagrama fasorial de las corrientes [6]

De la Figura 22 se obtiene las relaciones de voltaje expresadas en la ecuación 43.

$$\begin{aligned} \bar{V}_{AB} &= \bar{V}_A & \bar{V}_{ab} &= \bar{V}_a \\ \bar{V}_{BC} &= \bar{V}_B & \bar{V}_{bc} &= \bar{V}_b \\ \bar{V}_{CA} &= \bar{V}_C & \bar{V}_{ca} &= \bar{V}_c \end{aligned} \quad (\text{Ec. 43})$$

$V_A$  y  $V_a$  = voltajes primario y secundario del transformador A.

$V_B$  y  $V_b$  = voltajes primario y secundario del transformador B.

$V_C$  y  $V_c$  = voltajes primario y secundario del transformador C.

Mientras que las corrientes se obtienen de la Figura 23, quedando expresadas de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \bar{I}_A &= \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA} & \bar{I}_a &= \bar{I}_{ba} - \bar{I}_{ac} \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB} & \bar{I}_b &= \bar{I}_{cb} - \bar{I}_{ba} \\ \bar{I}_C &= \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC} & \bar{I}_c &= \bar{I}_{ac} - \bar{I}_{cb} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 44})$$

Las corrientes de línea se obtienen por la ley de los cosenos del diagrama fasorial de corrientes (Figura 23) quedando expresado:

$$I_A = \sqrt{I_{AB}^2 + I_{BC}^2 - 2I_{AB} I_{BC} \cos 120^\circ} \quad \text{donde } \cos 120^\circ = -\frac{1}{2} \quad (\text{Ec. 45})$$

Como  $I_{AB} = I_{BC}$  por ser un sistema balanceado se reemplaza en la ecuación 45 obteniéndose:

$$\begin{aligned} I_A &= \sqrt{2I_{AB}^2 + I_{AB}^2} \\ I_A &= \sqrt{3} I_{AB} \angle -30^\circ \end{aligned} \quad (\text{Ec. 46})$$

En forma análoga para el lado secundario

$$I_a = \sqrt{3} I_{ab} \angle -30^\circ \quad (\text{Ec. 47})$$

Se obtiene en forma general las demás corrientes.

La relación de transformación es:

$$\frac{V_A}{V_a} = \frac{V_{AB}}{V_{ba}} = a \quad [6] \quad (\text{Ec. 48})$$

## Conexión estrella – estrella

La conexión estrella-estrella (Figura 24), da un servicio satisfactorio únicamente en las cargas trifásicas balanceadas. Cuando la carga se desbalancea, el neutro eléctrico estará en el centro exacto de un punto que hará desigual los tres voltajes de línea a neutro. “Esta conexión se emplea en sistemas que operan con tensiones relativamente elevadas y en instalaciones de potencia a 4 hilos.” [6]

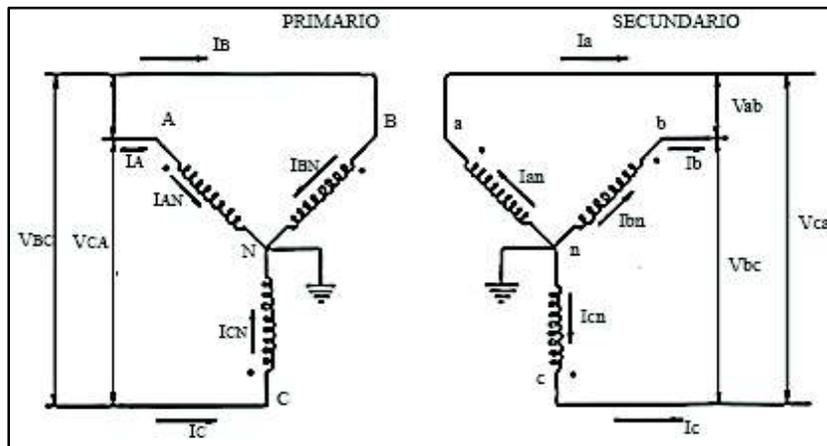


Figura 24. Diagrama de conexiones Y – Y. [6]

Se observa en la Figura 24 que las corrientes de línea en los devanados primario y secundario son iguales a las de los correspondientes devanados por cada transformador.

$$\begin{aligned}
 \bar{I}_A &= \bar{I}_{AN} & \bar{I}_{an} &= \bar{I}_a \\
 \bar{I}_B &= \bar{I}_{BN} & \bar{I}_{bn} &= \bar{I}_b \\
 \bar{I}_C &= \bar{I}_{CN} & \bar{I}_{cn} &= \bar{I}_c
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 49}$$

Los diagramas vectoriales aproximados quedan expresados en la Figura 25.

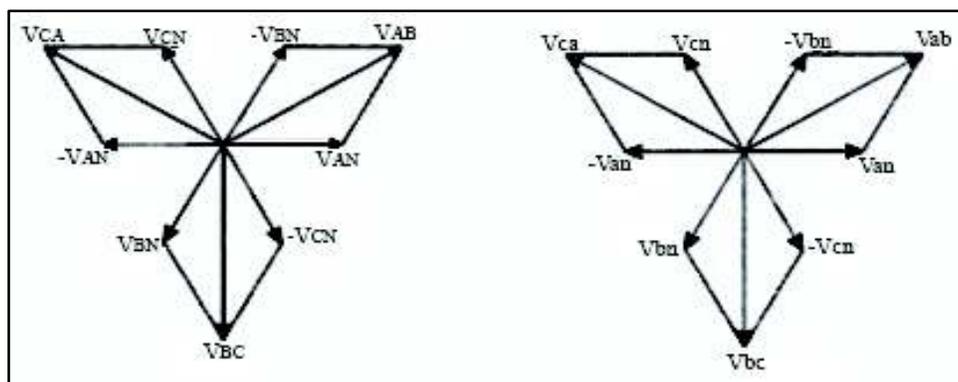


Figura 25. Diagrama vectorial de voltajes. [6]

Obteniéndose las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{AB} &= \bar{V}_{AN} - \bar{V}_{BN} & \bar{V}_{ab} &= \bar{V}_{an} - \bar{V}_{bn} \\ \bar{V}_{BC} &= \bar{V}_{BN} - \bar{V}_{CN} & \bar{V}_{bc} &= \bar{V}_{bn} - \bar{V}_{cn} \\ V_{CA} &= V_{CN} - V_{AN} & V_{ca} &= V_{cn} - V_{an} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 50})$$

El valor de los voltajes entre líneas considerando un orden de fases a b c y las conexiones balanceadas, se obtienen en forma semejantes que las corrientes a partir de la Figura 25 para la conexión delta-delta.

$$V_{AB} = \sqrt{V_{AN}^2 + V_{BN}^2 - 2V_{AN} V_{BN} \cos 120^\circ} \quad \text{donde } \cos 120^\circ = -\frac{1}{2} \quad (\text{Ec. 51})$$

Como el sistema esta balanceado se tiene que  $V_{an} = V_{bn}$ , se reemplaza en la Ec. 51.

$$\begin{aligned} V_{AB} &= \sqrt{2V_{AN}^2 + V_{AN}^2} \\ V_{AB} &= \sqrt{3} V_{AN} \angle 30^\circ \end{aligned} \quad (\text{Ec. 52})$$

En forma semejante para el lado secundario.

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_{an} \angle 30^\circ \quad (\text{Ec. 53})$$

En general para todos los voltajes entre líneas, la relación de transformación es:

$$\begin{aligned} \frac{V_{AB}}{V_{ab}} &= \frac{\sqrt{3} V_{AN}}{\sqrt{3} V_{an}} \\ \frac{V_{AN}}{V_{an}} &= a \quad [6] \end{aligned} \quad (\text{Ec. 54})$$

### Conexión delta - estrella

En la Figura 26 se expone la conexión delta-estrella, una de las más empleadas, “se utiliza en los sistemas de potencia para elevar voltajes de generación o de trasmisión, en los sistemas de distribución (4 hilos) para alimentación de fuerza y alumbrado.” [6]

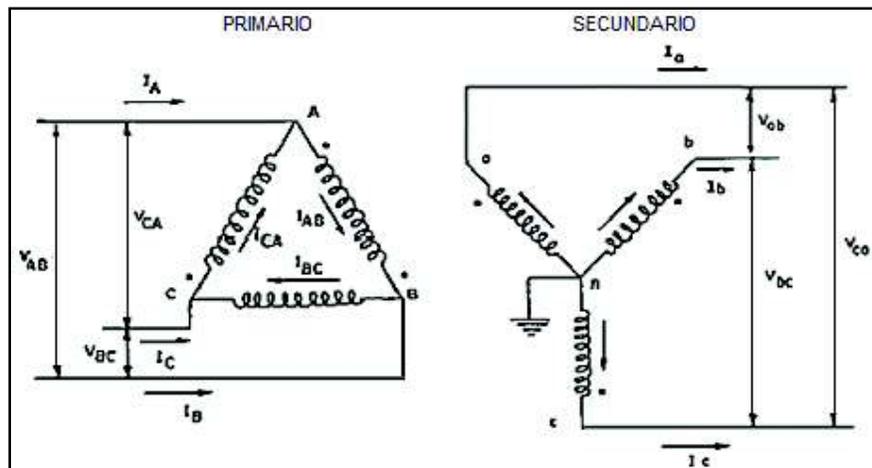
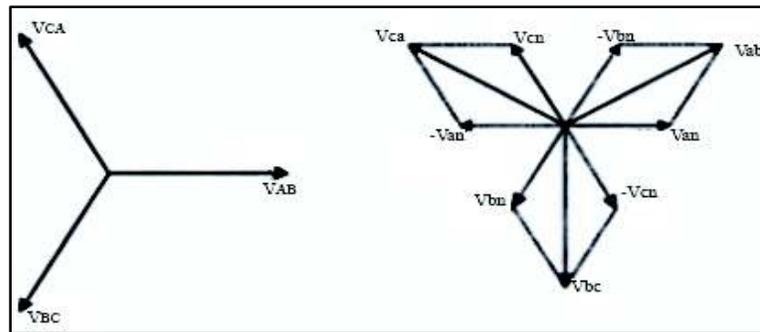


Figura 26. Diagrama de conexión D – Y. [6]

Las relaciones fundamentales de los voltajes para esta conexión se obtienen de los diagramas vectoriales aproximados expuestos en la Figura 27.



**Figura 27.** Diagramas vectoriales de voltaje en D-Y. [6]

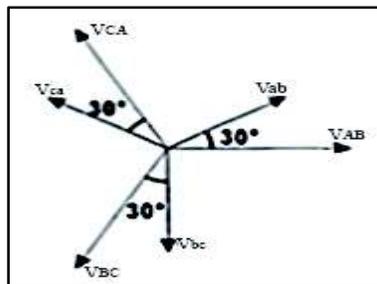
De la Figura 27 se obtiene cada voltaje y se expresa en la ecuación 55.

$$\bar{V}_{AB} = \bar{V}_A \qquad V_{ab} = \sqrt{3} V_{an} \angle 30^\circ \qquad (\text{Ec. 55})$$

$$\bar{V}_{BC} = \bar{V}_B \qquad V_{bc} = \sqrt{3} V_{bn} \angle 30^\circ$$

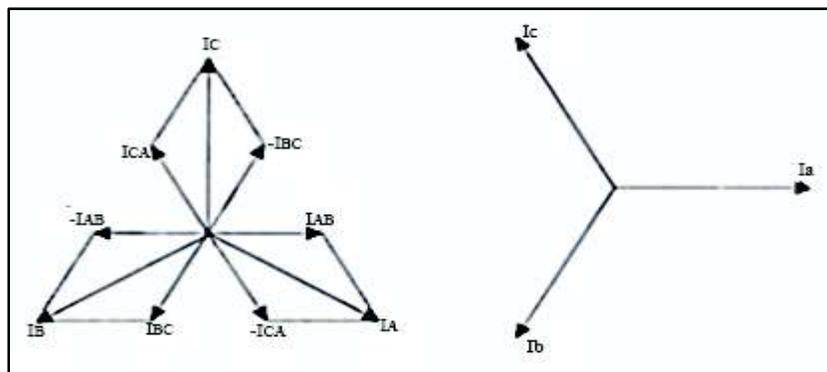
$$\bar{V}_{CA} = \bar{V}_C \qquad V_{ca} = \sqrt{3} V_{cn} \angle 30^\circ$$

El desfase entre los voltajes primario y secundario se observa en el diagrama vectorial de la Figura 28.



**Figura 28.** Desfase entre los voltajes primario y secundario en D-Y. [6]

El diagrama vectorial para las corrientes se puede apreciar en la Figura 29.

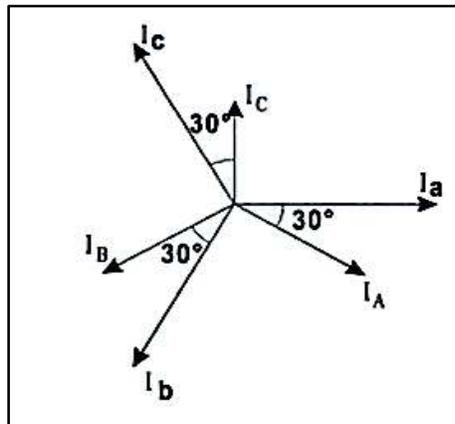


**Figura 29.** Diagramas vectoriales de corriente en D-Y. [6]

A partir de la Figura 29 se obtiene las relaciones fundamentales de las corrientes y se muestra en la ecuación 56:

$$\begin{aligned}
 I_A &= \sqrt{3} I_{AB} \angle -30^\circ & I_{an} &= I_a \\
 I_B &= \sqrt{3} I_{BC} \angle -30^\circ & I_{bn} &= I_b \\
 I_C &= \sqrt{3} I_{CA} \angle -30^\circ & I_{cn} &= I_c
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 56}$$

El desfase entre las corrientes primaria y secundaria se observa en el diagrama vectorial de la Figura 30.



**Figura 30.** Desfase entre las corrientes primaria y secundaria en D-Y. [6]

La relación de transformación es:

$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{V_{AB}}{\sqrt{3} V_{an}} = a \quad [6] \tag{Ec. 57}$$

### Conexión estrella – delta

La conexión estrella – delta de la Figura 31, es contraria a la conexión delta-estrella, por ejemplo: en sistema de potencia, la conexión delta-estrella se emplea para elevar los voltajes y la conexión estrella-delta para reducirlos. En ambos casos: “los devanados conectados en estrella se conectan al circuito de más alto voltaje, fundamentalmente por razones de aislamiento.” [6]

En sistemas de distribución esta conexión es poco usual, salvo en algunas ocasiones para distribución a tres hilos.

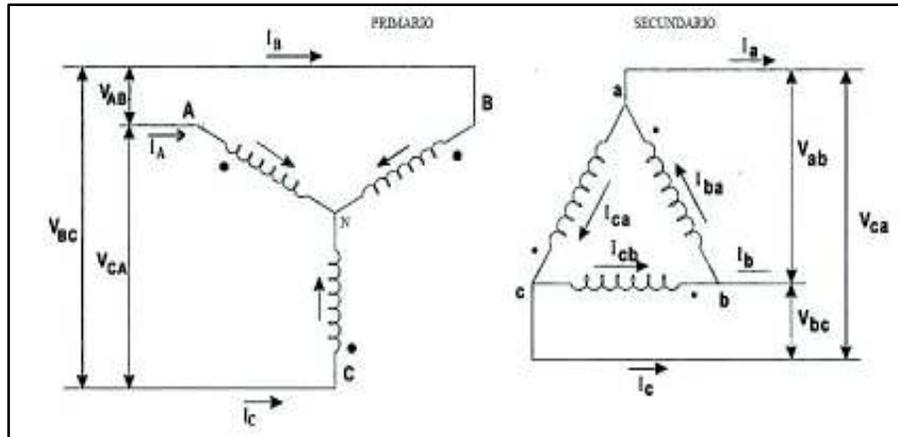


Figura 31. Diagrama de conexiones Y – D. [6]

Las relaciones fundamentales para los voltajes en la conexión estrella – delta quedan expuestos en la Figura 32.

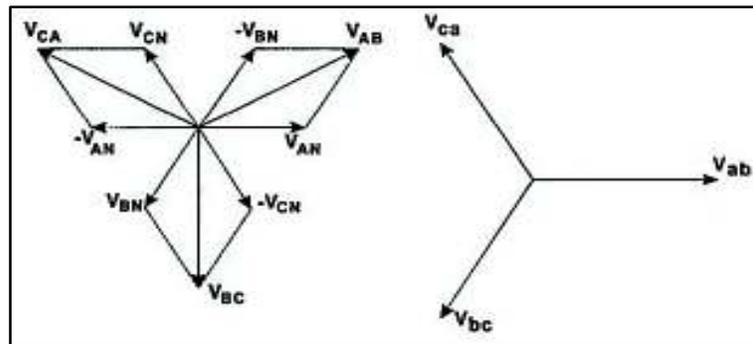


Figura 32. Diagramas vectoriales de voltaje en Y-D. [6]

Los voltajes obtenidos de la Figura 32 se expresan en la ecuación 58.

$$\begin{aligned}
 V_{AB} &= \sqrt{3}V_{AN} \angle 30^\circ & V_{ab} &= V_a \\
 V_{BC} &= \sqrt{3}V_{BN} \angle 30^\circ & V_{bc} &= V_b \\
 V_{CA} &= \sqrt{3}V_{CN} \angle 30^\circ & V_{ca} &= V_c
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 58}$$

El desfase entre los voltajes primario y secundario se observa en el diagrama vectorial de la Figura 33.

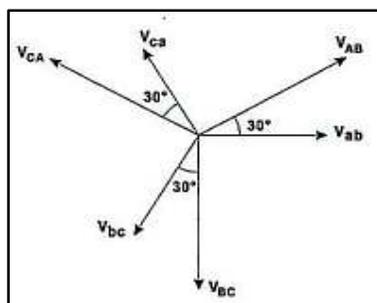
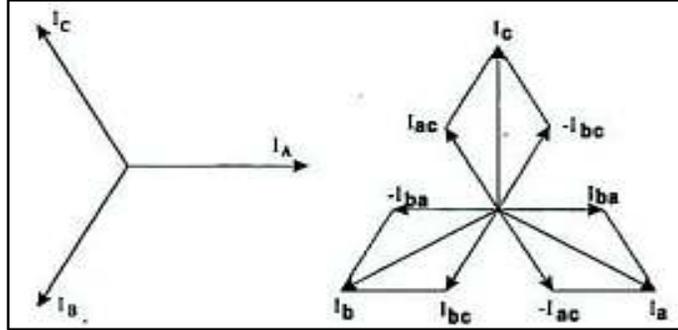


Figura 33. Desfase entre los voltajes primario y secundario en Y - D. [6]

Las relaciones vectoriales para las corrientes se pueden observar en la Figura 34.

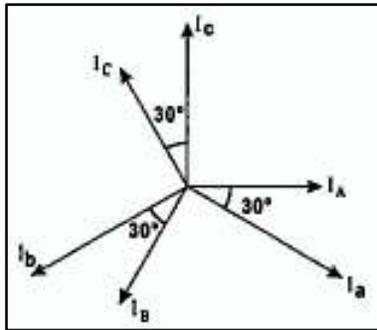


**Figura 34.** Diagramas vectoriales de corrientes en Y - D. [6]

Las corrientes obtenidas de la Figura 34 se expresan en la ecuación 59.

$$\begin{aligned}
 I_A &= I_{AN} & I_a &= \sqrt{3} I_{ba} \angle 30^\circ & \text{(Ec. 59)} \\
 I_B &= I_{BN} & I_b &= \sqrt{3} I_{cb} \angle -30^\circ \\
 I_C &= I_{CN} & I_c &= \sqrt{3} I_{ac} \angle -30^\circ
 \end{aligned}$$

En el diagrama fasorial de la Figura 35 se puede apreciar el desfase entre la corriente primaria y secundaria.



**Figura 35.** Desfase entre las corrientes primaria y secundaria en Y - D. [6]

La relación de transformación es:

$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{\sqrt{3} V_{AN}}{V_{an}} \quad [6] \quad \text{(Ec. 60)}$$

#### 2.1.4. Otras aplicaciones

##### **Autotransformador (elevador, reductor)**

Cuando dos devanados de un transformador están conectados eléctricamente se tiene un autotransformador, como se puede apreciar en la Figura 36. Un autotransformador

puede tener un solo devanado continuo común al primario y al secundario. En forma alternativa, es posible conectar dos o más bobinas devanadas en el mismo núcleo magnético para formar un autotransformador, el principio de operación es el mismo, en cualquier caso.

Los autotransformadores pueden utilizarse para casi todas las aplicaciones en las que se emplea un transformador de dos devanados. La única desventaja es la pérdida de aislamiento eléctrico entre el lado de alto voltaje y el lado de bajo voltaje del autotransformador.

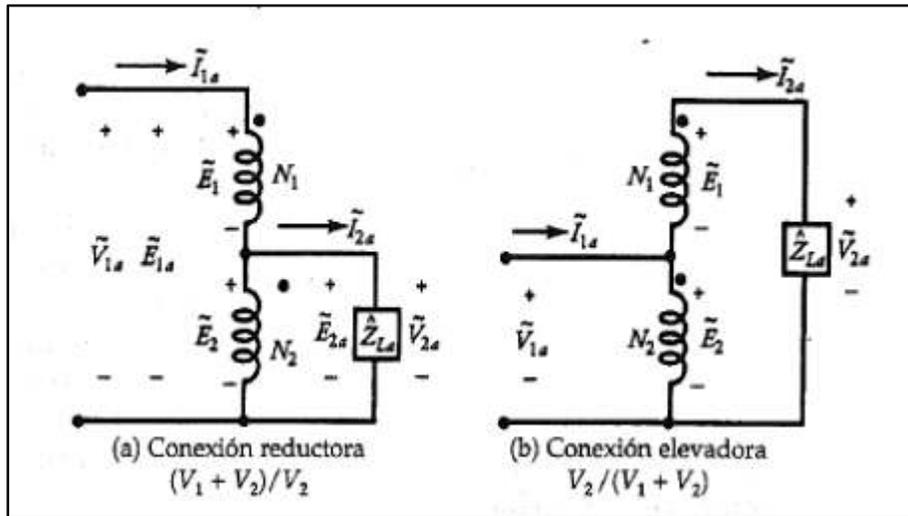


Figura 36. Autotransformador reductor y elevador. [4]

### Transformador elevador

El devanado primario de un transformador tiene menos vueltas que el devanado secundario, como indica la Figura 37, con el resultado que la tensión secundaria es más alta que la tensión primaria.

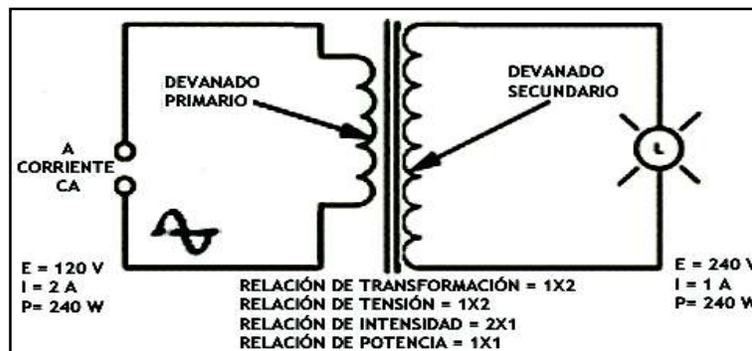


Figura 37. Transformador elevador [7]

## Transformador Reductor

El devanado primario de un transformador reductor tiene más vueltas que el devanado secundario, como indica la Figura 38 de tal manera que la tensión secundaria sea menor que la tensión primaria.

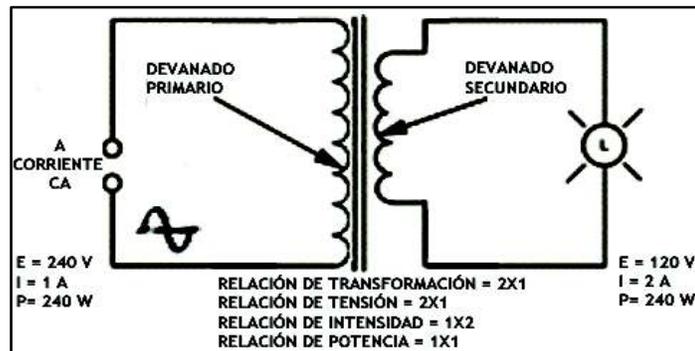


Figura 38. Transformador reductor [7]

### 2.1.5. Amplificadores operacionales

Es un dispositivo amplificador electrónico de alta ganancia acoplado en corriente continua que tiene dos entradas y una salida, tal y como se indica en la Figura 39.

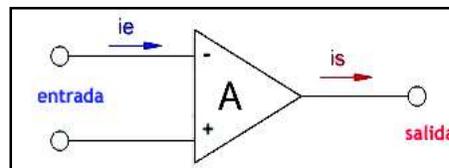
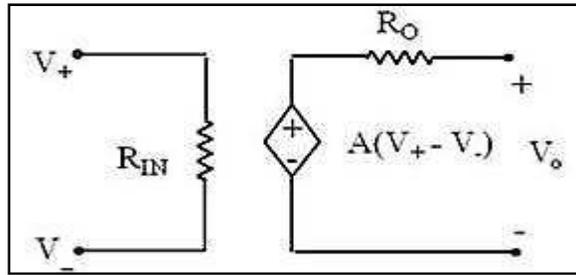


Figura 39. Concepto amplificador operacional.

### Amplificador operacional ideal

La tensión de salida de un amplificador operacional ideal es la diferencia de tensión en las entradas multiplicada por un factor A (ganancia en lazo abierto),  $A \gg 0$  [en el caso ideal  $A = \infty$ ]. La Figura 40 muestra un esquema donde se aprecia el circuito equivalente de este dispositivo.

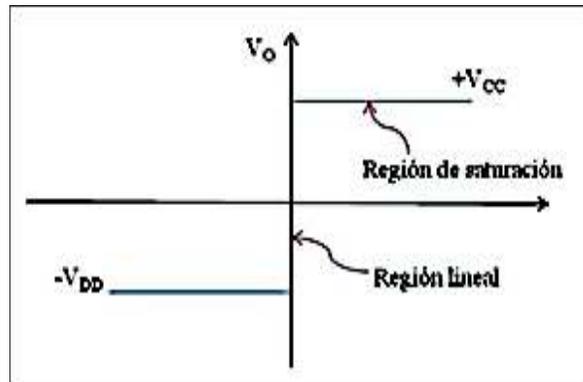
$$V_o = A(V_+ - V_-) \quad (\text{Ec. 61})$$



**Figura 40.** Circuito equivalente del amplificador operacional. [8]

Se considera un amplificador operacional ideal cuando cumple con las siguientes condiciones:

1. Ganancia en tensión en lazo abierto infinita. ( $A = \infty$ )
2. Corriente por los terminales de entrada nula;  $R_{IN} = \infty$  (impedancia de entrada).  
Impedancia de entrada: infinita.
3. Corriente de salida muy grande; Impedancia de salida: cero asimetrías.
4. Ganancia de tensión en modo diferencial: infinita.
5. Ganancia de tensión en modo común: cero.
6. La Figura 41 muestra la función característica del amplificador operacional ideal.



**Figura 41.** Función característica del amplificador operacional ideal. [8]

### **Amplificador operacional real**

El amplificador operacional real tiene un desajuste, debido a que los transistores que lo componen, especialmente los transistores del amplificador diferencial de entrada, no son exactamente pareados.

1. Ganancia =  $\infty$ , en realidad  $\rightarrow 10^4 - 10^6$ .
2.  $R_{IN} \neq \infty$ , Impedancia de entrada: 2 M a 1G  $\Omega$ .
3.  $R_o \neq 0$ , Impedancia de salida: 70 $\Omega$ .

4. Corr. Polarización  $I_b$ : 10 pA a 10  $\mu$ A.
5. Offset  $V_{io}$ : 1 nV a 10 mV.
6. La Figura 42 muestra la función característica del amplificador operacional no ideal.

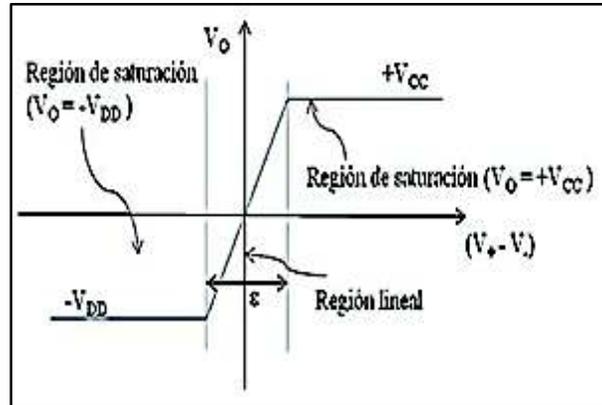


Figura 42. Curva característica del amplificador operacional no ideal. [8]

### Alimentación del amplificador operacional

El amplificador operacional de la Figura 43 es un dispositivo que posee, dos entradas activas referidas a masa; la entrada inversora (-), y la no inversora (+). Dispone alimentación con tensión simétrica (dos fuentes de tensión) y una salida.

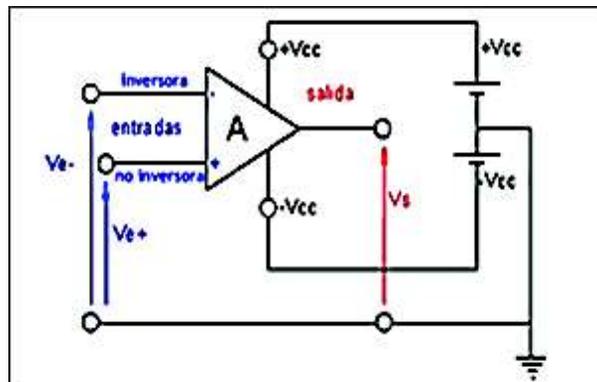


Figura 43. Alimentación del amplificador operacional.

### Protección de los amplificadores operacionales

La forma más sencilla de proteger las entradas del amplificador operacional es agregar dos diodos tipo 1N4733 o similares, observar Figura 44, los mismos que deben poseer bajas pérdidas.

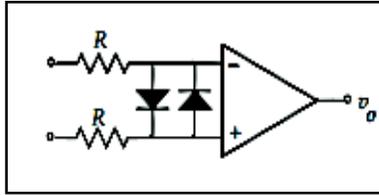


Figura 44. Protección de entrada diferencial. [9]

## 2.1.6. Aplicaciones lineales para amplificadores operacionales

### Amplificador inversor

La señal de salida ( $V_o$ ) es inversa a la señal de entrada ( $V_i$ ), en polaridad, aunque puede ser mayor, igual o menor, dependiendo esto de la ganancia que se dé al amplificador en lazo cerrado. La señal de entrada se acopla al terminal inversor o negativo del amplificador y el positivo o no inversor a tierra, tal como muestra la Figura 45.

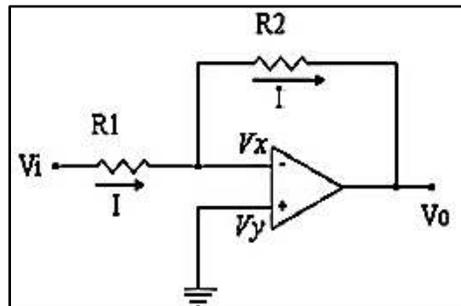


Figura 45. Esquema de un amplificador inversor. [9]

Debido a la alta impedancia de entrada del amplificador operacional la corriente  $I$ , que se produce cuando se alimenta con  $V_i$  al extremo de  $R_1$ , no podrá fluir a través del punto  $V_x$ , por lo que seguirá su camino por medio de la resistencia  $R_2$ , obteniéndose así,  $V_o$ .

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \times V_i \quad [9] \quad (\text{Ec. 62})$$

### Amplificador no inversor

La señal se introduce por el terminal no inversor, lo cual va a significar que la señal de salida estará en fase con la señal de entrada y amplificada.

La Figura 46 muestra el esquema de un no inversor.

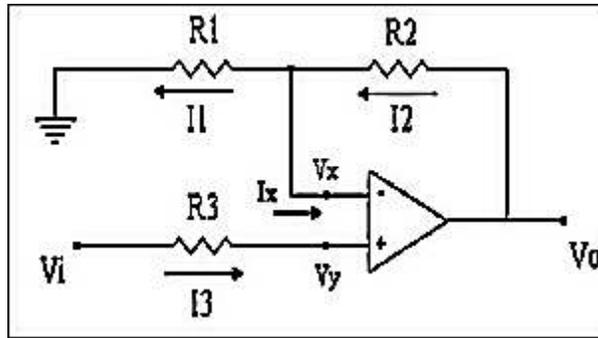


Figura 46. Esquema de un amplificador no inversor. [9]

La salida quedará expresada:  $V_o = 1 + \frac{R_2}{R_1}(V_i)$  [9] (Ec. 63)

Como se ve la ganancia de éste amplificador no puede ser menor que 1.

### 2.1.7. Aplicaciones no lineales

#### Rectificador de media onda con salida negativa

Los circuitos rectificadores de media onda, como el de la Figura 47, transmiten solamente la mitad de un ciclo de una señal y eliminan el otro, la magnitud dependerá de las resistencias elegidas y de la colocación de los diodos en el circuito del amplificador operacional.

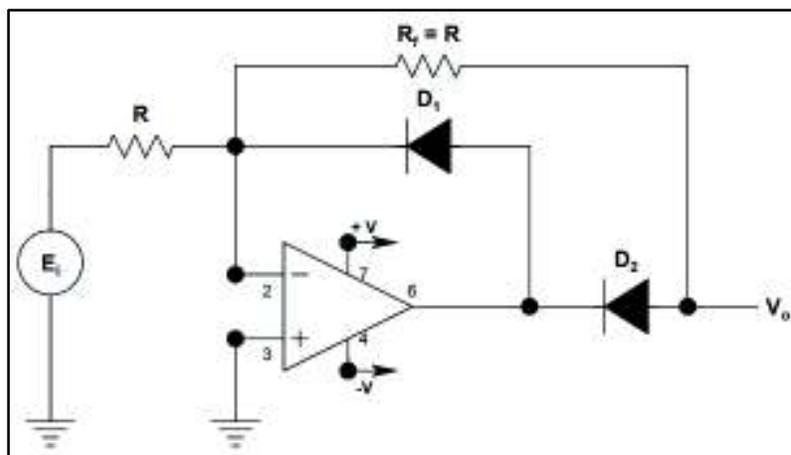


Figura 47. Esquema del rectificador de media onda con amplificador operacional. [9]

La forma de onda en la salida queda expresada en la Figura 48:

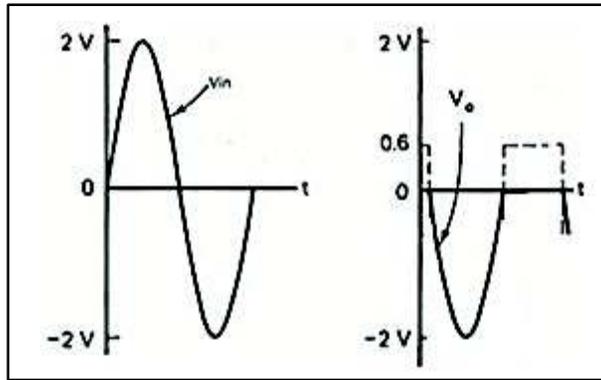


Figura 48. Onda de salida en el circuito rectificador de media onda. [9]

### Rectificador de onda completa con amplificador operacional

El rectificador de onda completa de la Figura 49 transmite una polaridad de la señal de entrada e invierte la otra. Es decir, para las entradas positivas, el amplificador operacional A invierte  $E_i$ , mientras que el amplificador operacional B suma la salida de A y  $E_i$  para dar una salida de circuito  $V_o = E_i$ .

En el caso de las entradas negativas, el amplificador operacional B invierte  $-E_i$ , mientras que el amplificador operacional A limita su salida a cero voltios, por lo tanto, la salida  $V_o$  del circuito es  $+E_i$ .

De esta manera, la salida del circuito  $V_o$  es positiva e igual al valor rectificado o absoluto de la entrada.

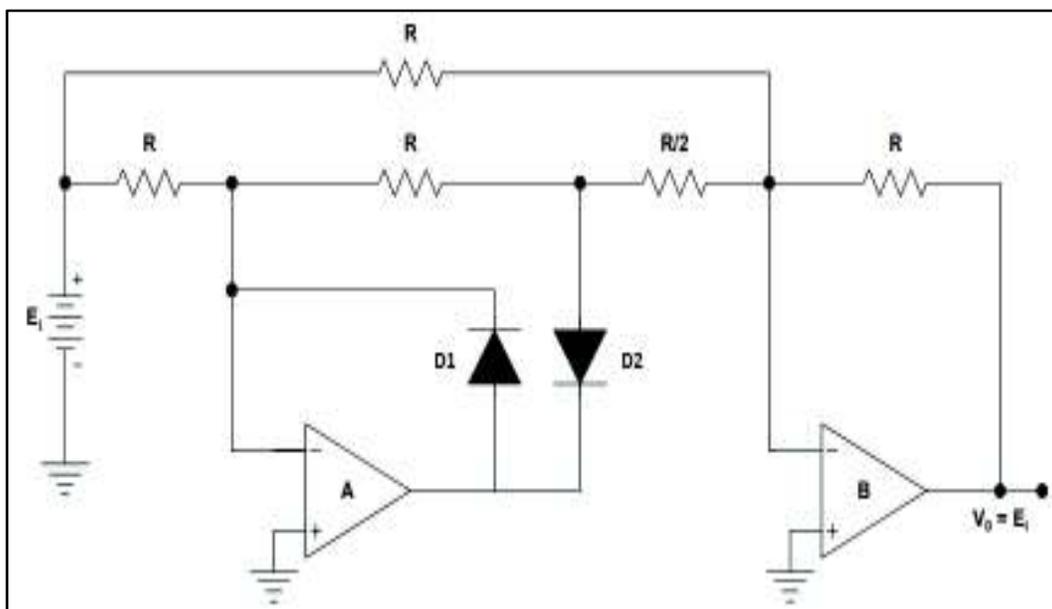


Figura 49. Rectificador de onda completa. [9]

La forma de onda en la salida quedaría expresada de acuerdo a la Figura 50.

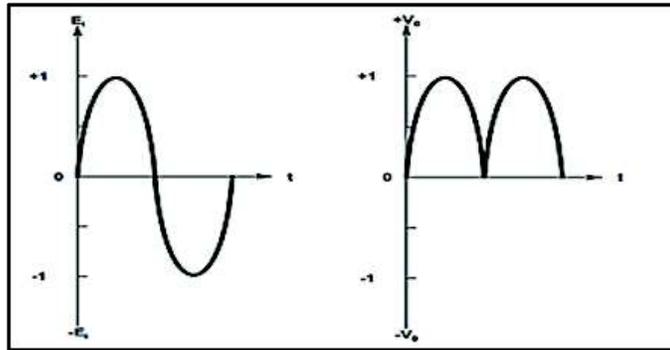


Figura 50. Representación de la rectificación de una onda senoidal. [9]

### Convertidor CA a CD

Al circuito rectificador de onda completa de la Figura 51, se le añade un capacitor de  $10\ \mu\text{F}$ . Cuando a un circuito rectificador se le pone un condensador a la salida, “es para evitar las oscilaciones de la salida del rectificador para obtener una corriente directa”. [10]

El circuito que se obtiene es el del amplificador de valor medio absoluto (MAV). El capacitor C se encarga de promediar la salida rectificada del amplificador operacional B. Transcurren aproximadamente de 60 ciclos de voltaje de entrada antes de que el voltaje del capacitor se establezca y sea igual al valor de su lectura final. La Figura 52 representa la salida del circuito al implementar el capacitor.

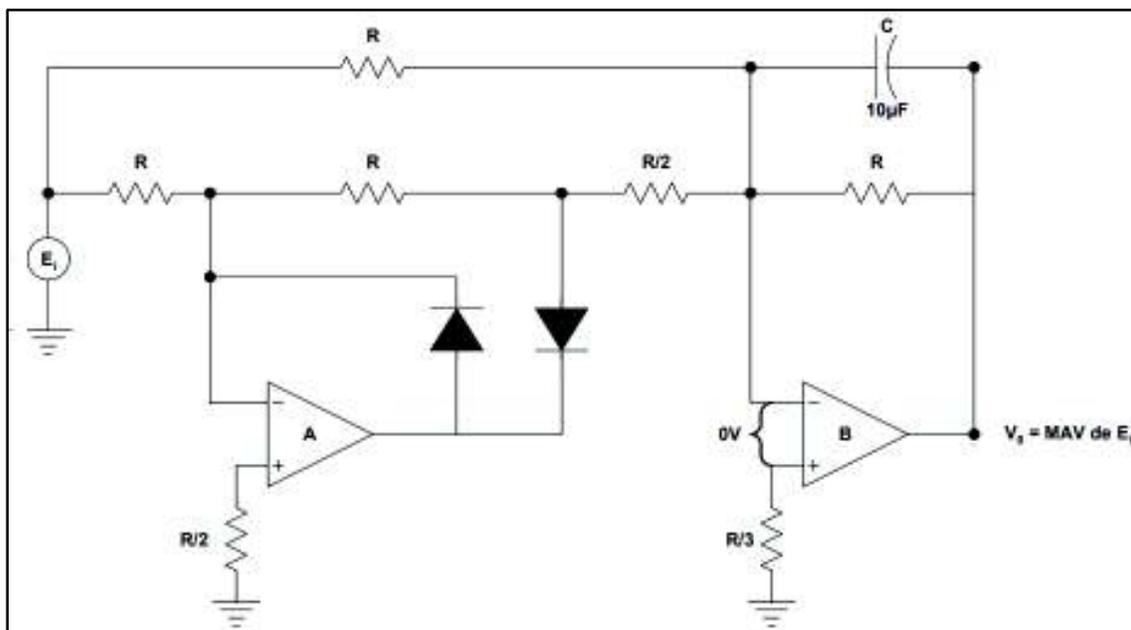
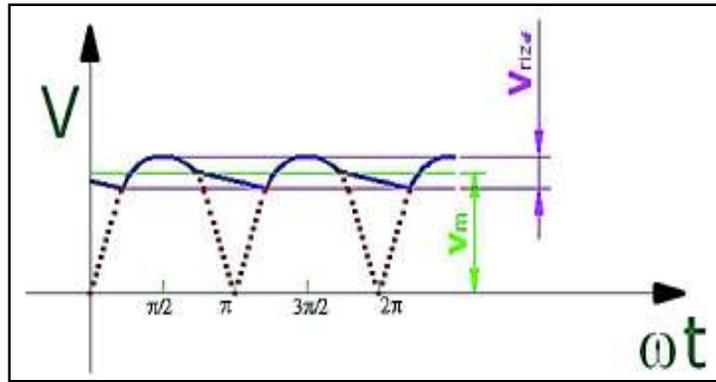


Figura 51. Circuito convertidor CA a CD con capacitor. [10]



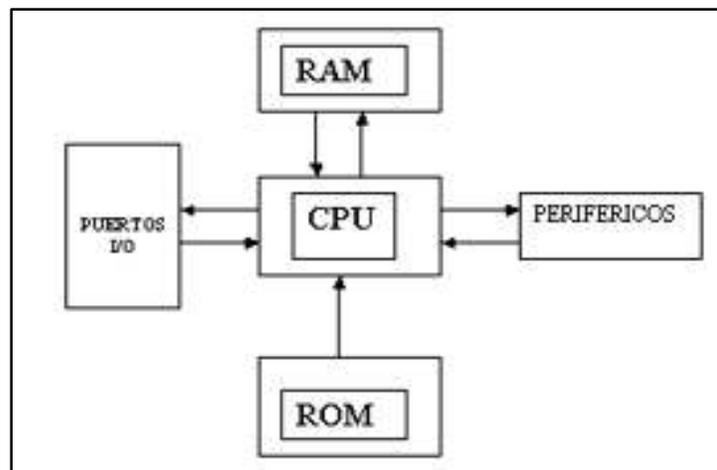
**Figura 52.** Representación del rizado por medio de capacitor. [10]

Los filtros que se utilicen deben presentar poca resistencia al paso de la corriente continua y elevada resistencia al paso de la corriente alterna; además deben almacenar energía cuando la señal de entrada aumente, y cederla cuando la energía disminuya, para que la señal resulte menos ondulatoria.

### 2.1.8. Microcontrolador

#### Definición

Un microcontrolador similar al de la Figura 53, es un circuito integrado que en su interior contiene una unidad central de procesamiento (CPU), unidades de memoria (RAM y ROM), puertos de entrada y salida y periféricos. Estas partes están interconectadas dentro del microcontrolador, y en conjunto forman lo que se le conoce como microcomputadora. Se puede decir con toda propiedad que un microcontrolador es una microcomputadora completa encapsulada en un circuito integrado.



**Figura 53.** Representación de un CPU. [11]

## Función

El propósito fundamental de los microcontroladores es el de leer y ejecutar programas que el usuario le escribe, el carácter programable de los microcontroladores simplifica el diseño de circuitos electrónicos. Permiten modularidad y flexibilidad, ya que un mismo circuito se puede utilizar para que realice diferentes funciones.

### 2.1.9. Arduino Mega

Arduino es una plataforma física computacional open-hardware basada en una sencilla placa con microcontrolador, entradas y salidas (E/S), analógicas, digitales, en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje Processing/Wiring.

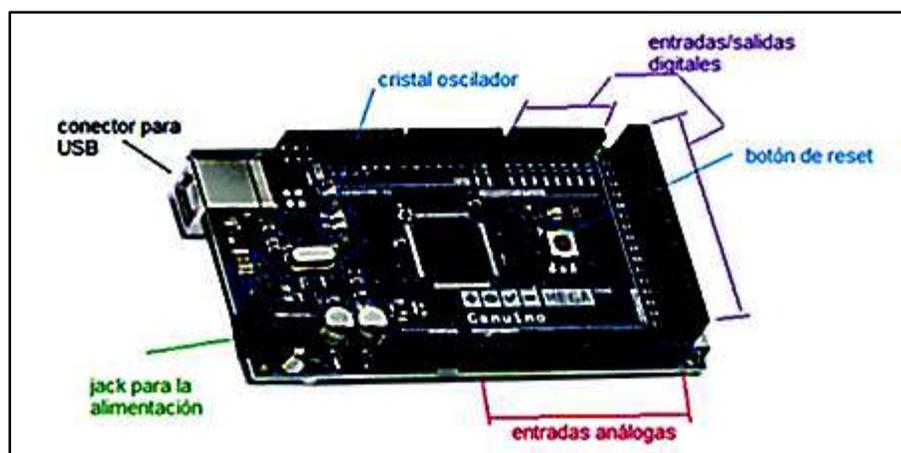
“Arduino puede utilizarse en el desarrollo de objetos interactivos autónomos o puede conectarse a un PC a través del puerto serie utilizando lenguajes como Flash, Processing, MaxMSP, etc.” [12]

## Estructura

El Arduino Mega está basado en el microcontrolador ATmega2560. La Figura 54 muestra algunas partes principales de este dispositivo. Estas partes se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Puertos principales tarjeta Arduino mega. [12]

COMPOSICIÓN ARDUINO	
54 pines de entradas/salidas digitales	16 entradas analógicas
4 UARTs (puertos serial por hardware)	Cristal oscilador de 16 MHz
Conexión USB	Jack de alimentación
Conector ICSP	Botón de reset



**Figura 54.** Esquema Arduino Mega

Incorpora todo lo necesario para que el microcontrolador trabaje simplemente al conectarlo a la PC por medio de un cable USB o con una fuente de alimentación externa. El Arduino Mega es compatible con la mayoría de los shields diseñados para Arduino. Para conocer más detalles se recomienda ir al Anexo 3, donde se detalla información adicional.

## Especificaciones técnicas Arduino Mega

En la Tabla 2 se muestra las especificaciones técnicas que posee el Arduino mega.

**Tabla 2.** Especificaciones Técnicas. [12]

<b>MICROCONTROLADOR</b>	<b>ATmega2560</b>
<b>Voltaje de operación</b>	5 V
<b>Voltaje de entrada</b>	7-12 V
<b>Voltaje de entrada (límites)</b>	6-20 V
<b>Pines digitales i/o</b>	54 (15 como salidas PWM)
<b>Pines de entrada analógica</b>	16
<b>Corriente dc por pin i/o</b>	40 mA
<b>Corriente dc para pin 3.3 v</b>	50 mA
<b>Flash memory</b>	256 KB
<b>Sram</b>	8 KB
<b>Eeprom</b>	4 KB
<b>Clock speed</b>	16 MHz

## Alimentación

El Arduino Mega puede ser alimentado por dos vías, mediante conexión USB o fuente de poder externa, esta fuente es seleccionada automáticamente.

“Para realizar la conexión externa la fuente debe venir provista de un adaptador AC/DC. El adaptador puede ser conectado por un plug de 2.1mm hacia el jack provisto en la placa. Si se dispone de una batería los terminales deben ser insertados en los pines Gnd y Vin de la fuente de poder.” [12]

La placa puede operar en un rango de 6 a 20 V. Si se suministra con menos de 7V el pin de salida 5V puede suministrar un valor menor y la placa puede ser inestable. Si se utiliza más de 12 V el regulador de voltaje puede sobrecalentarse y dañar la placa. El rango recomendado es 7 a 12 V.

Los pines de alimentación son los siguientes:

- **VIN.** (Voltaje de entrada a la tarjeta Arduino), se utiliza una fuente de alimentación externa, diferente de los 5 voltios de la conexión USB (regulador de voltaje).
- **5V.** La fuente de alimentación regulada se utiliza para alimentar el microcontrolador y otros componentes de la placa.
- **3V3.** Una fuente de 3.3 voltios generada por el chip FTDI (módulos y circuitos integrados para conectividad USB) de la placa. La corriente máxima es de 50 mA.
- **GROUND.** Pin de tierra.

### Entradas y salidas

Cada uno de los 54 pines digitales del Mega se puede utilizar como entrada o salida, utilizando las funciones `pinMode ()`, `digitalWrite ()` y `digitalRead ()`, funcionan a 5 voltios. Los pines pueden proporcionar o recibir un máximo de 40 mA y tiene una resistencia pull-up interna (desconectada por defecto) de 20-50 Kohm. La Tabla 3 resume algunos pines que se requerirán para la elaboración del proyecto.

**Tabla 3.** Especificaciones de los puertos Arduino Mega. [12]

Puerto	Pines	DESCRIPCIÓN
<b>Serial</b>	Serial 0: 0 (RX) y 1 (TX); Serial 1: 19 (RX) y 18 (TX); Serial 2: 17 (RX) y 16 (TX); Serial 3: 15 (RX) y 14 (TX).	Se utiliza para recibir (RX) y transmitir (TX) datos en serie TTL.
<b>Interrupciones Externas</b>	2 (interrupt 0), 3 (interrupt 1), 18 (interrupt 5), 19 (interrupt 4), 20 (interrupt 3), y 21 (interrupt 2).	Estos pines se pueden configurar para activar una interrupción en un valor bajo, un flanco ascendente o descendente o un cambio de valor.

El Mega tiene 16 entradas analógicas, cada una de las cuales proporciona 10 bits de resolución (es decir, 1023 valores diferentes), reciben señales análogas de 0 a 5 voltios, aunque es posible cambiar el extremo superior de su rango usando la función `AREF` y `analogReference ()`.

## Distribución de pines

La Figura 55 muestra la distribución de pines en la plataforma Arduino.

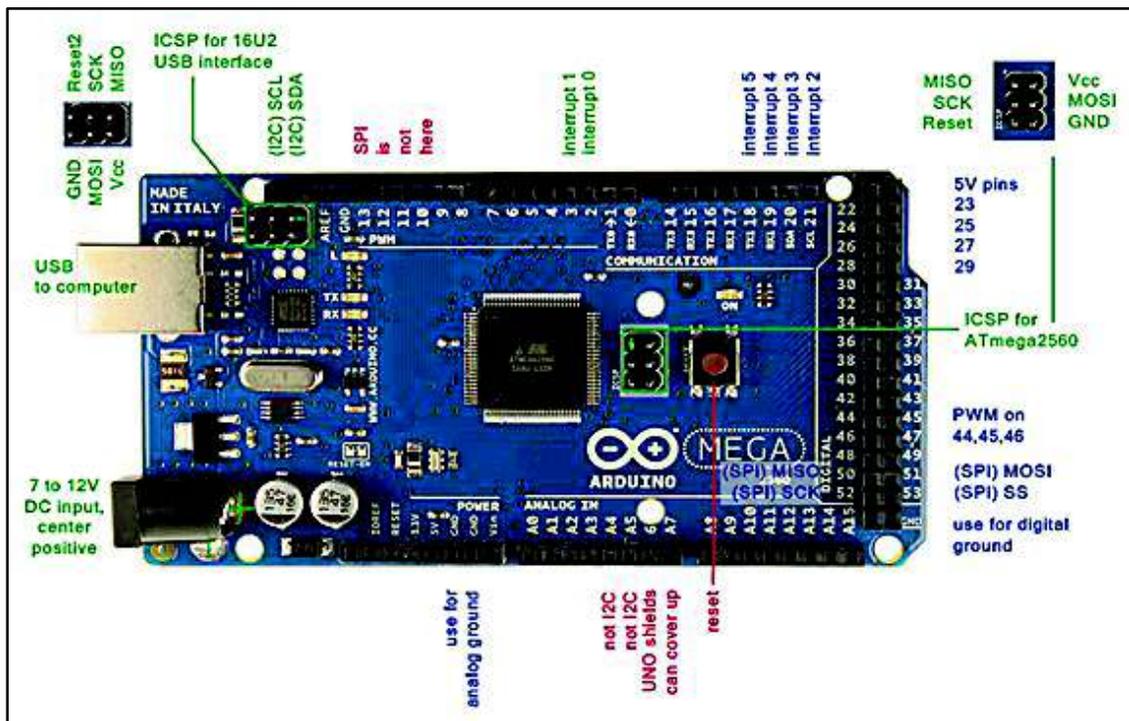


Figura 55. Distribución de pines plataforma Arduino. [13]

### 2.1.10. Entorno de Arduino

Utiliza el lenguaje de programación processing/Wiring, se utiliza para realizar objetos interactivos autónomos o puede ser conectado a software del ordenador. Las aplicaciones que ofrece Arduino son diversas, dependerá del usuario para la creación de proyectos. El entorno de desarrollo integrado tiene licencia para la distribución y uso de forma gratuita, y se puede descargar fácilmente de internet.

El ATmega1280 en el Arduino Mega viene pre-quemado con un gestor de arranque que le permite cargar un nuevo código sin el uso de un programador de hardware externo. Se comunica utilizando el protocolo STK500 original.

### Librerías

Las librerías son fragmentos de código hechas por terceros que se usaron en el sketch o proyecto, esto facilita la programación y permite la abstracción haciendo que el programa sea más sencillo de realizar y entender.

El compilador debe conocer todas las dependencias del archivo fuente para compilarlo adecuadamente, al escribir un proyecto debe especificarse que librerías se utilizan. Para usar una Librería, selecciónela en Sketch> Importar Librería.

Las librerías normalmente incluyen los siguientes archivos comprimidos en un archivo ZIP o dentro de un directorio. Estas siempre contienen:

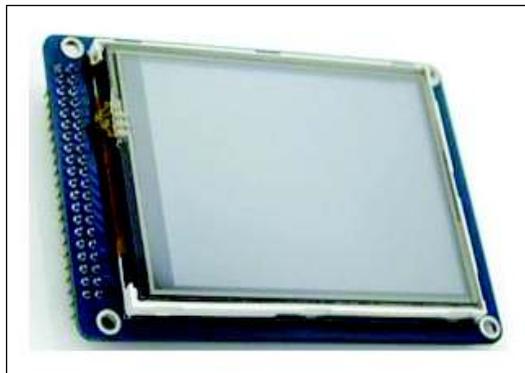
- Un archivo .cpp (código de C++)
- Un archivo .h o encabezado de C, que contiene las propiedades y métodos o funciones de la librería.
- Un archivo Keywords.txt, que contiene las palabras clave que se resaltan en el IDE (opcional).
- Muy posiblemente la librería incluye un archivo readme con información adicional de lo que hace y con instrucciones de cómo usarla.
- Directorio denominado examples con varios sketches de ejemplo que ayuda a entender cómo usar la librería (opcional).

### 2.1.11. Pantalla

#### Display LCD TFT gráfico (GLCD)

Los dispositivos táctiles TFT (Thin Film Transistor - Transistor de Película Fina), como se muestra en la Figura 56, pueden encontrarse en muchos aparatos, permitiendo que un simple golpe en el monitor de la pantalla táctil controle la función de una máquina, dispositivo o programa.

Esta pantalla mide 320 x 240, 3.2" con interfaz táctil (Touch screen), y se alimenta con 3.3 V.



**Figura 56.** Pantalla TFT para Arduino [15]

Características:

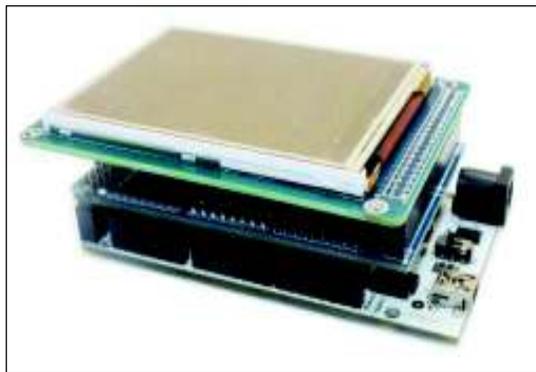
- Backlight LED blanco.

- Ángulo de visión amplio.
- Permite control total para crear formas gráficas, texto y números.
- Controlador del LCD ILI9341 on-board.
- Controlador touch XPT2046 on-board.
- Conector de 40 pines que proporciona las señales de los buses del LCD, touchscreen.
- Interface en modo de 16 bits.
- Voltaje de señales lógicas: 3.3 V. Conectar la pantalla a señales de voltajes mayores como por ej. 5 V puede dañarla.
- Voltaje de alimentación (Pin VCC): 5

### **Touch LCD Shield para pantallas TFT**

Las pantallas vienen con una fuente de alimentación de 3.3 V, lo que hace que sea imposible conectarlas directamente a los controladores Mega de Arduino.

El shield Arduino 3.2" TFT LCD Touch es un display TFT multicolor con pantalla táctil y es compatible con el Arduino Mega. Está disponible en un shield para Arduino Mega con pines compatibles para acoplarlo con la tarjeta Mega (ver Figura 57). El driver del TFT está basado en un SSD1289 con 8 bits de datos y 4 bits de interfaz de control.



**Figura 57.** Acople de pantalla, shield y Arduino. [15]

### **Shield**

Es una placa que se apila sobre el Arduino, de forma que permite ampliar el hardware/capacidades de Arduino. En la Figura 58 se aprecia un modelo shield que es compatible con Arduino Mega.



**Figura 58.** Shield Arduino 3.2" para TFT LCD Touch. [15]

### 2.1.12. Sensor de corriente YHDC SCT-013-000

Los sensores de la serie SCT-013 como el de la Figura 59, son sensores que trabajan como transformadores, la corriente que circula por el cable a medir actúa como el devanado primario (1 espira) e internamente tiene un devanado secundario que dependiendo del modelo pueden tener hasta más de 2000 espiras.

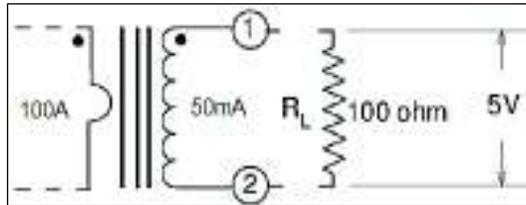
La cantidad de espiras representa la relación entre corriente que circula por el cable y la que el sensor entrega, esta relación o proporción es la que diferencia los modelos de sensores SCT-013, adicionalmente pueden tener una resistencia de carga en la salida de esta forma en lugar de corriente se trabaja con una salida voltaje.



**Figura 59.** Sensor de efecto hall. [14]

Si el sensor es de salida de corriente como el SCT-013-100 (ver Figura 60) se debe colocar una resistencia de carga para que la salida entregue un rango de  $\pm 1V$  o  $\pm 5V$  AC.

En la Tabla 4 se detallan algunas especificaciones técnicas sobre su funcionamiento. Para conocer más detalles ver el anexo 2.



**Figura 60.** Circuito equivalente del sensor de corriente [14]

**Tabla 4.** Especificaciones Técnicas del sensor de corriente [14]

CORRIENTE DE ENTRADA	CORRIENTE DE SALIDA	NO LINEALIDAD	RESISTENCIA INCORPORADA
0 – 100A	0 - 50mA	±3%	No tiene
RELACIÓN ESPIRAS	GRADO DE RESISTENCIA	TEMPERATURA DE TRABAJO	RESISTENCIA DIELECTRICA
100A;0.05A	Grado B	-25°C ~+70°C	1000V AC/1min 5mA

## 2.2. Metodología de diseño del módulo

Hace referencia al conjunto de técnicas, procedimientos y soportes documentales empleados en el diseño de dispositivos elementales: transformadores monofásicos e instrumento de medición como voltímetro, amperímetro y factor de potencia.

### 2.2.1. Diseño de transformadores monofásicos

#### Cálculo de parámetros de transformadores monofásicos

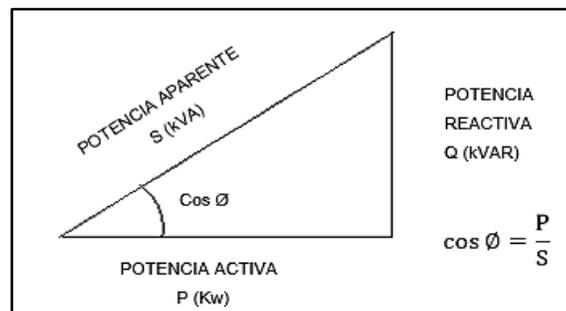
En la Tabla 5 se detalla los parámetros constructivos de los transformadores a elaborarse.

**Tabla 5.** Parámetros transformadores.

DATOS REQUERIDOS	
Voltaje Primario	110V
Corriente Primario	5A
Voltaje Secundario	110V
Corriente Secundario	5A
Factor Potencia	0.85
Rendimiento	0.9

#### Cálculo de la potencia aparente

Para construir un transformador es importante conocer su potencia aparente, para ello hay que basarse en el triángulo de potencias de la Figura 61.



**Figura 61.** Triángulo de Potencias de transformadores.

Se procede al cálculo de la potencia activa en el secundario, para ello se utiliza la ecuación 64.

$$P_s = V_s \cdot I_s \cdot \cos \phi \quad (\text{Ec. 64})$$

$$P_s = (110 * 2)(5)(0.85) = 935w$$

Una vez calculada la potencia en el secundario se procede al cálculo de la potencia en el primario, se utiliza la ecuación 65.

$$n = \frac{P_s}{P_p} \rightarrow P_p = \frac{P_s}{n} \quad (\text{Ec. 65})$$

$$P_p = \frac{935w}{0.9} = 1038.88 w$$

Por último, se encuentra la potencia aparente por medio de la ecuación 66. Con  $\cos \phi = 0.85$ .

$$\cos \phi = \frac{P_s}{S} \rightarrow S = \frac{P_s}{\cos \phi} \quad (\text{Ec. 66})$$

$$S = \frac{935w}{0.85} = 1100 \text{ VA}$$

Donde:  $P_s$  = Potencia activa lado secundario (2 devanados en serie).

$V_s$  = Voltaje lado secundario.

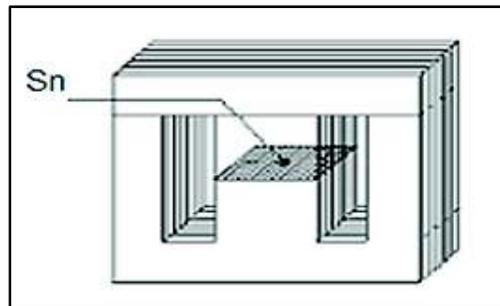
$I_s$  = Corriente lado secundario.

$\cos \phi$  = Factor de potencia (diseño).

$n$  = Rendimiento.

$P_p$  = Potencia activa lado primario.

### Sección transversal del núcleo



**Figura 62.** Sección del núcleo con sus medidas. [16]

Para conocer el valor de la sección transversal del núcleo (Figura 62) se utiliza la ecuación 67.

$$S_n = k \cdot \sqrt{S} \quad (\text{Ec. 67})$$

Dónde:  $S_n$  = Sección transversal del núcleo [ $\text{cm}^2$ ]

$S$  = Potencia aparente en el secundario [VA]

$K$  = Coeficiente del hierro para la chapa magnética

Para determinar el valor de K se debe tomar en consideración la Tabla 6 y se debe optar por el valor de mayor rango.

**Tabla 6.** Valores de coeficiente del hierro para chapa de buena calidad. [16]

POTENCIA DEL TRANSFORMADOR (P)	COEFICIENTE (k)
de 25 a 100 VA	entre 0.7 y 0.85
de 100 a 500 VA	entre 0.85 y 1
de 500 a 1000 VA	entre 1 y 1.1
de 1000 a 3000 VA	entre 1.1 y 1.2

Entonces se reemplaza en la ecuación 67, obteniéndose el área del núcleo.

$$S_n = (1)\sqrt{1100}$$

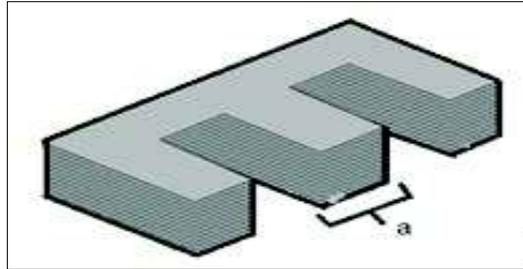
$$S_n = 33.1 \text{ cm}^2$$

### Elección de la chapa para el núcleo

**Tabla 7.** Dimensión de chapas (silicio hierro).

Chapas y sus dimensiones											
Chap N°	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	l (mm)	l' (calc.)	C B K	Peso x Sección² (kg)	Peso de chapa (kg)		Geometría de las chapas
									Chap a "E"	Chapa "I"	
14	3.5	3.5	8.75	1.75	14	14	6	0.025	760	240	
18	4.8	4.8	1.1	2.5	19	19.2	13.5	0.065	770	230	
25	12.5	8	20.75	8	41.5	41	36.5	0.110	710	290	
30	33	27	97	17.5	120	120	132	2.320	810	190	
37	9.5	7.95	19	4.5	35	34.9	28.6	0.046	750	250	
60	40	20	60	20	120	120	100	2.800	750	250	
62	16	8	24	8	48	48	40	0.180	750	250	
75	19	9.5	26.5	9.5	57	57	47.5	0.300	750	250	
77	22	12	34	12	68	68	58	0.510	750	250	
111	25.4	12.7	33.1	12.7	76.2	76.2	63.5	0.720	750	250	
112	28.6	14.3	43	14.3	85.8	85.8	71.6	1.030	750	250	
125	32	16	49	16	95	96	80	1.420	750	250	
150	45	28.5	117	22.5	147	147	162	5.653	810	190	
155	42	21	21	21	126	126	105	2.430	750	250	
55 E	42	21	21	21	126	126	105	3.100	750	250	
200	33	27	65	17.5	120	120	100	1.960	750	250	
500	64	32	96	32	192	192	160	11.35	750	250	
600	57	25	75	25	150	150	125	9.400	750	250	
700	64	32	93	32	192	192	256	16.200	830	170	
800	82	41	122	41	246	246	204	24.500	750	250	
850	82	41	244	41	246	246	326	36.300	830	170	
1102	102	51	453	51	305	306	324	43.400	750	250	

Se hace en función del ancho de la columna del núcleo (ver Figura 63) que correspondería al ancho de la parte central de la chapa se representa como “a”.



**Figura 63.** Representación del ancho de chapa.

De la Tabla 7 se selecciona las chapas número 600, principalmente por motivo de costos y disponibilidad en el mercado.

Estas láminas proveen un ancho en la columna del núcleo  $a = 57\text{mm} = 5.7 \text{ cm}$ .

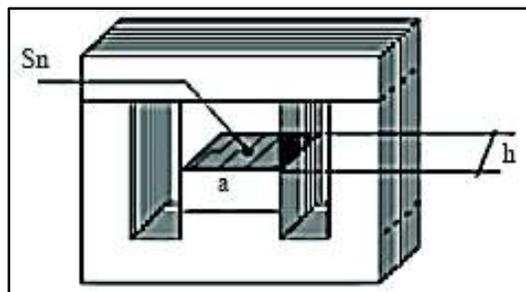
### **Elección del carrete**

El área se observa en la Figura 64, ésta es igual a la multiplicación del largo por el ancho, se expresa en la ecuación 68.

$$S_n = a \times h \quad (\text{Ec. 68})$$

$$h = \frac{S_n}{a}$$

Dónde:  
 $a$  = ancho de la lámina  
 $h$  = largo de la lámina



**Figura 64.** Sección del núcleo con sus medidas. [16]

Con ello se tiene la dimensión que debería tener la sección transversal del carrete. El carrete estará expresado con dimensiones  $(a \times h)$ .

Con  $a = 5.7\text{cm}$ , se obtiene  $h$ , a través de la ecuación 68:

$$h = \frac{S_n}{a}$$
$$h = \frac{33.1\text{cm}^2}{5.7\text{cm}}$$
$$h = 5.8\text{cm}$$

Por lo tanto, se necesita un carrete de dimensiones  $(a \times h) = 5.7\text{cm} \times 5.8\text{cm} = 57\text{mm} \times 58\text{mm}$ . Se puede seleccionar utilizando tablas de carretes normalizados o a su vez construir el mismo.

### Número de chapas

Se obtiene a partir de la medida ( $h$ ) del carrete y del espesor ( $e$ ) de la chapa, expresada en la ecuación 69. Hay que considerar un espesor de la chapa como  $e = 0.05\text{cm}$ .

$$N_{\text{chapas}} = \frac{h}{e} \quad (\text{Ec. 69})$$
$$N_{\text{chapas}} = \frac{5.8\text{cm}}{0.05\text{cm}}$$
$$N_{\text{chapas}} = 116 \text{ chapas}$$

### Cálculo de vueltas para bobinados

#### Vueltas primario ( $N_p$ )

Para el cálculo del número de vueltas/bobina, para el primario se utiliza la ecuación 70.

$$N_p = \frac{V_p(37.5)}{S_n} \quad (\text{Ec. 70})$$

$N_p$  = Número de vueltas en el primario

$V_p$  = Voltaje en el primario

37.5 = Constante que depende del tipo de chapa.

$S_n$  = Área de la sección del núcleo ( $\text{cm}^2$ )

$$N_p = \frac{V_p(34.125)}{S_n}$$
$$N_p = \frac{127(34.125)}{33.1}$$

$$N_p = 131 \text{ [Vueltas]}$$

### Vueltas secundario (Ns)

Para el cálculo del número de vueltas/bobina, para el secundario se utiliza la ecuación 71.

$$N_s = \frac{V_s(37.5)}{S_n} \quad (\text{Ec. 71})$$

$N_s$  = Número de vueltas lado secundario

$V_s$  = Voltaje en el secundario

37.5 = constante que depende del tipo de chapa

$S_n$  = Área de la sección del núcleo ( $\text{cm}^2$ )

Nota: Cabe recalcar que el valor de 37.5 visto desde la práctica no es un valor que se calcula si no un valor que depende del tipo de chapas y tipo de transformador que se vaya a realizar.

$$N_s = \frac{V_s(34.125)}{S_n}$$

$$N_s = \frac{127(34.125)}{33.1}$$

$$N_s = 131 \text{ [Vueltas]}$$

### Sección de conductores primario y secundario

Para el cálculo de la sección transversal de los conductores se utiliza la ecuación 72.

$$S_c = \frac{I_c}{\delta} \quad (\text{Ec. 72})$$

$S_c$  = Sección del conductor (Primario/Secundario)

$I_c$  = Intensidad del conductor (Primario/Secundario)

$\delta$  = Densidad de corriente  $\text{A/mm}^2$

El valor de la densidad de corriente ( $\delta$ ) se obtiene de la Tabla 8.

**Tabla 8.** Densidad de corriente ( $\delta$ ). [16]

Potencia (VA)	10 a 50	51 a 100	101 a 200	201 a 500	501 a 1000	1001 a 1500
$\delta \text{ A/mm}^2$	4	3,5	3	2,5	2	1,5

Nota: en la práctica se recomienda mucho usar para la densidad de corriente ( $\delta$ ) el valor de  $4 \text{ A/mm}^2$  con esta sección se consigue el número del cable en una tabla de cables AWG.

### Corriente primario (Ip)

La corriente se obtiene a partir de la ecuación 73.

$$I_p = \frac{P_p}{V_p} \quad (\text{Ec. 73})$$

$$I_p = \frac{519.44}{110}$$

$$I_p = 4.72 \text{ A}$$

### Corriente secundario (Is)

Para el secundario se acordó en los datos un valor de  $I_s = 5 \text{ A}$ .

### Sección y calibre de conductor para el primario

La sección del conductor primario se obtiene a partir de la ecuación 74.

$$S_p = \frac{I_p}{\delta} \quad (\text{Ec. 74})$$

Dónde:

$S_p$  = Sección del primario

$I_p$  = Corriente del primario

$$S_p = \frac{4.72 \text{ [A]}}{4 \left[ \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right]} = 1.18 \text{ mm}^2$$

El calibre del conductor se selecciona a partir de la Tabla 9, cuyo valor es: #16 AWG.

### Sección y calibre de conductor para el secundario (Ss)

La sección del conductor primario se obtiene a partir de la ecuación 75.

$$S_s = \frac{I_s}{\delta} \quad (\text{Ec. 75})$$

Dónde:

$S_s$  = Sección del secundario

$I_s$  = Corriente del secundario

$$S_s = \frac{5 \text{ [A]}}{4 \left[ \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right]} = 1.25 \text{ mm}^2$$

El calibre del conductor se selecciona a partir de la Tabla 9, cuyo valor es: #16 AWG.

**Tabla 9.** Tabla de conductores AWG. [16]

AWG	Ø[Pulg]	Ø [mm]	Ø[mm <sup>2</sup> ]	AWG	Ø[Pulg]	Ø[mm]	Ø[mm <sup>2</sup> ]
6/0=000000	0.580	14.73	170.30	18	0.0403	1.02	0.823
5/0 = 00000	0.517	13.12	135.10	19	0.0359	0.912	0.635
4/ = 0000	0.460	11.7	107	20	0.0320	0.812	0.518
3/0 = 000	0.410	10.4	85.0	21	0.0285	0.723	0.410
2/0 = 00	0.365	9.26	67.4	22	0.0253	0.644	0.326
1/0 = 0	0.325	8.25	53.5	23	0.0226	0.573	0.258
1	0.289	7.35	42.4	24	0.0201	0.511	0.205
2	0.258	6.54	33.6	25	0.0179	0.455	0.162
3	0.229	5.83	26.7	26	0.0150	0.405	0.129
4	0.204	5.19	21.2	27	0.0142	0.361	0.102
5	0.182	4.62	16.8	28	0.0126	0.321	0.0801
6	0.162	4.11	13.3	29	0.0113	0.286	0.0642
7	0.144	3.66	10.5	30	0.0100	0.255	0.0509
8	0.128	3.26	8.36	31	0.00893	0.227	0.0404
9	0.144	2.91	6.63	32	0.00500	0.202	0.0320
10	0.102	2.59	5.26	33	0.00708	0.180	0.0254
11	0.0907	2.30	4.17	34	0.0631	0.160	0.0201
12	0.0808	2.05	3.31	35	0.0562	0.143	0.0160
13	0.0720	1.83	2.62	36	0.00500	0.127	0,0127
14	0.0641	1.63	2.08	37	0.00445	0.113	0.0100
15	0.0571	1.45	1.65	38	0.00397	0.101	0.00797
16	0.0508	1.29	1.31	39	0.00353	0.0897	0.00632
17	0.0453	1.15	1.04	40	0.00314	0.0799	0.00501

### 2.2.2. Diseño del dispositivo de medición

Este sistema está compuesto por fuente de alimentación DC, circuitos de tratamiento de señales como: monitor de voltajes, corrientes y factor de potencia.

### Fuentes de alimentación DC

#### Fuente DC de ±9 V

El dispositivo de medición utiliza una fuente DC de ±9 V (ver Figura 65), para polarizar los diferentes componentes electrónicos. La Tabla 10 detalla los componentes utilizados para realizar la fuente.

Tabla 10. Elementos utilizados para la fuente  $\pm 9$  V.

ELEMENTO	TIPO	CANTIDAD	CAPACIDAD
Transformador	Relación 10:1	1	1 A
Puente de diodos		1	1.5A
Capacitor	2200uF y 10 uF	2/c	50 V
Regulador	LM 7809 y LM 7909	1/c	1A, $\pm 9$ V
Capacitor	100nF	4	50 V

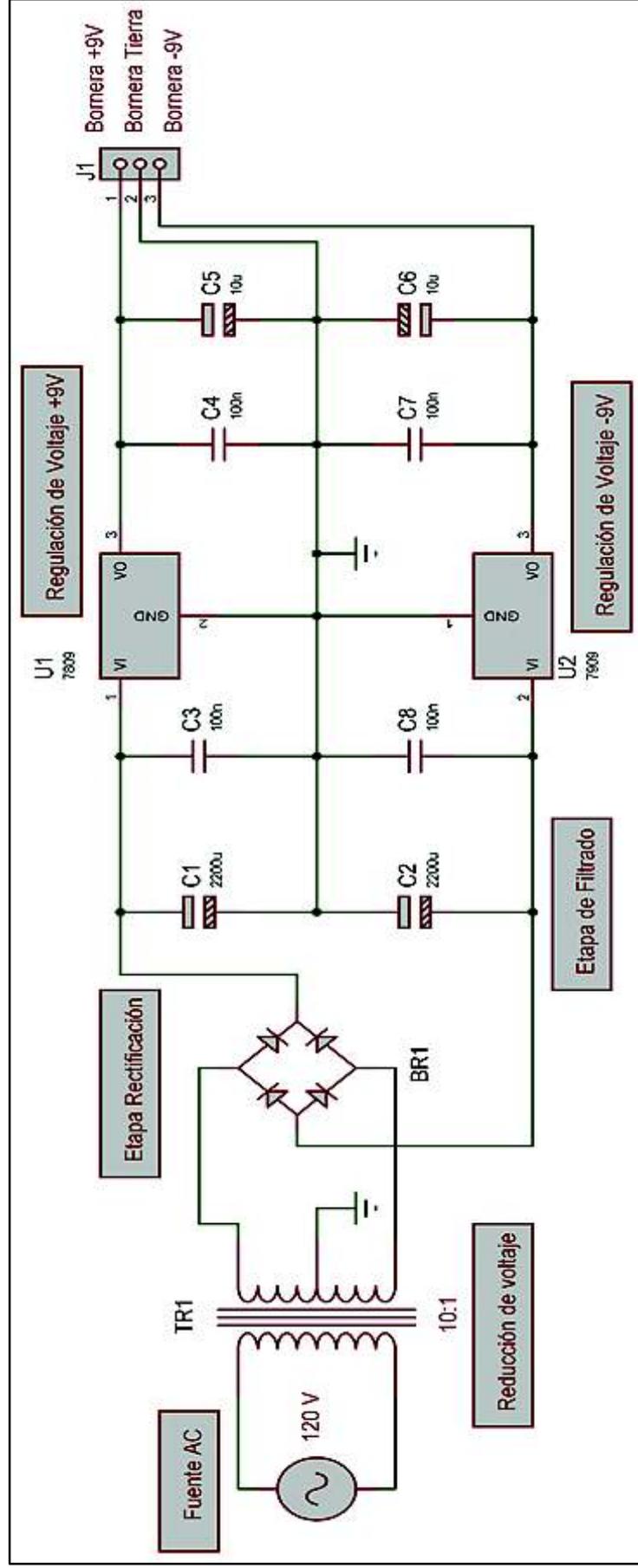


Figura 65. Circuito implementado para la fuente  $\pm 9$  V.

Este tipo de fuentes está constituido básicamente por un transformador que reduce el voltaje a un nivel adecuado para el funcionamiento de los circuitos. Se utilizó un transformador de 120/9 V<sub>AC</sub> con TAP central de relación 10:1. La rectificación de V<sub>AC</sub> se realiza por medio de un puente de diodos integrado, la finalidad que tiene este elemento es convertir la señal de voltaje alterno a una señal de voltaje pulsatorio positivo.

La salida del rectificador dispone de capacitores nominados como C1 y C2 para el filtrado de la señal. Los capacitores C1 y C2 producen un aplanamiento de la señal, con cierto valor de rizo, C1 (para la señal positiva), y el C2 (para la señal negativa), esta señal aún no es adecuada para polarizar los circuitos integrados por lo que se utiliza los reguladores LM 7809, para obtener + 9V y el regulador LM 7909, para obtener - 9V, con el fin de estabilizar la señal de voltaje. Los valores de los capacitores C4, C5, C6, C7 y C8 son recomendados por los fabricantes. Los amplificadores operaciones requieren 800 mA en su alimentación por lo que el transformador de un amperio es más que suficiente para los circuitos.

### **Fuente de alimentación para el Arduino Mega, pantalla y shield TFT**

Se seleccionó un cargador de +5 VDC como el de la Figura 66, debido a que estos dispositivos son compatibles con cualquier modelo.



**Figura 66.** Cargador 5Vdc.

### **Dispositivo de medición de corriente**

#### **Desarrollo del monitor de corriente**

La salida del sensor SCT-013-000 es una señal de corriente alterna, cuyos valores no están dentro del rango de las entradas analógicas (0 a +5V) del Arduino, si bien el rango del sensor puede ser inferior, la parte negativa de la señal podría malograr al Arduino.

Lo ideal es, si el sensor tiene una salida de -50mA a +50mA acondicionarlo a una salida de 0 a 5V (voltaje de entrada analógica del Arduino). Esto se podría realizar convirtiendo de

corriente a voltaje, (a un rango de [-5V, +5V]) mediante una resistencia de carga en los terminales del sensor, luego rectificarlo para eliminar la parte negativa ([0, +5V]).

Para rectificar no se puede usar únicamente diodos, puesto que la caída de voltaje en el diodo es muy grande en comparación al voltaje de la señal. Para esto se empleará circuitos rectificadores con operacionales los cuales anulan el voltaje umbral de los diodos.

### Acondicionamiento para la lectura de la señal de corriente

El sensor a utilizar tiene una relación 100 A/50mA, por lo que para el cálculo de la resistencia de salida se utiliza la ecuación 76.

$$V_{sal} = \frac{I_{in} * 50mA}{100A} * R \quad (\text{Ec. 76})$$

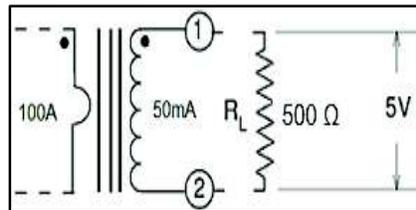
Dónde:  $V_{sal}$  = Valor a ingresar a la entrada analógica del Arduino.

$I_{in}$  = Corriente a ser medida

R = Resistencia a la salida del sensor

Se necesita que el sensor proporcione 5 V cuando detecte una señal de 20 A, hay que calcular el valor de la resistencia a implementar, como muestra la Figura 67.

$$R = \frac{V_{sal} * 100 A}{I_{in} * 50 mA} = \frac{5 V * 100 A}{20 A * 50 mA} = 500\Omega$$



**Figura 67.** Circuito equivalente del sensor de corriente.

### Relación entre la corriente de entrada y el voltaje de salida

Con el valor de resistencia calculada, se podrá obtener un factor de transformación que será necesaria incluir en la programación. La relación queda expresada en la ecuación 77.

$$r = \frac{I_{in}}{V_{sal}} \quad (\text{Ec. 77})$$

$$r = \frac{20A}{5V}$$

$$r = 4$$

## Dispositivo de medición de voltajes

El rango de voltaje alterno a medir es de 0 a 260 VAC y los canales analógicos del Arduino mega admiten voltajes comprendidos de 0 a 5V DC, por lo tanto, se debe disminuir de forma proporcional el voltaje aplicando un divisor de tensión para rectificarlo y posteriormente convertirlo en señal DC.

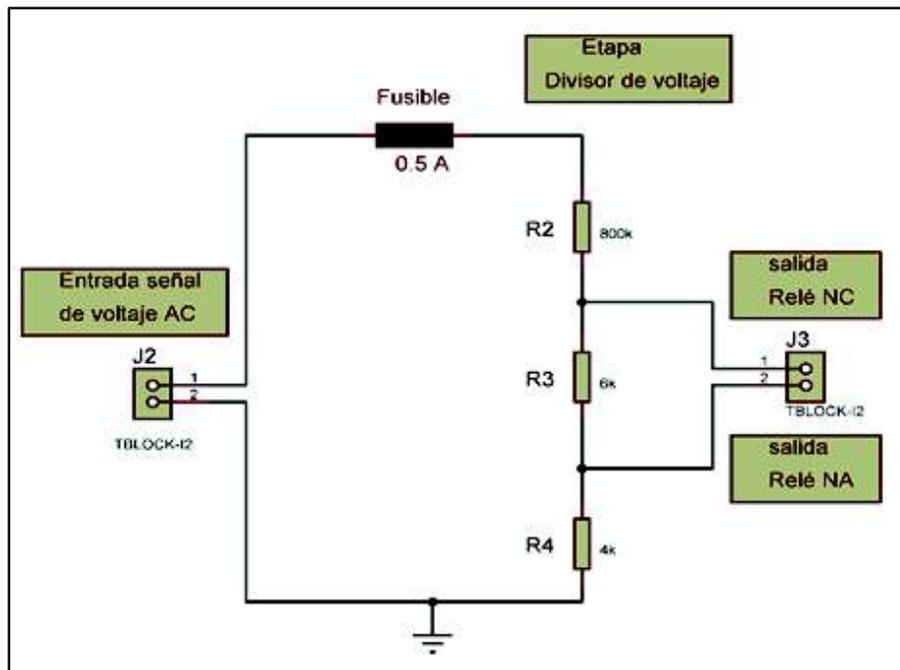


Figura 68. Circuito divisor de voltaje.

El divisor de voltaje de la Figura 68 se produce cuando una fuente de voltaje es conectada en serie con dos resistencias obteniéndose en el punto medio de las resistencias, el voltaje requerido. Se escogieron dos salidas para diferentes escalas de medición, que serán enviadas al circuito MAV por medio de un relé de dos posiciones, impidiendo que la señales estén al mismo tiempo. El circuito consta de un fusible que permite proteger los elementos que componen el divisor de voltaje.

### Acondicionamiento para la lectura de la señal de voltaje

Primero se procede al cálculo de las resistencias a utilizar en el divisor de voltaje, a partir de la ecuación 78, dado que el circuito MAV mantiene cierta linealidad en el rango de 0.5 a 1.5 Vdc, se procede:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{in} \quad (\text{Ec. 78})$$

Como datos se tiene que:

$$V_{in} = 127 \text{ V}$$

$$V_{out} = 1.5 \text{ V}$$

$R_2 = 810 \text{ k}\Omega$  (para limitar el paso de corriente)

$$R_3 = \frac{V_{out} * R_2}{V_{in} - V_{out}}$$

$$R_3 = \frac{1.5 \text{ V} * 810 \text{ k}\Omega}{127 \text{ V} - 1.5 \text{ V}}$$

$$R_3 = 9.68 \text{ k}\Omega, \text{ quedando en un valor de } 10 \text{ k}\Omega .$$

Mientras que para 260 V se tiene que:

$$V_{in} = 260 \text{ V}$$

$$V_{out} = 1.5 \text{ V}$$

$R_2 = 820 \text{ k}\Omega$  (para limitar el paso de corriente)

$$R_4 = \frac{V_{out} * R_2}{V_{in} - V_{out}}$$

$$R_4 = \frac{1.5 \text{ V} * 820 \text{ k}\Omega}{260 \text{ V} - 1.5 \text{ V}}$$

$$R_4 = 4.2 \text{ k}\Omega , \text{ quedando en un valor de } 4 \text{ k}\Omega .$$

### **Relación entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida**

La relación queda expresada en la ecuación 79.

$$r = \frac{V_{in}}{V_{sal}} \quad (\text{Ec. 79})$$

$$r = \frac{127 \text{ V}}{1.5 \text{ V}}$$

$$r = 84.6$$

$$r = \frac{260 \text{ V}}{1.5 \text{ V}}$$

$$r = 173.3$$

## Convertidor CA a CD para señales de voltaje y corriente

Los dos circuitos anteriores proporcionan señales alternas de voltaje de [-5 a +5] VAC proporcionales a las magnitudes presentes en las entradas de los mismos,

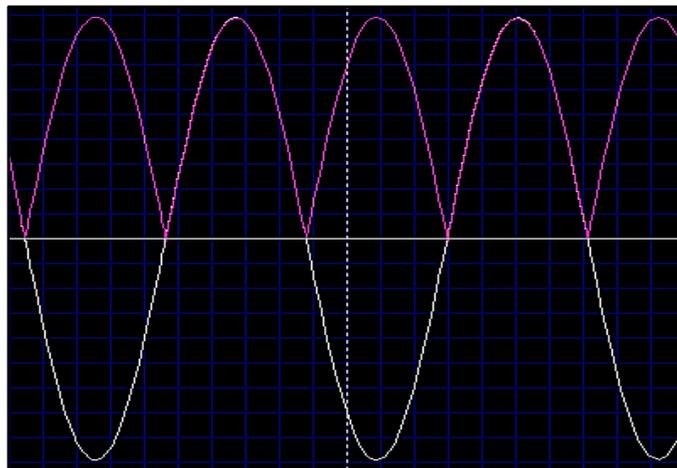
Para acondicionar la señal de voltaje AC no solo es necesario utilizar un convertidor de CA a DC, como el de la Figura 70, sino que también hace falta usar circuitos adicionales como seguidores de voltaje y filtros.

El circuito implementado comienza con un seguidor de tensión, colocado a la salida de la señal entregada por el sensor, con la finalidad de "proporcionar un efecto de aislamiento de la salida respecto de la señal de entrada, anulando los efectos de carga". [9]

La Tabla 11 detalla los elementos utilizados para implementar dicho circuito.

Posteriormente la señal es enviada hacia el circuito convertidor CA a CD, para obtener una señal continua pulsante, logrando eliminar los pulsos negativos que el Arduino mega no identifica en la entrada analógica, la Figura 69 muestra una onda senoidal rectificada.

Finalmente se ha colocado un capacitor  $C=10\mu\text{F}$  con el fin de obtener un rizado, de modo que se disminuya cualquier efecto de ruido que pueda alterar la medición.



**Figura 69.** Onda rectificada para 5 Vrms.

Señal roja ■ = onda rectificada

Señal blanca □ = onda senoidal

Tabla 11. Elementos utilizados en el convertidor CA a CD.

ELEMENTO	TIPO	CANT.
Amplificador operacional	OP07C	2
Amplificador operacional	TL072	1
Diodo	1N4148	2
Resistencia	20K $\Omega$	4
Resistencia	10K $\Omega$	5
Resistencia	6,6 K $\Omega$	1
Capacitor	10uF	1

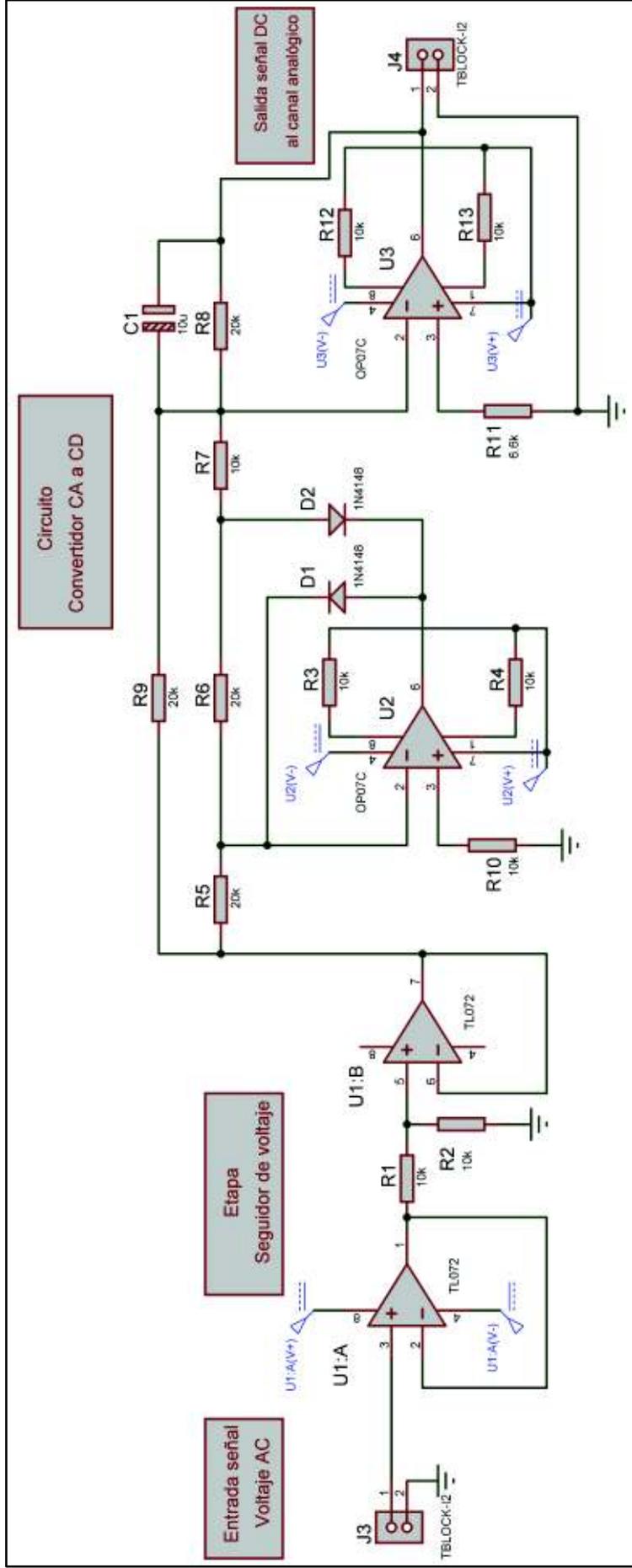


Figura 70. Circuito implementado para el acondicionamiento de la señal.

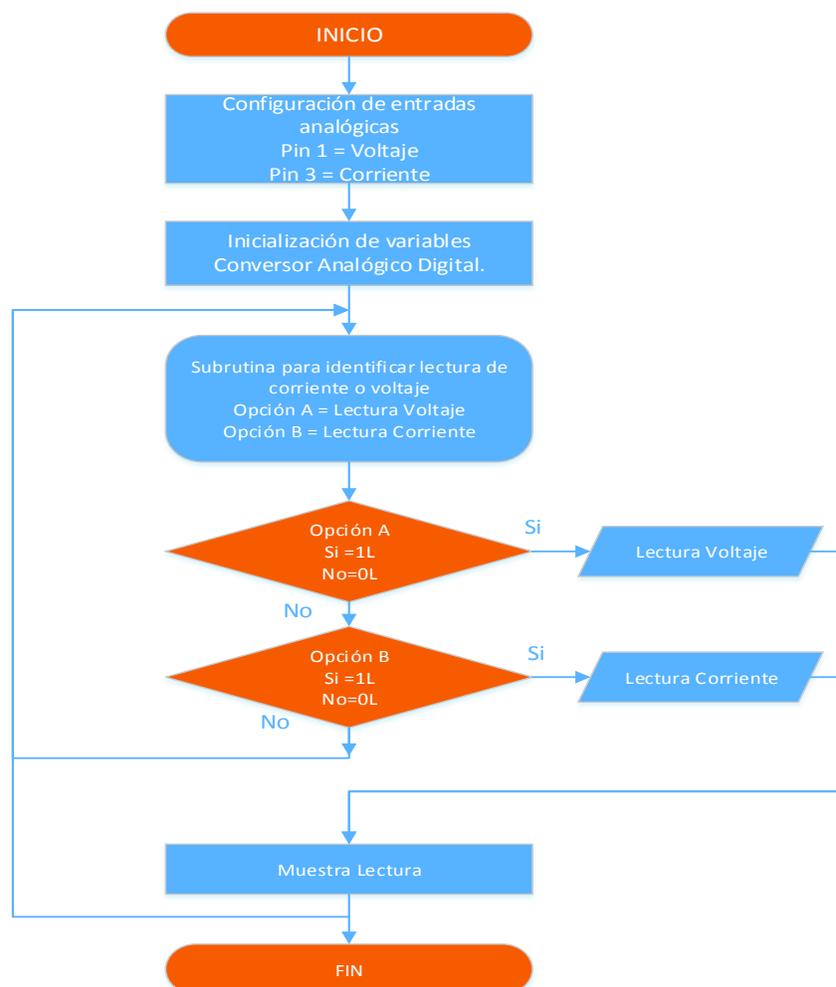
## Asignación de pines para las señales analógicas en Arduino

Una vez que se han tratado las señales están listas para ingresar a la tarjeta Arduino, la Tabla 12 muestra los pines utilizados para detectar el rango de mediciones, luego por medio de la programación se obtendrá los valores de las magnitudes (voltajes y corrientes) que serán mostradas en la pantalla táctil.

**Tabla 12.** Asignación de pines.

PIN	ASIGNACIÓN	TIPO
GND	Tierra	--
A1	Señal voltaje 0-130V	Canal analógico
A7	Señal voltaje 130-260V	Canal analógico
A3	Señal corriente	Canal analógico

### Diagrama de flujo para captar las señales analógicas



**Figura 71.** Diagrama de flujo general.

## Medición del factor de potencia

Para identificar el desfase entre las ondas de voltaje y corriente de los transformadores, se optó por utilizar amplificadores operacionales, específicamente el comparador Lm311 debido a ciertas características como: tiempo de respuesta, voltaje offset, voltaje de alimentación simple o dual, ganancia de voltaje (V/mV), entre los principales.

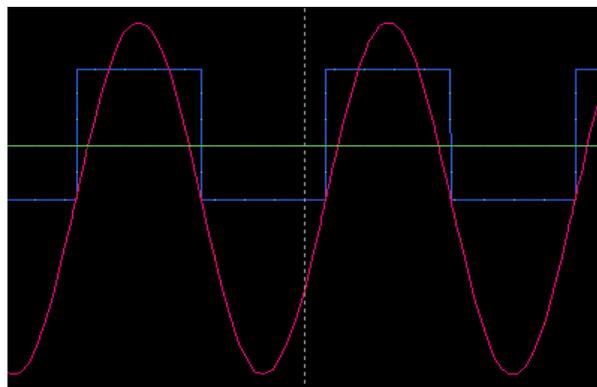
### Acondicionamiento de las señales para el detector de cruce por cero

La captación de señales se realiza a través del divisor de voltaje (para la señal de V) y por medio de la resistencia  $R=500$  (para la señal de corriente) disponibles en cada uno de los circuitos de tratamiento de señales implementados. El circuito de la Figura 73 se encarga de generar una onda cuadrada que oscila entre 0 y 5 VDC sincronizado por los cruces por cero. Mientras que si la señal alterna cruza de cero hacia valores negativos el circuito conmuta de 5 a 0 VDC es decir en los flancos negativos, la Figura 72 muestra la señal pulsatoria cuando se produce el cambio de flancos.

En la primera etapa del circuito se ha dispuesto de un seguidor de voltaje, con la finalidad de evitar caídas de voltaje y tener una aislación del circuito rectificador. Por último, se ha dispuesto de un diodo limitador de voltaje con el propósito de proteger la entrada digital dispuesta para la señal.

El circuito implementado ha sido diseñado según la recomendación del fabricante, es decir se puede encontrar en el datasheet del comparador LM 311.

Para tener una respuesta rápida y comparación con entradas ruidosa, que puede afectar el rango de voltaje de modo común de la entrada del comparador se ha utilizado un condensador de 100nF en derivación entre el voltaje de alimentación y tierra.



**Figura 72.** Forma de onda cuadrada del circuito detector de cruce por cero.

Cuando la onda alterna de voltaje o corriente cruza por cero y se dirige hacia valores positivos, el circuito conmuta de 0 a 5 V<sub>DC</sub>, es decir se activa en los flancos ascendentes.

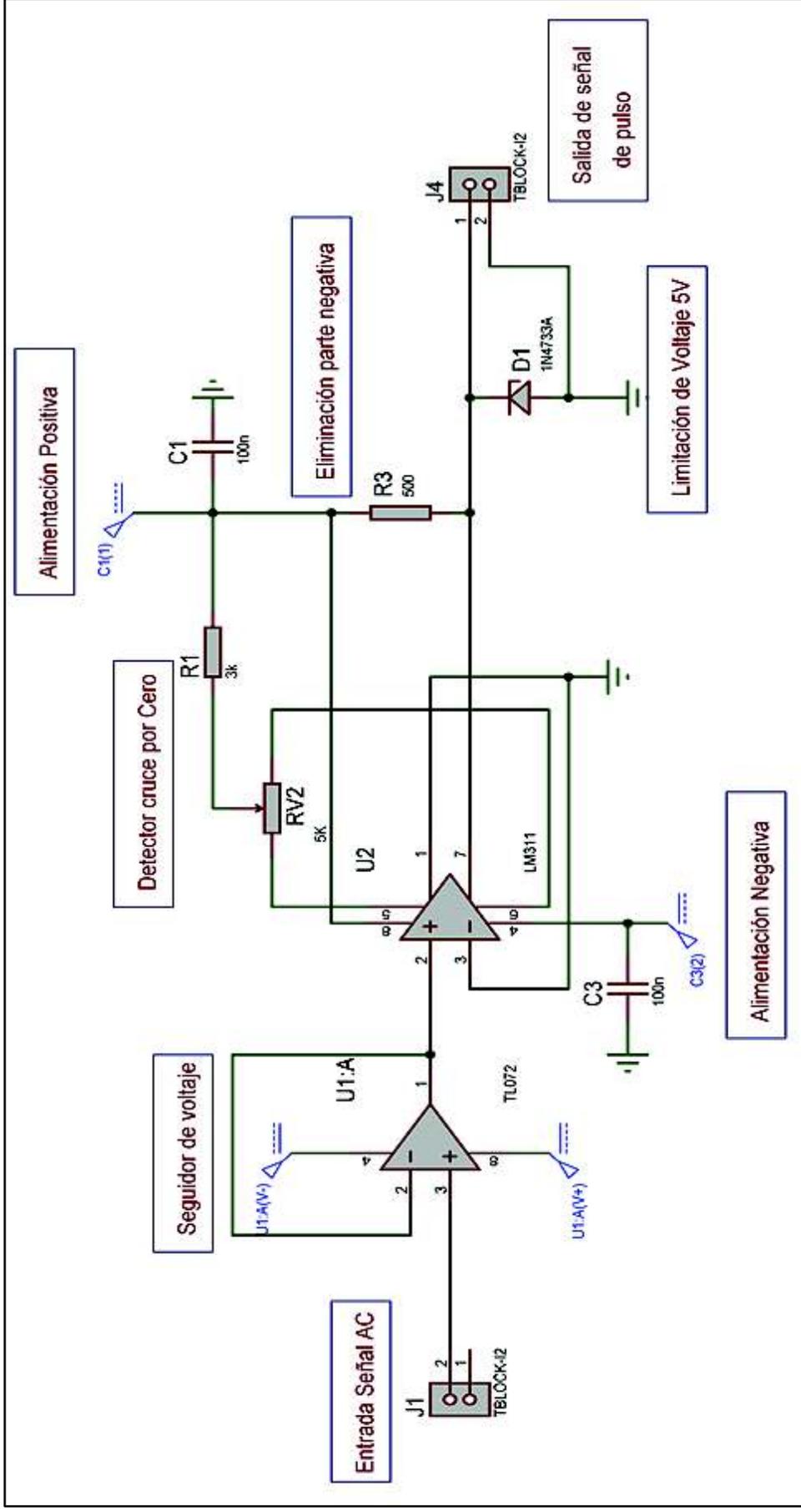


Figura 73. Circuito detector de cruce por cero.

## Obtención del ángulo de desfase

La Tabla 13 detalla los pines a utilizar en la plataforma Arduino para detectar los cruces por cero.

**Tabla 13.** Asignación de pines digitales

PIN	ASIGNACIÓN	INTERRUPCIÓN
GND	Tierra	--
PIN 18	Señal voltaje	Int 5
PIN 19	Señal corriente	Int 4

Estos pines tienen la ventaja de que pueden detectar cuando una señal se encuentra en el estado HIGH para producir una interrupción de manera que se pueda aplicar un timer para medir el tiempo de desfase entre las ondas.

Para definir una interrupción se necesitan tres parámetros:

- Un pin de Arduino que reciba la señal de disparo.
- Una condición de disparo.
- Una función que se ejecutará, cuando se dispare la interrupción.

La condición de disparo puede ser:

- LOW para activar la interrupción siempre que el pin esté bajo,
- CHANGE para activar la interrupción siempre que el pin cambie de valor
- RISING para disparar cuando el pasador cambia de bajo a alto,
- FALLING cuando el pasador cambia de alto a bajo.
- Para activar una interrupción se debe utilizar la función attachInterrupt.

Una vez designadas las interrupciones hay que activar un timer, de manera que se pueda obtener el tiempo entre interrupciones.

Cuando el tiempo transcurra el microprocesador se encargará de almacenar el valor de tiempo en cierta variable, por defecto este tiempo es almacenado en microsegundos por lo que se deberá multiplicar por un factor de conversión para anular unidades.

**Tabla 14.** Ciclos de una onda alterna

Frecuencia	60 Hz
Período	16.6 ms
Onda completa	$2\pi$ rad (360°)

De acuerdo a la Tabla 14, la onda senoidal cruza por completo en 16.6 ms, ese valor corresponde a 360 grados, al medir el tiempo de desfase entre las dos ondas se puede obtener el ángulo requerido por simple regla de tres, obteniéndose el factor de conversión de unidades en la ecuación 80.

$$\text{Radian} = \text{valor de tiempo} * 0.000377 \quad (\text{Ec. 80})$$

Una desventaja de utilizar interrupciones en Arduino es que este dispositivo se vuelve un poco lento pero los resultados se encuentran en un rango tolerable.

### Diagrama de flujo Factor de Potencia

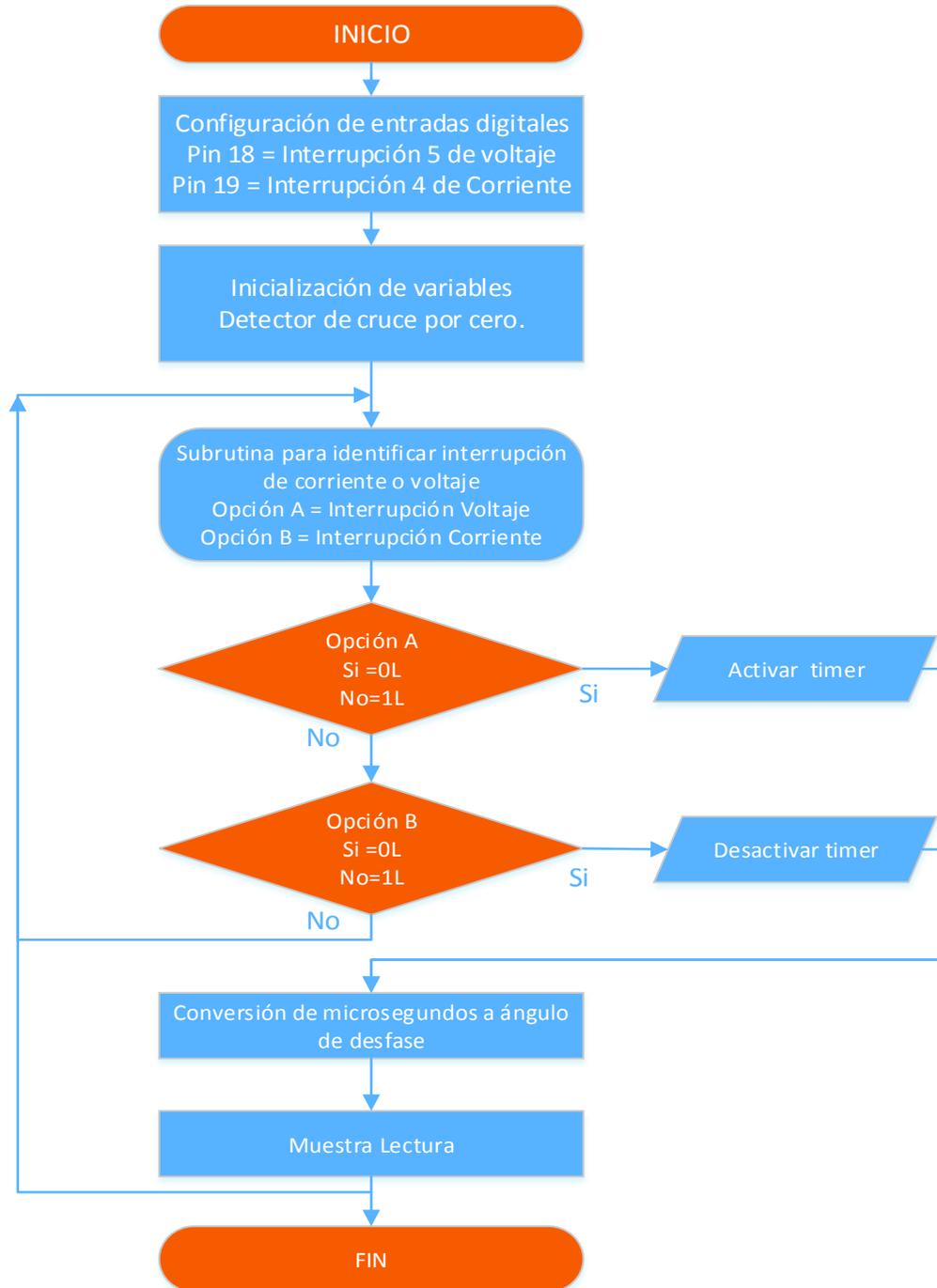


Figura 74. Diagrama de flujo para obtener el ángulo de desfase.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Implementación del módulo de transformadores

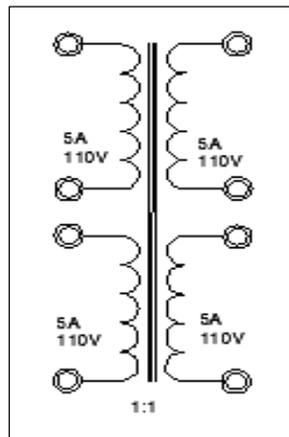
##### 3.1.1. Construcción de transformadores

Con los datos obtenidos en el cálculo de transformadores se establecen los materiales y parámetros constructivos requeridos y se exponen en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Materiales y equipos utilizados.

Materiales y equipos utilizados para construir cada transformador	
Chapas magnéticas	Hierro # 4 grano no orientado 19 Lbs.
Alambre de cobre	Esmaltado # 15 de rebobinar 7 Lbs.
Papel parafinado (aislamiento de bobinas)	4 metros (0.15 mm espesor)
Papel aislante (Carrete Núcleo)	1 metro (0.5mm espesor)
Cinta de enmascarar	1 Rollo
Borneras	8 (4 rojas y 4 negras)
Porta-fusible 5 amperios	4
Espagueti	1 metro (amarillo, negro y rojo)
Multímetro, pinzas, alicate, caudín, rollo de estaño, barniz y brocha	1

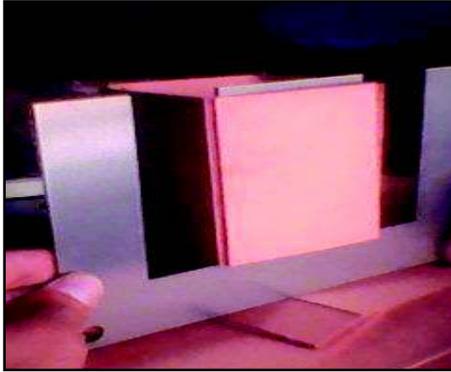
Las salidas de cada bobina se expondrán en un soporte como muestra la Figura 75.



**Figura 75.** Representación de las bobinas.

#### Construcción del carrete

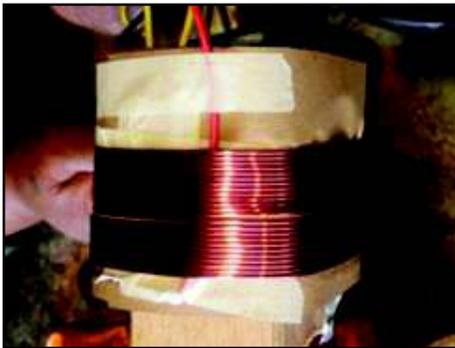
Se requiere una área de  $33.06 \text{ cm}^2$  (núcleo de chapas laminadas) para ello se emplea un carrete de un material aislante de tal modo que exista una separación del circuito eléctrico con el circuito magnético. Se utilizó un molde de madera para construir el carrete (ver Figura 76), verificando que coincida con el ancho de la E de la lámina silicio hierro.



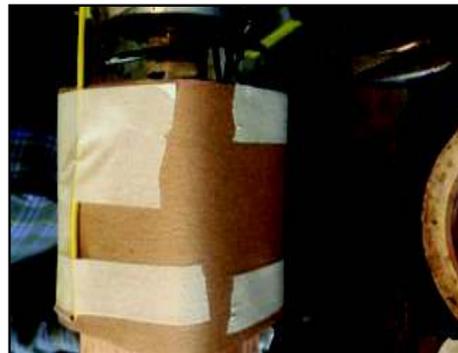
**Figura 76.** Carrete de papel parafinado.

### **Elaboración de Bobinados**

Con ayuda del molde de madera se procede a realizar las bobinas encima del carrete aislante (Figura 77), empleando el cable barnizado # 15 (131 espiras por bobina), los terminales de cada bobina deben estar debidamente aislados con espaguete (Figura 78).



**Figura 77.** Elaboración de bobinas.



**Figura 78.** Aislamiento de cada bobina.

Para este tipo de transformadores se deben fabricar cuatro bobinas idénticas semejantes, dos devanados en el lado primario y dos devanados en el lado secundario, pero debidamente aisladas entre sí, tal y como muestra la Figura 79.



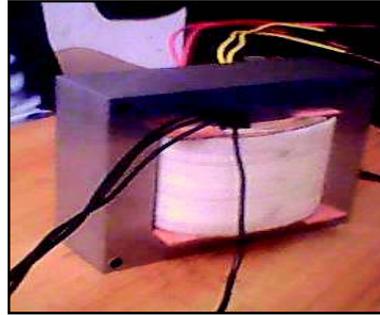
**Figura 79.** Bobinado completo primarios y secundarios.

## Armado del núcleo magnético

La colocación de las láminas de hierro (Figura 80) debe ser de forma alternada, es decir una lámina por delante y la siguiente por la parte posterior, para obtener un núcleo más compacto con el fin de reducir vibraciones y pérdidas. El núcleo terminado se presenta en la Figura 81.



**Figura 80.** Láminas de Hierro.



**Figura 81.** Núcleo Armado.

Terminada la construcción de los transformadores, se recomienda aplicar una capa de barniz protector (Figura 82), con la finalidad de alargar la vida útil del transformador, reducir pérdidas por vibraciones y evitar acumulación de la humedad del ambiente.



**Figura 82.** Barniz para bobinas y núcleo.

El proceso anterior se realizó para los seis transformadores, para proceder al montaje de cada transformador en las bases soporte, además se realizó las conexiones externas, tanto en borneras y porta-fusibles. Finalmente se colocan en la estructura principal (Figura 83).



**Figura 83.** Estructura principal del módulo.

### 3.1.2. Implementación del dispositivo de medición

A continuación, se detalla los pasos para la implementación del dispositivo de medición. Se procederá con el diseño de los circuitos impresos, después de haber verificado su funcionamiento, primero en el simulador PROTEUS y luego en el protoboard. El diseño de los circuitos impresos se ha realizado a través del módulo ARES disponible en el PROTEUS.

#### Diseño de las pistas a través del programa ARES

Mediante la herramienta ARES del simulador Proteus se facilitó la transferencia de los elementos desde ISIS a ARES, obteniéndose ciertas características como son:

- Auto-posicionamiento de elementos
- Auto-ruteo

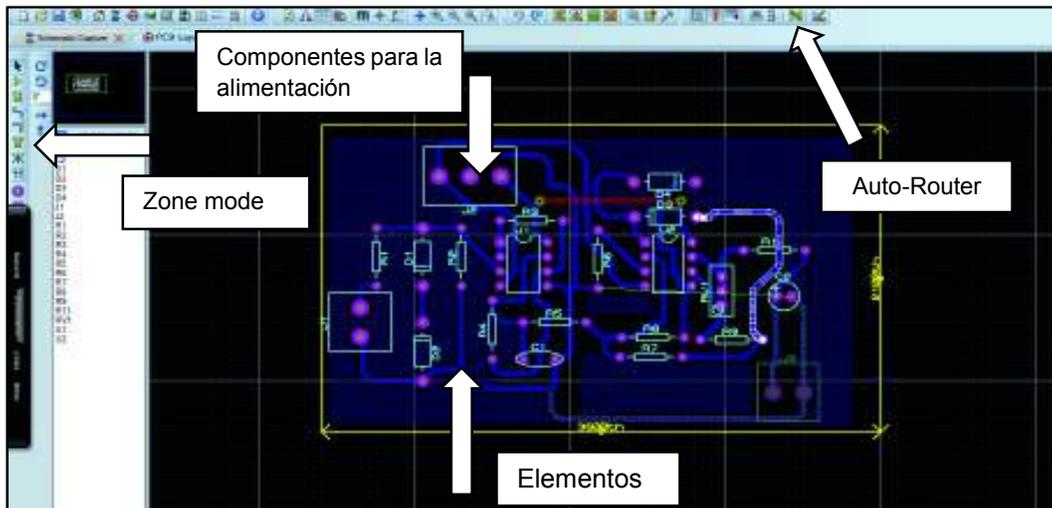
Para la realización del dispositivo de medición se ha implementado cinco circuitos, un circuito para la fuente DC, dos circuitos para la toma de las señales de voltaje y corriente y otros dos circuitos para la señal de cruces por cero (factor de potencia).

Antes de ubicar cada elemento se procede a delimitar el área de trabajo, es decir crear los bordes que componen la PCB, en la Figura 84, se puede apreciar con color amarillo el tamaño de la placa.



**Figura 84.** Delimitación del área de trabajo.

Una vez definido los bordes de la placa, se procede a colocar cada uno de los elementos como muestra la Figura 85, hay que tener en cuenta la trayectoria que puedan tomar las pistas, tamaño de los elementos, terminales para la conexión entre placas y alimentación, estas últimas deben colocarse en los extremos de la placa.



**Figura 85.** Colocación de elementos en la placa.

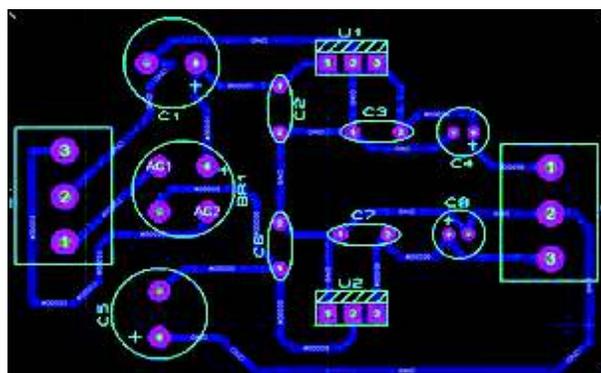
Las pistas se han desarrollado utilizando la opción “Auto-router”, gracias a su flexibilidad y rapidez se han generado cada una de las rutas en la placa del circuito. Para la pista de GND se ha utilizado la herramienta “Zone Mode”, el cual permite establecer un punto de masa general entre los puntos GND de cada componente.

### Exportación de circuitos

Mediante la herramienta “Export Graphics” del menú “Output” se ha procedido a la impresión de cada pista diseñada (Figuras 86, 87 y 88) para continuar con la transferencia de los circuitos sobre las placas. A continuación, se detalla cada PCB implementado.

- PCB de fuente de alimentación DC
- PCB del bloque para señal de voltaje
- PCB del bloque para señal de corriente
- PCB del bloque detector de cruce por cero

### PCB de fuente de alimentación DC



**Figura 86.** Ruteo de pistas en ARES.

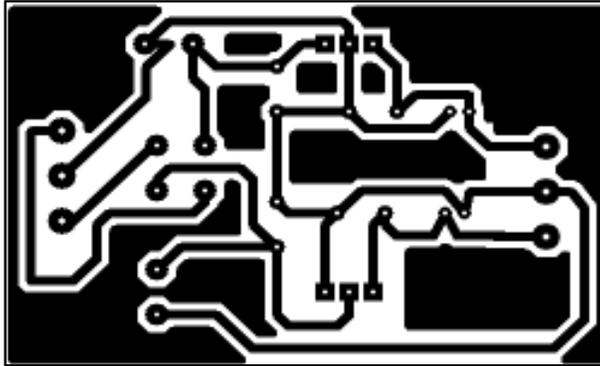


Figura 87. Fotolítico de las pistas cara inferior.

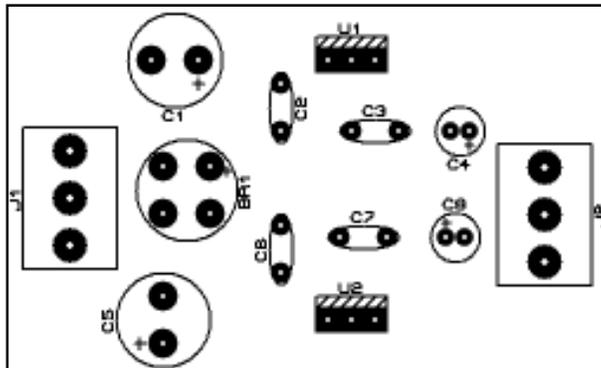


Figura 88. Plantilla de la cara superior.

### Montaje del dispositivo de medición

Los circuitos construidos han sido montados en una caja metálica con tapa, cuyas dimensiones son 300 x 400 mm. Cada placa fue perforada en sus extremos para poder insertar tornillería de modo que queden sujetos a la caja metálica, se puede apreciar en la Figura 89.

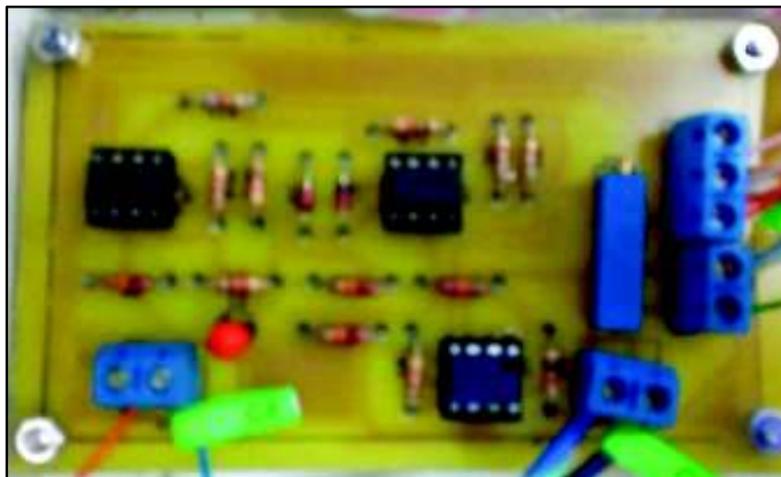


Figura 89. Placa sujeta con tornillería.

En el interior de la caja se colocó cada una de las placas, además se incluyó el transformador para poder alimentar la fuente dc.

Una vez colocados y ubicados todos los componentes, se procedió a realizar las conexiones entre ellos, como muestra la Figura 90, para luego verificar el encendido y correcto funcionamiento del dispositivo.

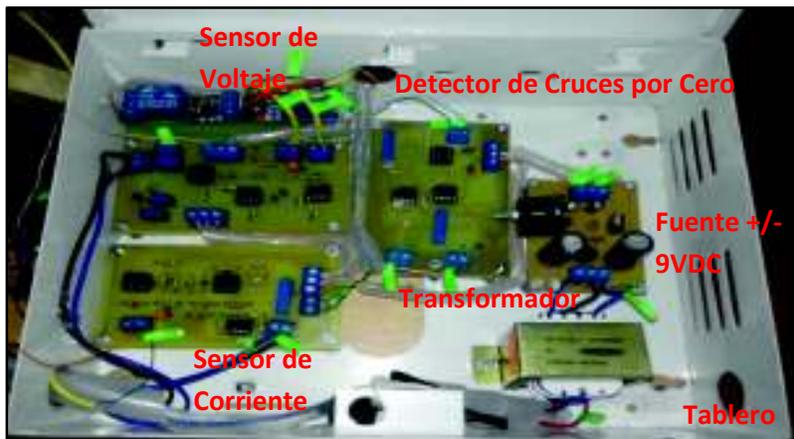


Figura 90. Ubicación interna de todos los componentes.

### 3.1.3. Implementacion terminada

El módulo consta de 6 transformadores monofásicos cada una debidamente identificado con T1, T2, T3, T4, T5 y T6, además posee dispositivo de mediciones con su respectivo botón de encendido y terminales para la obtención de las señales de voltaje y corriente, en la Figura 91 se muestra lo descrito anteriormente.



Figura 91. Módulo de transformadores.

### 3.2. Pruebas y análisis de resultados

Una vez concluido el diseño y construcción del módulo de transformadores se procede a realizar diferentes pruebas, con la finalidad de determinar el correcto funcionamiento y cumplimiento de los objetivos planteados.

Las pruebas que se realizan están detalladas a continuación:

- Pruebas del sistema de medición.
- Pruebas de vacío.
- Pruebas de cortocircuito.
- Conexión como transformador elevador y reductor.
- Conexión como autotransformador elevador y reductor.
- Conexión en banco de transformadores.
- Pruebas de polaridad.

Para las pruebas fueron necesarios algunos dispositivos adicionales, que son detallados en la Tabla 16, independientemente de la conexión realizada.

**Tabla 16.** Recursos para realizar las pruebas.

ELEMENTO	USO
Variac	Pruebas de cortocircuito Pruebas de vacío
Analizador de red	Pruebas de cortocircuito Pruebas de vacío
Watímetro	Pruebas de cortocircuito Pruebas de vacío
Pinza amperimétrica	Conexión de transformadores Comparación de medidas
Carga resistivas trifásicas y monofásicas	Prueba de transformador elevador y reductor. Prueba de autotransformador elevador y reductor. Prueba de banco de transformadores.

Para comprobar el funcionamiento del módulo de transformadores, se analiza el comportamiento de cada uno, se debe tener en cuenta que los transformadores utilizados son iguales; es decir, son de similares características eléctricas. Para realizar las pruebas, los seis transformadores están trabajando con la misma carga, de modo que permitan hacer las respectivas comparaciones.

### 3.2.1. Pruebas del sistema de medición

Para verificar que las lecturas entregadas por el sistema de medición (voltaje, corriente y factor de potencia), sean confiables se procedió a comparar instrumentos de referencia como: Pinza amperimétrica (Fluke 337) y Analizador de red Fluke, disponibles en el Laboratorio de máquinas de ingeniería eléctrica. La Tabla 17 muestra las especificaciones técnicas del Fluke 337, mientras que la Tabla 18 se refiere a las especificaciones técnicas del analizador de red Fluke 434.

**Tabla 17.** Especificaciones técnicas del Fluke 337.

Lectura	Rango	Porcentaje de error
Voltaje	0 – 600.0 V	±1.0 %
Corriente	0 – 999.9 A	±2.0 %

**Tabla 18.** Especificaciones técnicas analizador de red Fluke 434.

Lectura	Rango	Porcentaje de error
Factor de Potencia	0 – 1	± 0.1% con condiciones de carga nominal

#### Cálculo porcentaje de error

Los valores medidos por el dispositivo de medición son comparados con el instrumento de referencia. Si las lecturas se encuentran dentro de un rango de error tolerable, se podrá concordar que el instrumento tiene un rango aceptable, por lo tanto, se dará como válido. Para ello se ha desarrollado un análisis de las lecturas a través del cálculo del porcentaje (%) de error.

La siguiente ecuación permite encontrar dicho valor:

$$\%_{\text{error}} = \frac{|Lectura_p - Lectura_d|}{Lectura_p} \times 100 \quad [17] \quad (\text{Ec. 81})$$

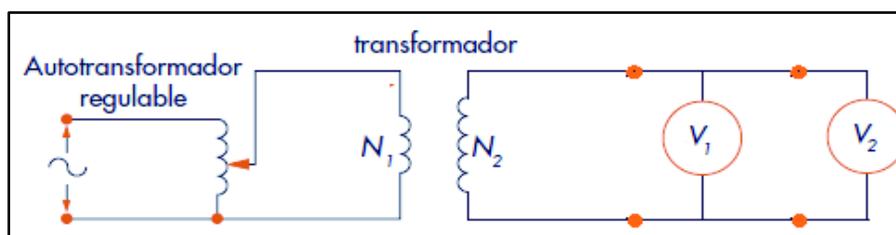
Dónde:

Lectura<sub>p</sub> = Lectura del elemento de referencia (elemento patrón).

Lectura<sub>d</sub> = Lectura del sistema de medición.

#### Pruebas para el sensor de voltaje

Para poder obtener diferentes rangos de voltaje, se ha utilizado el variac (Autotransformador de voltaje regulable), además se implementó el diagrama de la Figura 92, para obtener diferentes valores de voltaje que son expuestos en la Tabla 19.



**Figura 92.** Diagrama para obtener diferentes voltajes.

Dónde:  $V_1$ : Elemento de referencia [V]

$V_2$ : Dispositivo de medición [V]

**Tabla 19.** Comparación de voltajes entre el elemento referencia y el diseñado.

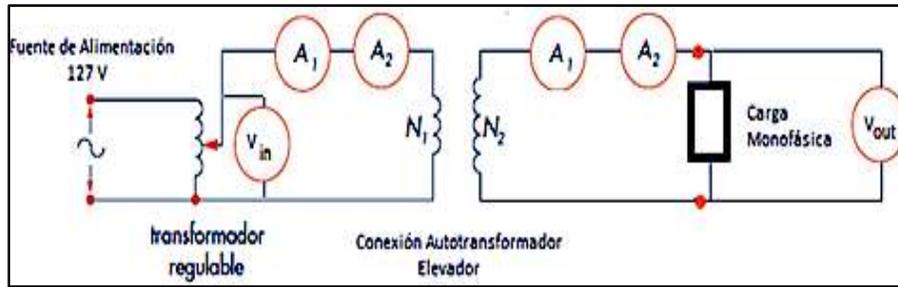
Número de lecturas	Elemento de referencia Voltios [V]	Dispositivo de medición Voltios [V]	Porcentaje de error Error [%]
1	4.4	4.3	2.3
2	5.3	5.5	3.8
3	9.7	9.9	2.06
4	23.8	23.9	0.42
5	50.3	50.0	0.6
6	75.0	74.9	0.13
7	102.5	102.1	0.4
8	110.3	109.8	0.45
9	115.3	115.1	0.17
10	120.9	120.6	0.25
11	126.9	126.5	0.24
12	134.8	134.6	0.15
13	145.5	145.6	0.07
14	146.5	146.6	0.07
15	218.2	217.4	0.36
16	250.2	250.6	0.16
Error Promedio			0.69

El error es mayor cuando las lecturas tomadas se acercan a cero debido a que la señal producida es muy baja cuando la medición es inferior a 0.8 voltios, pero se puede tomar como tolerable. El error obtenido en las muestras tomadas, tienen un rango de error por debajo del 1.5%.

Se verifica que, para el sensor de voltaje, las lecturas tomadas se aproximan al elemento de referencia, trabajando en el rango de [0.8 – 250 V] voltios.

### Pruebas para el sensor de corriente

Para la obtención de varios rangos de corriente, se realizó la conexión de la Figura 93 al implementar carga (resistencia monofásica ajustable) se pudo obtener diferentes rangos de corriente expuestos en la Tabla 20 y poder comprobar el funcionamiento.



**Figura 93.** Diagrama para obtener diferentes niveles de corriente.

Dónde:  $A_1$ : Elemento de referencia [A]  
 $A_2$ : Dispositivo de medición [A]  
 $V_{out}$ : Voltaje en la carga [V]  
 $V_{in}$ : Voltaje alimentación [V]

**Tabla 20.** Comparación de corrientes entre el elemento de referencia y el diseñado.

Número de lecturas	Voltaje de entrada $V_{in}$ [V]	Voltaje en la carga $V_{out}$ [V]	Elemento de referencia Amperios [A]	Dispositivo de medición Amperios [A]	Porcentaje de error Error [%]
1	63.7	127.0	0.2	0.22	10
2	6.5	12.7	0.6	0.53	11.6
3	6.5	12.7	1.1	1.08	1.8
4	12.6	24.4	1.1	1.07	2.72
5	17.1	33.9	1.4	1.5	7.14
6	21.0	40.7	1.8	1.7	5.5
7	12.6	24.4	2.2	2.03	7.72
8	17.1	33.9	3.0	2.85	5.0
9	21.0	40.7	3.5	3.47	0.86
10	43.1	84.0	3.7	3.55	4.05
11	48.3	94.0	4.3	4.1	4.65
12	60.0	116.0	5.2	5.02	3.46
13	71.5	139.0	6.2	6.0	3.22
14	43.1	84.0	7.6	7.4	2.6
15	48.3	94.0	8.6	8.4	2.3
16	60.0	116.0	10.4	10.1	2.9
17	43.2	84.2	10.3	9.9	3.8
18	71.5	139.0	12.7	12.5	1.6
19	84.0	160.0	14.8	15.1	2.2
20	43.2	84.2	20.5	19.5	4.9
Error Promedio					4.4

Para el desarrollo de esta prueba se implementó la conexión de autotransformador elevador, dicha conexión tuvo que ser alimentada a través del Variac con la finalidad de obtener diferentes rangos de corriente, de tal modo que sirvan para realizar una comparación de resultados entre el dispositivo de medición y el elemento de referencia.

De acuerdo a la Tabla 20 el error es mayor cuando las lecturas tomadas se acercan a cero debido a que la señal producida es muy baja, pero se puede tomar como tolerable.

El error obtenido para las muestras tomadas, tiene un valor por debajo del 5%, que para instrumentos de medida es aceptable.

Se verifica que las lecturas tomadas se aproximan al elemento de referencia, trabajando en el rango de [0.1 – 20 A].

### Prueba de cosfímetro

Para comprobar este dispositivo es necesario realizar las pruebas de cortocircuito y vacío en transformadores con el analizador de red como instrumento de referencia, los resultados se exponen en la Tabla 21.

**Tabla 21.** Porcentaje de error prueba de cosfímetro.

Prueba de cortocircuito				Prueba de vacío			
Transf. N°	F.P. Fluke	F.P. Dispositivo	Error %	Transf N°	F.P. Fluke	F.P. Dispositivo	Error %
T1	0.92	0.92	0	T1	0.59	0.57	3.38
T2	0.92	0.93	1.01	T2	0.58	0.58	0
T3	0.92	0.95	2	T3	0.58	0.56	1.72
T4	0.92	0.93	1.01	T4	0.57	0.57	0
T5	0.92	0.93	1.01	T5	0.52	0.51	1.92
T6	0.93	0.93	0	T6	0.55	0.56	1.81
<b>Error promedio</b>			<b>0.83</b>	<b>Error promedio</b>			<b>1.47</b>

Como se puede apreciar el porcentaje de error es bajo comprobándose el buen funcionamiento del instrumento. El factor de potencia es importante para adquirir las magnitudes de potencia activa, reactiva y aparente presentes en sistemas eléctricos.

### 3.2.2. Pruebas de transformadores monofásicos

#### Pruebas de vacío

Se realizó la prueba en cada transformador para conocer la magnitud de las pérdidas en el hierro, para ello se desarrolló el diagrama de la Figura 94.

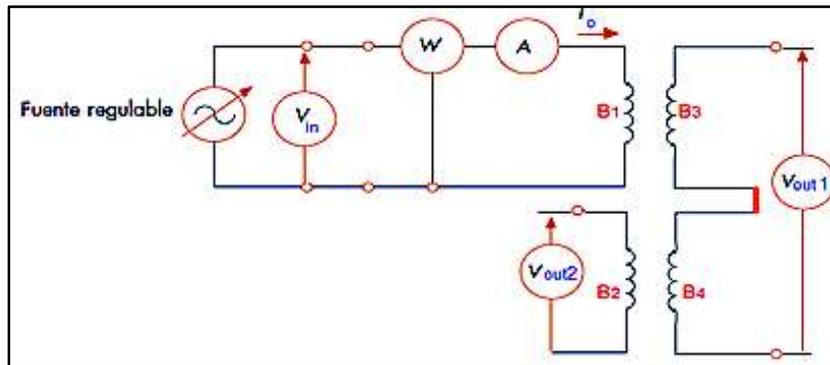


Figura 94. Diagrama de conexión para la prueba de vacío.

Una vez realizadas las conexiones, se procedió a la toma de valores de voltaje, corriente y potencia activa. En cada conexión se tuvo en cuenta los pasos definidos en el capítulo referente a metodología, para realizar el procedimiento de ensayo de vacío.

La Tabla 22 muestra un resumen de las magnitudes tomadas en cada transformador, para tener mayor información ver los Anexos (4 – 9).

Tabla 22. Datos de las pruebas de vacío referidas a la bobina 1.

TRANSFORMADOR	V <sub>nominal</sub> [V]	I <sub>0</sub> [A]	V <sub>salida</sub> [V]	P <sub>leída</sub> [W]	% Pérdidas
T <sub>1</sub>	127.9	0.38	128.8	29	2.6
T <sub>2</sub>	128.2	0.39	128.8	29	2.6
T <sub>3</sub>	128.2	0.38	126.0	29	2.6
T <sub>4</sub>	127.9	0.39	128.3	29	2.6
T <sub>5</sub>	128.4	0.49	129.4	33	3.0
T <sub>6</sub>	128.2	0.4	128.7	29	2.6

$$\%_{pérdidas\ fe} = \frac{\text{potencia leída}}{\text{potencia nominal}} \times 100 \quad (\text{Ec. 82})$$

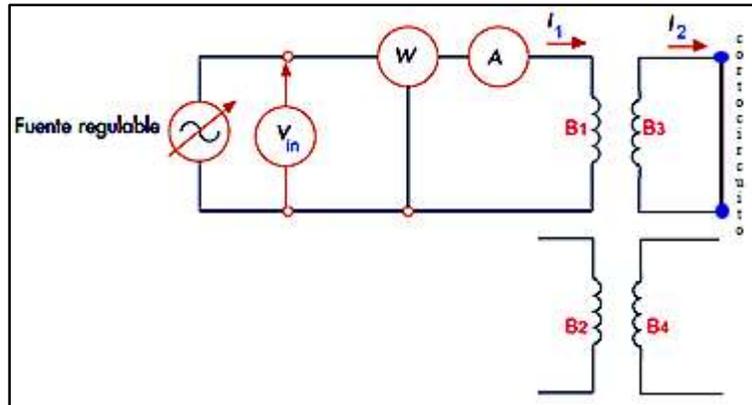
$$\text{Potencia nominal} = 1100\text{W}$$

De acuerdo a los resultados obtenidos de la Tabla 22, se puede definir que la corriente de vacío I<sub>0</sub> (componente de la corriente de excitación responsable de la pérdida en el núcleo) es relativamente baja debido a la resistencia del devanado (B1) en el que se realizó la prueba. Las lecturas del vatímetro hacen referencia a la potencia de pérdidas en el núcleo, por lo tanto,

no existen pérdidas grandes en el hierro (aproximadamente 3% de la potencia nominal), cuando el transformador esté trabajando a voltaje nominal.

### Pruebas de cortocircuito

Se realizó la evaluación en cada transformador con el motivo de conocer la magnitud de las pérdidas en el cobre, para ello se desarrolló el diagrama de la Figura 95.



**Figura 95.** Diagrama de conexión para la prueba de cortocircuito.

Realizadas las conexiones, se procedió a tomar valores de voltaje, corriente y potencia activa. En cada conexión se tuvo en cuenta los pasos definidos en el capítulo referente a la metodología, enfocado al procedimiento de ensayo de cortocircuito.

La Tabla 23 resume las magnitudes tomadas en cada transformador, para tener mayor información ver los Anexos (10 – 15).

**Tabla 23.** Datos de las pruebas de cortocircuito referidas a las bobinas 1 y 3.

TRANSFORMADOR	V <sub>entrada</sub> [V]	I <sub>1</sub> [A]	I <sub>2</sub> nominal [V]	P [W]	% Pérdidas
T <sub>1</sub>	5,2	5.5	5.4	28	2.5
T <sub>2</sub>	5.3	5.05	5.0	28	2.5
T <sub>3</sub>	5.2	5.3	5.4	27	2.4
T <sub>4</sub>	5.3	5.1	5.0	29	2.6
T <sub>5</sub>	4.8	4.96	4.9	21	1.9
T <sub>6</sub>	5.7	4.9	4.8	23	2

$$\% \text{pérdidas cu} = \frac{\text{potencia leída}}{\text{potencia nominal}} \times 100 \quad (\text{Ec. 83})$$

$$\text{Potencia nominal} = 1100\text{W}$$

Según los datos obtenidos de la Tabla 23, la tensión aplicada al primario del transformador es solo una pequeña fracción de la tensión nominal (127V), aproximadamente un 4%.

Por tanto, la corriente por pérdida en el núcleo y la corriente de magnetización se consideran despreciables, En este caso, el vatímetro registra la pérdida del cobre a plena carga, las cuáles son menores del tres por ciento de su potencia nominal.

### Pruebas como transformador elevador

La prueba se realizó para cada transformador de manera que se pueda verificar el principio de transformador elevador, es decir; la tensión secundaria es más alta que la tensión primaria.

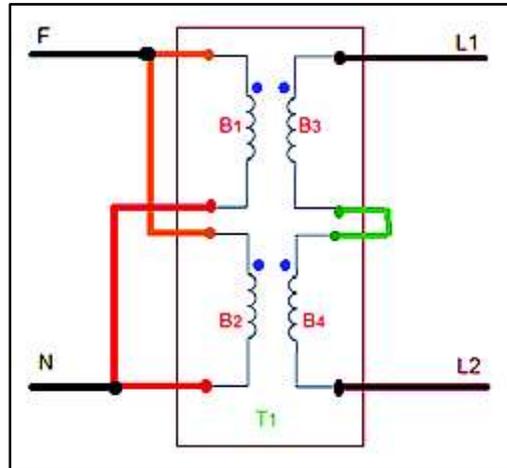


Figura 96. Diagrama de conexión como transformador elevador.

Las conexiones se muestran en la Figura 96, para después proceder a la toma de valores de voltaje y corriente, aplicando la respectiva carga a cada uno de los transformadores. La Tabla 24 resume las magnitudes tomadas en cada transformador, para tener mayor información ver Anexo (16).

Tabla 24. Datos de la prueba de transformador elevador.

TRANS.	VOLTAJE [V]		Relación de voltaje	CORRIENTE [A]		Relación de corriente
	Primario	Secundario		Primario	Secundario	
T1	121.3	245.7	2.02	6.9	3.2	0.46
T2	121.9	236.5	1.94	6.9	3.3	0.48
T3	121.4	233.4	1.92	6.6	3.2	0.48
T4	121.7	247.5	2.01	6.9	3.3	0.48
T5	121.2	237.9	1.96	7.0	3.3	0.47
T6	120.6	235.3	1.95	6.7	3.3	0.49

$$\text{Relación voltaje} = \frac{\text{voltaje}_{\text{secundario}}}{\text{Voltaje}_{\text{primario}}} \quad (\text{Ec. 84})$$

$$\text{Relación corriente} = \frac{\text{corriente}_{\text{secundario}}}{\text{corriente}_{\text{primario}}} \quad (\text{Ec. 85})$$

Las respectivas relaciones de voltaje y corriente se han calculado en base a las ecuaciones 55 y 56. Se puede apreciar que:

- El voltaje del secundario en cada transformador es aproximadamente el doble del primario, cumpliendo como transformador elevador.
- La corriente en el secundario es aproximadamente la mitad del primario, cumpliendo el enunciado de potencia que entra es la que sale.

### Pruebas como transformador reductor

Se realizó la prueba en cada transformador para verificar que se cumpla el principio de transformador reductor, es decir; la tensión secundaria es menor que la tensión primaria.

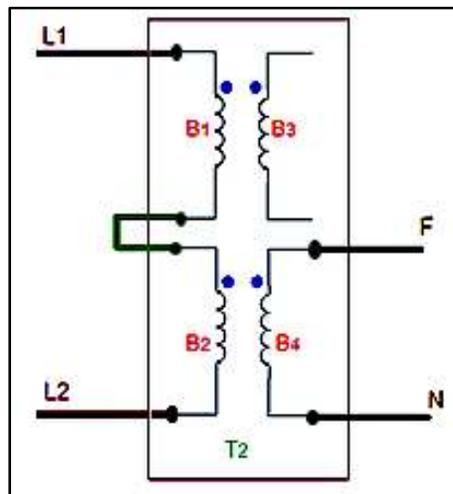


Figura 97. Diagrama de conexión como transformador reductor.

Las conexiones se muestran en la Figura 97, para después proceder a la toma de valores de voltaje y corriente, aplicando la respectiva carga a cada uno de los transformadores.

La Tabla 25 resume las magnitudes tomadas en cada transformador, para tener mayor información ver Anexo (17).

Tabla 25. Datos de la prueba de transformador reductor.

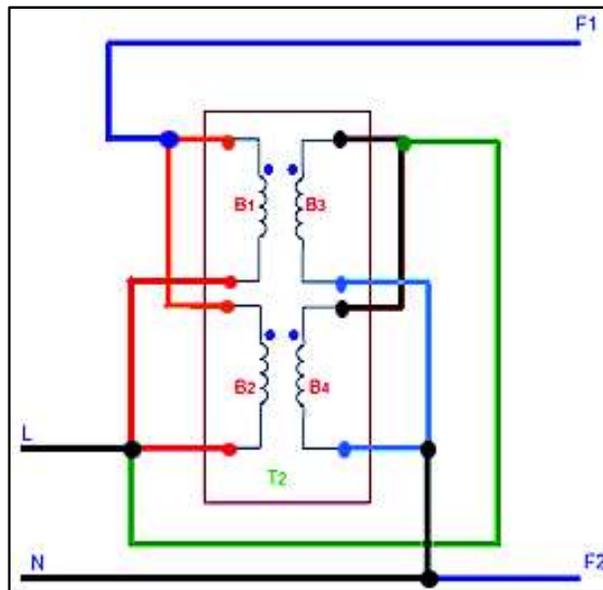
TRANS.	VOLTAJE [V]		Relación de voltaje	CORRIENTE [A]		Relación de corriente
	Primario	Secundario		Primario	Secundario	
T1	216.2	107.1	0.49	0.7	1.4	2.00
T2	214.7	106.1	0.49	0.7	1.5	2.14
T3	211.8	103.5	0.49	0.7	1.4	2.00
T4	216.4	107.4	0.49	0.7	1.4	2.00
T5	211.9	106.1	0.50	0.8	1.5	1.88
T6	211.8	104.9	0.49	0.8	1.4	1.75

Durante la prueba se pudo apreciar que:

- El voltaje del secundario en cada transformador es aproximadamente la mitad del primario, comportándose como transformador reductor.
- La corriente en el secundario es aproximadamente el doble del primario, cumpliendo con el enunciado de potencia que entra es igual a la que sale.

### Pruebas como autotransformador elevador

Para realizar las pruebas de cada transformador se procedió a conectar como autotransformador elevador, es decir, formar un único devanado que forma parte tanto del devanado primario como del secundario. La tensión secundaria es mayor que la tensión primaria. Para ello se desarrolló el diagrama de la Figura 98.



**Figura 98.** Diagrama de conexión como autotransformador elevador.

Se procedió a tomar valores de voltaje y corriente, aplicando la respectiva carga, en cada uno de los transformadores.

La Tabla 26 resume las magnitudes tomadas en cada transformador, para tener mayor información ver Anexo (18).

**Tabla 26.** Datos de las pruebas autotransformador elevador.

TRANS.	VOLTAJE [V]		Relación de voltaje	CORRIENTE [A]		Relación de corriente
	Primario	Secundario		Primario	Secundario	
T1	121.3	245.7	2.02	6.9	3.2	0.46
T2	122.9	243.0	1.98	7.1	3.2	0.45
T3	121.2	242.9	2.00	7.1	3.3	0.46
T4	121.7	247.5	2.03	6.9	3.3	0.48
T5	121.1	239.6	1.98	7.0	3.2	0.46
T6	121.1	240.0	1.98	7.0	3.4	0.48

Los datos registrados fueron tomados cuando a la conexión se aplicó una carga monofásica de características 220V, 3A. Mediante la Tabla 26 se puede afirmar que:

- El voltaje del secundario en cada transformador es aproximadamente el doble del primario, comportándose como autotransformador elevador.
- La corriente en el secundario es aproximadamente la mitad del primario.

### Pruebas como autotransformador reductor

Para realizar las pruebas en cada transformador se procedió a conectar como autotransformador reductor, observar la Figura 99, es decir formar un devanado único que forma parte tanto del devanado primario como del secundario. La tensión secundaria es menor que la tensión primaria.

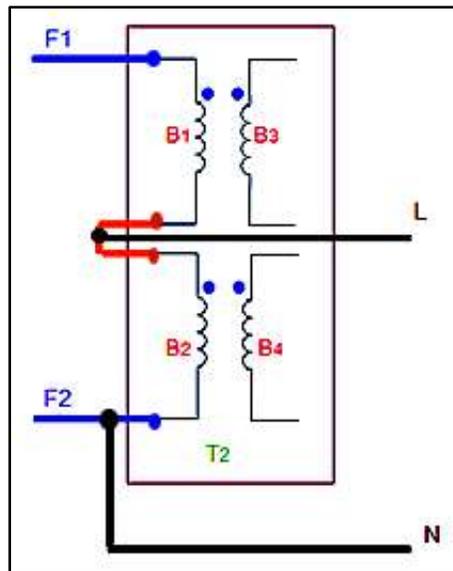


Figura 99. Diagrama de conexión como autotransformador reductor.

Se obtienen valores de voltaje y corriente, aplicando la respectiva carga, en cada uno de los transformadores. La Tabla 27 resume las magnitudes tomadas en cada transformador, para tener mayor información ver Anexo (19).

Tabla 27. Datos de las pruebas autotransformador reductor.

TRANS.	VOLTAJE [V]		Relación de voltaje	CORRIENTE [A]		Relación de corriente
	Primario	Secundario		Primario	Secundario	
T1	216.4	107.7	0.5	0.7	1.4	2.00
T2	214.1	106.8	0.5	0.7	1.4	2.00
T3	212.0	105.3	0.49	0.8	1.4	1.75
T4	216.2	107.7	0.5	0.8	1.5	1.87
T5	211.3	105.9	0.5	0.8	1.4	1.75
T6	211.7	105.6	0.5	0.8	1.5	1.87

Los datos registrados en la Tabla 27 fueron tomados cuando a la conexión se aplicó una carga monofásica de características 110V, 1.4A.

- El voltaje del secundario en cada transformador es aproximadamente la mitad del primario, cumpliendo como autotransformador reductor.
- La corriente en el secundario es aproximadamente el doble del primario.

### Grupo de conexión yy0 con neutro

Para realizar esta prueba se procedió a conectar tres transformadores monofásicos de acuerdo a la Figura 100, se obtuvo las magnitudes de voltaje, corriente tanto de la fase como de línea, del primario y el secundario.

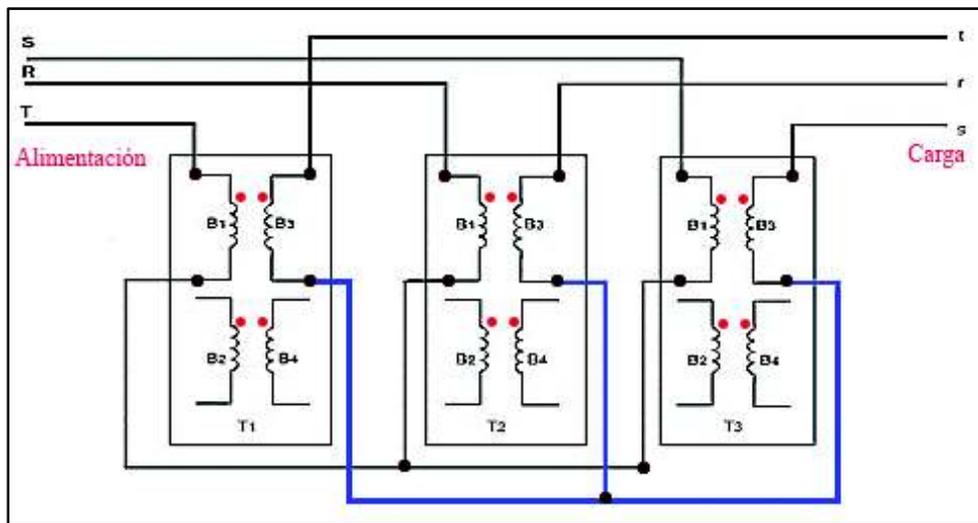


Figura 100. Diagrama de Conexión Yy0.

Al aplicar una carga trifásica se obtuvo valores de voltaje y corriente, la Tabla 28 resume las magnitudes tomadas en la conexión.

. **Tabla 28.** Resultados de la conexión YY0 con neutro.

GRUPO DE CONEXIÓN Yy0					
VOLTAJE	Carga	Primario		Secundario	
		$V_L$ [V]	$V_F$ [V]	$V_{L'}$ [V]	$V_{F'}$ [V]
	1	212.7	210.5	123.8	121.2
2	213.4	207	120.5	114	
CORRIENTE	Carga	Primario		Secundario	
		$I_L$ [A]	$I_F$ [A]	$I_{L'}$ [A]	$I_{F'}$ [A]
	1	2.5	2.5	2.4	2.4
2	4.5	4.5	4.2	4.2	

Se realizó una comparación de las características eléctricas para establecer las conclusiones relacionadas a su comportamiento, ver Anexos (20-21-22-23).

Las relaciones fundamentales para esta conexión son las siguientes:

- Las corrientes de línea en los devanados primario y secundario son iguales a las de los correspondientes devanados en cada transformador.
- Todos los voltajes entre líneas tienen valores aproximados a la relación de transformación (en los secundarios hay caída de voltaje debido a las cargas).
- Se cumple la relación para este tipo de conexión:  $\frac{V_L}{V_{L'}} = \frac{\sqrt{3} V_F}{\sqrt{3} V_{F'}} = a$

### Grupo de conexión dd0

Para esta prueba se procedió a conectar tres transformadores monofásicos de acuerdo a la Figura 101, se obtuvo las magnitudes de voltaje y corriente del primario y secundario.

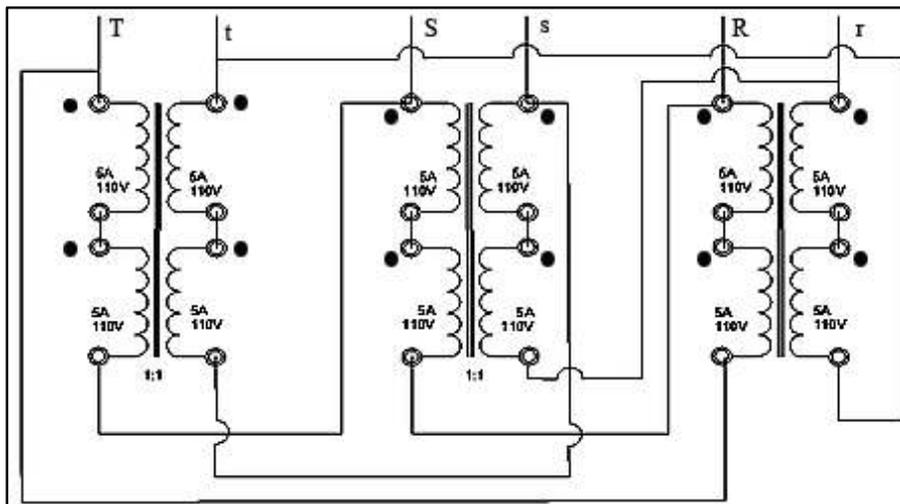


Figura 101. Diagrama de conexión Dd0.

Al aplicar una carga trifásica se obtuvo valores de voltaje y corriente, la Tabla 29 resume las magnitudes tomadas en la conexión.

Tabla 29. Resultados en conexión Dd0.

Grupo de conexión: Dd0					
VOLTAJES	Paso de Carga	Primario	Secundario		
		$V_L$ [V]	$V_F$ [V]	$V_{L'}$ [V]	$V_{F'}$ [V]
	0	214.3	214.3	214.4	214.4
	1	212.0	212.0	211.3	211.3
	2	212.3	212.3	209.3	209.3
CORRIENTES	Paso de Carga	Primario		Secundario	
		$I_L$ [A]	$I_F$ [A]	$I_{L'}$ [A]	$I_{F'}$ [A]
	0	0.2	0.2	0.2	0.2
	1	1.4	0.8	1.3	0.6
	2	2.8	1.5	2.8	1.4

Al realizar la comparación de magnitudes eléctricas se obtuvo lo siguiente.

- Las relación fundamental de voltaje  $\bar{V}_L = \bar{V}_{L'} = \bar{V}_F = \bar{V}_{F'}$ , según la Tabla 29 cumple con la condición, para obtener más datos ver Anexos (24-25-26).
- Las corrientes cumplen con la expresión  $I_L = \sqrt{3} I_F$
- La relación de transformación es:  $\frac{V_L}{V_{L'}} = \frac{V_F}{V_{F'}} = a$

### Pruebas de polaridad

Para determinar la polaridad se hizo un puente en dos bornes adyacentes de dos devanados para luego aplicar un voltaje nominal (127V) a cualquiera de los devanados después se realizó la medición en los extremos para determinar si la polaridad resultante es aditiva o sustractiva, tal y como indica la Figura 102 (a).

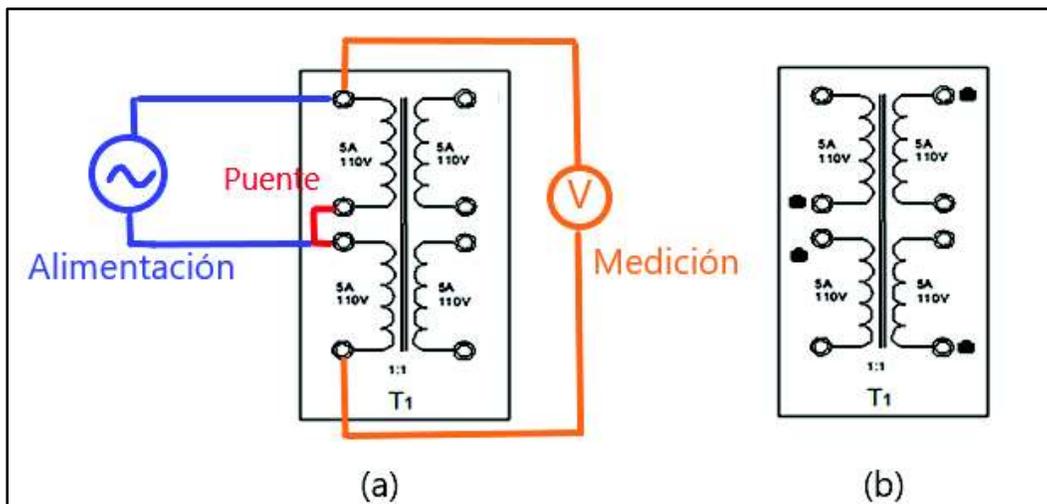


Figura 102. Esquema prueba de polaridad.

Finalmente, una vez determinadas las polaridades en cada bobina se señala mediante un punto al lado de la bobina que resulta como aditiva, como muestra la Figura 102 (b). Para ver la polaridad relativa de cada transformador observar el Anexo 27.

Al realizar la prueba se obtuvo que:

- La polaridad es aditiva si el voltaje medido entre los otros dos bornes de los devanados es mayor que el voltaje de alimentación.
- La polaridad es sustractiva si el voltaje medido entre los dos bornes de los devanados es menor que el voltaje de alimentación.
- La polaridad de los transformadores indica el sentido relativo instantáneo del flujo de corriente en los terminales del bobinado primario con respecto a la dirección del flujo de corriente en los terminales del bobinado secundario.

## 4. CONCLUSIONES

El circuito rectificador de onda completa realizado con amplificadores operacionales reduce el voltaje de barrera de los diodos rectificadores considerablemente, de tal manera que facilita la rectificación de señales de muy pequeña amplitud.

El uso de la plataforma Arduino tiene librerías disponibles que son de fácil aprendizaje, convirtiéndolo en una herramienta adecuada en la compilación y elaboración del programa, tanto para la presentación de datos como la obtención de los mismos.

Para la adquisición de datos (corriente y voltaje) se utiliza un transformador de corriente y divisor de voltaje respectivamente, de tal modo que entreguen al usuario un ambiente de seguridad y comodidad, cuya ventaja es proteger la plataforma Arduino.

Los ensayos en los transformadores monofásicos permiten al estudiante tener experiencia al momento de aplicar carga, de tal manera que exista una idea clara en temas relacionados a sistemas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

Es importante definir la potencia nominal requerida en los transformadores, principalmente para establecer los parámetros constructivos: eléctricos (espiras por voltio) y magnéticos (sección del núcleo), de tal manera que dichos transformadores soporten 110 V y 5 A en cada bobina.

Es primordial armar el núcleo de un transformador con chapas en forma de E, y colocarlas en forma invertida, una con respecto a la siguiente con el fin de aprovechar el flujo magnético casi es su totalidad, de esta manera se evita el entrehierro o espacio de aire para disminuir pérdidas de potencia.

Las pruebas de funcionamiento del dispositivo de medición han entregado resultados válidos, para el sensor de voltaje con un porcentaje de error menor del 1.5%, mientras que para el sensor de corriente menor al 5%, con respecto del instrumento patrón, lo cual valida su funcionamiento.

## RECOMENDACIONES

No sobrecargar los transformadores, con la finalidad de alargar la vida útil de los aislantes.

Cuando se realice cualquier tipo de conexión es importante usar un diagrama que facilite la implementación del circuito, evitando malas conexiones, prevención de la red o a su vez que los fusibles se fundan.

Al utilizar la medición del factor de potencia la pantalla se vuelve demasiado lenta, por lo que si se requiere realizar mediciones de corriente y voltaje se debe resetear el dispositivo, para acelerar el funcionamiento.

No enviar señales de voltaje y corriente sin previamente haber encendido el dispositivo de medición, caso contrario puede existir averías o daños en los circuitos.

Se recomienda en el caso de usar osciloscopio para observar las señales en la placa utilizar un transformador de aislamiento.

Es importante realizar un mantenimiento periódico, principalmente revisando portafusibles o fusibles ya que al realizar cualquier ensayo con carga los fusibles pueden fundirse sin que el operador se haya dado cuenta.

En caso de existir alguna falla o problema se recomienda revisar el manual de usuario y así poder dar solución a cualquier inquietud.

La herramienta Arduino mega permite explorar diversos temas, por lo que se recomienda para temas futuros integrar otros parámetros como presentación de gráficas de las señales obtenidas en carga o vacío, con el fin de aproximarse a un analizador de red.

Para una mejora en la estructura, se recomienda implementar unas ruedas al soporte, con la finalidad de facilitar el desplazamiento del módulo.

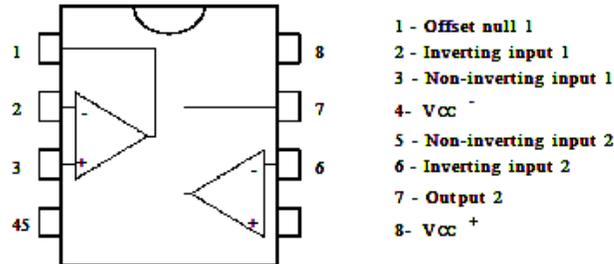
## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Wilcox, Máquinas Eléctricas, México DF, Limusa, 1974.
- [2] M. Rodríguez, (2012). Transformadores [En línea]. Available: <http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Trafos.pdf>.
- [3] J. Alvarez, (2011). Máquinas Eléctricas [En línea]. Available: [https://www4.frba.utn.edu.ar/html/Electrica/archivos/electrotecnica\\_y\\_maquinas\\_electricas/apuntes/7\\_transformador.pdf](https://www4.frba.utn.edu.ar/html/Electrica/archivos/electrotecnica_y_maquinas_electricas/apuntes/7_transformador.pdf).
- [4] B. Guru y R. Hiziroglu, Transformador Ideal, de *Máquinas Eléctricas y Transformadores*, México DF, Oxford University Press, 2003.
- [5] R. Domínguez, Faradayos, (2015). [En línea]. Available: <http://faradayos.blogspot.com/2015/01/polaridad-transformadores-aditiva-sustractiva-determinacion.html>.
- [6] E. Harper, Curso de Transformadores y Motores de Inducción, México: Limusa, 1976.
- [7] H. Cutler, (2016). Transformador Monofásico [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/JohanderSuarez/modulo-4-transformadores>. [Último acceso: 9 9 2016]..
- [8] D. Hermosa , *Electronica Aplicada*, México DF: Alfa Omega Grupo Editor, 2013.
- [9] F. Driscoll y R. Coughlin, *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales.*, México DF: Prentice Hall HISPANOAMERICA, 1993.
- [10] Catedu, (2016). Circuitos Electrónicos Básicos [En línea]. Available: [http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3079/html/44\\_filtro\\_por\\_condensador.html](http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3079/html/44_filtro_por_condensador.html).
- [11] J. Penagos, *Cómo programar el lenguaje C los Microcontroladores.*, Quito: 034985 IEPI, 2010.
- [12] O. Torrente, *El mundo Genuino Arduino*, México DF: Alfa Omega , 2016.
- [13] Geek Factory, (2016). Diagrama de pines arduino [En línea]. Available: <http://www.geekfactory.mx/tutoriales/tutoriales-arduino/diagrama-de-pines-arduino>.
- [14] Silicio.MX, (2015). Sensor de Efecto Hall [En línea]. Available: <http://silicio.mx/sensor-de-corriente-ac-no-invasiva-100amax>.
- [15] Inven, (2015). Shield TFT LCD + Pantalla táctil TFT de 3.2" Para Arduino MEGA 2560 [En línea]. Available: <http://inven.es/outlet-y-ofertas/302-shield-tft-lcd-pantalla-tactil-tft-de-32-para-arduino-mega-2560.html>.
- [16] F. Garzón, (2012). Construcción de Transformador [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/junior198619/construccion-y-diseo-de-un-transformador-monofasico>.

## 6. ANEXOS

### Anexo 1 Amplificador operacional TI 082.

#### Configuración de Pines



#### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	TL082M, AM, BM	TL082I, AI, BI	TL082C, AC, BC	Unit
V <sub>CC</sub>	Supply voltage - note 1)	±18			V
V <sub>i</sub>	Input Voltage - note 2)	±15			V
V <sub>id</sub>	Differential Input Voltage - note 3)	±30			V
P <sub>tot</sub>	Power Dissipation	680			mW
	Output Short-circuit Duration - note 4)	Infinite			
T <sub>oper</sub>	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	°C
T <sub>stg</sub>	Storage Temperature Range	-65 to +150			°C

Symbol	Parameter	TL082I,M,AC,AI,AM, BC,BI,BM			TL082C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
THD	Total Harmonic Distortion (T <sub>amb</sub> = +25°C), f = 1kHz, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF, A <sub>v</sub> = 20dB, V <sub>o</sub> = 2V <sub>pp</sub>		0.01			0.01		%
e <sub>n</sub>	Equivalent Input Noise Voltage R <sub>s</sub> = 100Ω, f = 1kHz		15			15		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
∅ <sub>m</sub>	Phase Margin		45			45		degrees
V <sub>oi</sub> /V <sub>o2</sub>	Channel Separation A <sub>v</sub> = 100		120			120		dB

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_{CC} = \pm 15V$ ,  $T_{amb} = +25^{\circ}C$  (unless otherwise specified)

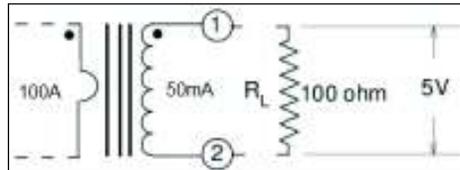
Symbol	Parameter	TL082I,M,AC,AI,AM, BC,BI,BM			TL082C			Unit	
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.		
$V_{io}$	Input Offset Voltage ( $R_s = 50\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	TL082	3	10		3	10	mV	
		TL082A	3	6					
		TL082B	1	3					
		TL082		13			13		
		TL082A		7					
		TL082B		5					
$DV_{io}$	Input Offset Voltage Drift		10			10	$\mu V/^{\circ}C$		
$I_{io}$	Input Offset Current - note 1) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		5	10		5	100	pA nA	
				4			10		
$I_{ib}$	Input Bias Current -note 1 $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		20	200		20	400	pA nA	
				20			20		
$A_{vd}$	Large Signal Voltage Gain ( $R_L = 2k\Omega, V_o = \pm 10V$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		50	200		25	200	V/mV	
			25			15			
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ( $R_s = 50\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		80	86		70	86	dB	
			80			70			
$I_{CC}$	Supply Current, no load $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1.4	2.5		1.4	2.5	mA	
				2.5			2.5		
$V_{icm}$	Input Common Mode Voltage Range	$\approx 11$	-15 -12		$\approx 11$	-15 -12	V		
CMR	Common Mode Rejection Ratio ( $R_s = 50\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		80	86		70	86	dB	
			80			70			
$I_{os}$	Output Short-circuit Current $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		10	40	60	10	40	60	mA
			10		60	10		60	
$\pm V_{opp}$	Output Voltage Swing $T_{amb} = +25^{\circ}C, R_L = 2k\Omega$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		10	12		10	12	V	
			12	13.5		12	13.5		
			10			10			
			12			12			
SR	Slew Rate ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_m = 10V, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$ , unity gain		8	16		8	16	$V/\mu s$	
$t_r$	Rise Time ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_m = 20mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$ , unity gain			0.1			0.1	$\mu s$	
$K_{ov}$	Overshoot ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_m = 20mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$ , unity gain			10			10	%	
GBP	Gain Bandwidth Product ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_m = 10mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF, f = 100kHz$		2.5	4		2.5	4	MHz	
$R_i$	Input Resistance		1012			1012	$\Omega$		

**Anexo 2 Sensor de corriente efecto Hull.**

<b>SENSOR EFECTO HULL MODELO YHDC SCT-013-000</b>	
<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>	
Corriente de entrada	0 – 100A
Corriente salida	0 – 50 mV
Alimentación	No tiene
Linealidad	+/- 3%
Clase de protección	Grado B
Temperatura de servicio	-25 ... +80 °C
Material de la carcasa	Poliéster termoplástico
Fuerza dieléctrica	1000V AC1min 5mA



**ESQUEMA ELÉCTRICO**



**DIMENSIONES**

**Front View**

**Side View**

**Current output type**

**Voltage output type**

**Schematic diagram**

**Three-core plug size**

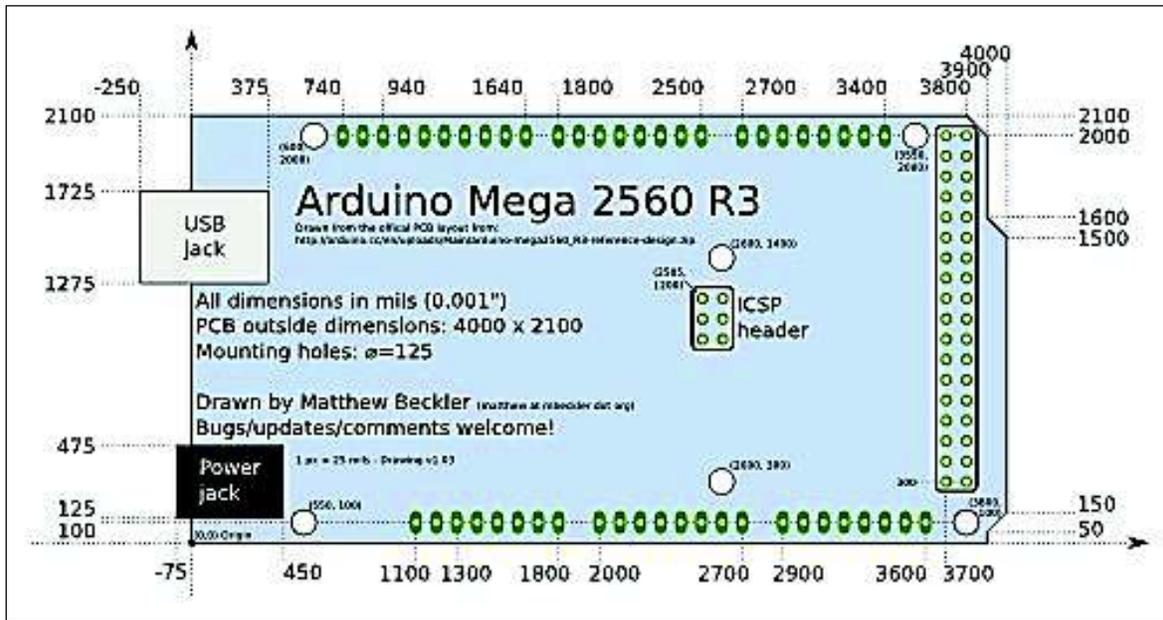
	X	Y	select
2.5mm Audio Plug	11.9	2.5	and use
3.5mm Audio Plug	15.0	3.5	standard

**Diagram for standard three-core plug**

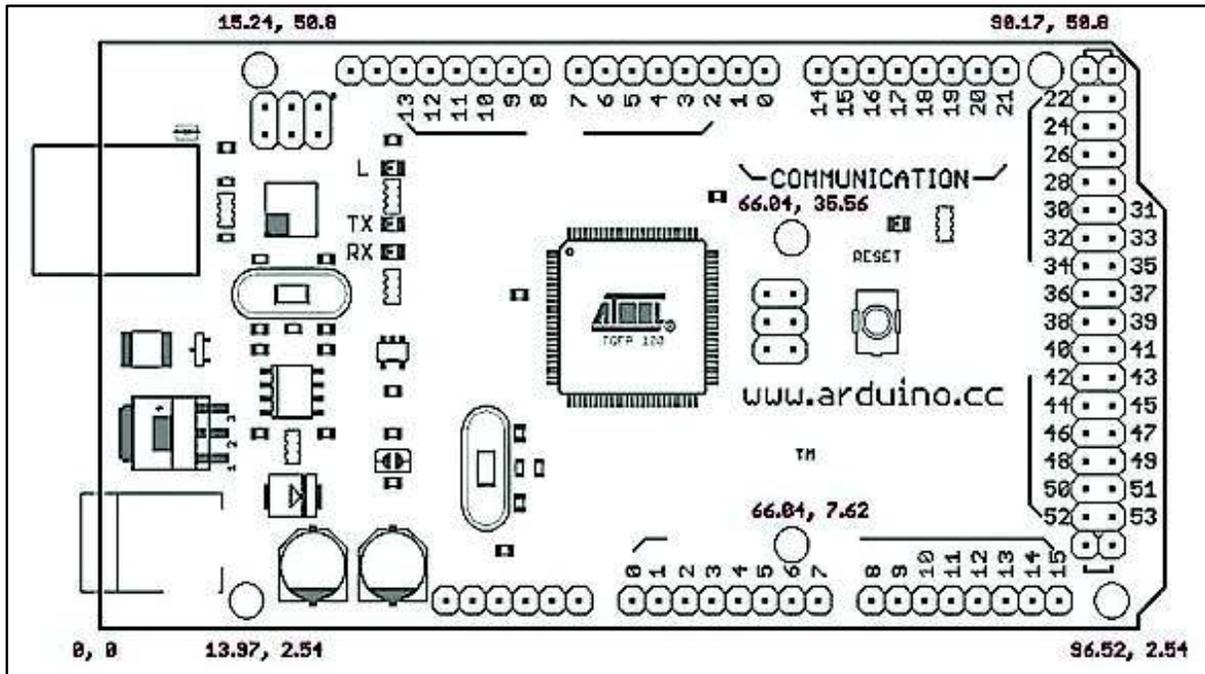
### Anexo 3 Plataforma Arduino Mega.

ARDUINO MEGA 2560	
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
	
Microcontrolador	ATMEGA 2560
Voltaje de operación	5 v
Alimentación	7-12 V
Pines digitales i/o	54 (15 como salidas PWM)
Pines de entrada analógica	16
Corriente dc por pin i/o	40 mA
Corriente dc para pin 3.3 v	50mA
Flash memory	128kb
Sram	8kb
Eeprom	4kb
Clock speed	16mhz
Longitud	101.52 mm
Ancho	53m3 mm
Peso	37g

## DIMENSIONES



## CONFIGURACIÓN PINES



Anexo 4 Ensayo de vacío transformador T1.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES								
Tipo de ensayo		Ensayo de vacío		Nominación			T1	
Características del transformador		V: 120 (V) I: 5 (A)		Relación: 1:1 Núm. Bobinas: 4			f: 60 (Hz)	
Objetivo del ensayo		Determinar las pérdidas en el hierro						
Esquema del montaje								
Resistencia de los devanados		BOBINA 1	BOBINA 2	BOBINA 3	BOBINA 4			
		0.7	0.7	0.6	0.7			
Instrumentos de medida y regulación a utilizar		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voltímetro AC (V)</li> <li>- Pinza amperimétrica (A)</li> <li>- Watímetro (w)</li> <li>- Fuente regulable (Autotransformador)</li> </ul>						
TABLA DE VALORES DE LAS MEDIDAS REALIZADAS								
Bobina	V in [V]	I <sub>o</sub> [A]	V out		f.p.	S [kVA]	P [kw]	Q[kVAR]
			1 [V]	2 [V]				
<b>B1</b>	127.9	0.3	256.7	128.8	0.59	0.049	0.029	0.036
<b>B2</b>	128.5	0,4	258.5	129.1	0.59	0.049	0.029	0.036
<b>B3</b>	128.1	0.4	256.0	127.6	0.51	0.048	0.029	0.035
<b>B4</b>	127.9	0.4	257.4	128.8	0.55	0.049	0.029	0.037
CÁLCULOS	<p>Cálculos referidos a la bobina 1</p> $P_h = P_{oc} - I_m^2 R_x$ $P_h = 29W - 0.4^2 * 0.7$ $P_h = 28.9 W$ <p> <math>P_h</math> = Pérdidas en el hierro  <math>P_{oc}</math> = Lectura del Watímetro  <math>I_m</math> = Corriente magnetizante  <math>R_x</math> = Resistencia del devanado                 </p> $\cos \phi_{oc} = \frac{P_{oc}}{S_{oc}} = \frac{0.029 \text{ kW}}{127.9 \text{ V} * 0.4 \text{ A} * 10^{-3}} = 0.59$							
	Bobina	Bobina 1 [kw]	Bobina 2 [kw]	Bobina 3 [kw]	Bobina 4 [kw]			
	Pérdidas en el hierro	0.029	0.029	0.029	0.029			

## Anexo 5 Ensayo de vacío transformador T2.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES								
Tipo de ensayo	Ensayo de vacío			Nominación	T2			
Características del transformador	V: 120 (V)	I: 5 (A)		Relación: 1:1	Núm. Bobinas: 4		f : 60 (Hz)	
Objetivo del ensayo	Determinar las pérdidas en el hierro							
Esquema del montaje								
Resistencia de los devanados	BOBINA 1	BOBINA 2	BOBINA 3	BOBINA 4				
	0.7	0.7	0.7	0.7				
Instrumentos de medida y regulación a utilizar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voltímetro AC</li> <li>- Pinza amperimétrica (A)</li> <li>- Watímetro (w)</li> <li>- Fuente regulable (Autotransformador)</li> </ul>							
TABLA DE VALORES DE LAS MEDIDAS REALIZADAS								
Bobina	V in [V]	I <sub>o</sub> [A]	V out		f.p.	S [kVA]	P [kw]	Q[kVAR]
			1 [V]	2 [V]				
<b>B1</b>	128.2	0.4	258.0	128.8	0.51	0.051	0.029	0.038
<b>B2</b>	128.4	0.4	258.0	128.8	0.52	0.050	0.029	0.037
<b>B3</b>	128.1	0.4	256.8	128.3	0.51	0.050	0.029	0.037
<b>B4</b>	128.3	0.4	257.0	128.1	0.52	0.049	0.029	0.037
Cálculos	<p>Cálculos referidos a la bobina 2</p> $P_h = P_{oc} - I_m^2 R_x$ $P_h = 29W - 0.4^2 * 0.7$ $P_h = 28.9 W$ <p> <math>P_h</math> = Pérdidas en el hierro  <math>P_{oc}</math> = Lectura del Watímetro  <math>I_m</math> = Corriente magnetizante  <math>R_x</math> = Resistencia del devanado                 </p> $\cos \phi_{oc} = \frac{P_{oc}}{S_{oc}} = \frac{0.029 kW}{128.4 V * 0.4 A * 10^{-3}} = 0.58$							
	Bobina	Bobina 1 [kw]	Bobina 2 [kw]	Bobina 3 [kw]	Bobina 4 [kw]			
Pérdidas en el hierro	0.029	0.029	0.029	0.029				

## Anexo 5 Ensayo de vacío transformador T3.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES								
Tipo de ensayo	Ensayo de vacío			Nominación		T3		
Características del transformador	V: 120 (V) I: 5 (A)		Relación: 1:1 Núm. Bobinas: 4		f : 60 (Hz)			
Objetivo del ensayo	Determinar las pérdidas en el hierro							
Esquema del montaje								
Resistencia de los devanados	BOBINA 1	BOBINA 2	BOBINA 3	BOBINA 4				
	0.7	0.7	0.6	0.7				
Instrumentos de medida y regulación a utilizar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voltímetro AC</li> <li>- Pinza amperimétrica (A)</li> <li>- Watímetro (w)</li> <li>- Fuente regulable (Autotransformador)</li> </ul>							
Tabla de valores de las medidas realizadas								
Bobina	V in [V]	I0 [A]	V out		f.p.	S [kVA]	P [kw]	Q[kVAR]
			1 [V]	2 [V]				
B1	128.2	0.4	252.4	126.0	0.51	0.049	0.029	0.036
B2	128.2	0.4	254.2	126.5	0.51	0.05	0.029	0.037
B3	128.0	0.4	261.8	131.4	0.51	0.053	0.030	0.039
B4	128.1	0.4	260.3	130.6	0.50	0.052	0.030	0.039
Cálculos	<p>Cálculos referidos a la bobina 3</p> $P_h = P_{oc} - I_m^2 R_x$ $P_h = 30W - 0.4^2 * 0.7$ $P_h = 29.9 W$ <p> <math>P_h</math> = Pérdidas en el hierro  <math>P_{oc}</math> = Lectura del Watímetro  <math>I_m</math> = Corriente magnetizante  <math>R_x</math> = Resistencia del devanado         </p> $\cos \phi_{oc} = \frac{P_{oc}}{S_{oc}} = \frac{0,03 \text{ kW}}{128 \text{ V} * 0.4 \text{ A} * 10^{-3}} = 0.57$							
	Bobina	Bobina 1 [kw]	Bobina 2 [kw]	Bobina 3 [kw]	Bobina 4 [kw]			
Pérdidas en el hierro	0.029	0.029	0.03	0.03				

**Anexo 6 Ensayo de vacío transformador T4.**

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES										
Tipo de ensayo	Ensayo de vacío			Nominación			T4			
Características del transformador	V:	120 (V)		Relación:	1:1		f:	60 (Hz)		
	I:	5 (A)		Núm. Bobinas:	4					
Objetivo del ensayo	Determinar las pérdidas en el hierro									
Esquema del montaje										
Resistencia de los devanados	BOBINA 1	BOBINA 2	BOBINA 3	BOBINA 4						
	0.7	0.7	0.6	0.7						
Instrumentos de medida y regulación a utilizar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voltímetro AC</li> <li>- Pinza amperimétrica (A)</li> <li>- Watímetro (w)</li> <li>- Fuente regulable (Autotransformador)</li> </ul>									
TABLA DE VALORES DE LAS MEDIDAS REALIZADAS										
Bobina	V in [V]	I <sub>o</sub> [A]	V out		f.p.	S [kVA]	P [kw]	Q[kVAR]		
			1 [V]	2 [V]						
<b>B1</b>	127.9	0.4	256.6	128.3	0.51	0.051	0.029	0.038		
<b>B2</b>	128.2	0.4	257.1	128.5	0.51	0.051	0.029	0.038		
<b>B3</b>	128.3	0.4	257.5	128.6	0.52	0.051	0.029	0.038		
<b>B4</b>	128.3	0.4	257.5	128.6	0.50	0.050	0.029	0.037		
Cálculo	<p>Cálculos referidos a la bobina 1</p> $P_h = P_{oc} - I_m^2 R_x$ $P_h = 29W - 0.4^2 * 0.8$ $P_h = 28.8 W$ <p> <math>P_h</math> = Pérdidas en el hierro  <math>P_{oc}</math> = Lectura del Watímetro  <math>I_m</math> = Corriente magnetizante  <math>R_x</math> = Resistencia del devanado                 </p> $\cos \phi_{oc} = \frac{P_{oc}}{S_{oc}} = \frac{0,029 \text{ kW}}{127.9 \text{ V} * 0.4 \text{ A} * 10^{-3}} = 0.57$									
	Bobina	Bobina 1 [kw]	Bobina 2 [kw]	Bobina 3 [kw]	Bobina 4 [kw]					
Pérdidas en el hierro	0.029	0.029	0.029	0.029						

## Anexo 7 Ensayo de vacío transformador T5.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES									
Tipo de ensayo	Ensayo de vacío			Nominación			T5		
Características del transformador	V: 120 (V) I: 5 (A)			Relación: 1:1 Núm. Bobinas: 4			f: 60 (Hz)		
Objetivo del ensayo	Determinar las pérdidas en el hierro								
Esquema del montaje									
Resistencia de los devanados	BOBINA 1	BOBINA 2	BOBINA 3	BOBINA 4					
	0.7	0.7	0.8	0.7					
Instrumentos de medida y regulación a utilizar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voltímetro AC</li> <li>- Pinza amperimétrica (A)</li> <li>- Watímetro (w)</li> <li>- Fuente regulable (Autotransformador)</li> </ul>								
TABLA DE VALORES DE LAS MEDIDAS REALIZADAS									
Bobina	V in [V]	I <sub>o</sub> [A]	V out		f.p.	S [kVA]	P [kW]	Q[kVAR]	
			1 [V]	2 [V]					
<b>B1</b>	128.4	0.5	260.4	129.4	0.51	0.063	0.033	0.050	
<b>B2</b>	128.1	0.5	258.0	128.6	0.52	0.061	0.032	0.048	
<b>B3</b>	128.6	0.4	257.3	128.2	0.52	0.062	0.033	0.049	
<b>B4</b>	128.1	0.4	254.0	126.7	0.53	0.060	0.032	0.046	
Cálculos	<p>Cálculos referidos a la bobina 2</p> $P_h = P_{oc} - I_m^2 R_x$ $P_h = 32W - 0.5^2 * 0.7$ $P_h = 31.8 W$ <p> <math>P_h</math> = Pérdidas en el hierro  <math>P_{oc}</math> = Lectura del Watímetro  <math>I_m</math> = Corriente magnetizante  <math>R_x</math> = Resistencia del devanado         </p> $\cos \phi_{oc} = \frac{P_{oc}}{S_{oc}} = \frac{0,032 \text{ kW}}{128.1 \text{ V} * 0.5 \text{ A} * 10^{-3}} = 0.525$								
	Bobina	Bobina 1 [kW]	Bobina 2 [kW]	Bobina 3 [kW]	Bobina 4 [kW]				
Pérdidas en el hierro	0.033	0.032	0.033	0.032					

## Anexo 9 Ensayo de vacío transformador T6.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES								
Tipo de ensayo	Ensayo de vacío			Nominación	T6			
Características del transformador	V: 120 (V) I: 5 (A)			Relación:	1:1	f: 60 (Hz)		
Objetivo del ensayo	Determinar las pérdidas en el hierro							
Esquema del montaje								
Resistencia de los devanados	BOBINA 1	BOBINA 2	BOBINA 3	BOBINA 4				
	0.7	0.7	0.6	0.7				
Instrumentos de medida y regulación a utilizar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voltímetro AC</li> <li>- Pinza amperimétrica (A)</li> <li>- Watímetro (w)</li> <li>- Fuente regulable (Autotransformador)</li> </ul>							
<b>Tabla de valores de las medidas realizadas</b>								
Bobina	V in [V]	I <sub>o</sub> [A]	V out		f.p.	S [kVA]	P [kw]	Q[kVAR]
			1 [V]	2 [V]				
<b>B1</b>	128.2	0.4	257.3	128.7	0.51	0.053	0.029	0.040
<b>B2</b>	128.8	0.4	253.0	129.1	0.50	0.053	0.029	0.040
<b>B3</b>	128.4	0.4	259.1	129.0	0.52	0.054	0.030	0.041
<b>B4</b>	128.3	0.4	257.5	128.6	0.53	0.054	0.029	0.040
Cálculos	<p>Cálculos referidos a la bobina 4</p> $P_h = P_{oc} - I_m^2 R_x$ $P_h = 29W - 0.4^2 * 0,7$ $P_h = 28,9 W$ <p> <math>P_h</math> = Pérdidas en el hierro  <math>P_{oc}</math> = Lectura del Watímetro  <math>I_m</math> = Corriente magnetizante  <math>R_x</math> = Resistencia del devanado         </p> $\cos \phi_{oc} = \frac{P_{oc}}{S_{oc}} = \frac{0,029 \text{ kW}}{128,3 \text{ V} * 0,4 \text{ A} * 10^{-3}} = 0,55$							
	Bobina	Bobina 1 [kw]	Bobina 2 [kw]	Bobina 3 [kw]	Bobina 4 [kw]			
Pérdidas en el hierro	0.029	0.029	0.03	0.029				

## Anexo 8 Ensayo de cortocircuito transformador T1.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES								
Tipo de ensayo	Ensayo de cortocircuito			Nominación		T1		
Características del transformador	V: 120(v) I: 5(A)			Relación: 1:1		F: 60 Hz		
Objetivo del ensayo	Determinar las pérdidas en el cobre a plena carga.							
Esquema del montaje								
Instrumentos de medida y regulación a utilizar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autotransformador</li> <li>- Pinza amperimétrica</li> <li>- Voltímetro AC</li> <li>- Amperímetro AC</li> </ul>							
<b>Resistencia de los devanados ohms</b>								
<b>Bobina 1</b>	Bobina 2		Bobina 3			Bobina 4		
0.7	0.7		0.6			0.7		
<b>Tabla de valores de las medidas realizadas</b>								
Fuente AC	Corto circuito	Vin [V]	Iin [A]	Iout [A]	Fp	S [Kva]	W [kw]	Q [Kvar]
<b>B1</b>	B2	5.3	5.0	5.0	0.98	0.026	0.026	0.003
<b>B1</b>	B3	5.2	5.5	5.4	0.96	0.028	0.027	0.008
<b>B1</b>	B4	5.2	5.4	5.3	0.97	0.028	0.028	0.003
<b>B2</b>	B1	5.2	4.9	5.1	0.97	0.026	0.026	0.003
<b>B2</b>	B3	5.3	5.1	5.1	0.91	0.027	0.025	0.011
<b>B2</b>	B4	5.2	5.0	5.1	0.95	0.026	0.025	0.007
<b>B3</b>	B1	5.2	5.3	5.4	0.91	0.027	0.026	0.008
<b>B3</b>	B2	5.3	4.9	5.1	0.91	0.026	0.024	0.011
<b>B3</b>	B4	5.1	5.7	5.7	0.94	0.029	0.029	0.003
<b>B4</b>	B1	5.2	5.3	5.3	0.95	0.028	0.027	0.003
<b>B4</b>	B2	5.3	5.0	5.0	0.96	0.026	0.026	0.007
<b>B4</b>	B3	5.1	5.7	5.6	0.96	0.029	0.029	0.003
Cálculos	<p>Si <math>V_{sc}</math>, <math>I_{sc}</math> y Si <math>P_{sc}</math> son lecturas del voltímetro, amperímetro y vatímetro, entonces</p> <p>Resistencia Equivalente</p> $R_{eH} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{26w}{5.0^2} = 1.0935 \text{ ohms}$ $Z_{eH} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{5.3}{5.0} = 1.047$ <p>Reactancia equivalente de dispersión</p> $X_{eH} = \sqrt{Z_{eH}^2 - R_{eH}^2} = \sqrt{1.047^2 - 1.0935^2} = 1.04$ <p>Resistencia equivalente medida</p> $R_H=0.7 \quad ; \quad R_L=0.7$ $R_{eH} = R_H + a^2 R_L = 0.7 + 1^2 0.7 = 1.4$ <p>La reactancia equivalente se obtiene a partir del criterio de diseño optimo</p> $X_H = a^2 X_L = 0.5 \quad X_{eH} = 0.5 * 1.04 = 0.52 \quad ; \quad X_L = 0.52$							

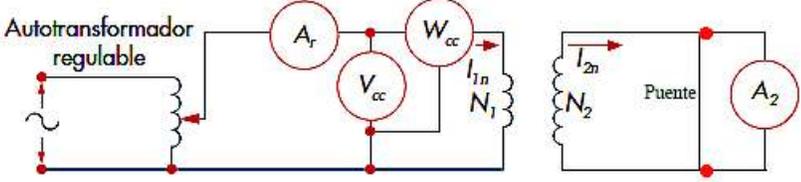
## Anexo 9 Ensayo de cortocircuito transformador T2.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES								
Tipo de ensayo	Ensayo de cortocircuito	Nominación	T2					
Características del transformador	V: 120(v) I: 5(A)	Relación: 1:1	F: 60 Hz					
Objetivo del ensayo	Determinar las pérdidas en el cobre a plena carga.							
Esquema del montaje								
Instrumentos de medida y regulación a utilizar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autotransformador</li> <li>- Pinza amperimétrica</li> <li>- Voltímetro AC</li> <li>- Amperímetro AC</li> </ul>							
<b>Resistencia de los devanados ohms</b>								
Bobina 1	Bobina 2	Bobina 3	Bobina 4					
0.7	0.7	0.7	0.7					
<b>Tabla de valores de las medidas realizadas</b>								
Fuente AC	Cortocircuito	Vin [V]	Iin [A]	Iout [A]	Fp	S [Kva]	W [kw]	Q [Kvar]
B1	B2	5.1	5.7	5.7	0.95	0.030	0.030	0.004
B1	B3	5.3	5.0	5.0	0.95	0.027	0.026	0.008
B1	B4	5.2	5.3	5.3	0.92	0.028	0.025	0.003
B2	B1	5.1	5.7	5.7	0.97	0.029	0.029	0.004
B2	B3	5.4	4.9	4.9	0.89	0.027	0.027	0.008
B2	B4	5.2	5.4	5.3	0.95	0.028	0.027	0.008
B3	B1	5.3	5.0	5.0	0.95	0.027	0.026	0.008
B3	B2	5.4	5.0	5.0	0.89	0.027	0.024	0.012
B3	B4	5.3	5.0	5.0	0.96	0.026	0.026	0.003
B4	B1	5.2	5.3	5.3	0.94	0.027	0.027	0.003
B4	B2	5.2	5.3	5.4	0.95	0.028	0.027	0.008
B4	B3	5.3	4.9	4.9	0.95	0.026	0.026	0.003
Cálculos	<p>Si <math>V_{sc}</math>, <math>I_{sc}</math> y <math>P_{sc}</math> son lecturas del voltímetro, amperímetro y vatímetro, entonces Resistencia Equivalente</p> $R_{eH} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{26w}{4.9^2} = 1.06 \text{ ohms}$ $Z_{eH} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{5.3}{4.9} = 1.07$ <p>Reactancia equivalente de dispersión</p> $X_{eH} = \sqrt{Z_{eH}^2 - R_{eH}^2} = \sqrt{1.07^2 - 1.06^2} = 0.145$ <p>Resistencia equivalente medida</p> $R_H = 0.7 \quad ; \quad R_L = 0.7$ $R_{eH} = R_H + a^2 R_L = 0.7 + 1^2 \cdot 0.7 = 1.4$ <p>La reactancia equivalente se obtiene a partir del criterio de diseño optimo</p> $X_H = a^2 X_L = 0.5 X_{eH} = 0.5 * 0.145 = 0.072 \quad ; \quad X_L = 0.072$							

**Anexo 10 Ensayo de cortocircuito transformador T3.**

<b>PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES</b>								
Tipo de ensayo		Ensayo de cortocircuito			Nominación		T3	
Características del transformador		V: 120(v) I: 5(A)			Relación: 1:1		F: 60 Hz	
Objetivo del ensayo		Determinar las pérdidas en el cobre a plena carga.						
Esquema del montaje								
Instrumentos de medida y regulación a utilizar		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autotransformador</li> <li>- Pinza amperimétrica</li> <li>- Voltímetro AC</li> <li>- Amperímetro AC</li> </ul>						
<b>Resistencia de los devanados ohms</b>								
Bobina 1		Bobina 2		Bobina 3		Bobina 4		
0.7		0.7		0.6		0.7		
<b>Tabla de valores de las medidas realizadas</b>								
Fuente AC	Corto circuito	Vin [V]	Iin [A]	Iout [A]	Fp	S [Kva]	W [kw]	Q [Kvar]
<b>B1</b>	<b>B2</b>	5.1	5.8	5.8	0.95	0.029	0.029	0.003
<b>B1</b>	<b>B3</b>	5.2	5.3	5.4	0.95	0.027	0.027	0.003
<b>B1</b>	<b>B4</b>	5.2	5.0	5.1	0.96	0.026	0.025	0.007
<b>B2</b>	<b>B1</b>	5.0	5.7	5.6	0.96	0.029	0.029	0.003
<b>B2</b>	<b>B3</b>	5.1	5.1	5.4	0.92	0.028	0.027	0.008
<b>B2</b>	<b>B4</b>	5.3	5.0	5.1	0.91	0.027	0.024	0.011
<b>B3</b>	<b>B1</b>	5.1	5.5	5.4	0.98	0.028	0.028	0.003
<b>B3</b>	<b>B2</b>	5.1	5.5	5.5	0.96	0.029	0.027	0.008
<b>B3</b>	<b>B4</b>	5.2	5.1	5.0	0.93	0.027	0.027	0.003
<b>B4</b>	<b>B1</b>	5.2	5.1	5.1	0.96	0.027	0.026	0.007
<b>B4</b>	<b>B2</b>	5.3	5.1	5.1	0.91	0.027	0.025	0.011
<b>B4</b>	<b>B3</b>	5.2	5.0	5.0	0.96	0.026	0.026	0.003
Cálculos		<p>Si <math>V_{sc}</math>, <math>I_{sc}</math> y <math>P_{sc}</math> son lecturas del voltímetro, amperímetro y vatímetro, entonces</p> <p>Resistencia Equivalente</p> $R_{eH} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{29w}{5.8^2} = 0.862 \text{ ohms}$ $Z_{eH} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{5.1}{5.8} = 0.879$ <p>Reactancia equivalente de dispersión</p> $X_{eH} = \sqrt{Z_{eH}^2 - R_{eH}^2} = \sqrt{0.879^2 - 0.862^2} = 0.172$ <p>Resistencia equivalente medida</p> $R_H = 0.7$ ; $R_L = 0.7$ $R_{eH} = R_H + a^2 R_L = 0.7 + 1^2 0.7 = 1.4$ <p>La reactancia equivalente se obtiene a partir del criterio de diseño optimo</p> $X_H = a^2 X_L = 0.5 X_{eH} = 0.5 * 0.172 = 0.86$ ; $X_L = 0.86$						

## Anexo 11 Ensayo de cortocircuito transformador T4.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES								
Tipo de ensayo		Ensayo de cortocircuito			Nominación		T 4	
Características del transformador		V: 120(v) I: 5(A)			Relación: 1:1		F: 60 Hz	
Objetivo del ensayo		Determinar las pérdidas en el cobre a plena carga.						
Esquema del montaje								
Instrumentos de medida y regulación a utilizar		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autotransformador</li> <li>- Pinza amperimétrica</li> <li>- Voltímetro AC</li> <li>- Amperímetro AC</li> </ul>						
<b>Resistencia de los devanados ohms</b>								
Bobina 1		Bobina 2		Bobina 3			Bobina 4	
0.7		0.7		0.6			0.7	
<b>Tabla de valores de las medidas realizadas</b>								
Fuente AC	Corto circuito	Vin [V]	Iin [A]	Iout [A]	Fp	S [Kva]	W [kw]	Q [Kvar]
B1	B2	4.8	5.2	5.3	0.93	0.023	0.023	0.002
B1	B3	5.3	5.1	5.0	0.91	0.028	0.027	0.008
B1	B4	5.2	5.4	5.4	0.94	0.029	0.029	0.003
B2	B1	4.5	5.3	5.3	0.97	0.024	0.024	0.003
B2	B3	5.5	5.1	5.0	0.91	0.028	0.026	0.012
B2	B4	5.3	5.5	5.5	0.92	0.029	0.028	0.008
B3	B1	5.4	5.0	5.5	0.93	0.027	0.026	0.007
B3	B2	5.4	5.1	5.1	0.91	0.028	0.026	0.011
B3	B4	5.3	4.9	4.9	0.95	0.026	0.026	0.003
B4	B1	5.2	5.4	5.4	0.94	0.028	0.028	0.003
B4	B2	5.2	5.5	5.5	0.92	0.029	0.027	0.008
B4	B3	5.3	4.9	4.8	0.95	0.026	0.026	0.003
Cálculos		<p>Si <math>V_{sc}</math>, <math>I_{sc}</math> y <math>P_{sc}</math> son lecturas del voltímetro, amperímetro y vatímetro, entonces</p> <p>Resistencia Equivalente</p> $R_{eH} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{23w}{5.2^2} = 0.850 \text{ ohms}$ $Z_{eH} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{4.8}{5.2} = 0.923$ <p>Reactancia equivalente de dispersión</p> $X_{eH} = \sqrt{Z_{eH}^2 - R_{eH}^2} = \sqrt{0.923^2 - 0.850^2} = 0.359$ <p>Resistencia equivalente medida</p> $R_H = 0.7 \quad ; \quad R_L = 0.7$ $R_{eH} = R_H + a^2 R_L = 0.7 + 1^2 \cdot 0.7 = 1.4$ <p>La reactancia equivalente se obtiene a partir del criterio de diseño optimo</p> $X_H = a^2 X_L = 0.5 X_{eH} = 0.5 * 0.359 = 0.17$ $X_L = 0.17$						

## Anexo 12 Ensayo de cortocircuito transformador T5.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES								
Tipo de ensayo	Ensayo de cortocircuito			Nominación	T 5			
Características del transformador	V: 120(v) I: 5(A)			Relación:	1:1		F: 60 Hz	
Objetivo del ensayo	Determinar las pérdidas en el cobre a plena carga.							
Esquema del montaje								
Instrumentos de medida y regulación a utilizar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autotransformador</li> <li>- Pinza amperimétrica</li> <li>- Voltímetro AC</li> <li>- Amperímetro AC</li> </ul>							
Resistencia de los devanados ohms								
Bobina 1	Bobina 2			Bobina 3		Bobina 4		
0.7	0.7			0.8		0.7		
Tabla de valores de las medidas realizadas								
Fuente AC	Corto circuito	Vin [V]	Iin [A]	Iout [A]	Fp	S [Kva]	W [kw]	Q [Kvar]
B1	B2	4.7	5.6	5.4	0.96	0.025	0.025	0.003
B1	B3	4.8	4.9	4.9	0.92	0.023	0.021	0.003
B1	B4	4.7	5.2	5.2	0.96	0.024	0.023	0.006
B2	B1	4.6	5.4	5.4	0.98	0.026	0.026	0.003
B2	B3	4.7	4.8	4.8	0.93	0.021	0.021	0.006
B2	B4	4.6	5.0	4.8	0.95	0.023	0.023	0.003
B3	B1	5.6	5.6	5.6	0.93	0.027	0.027	0.010
B3	B2	5.4	5.4	5.5	0.92	0.029	0.029	0.007
B3	B4	5.3	5.4	5.4	0.93	0.033	0.033	0.003
B4	B1	5.3	5.6	5.7	0.91	0.029	0.029	0.007
B4	B2	5.2	5.5	5.6	0.92	0.028	0.028	0.003
B4	B3	5.3	5.1	5.2	0.91	0.027	0.027	0.003
Cálculos	<p>Si <math>V_{sc}</math>, <math>I_{sc}</math> y Si <math>P_{sc}</math> son lecturas del voltímetro, amperímetro y vatímetro, entonces Resistencia Equivalente</p> $R_{eH} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{25w}{5.6^2} = 0.783 \text{ ohms}$ $Z_{eH} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{4.7}{5.6} = 0.831$ <p>Reactancia equivalente de dispersión</p> $X_{eH} = \sqrt{Z_{eH}^2 - R_{eH}^2} = \sqrt{0.831^2 - 0.783^2} = 0.278$ <p>Resistencia equivalente medida</p> $R_H = 0.7$ ; $R_L = 0.7$ $R_{eH} = R_H + a^2 R_L = 0.78 + 1^2 \cdot 0.7 = 1.4$ La reactancia equivalente se obtiene a partir del criterio de diseño optimo $X_H = a^2 X_L = 0.5 X_{eH} = 0.5 * 0.278 = 0.139$ $X_L = 0.139$							

### Anexo 13 Ensayo de cortocircuito transformador T6.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES								
Tipo de ensayo	Ensayo de cortocircuito			Nominación	<b>T 6</b>			
Características del transformador	V: 120(v) I: 5(A)			Relación:	1:1 F: 60 Hz			
Objetivo del ensayo	Determinar las pérdidas en el cobre a plena carga.							
Esquema del montaje								
Instrumentos de medida y regulación a utilizar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autotransformador</li> <li>- Pinza amperimétrica</li> <li>- Voltímetro AC</li> <li>- Amperímetro AC</li> </ul>							
<b>Resistencia de los devanados ohms</b>								
Bobina 1	Bobina 2			Bobina 3	Bobina 4			
0.7	0.7			0.8	0.7			
<b>Tabla de valores de las medidas realizadas</b>								
Fuente AC	Corto circuito	Vin [V]	Iin [A]	Iout [A]	Fp	S [Kva]	W [kw]	Q [Kvar]
B1	B2	5.2	5.7	5.7	0.91	0.030	0.030	0.003
B1	B3	5.7	4.9	4.8	0.93	0.024	0.023	0.007
B1	B4	4.8	4.9	4.8	0.95	0.025	0.025	0.003
B2	B1	4.8	5.4	5.5	0.94	0.025	0.025	0.003
B2	B3	5.1	4.7	4.6	0.91	0.024	0.022	0.010
B2	B4	4.8	5.0	4.9	0.93	0.024	0.023	0.007
B3	B1	4.8	4.6	4.5	0.91	0.023	0.022	0.006
B3	B2	5.0	4.6	4.6	0.91	0.023	0.021	0.009
B3	B4	5.4	5.1	5.0	0.96	0.027	0.027	0.003
B4	B1	5.2	5.3	5.3	0.95	0.028	0.028	0.003
B4	B2	5.1	5.4	5.4	0.93	0.027	0.027	0.008
B4	B3	5.3	4.9	4.8	0.95	0.026	0.026	0.003
Cálculos	<p>Si <math>V_{sc}</math>, <math>I_{sc}</math> y <math>P_{sc}</math> son lecturas del voltímetro, amperímetro y vatímetro Resistencia Equivalente</p> $R_{eH} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{23w}{4.9^2} = 0.957 \text{ ohms}$ $Z_{eH} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{5.7}{4.9} = 1.163$ <p>Reactancia equivalente de dispersión</p> $X_{eH} = \sqrt{Z_{eH}^2 - R_{eH}^2} = \sqrt{1.163^2 - 0.957^2} = 0.660$ <p>Resistencia equivalente medida  <math>R_H = 0.7</math> ; <math>R_L = 0.8</math></p> $R_{eH} = R_H + a^2 R_L = 0.7 + 1^2 0.8 = 1.5$ <p>La reactancia equivalente se obtiene a partir del criterio de diseño optimo  <math>X_H = a^2 X_L = 0.5 X_{eH} = 0.5 * 0.660 = 0.33</math> ; <math>X_L = 0.33</math></p>							

## Anexo 14 Transformador elevador.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES					
Tipo de ensayo	Transformador Elevador		Transformador:	<b>T1, T2, T3, T4, T5, T6</b>	
Características transformadores	V: 120 (V)	I: 5 (A)	Relación: 1:1	Núm. Bobinas: 4	f: 60 (Hz)
Objetivo del ensayo	Realizar relación de transformación 1:2				
Esquema del montaje	<p>El diagrama muestra un transformador con un núcleo rectangular. Hay cuatro bobinas: B1 y B2 en el lado izquierdo, B3 y B4 en el lado derecho. El terminal F está conectado a la bobina B1. El terminal N está conectado a la bobina B2. El terminal L1 está conectado a la bobina B3. El terminal L2 está conectado a la bobina B4. Hay un interruptor T1 en serie con la bobina B4. Las bobinas B1 y B2 están conectadas en serie para el primario, y B3 y B4 para el secundario.</p>				
Paso	VOLTAJE [V]		CORRIENTE [A]		
	Primario	Secundario	Primario	Secundario	
<b>T1</b>	0	123.2	249.6	0.3	0.1
	1	121.5	236.9	6.8	3.2
	2	120.4	230.4	12.5	6.3
<b>T2</b>	0	122.6	245.0	0.3	0.2
	1	121.9	236.5	6.9	3.3
	2	120.2	227.9	12.8	6.3
<b>T3</b>	0	123.1	243.2	0.3	0.2
	1	121.4	233.4	6.6	3.2
<b>T4</b>	0	126.0	251.8	0.4	0.1
	1	124.5	247.5	6.9	3.3
<b>T5</b>	0	122.6	246.8	0.4	0.2
	1	121.2	237.9	7.0	3.3
<b>T6</b>	0	122.6	245.1	0.4	0.4
	1	120.6	235.3	6.7	3.3
	2	119.1	227.0	12.5	6.3

## Anexo 15 Transformador reductor.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES					
Tipo de ensayo		Transformador Reductor		Transformador:	T1, T2, T3, T4, T5, T6
Características transformadores		V: 120 (V) I: 5 (A)	Relación: 1:1 Núm. Bobinas: 4	f: 60 (Hz)	
Objetivo del ensayo		Realizar relación de transformación 2:1			
Esquema del montaje					
Paso	VOLTAJE [V]		CORRIENTE [A]		
	Primario	Secundario	Primario	Secundario	
T1	0	216.3	108.2	0.1	0.2
	1	216.2	107.1	0.7	1.4
	2	215.4	105.7	1.5	2.8
T2	0	211.7	107.3	0.3	0.2
	1	214.7	106.1	0.7	1.5
	2	214.5	104.9	1.5	2.9
T3	0	211.9	104.6	0.2	0.2
	1	211.8	103.5	0.7	1.4
	2	211.0	102.6	1.4	2.8
T4	0	216.8	108.1	0.1	0.1
	1	216.4	107.1	0.7	1.4
	2	215.7	106.1	1.5	2.7
T5	0	211.6	107.2	0.2	0.2
	1	211.9	106.1	0.8	1.5
	2	211.3	105.0	1.5	2.7
T6	0	212.3	106.1	0.2	0.2
	1	211.8	104.9	0.8	1.4
	2	211.3	103.9	1.2	2.9
	3	211.2	102.9	2.0	4.2

## Anexo 16 Autotransformador elevador.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES					
Tipo de ensayo	Autotransf. Elevador		Transformador:	T1, T2, T3, T4, T5, T6	
Características transformadores	V: 120 (V) I: 5 (A)		Relación: 1:1 Núm. Bobinas: 4	f: 60 (Hz)	
Objetivo del ensayo	Realizar relación de transformación 1:2 mediante conexión autotransformador				
Esquema del montaje					
Paso	VOLTAJE [V]		CORRIENTE [A]		
	Primario	Secundario	Primario	Secundario	
T1	0	123.4	249.2	0.3	0.1
	1	121.3	245.7	6.9	3.2
	2	120.3	236.6	12.9	6.5
	3	119.2	233.5	18.7	9.2
T2	0	124.4	248.4	0.3	0.2
	1	122.9	243.0	7.1	3.2
	2	121.1	238.2	13.4	6.7
	3	120.0	234.4	19.4	9.6
T3	0	123.4	248.6	0.3	0.2
	1	121.2	242.9	7.1	3.3
	2	119.8	238.1	13.6	6.6
	3	117.8	232.8	19.74	9.5
T4	0	123.7	249.6	0.4	0.1
	1	121.7	247.5	6.9	3.3
	2	120.9	236.9	12.9	6.6
	3	119.9	234.6	18.7	9.2
T5	0	123.2	245.1	0.4	0.2
	1	121.1	239.6	7.0	3.2
	2	119.4	234.7	13.3	6.5
	3	117.5	229.6	19.2	9.4
T6	0	122.6	245.9	0.3	0.2
	1	121.1	240.0	7.0	3.4
	2	119.3	235.5	13.2	6.6
	3	117.9	230.4	19.0	9.4

## Anexo 17 Autotransformador reductor.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES					
Tipo de ensayo	Autotransf. Reductor		Transformador:	T1, T2, T3, T4, T5, T6	
Características transformadores	V: 120 (V) I: 5 (A)		Relación: 1:1 Núm. Bobinas: 4	f: 60 (Hz)	
Objetivo del ensayo	Realizar relación de transformación 1:2 mediante conexión autotransformador				
Esquema del montaje					
Paso	VOLTAJE [V]		CORRIENTE [A]		
	Primario	Secundario	Primario	Secundario	
T1	0	217.1	108.5	0.1	0.1
	1	216.4	107.7	0.7	1.4
	2	215.8	107.3	1.7	2.7
	3	215.6	106.7	2.1	4.2
T2	0	214.2	107.0	0.3	0.2
	1	214.1	106.8	0.7	1.4
	2	214.6	106.7	1.6	2.9
	3	213.6	105.6	2.1	4.3
T3	0	211.9	105.6	0.2	0.2
	1	212.0	105.3	0.8	1.4
	2	211.7	104.8	1.5	2.9
	3	211.5	104.7	2.3	4.2
T4	0	216.7	108.1	0.2	0.1
	1	216.2	107.7	0.8	1.5
	2	216.0	107.2	1.4	2.7
	3	215.9	106.9	2.0	4.2
T5	0	211.8	106.3	0.2	0.2
	1	211.3	105.9	0.8	1.4
	2	211.4	105.6	1.5	2.9
	3	211.5	105.1	2.3	4.2
T6	0	211.8	106.8	0.3	0.2
	1	211.7	105.6	0.8	1.5
	2	211.6	105.2	1.4	2.9
	3	211.6	105.0	2.3	4.3

## Anexo 18 Conexión y –y sin neutro.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES												
Tipo de ensayo	Conexión Y – Y sin neutro				Transformadores:				<b>T1 – T2 – T3</b>			
Características transformadores	V: 120 (V) I: 5 (A)				Relación: 1:1 Núm. Bobinas: 4				f: 60 (Hz)			
Objetivo	Realizar conexión estrella mediante banco de transformadores.											
Esquema del montaje												
Paso	VOLTAJE [V]								CORRIENTE [A]			
	VOLTAJE LINEA				VOLTAJE FASE							
	Primario		Secundario		Primario		Secundario		Primario		Secundario	
<b>0</b>	V <sub>RT</sub>	214.0	V <sub>rt</sub>	214.4	V <sub>R</sub>	133.0	V <sub>r</sub>	132.3	I <sub>R</sub>	0.8	I <sub>r</sub>	0.7
	V <sub>ST</sub>	211.1	V <sub>st</sub>	207.9	V <sub>S</sub>	132.6	V <sub>s</sub>	129.0	I <sub>S</sub>	0.8	I <sub>s</sub>	0.7
	V <sub>RS</sub>	213.7	V <sub>rs</sub>	209.8	V <sub>T</sub>	131.7	V <sub>t</sub>	132.2	I <sub>T</sub>	0.3	I <sub>t</sub>	0.1
<b>1</b>	V <sub>RT</sub>	213.5	V <sub>rt</sub>	211.5	V <sub>R</sub>	134.3	V <sub>r</sub>	132.0	I <sub>R</sub>	2.7	I <sub>r</sub>	2.5
	V <sub>ST</sub>	210.3	V <sub>st</sub>	207.1	V <sub>S</sub>	133.3	V <sub>s</sub>	128.5	I <sub>S</sub>	2.6	I <sub>s</sub>	2.4
	V <sub>RS</sub>	212.9	V <sub>rs</sub>	206.8	V <sub>T</sub>	128.2	V <sub>t</sub>	128.0	I <sub>T</sub>	2.0	I <sub>t</sub>	1.7
<b>2</b>	V <sub>RT</sub>	214.0	V <sub>rt</sub>	208.4	V <sub>R</sub>	136.1	V <sub>r</sub>	132.0	I <sub>R</sub>	4.4	I <sub>r</sub>	4.3
	V <sub>ST</sub>	210.3	V <sub>st</sub>	202.4	V <sub>S</sub>	133.2	V <sub>s</sub>	126.5	I <sub>S</sub>	4.3	I <sub>s</sub>	4.0
	V <sub>RS</sub>	213.5	V <sub>rs</sub>	203.6	V <sub>T</sub>	125.8	V <sub>t</sub>	123.2	I <sub>T</sub>	3.8	I <sub>t</sub>	3.7

## Anexo 19 Conexión y-y con neutro.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES												
Tipo de ensayo		Conexión Y – Y con neutro				Transformadores:			T1 – T2 – T3			
Características transformadores		V: 120 (V)		I: 5 (A)		Relación: 1:1		Núm. Bobinas: 4		f: 60 (Hz)		
Objetivo del ensayo		Realizar conexión estrella mediante banco de transformadores.										
Esquema del montaje												
Paso	VOLTAJE [V]								CORRIENTE [A]			
	VOLTAJE LINEA				VOLTAJE FASE				Primario		Secundario	
	Primario		Secundario		Primario		Secundario					
1	V <sub>RT</sub>	212.7	V <sub>rt</sub>	210.5	V <sub>Rn</sub>	123.8	V <sub>rn</sub>	121.2	I <sub>R</sub>	2.5	I <sub>r</sub>	2.4
	V <sub>ST</sub>	210.0	V <sub>st</sub>	204.6	V <sub>Sn</sub>	126.0	V <sub>sn</sub>	115.3	I <sub>S</sub>	2.6	I <sub>s</sub>	2.4
	V <sub>RS</sub>	212.4	V <sub>rs</sub>	205.7	V <sub>Tn</sub>	122.1	V <sub>tn</sub>	121.2	I <sub>T</sub>	2.0	I <sub>t</sub>	2.0
2	V <sub>RT</sub>	213.4	V <sub>rt</sub>	207.0	V <sub>Rn</sub>	120.5	V <sub>rn</sub>	114.0	I <sub>R</sub>	4.5	I <sub>r</sub>	4.2
	V <sub>ST</sub>	209.7	V <sub>st</sub>	201.2	V <sub>Sn</sub>	123.7	V <sub>sn</sub>	119.2	I <sub>S</sub>	4.2	I <sub>s</sub>	4.1
	V <sub>RS</sub>	213.1	V <sub>rs</sub>	202.1	V <sub>Tn</sub>	121.8	V <sub>tn</sub>	119.0	I <sub>T</sub>	3.8	I <sub>t</sub>	3.6

## Anexo 20 Conexión yy – yy sin neutro.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES												
Tipo de ensayo	Conexión YY – YY sin neutro				Transformadores:				T1 – T2 – T3			
Características transformadores	V: 120 (V)		I: 5 (A)		Relación: 1:1		Núm. Bobinas: 4		f: 60 (Hz)			
Objetivo del ensayo	Realizar conexión estrella mediante banco de transformadores.											
Esquema del montaje												
Paso	VOLTAJE [V]								CORRIENTE [A]			
	VOLTAJE LINEA				VOLTAJE FASE				Primario		Secundario	
	Primario		Secundario		Primario		Secundario					
<b>0</b>	$V_{RT}$	216.3	$V_{rt}$	216.4	$V_R$	134.7	$V_r$	133.9	$I_R$	0.8	$I_r$	0.6
	$V_{ST}$	213.3	$V_{st}$	211.7	$V_S$	133.0	$V_s$	130.2	$I_S$	0.9	$I_s$	0.7
	$V_{RS}$	215.6	$V_{rs}$	212.7	$V_T$	133.5	$V_t$	133.7	$I_T$	0.3	$I_t$	0.1
<b>1</b>	$V_{RT}$	214.7	$V_{rt}$	213.5	$V_R$	135.2	$V_r$	133.9	$I_R$	2.6	$I_r$	2.6
	$V_{ST}$	212.2	$V_{st}$	208.6	$V_S$	133.0	$V_s$	129.7	$I_S$	2.7	$I_s$	2.4
	$V_{RS}$	214.6	$V_{rs}$	217.0	$V_T$	131.0	$V_t$	130.8	$I_T$	2.0	$I_t$	1.8
<b>2</b>	$V_{RT}$	214.5	$V_{rt}$	211.7	$V_R$	136.1	$V_r$	127.9	$I_R$	4.6	$I_r$	4.4
	$V_{ST}$	212.4	$V_{st}$	208.0	$V_S$	133.6	$V_s$	129.0	$I_S$	4.4	$I_s$	4.2
	$V_{RS}$	214.4	$V_{rs}$	208.5	$V_T$	129.5	$V_t$	127.9	$I_T$	3.9	$I_t$	3.7
<b>3</b>	$V_{RT}$	215.1	$V_{rt}$	208.8	$V_R$	138.5	$V_r$	133.8	$I_R$	7.0	$I_r$	6.7
	$V_{ST}$	212.1	$V_{st}$	204.8	$V_S$	133.1	$V_s$	128.2	$I_S$	6.4	$I_s$	6.3
	$V_{RS}$	215.6	$V_{rs}$	208.0	$V_T$	126.7	$V_t$	125.2	$I_T$	7.6	$I_t$	7.3

## Anexo 21 Conexión yy – yy con neutro.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES												
Tipo de ensayo	Conexión YY – YY con neutro				Transformadores:				T1 – T2 – T3			
Características transformadores	V: 120 (V) I : 5 (A)				Relación: 1:1 Núm. Bobinas: 4				f: 60 (Hz)			
Objetivo del ensayo	Realizar conexión estrella mediante banco de transformadores.											
Esquema del montaje												
Paso	VOLTAJE [V]								CORRIENTE [A]			
	VOLTAJE LINEA				VOLTAJE FASE				Primario		Secundario	
	Primario		Secundario		Primario		Secundario					
<b>0</b>	$V_{RT}$	217.1	$V_{rt}$	216.9	$V_{Rn}$	125.4	$V_{rn}$	125.1	$I_R$	1.0	$I_r$	0.7
	$V_{ST}$	214.1	$V_{st}$	211.4	$V_{Sn}$	122.5	$V_{sn}$	120.5	$I_S$	0.8	$I_s$	0.7
	$V_{RS}$	216.0	$V_{rs}$	213.7	$V_{Tn}$	124.0	$V_{tn}$	124.8	$I_T$	0.4	$I_t$	0.2
<b>1</b>	$V_{RT}$	216.4	$V_{rt}$	214.7	$V_{Rn}$	125.5	$V_{rn}$	124.0	$I_R$	2.7	$I_r$	2.5
	$V_{ST}$	209.5	$V_{st}$	209.2	$V_{Sn}$	122.5	$V_{sn}$	119.2	$I_S$	2.7	$I_s$	2.5
	$V_{RS}$	216.3	$V_{rs}$	211.8	$V_{Tn}$	124.0	$V_{tn}$	123.1	$I_T$	2.0	$I_t$	1.8
<b>2</b>	$V_{RT}$	215.2	$V_{rt}$	211.9	$V_{Rn}$	125.1	$V_{rn}$	122.4	$I_R$	4.6	$I_r$	4.3
	$V_{ST}$	212.6	$V_{st}$	208.0	$V_{Sn}$	122.4	$V_{sn}$	118.0	$I_S$	4.4	$I_s$	4.3
	$V_{RS}$	214.6	$V_{rs}$	209.2	$V_{Tn}$	129.5	$V_{tn}$	122.0	$I_T$	4.0	$I_t$	4.8
<b>3</b>	$V_{RT}$	214.4	$V_{rt}$	207.7	$V_{Rn}$	125.0	$V_{rn}$	120.4	$I_R$	6.9	$I_r$	6.7
	$V_{ST}$	212.2	$V_{st}$	204.9	$V_{Sn}$	122.2	$V_{sn}$	117.0	$I_S$	6.4	$I_s$	6.3
	$V_{RS}$	214.4	$V_{rs}$	207.7	$V_{Tn}$	123.5	$V_{tn}$	119.8	$I_T$	7.6	$I_t$	7.4

## Anexo 22 Conexión D-D en T1, T2, T3.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES					
Tipo de ensayo	Conexión D-D		Nominación	T1-T2-T3	
Características del transformador	V: 120(V) I: 5(A)		Relación:	F: 60 Hz	
Objetivo del ensayo	Banco Trifásico conexión delta				
Instrumentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pinza amperimétrica</li> <li>- Voltímetro AC</li> <li>- Amperímetro AC</li> </ul>				
Esquema del montaje					
Tabla de valores de las medidas realizadas					
Vacío					
$I_T = 0.2$	$I_t = 0.2$	$I_{TS} = 0.2$	$I_{ts} = 0.2$	$V_{TS} = 210.5$	$V_{ts} = 210.1$
$I_S = 0.2$	$I_s = 0.2$	$I_{SR} = 0.2$	$I_{sr} = 0.2$	$V_{SR} = 213.8$	$V_{sr} = 213.8$
$I_R = 0.2$	$I_r = 0.2$	$I_{TR} = 0.2$	$I_{tr} = 0.2$	$V_{TR} = 214.3$	$V_{tr} = 214.4$
Paso 1					
$I_T = 1.5$	$I_t = 1.3$	$I_{TS} = 0.7$	$I_{ts} = 0.8$	$V_{TS} = 210.0$	$V_{ts} = 207.7$
$I_S = 1.6$	$I_s = 1.4$	$I_{SR} = 1.0$	$I_{sr} = 0.7$	$V_{SR} = 213.0$	$V_{sr} = 210.1$
$I_R = 1.4$	$I_r = 1.3$	$I_{TR} = 0.8$	$I_{tr} = 0.6$	$V_{TR} = 212.0$	$V_{tr} = 211.3$
Paso 2					
$I_T = 2.9$	$I_t = 2.7$	$I_{TS} = 1.6$	$I_{ts} = 1.6$	$V_{TS} = 209.2$	$V_{ts} = 206.0$
$I_S = 2.8$	$I_s = 2.7$	$I_{SR} = 1.7$	$I_{sr} = 1.7$	$V_{SR} = 212.3$	$V_{sr} = 208.9$
$I_R = 2.8$	$I_r = 2.8$	$I_{TR} = 1.5$	$I_{tr} = 1.4$	$V_{TR} = 212.3$	$V_{tr} = 209.3$

**Anexo 23 Conexión D-D en T4, T5, T6.**

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES					
Tipo de ensayo	Conexión D-D		Nominación	<b>T6-T5-T4</b>	
Características del transformador	V: 120(V) I: 5(A)		Relación: 1:1	F: 60 Hz	
Objetivo del ensayo	Banco Trifásico conexión delta				
Instrumentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pinza amperimétrica</li> <li>- Voltímetro AC</li> <li>- Amperímetro AC</li> </ul>				
Esquema del montaje					
Tabla de valores de las medidas realizadas					
Vacío					
$I_T = 0.2$	$I_t = 0.2$	$I_{TS} = 0.2$	$I_{ts} = 0.2$	$V_{TS} = 215.0$	$V_{ts} = 215.6$
$I_S = 0.2$	$I_s = 0.2$	$I_{SR} = 0.3$	$I_{sr} = 0.2$	$V_{SR} = 217.8$	$V_{sr} = 219.2$
$I_R = 0.2$	$I_r = 0.2$	$I_{TR} = 0.2$	$I_{tr} = 0.2$	$V_{TR} = 217.9$	$V_{tr} = 217.0$
Paso 1					
$I_T = 1.5$	$I_t = 1.3$	$I_{TS} = 0.8$	$I_{ts} = 0.7$	$V_{TS} = 213.7$	$V_{ts} = 212.5$
$I_S = 1.4$	$I_s = 1.2$	$I_{SR} = 0.9$	$I_{sr} = 0.9$	$V_{SR} = 217.0$	$V_{sr} = 215.7$
$I_R = 1.4$	$I_r = 1.2$	$I_{TR} = 0.8$	$I_{tr} = 0.6$	$V_{TR} = 216.8$	$V_{tr} = 215.5$
Paso 2					
$I_T = 2.9$	$I_t = 2.6$	$I_{TS} = 1.5$	$I_{ts} = 1.5$	$V_{TS} = 213.3$	$V_{ts} = 210.8$
$I_S = 2.8$	$I_s = 2.6$	$I_{SR} = 1.8$	$I_{sr} = 1.7$	$V_{SR} = 216.7$	$V_{sr} = 215.5$
$I_R = 2.8$	$I_r = 2.7$	$I_{TR} = 1.5$	$I_{tr} = 1.3$	$V_{TR} = 217.0$	$V_{tr} = 213.3$
Paso 3					
$I_T = 4.3$	$I_t = 4.0$	$I_{TS} = 2.2$	$I_{ts} = 2.2$	$V_{TS} = 213.9$	$V_{ts} = 210.6$
$I_S = 4.2$	$I_s = 4.0$	$I_{SR} = 2.2$	$I_{sr} = 2.6$	$V_{SR} = 216.6$	$V_{sr} = 212.8$
$I_R = 4.3$	$I_r = 4.1$	$I_{TR} = 2.1$	$I_{tr} = 2.1$	$V_{TR} = 216.3$	$V_{tr} = 212.8$

## Anexo 24 Conexión delta abierta en T4, T5, T6.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES					
Tipo de ensayo	Delta abierta	Nominación	T6-T5-T4		
Características del transformador	V: 120(V) I: 5(A)	Relación: 1:1	F: 60 Hz		
Objetivo del ensayo	Banco Trifásico conexión delta abierta				
Instrumentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pinza amperimétrica</li> <li>- Voltímetro AC</li> <li>- Amperímetro AC</li> </ul>				
Esquema del montaje					
Tabla de valores de las medidas realizadas					
Vacío					
$I_T = 0.3$	$I_t = 0.2$	$I_{TS} = 2.0$	$I_{ts} = 2.0$	$V_{TS} = 210.0$	$V_{ts} = 207.9$
$I_S = 0.2$	$I_s = 0.2$	$I_{SR} = 1.0$	$I_{sr} = 0.9$	$V_{SR} = 213.6$	$V_{sr} = 208.4$
$I_R = 0.2$	$I_r = 0.2$	$I_{TR} = 0.2$	$I_{tr} = 2.0$	$V_{TR} = 213.0$	$V_{tr} = 209.0$
Paso 1					
$I_T = 1.4$	$I_t = 1.3$	$I_{TS} = 0.2$	$I_{ts} = 0.2$	$V_{TS} = 210.3$	$V_{ts} = 203.9$
$I_S = 1.4$	$I_s = 1.3$	$I_{SR} = 1.4$	$I_{sr} = 1.4$	$V_{SR} = 213.7$	$V_{sr} = 208.7$
$I_R = 1.5$	$I_r = 1.3$	$I_{TR} = 1.4$	$I_{tr} = 1.4$	$V_{TR} = 213.1$	$V_{tr} = 210.4$
Paso 2					
$I_T = 2.7$	$I_t = 2.7$	$I_{TS} = 0.2$	$I_{ts} = 0.2$	$V_{TS} = 210.7$	$V_{ts} = 200.0$
$I_S = 2.6$	$I_s = 2.6$	$I_{SR} = 2.7$	$I_{sr} = 2.5$	$V_{SR} = 213.7$	$V_{sr} = 206.9$
$I_R = 2.9$	$I_r = 2.7$	$I_{TR} = 2.7$	$I_{tr} = 2.6$	$V_{TR} = 212.9$	$V_{tr} = 207.3$
Paso 3					
$I_T = 4.0$	$I_t = 4$	$I_{TS} = 0.2$	$I_{ts} = 0.2$	$V_{TS} = 211.0$	$V_{ts} = 200.0$
$I_S = 3.9$	$I_s = 4$	$I_{SR} = 3.7$	$I_{sr} = 4.0$	$V_{SR} = 213.8$	$V_{sr} = 205.4$
$I_R = 4.2$	$I_r = 5.2$	$I_{TR} = 4.0$	$I_{tr} = 4.0$	$V_{TR} = 213.9$	$V_{tr} = 205.0$

Anexo 25 Prueba de polaridad.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES			
Tipo de ensayo	Prueba de polaridad	Nominación	T1-T2-T3-T4-T5-T6
Características del transformador	V: 120(V) I: 5(A)	Relación: 1:1	F: 60 Hz
Objetivo del ensayo	Determinar la polaridad de los bobinado en cada transformador		
Instrumentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pinza amperimétrica</li> <li>- Voltímetro AC</li> <li>- Amperímetro AC</li> </ul>		
<b>Esquema de polaridad</b>			

## **Manual de Usuario**

# ESFOT

ESCUELA DE FORMACION  
DE TECNOLOGOS

## MANUAL DE USUARIO

Módulo didáctico de transformadores monofásicos



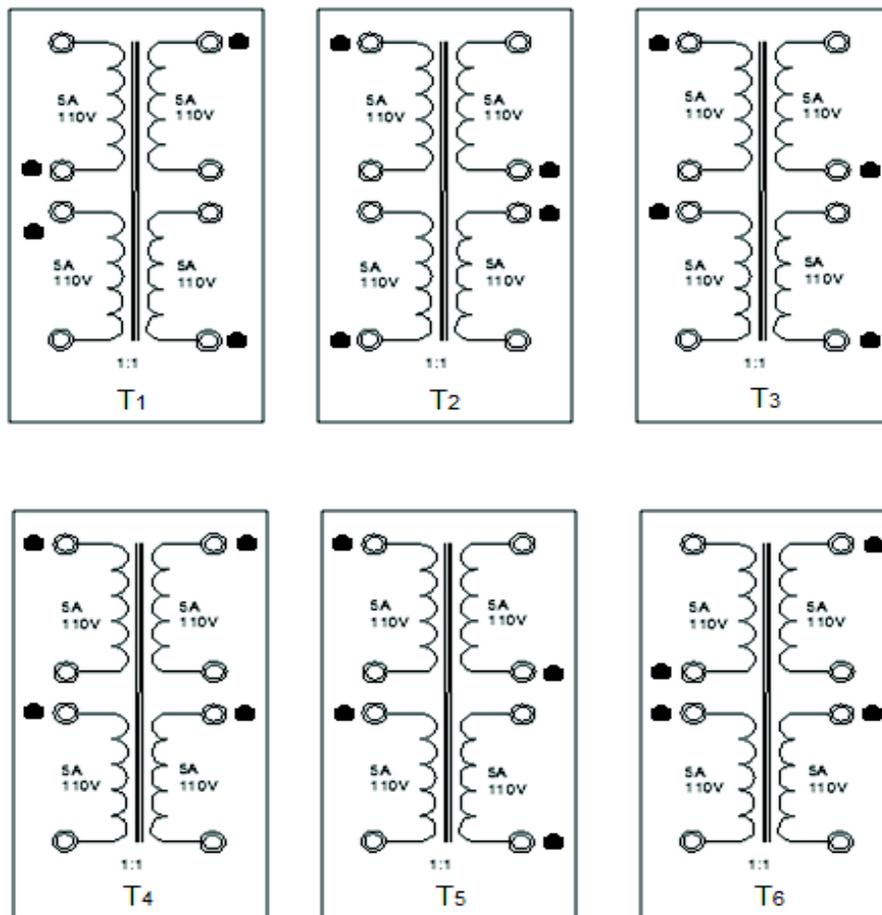
## Contenido

<b>1</b>	<b>SECCIÓN 1. ESPECIFICACIONES</b> .....	<b>3</b>
1.1	Transformadores monofásicos .....	3
1.2	Sistema de mediciones .....	4
1.2.1	Panel del sistema de mediciones. ....	4
1.2.2	Arduino y sus componentes para pantalla táctil.....	6
1.2.3	Fuente de alimentación +/- 9vdc circuitos de tratamiento de señales. ....	7
1.2.4	Alimentación para Arduino. ....	7
1.2.5	Circuito de tratamiento de señal de corriente. ....	8
1.2.6	Circuito de señal de voltaje. ....	9
1.2.7	Circuito detector de cruces por cero.....	10
1.2.8	Tabla de identificación de conductores. ....	11
<b>2.</b>	<b>SECCIÓN 2</b> .....	<b>13</b>
<b>3.</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN</b> .....	<b>13</b>
2.1	Voltímetro, amperímetro y cosfímetro. ....	13
2.2	Pruebas a realizarse en los transformadores. ....	15
2.2.1	Prueba N° 1: Transformador Monofásico y Autotransformador.....	15
2.2.2	Prueba N° 2: Pruebas en transformadores monofásicos. ....	16
2.2.3	Prueba N° 3: Banco de Transformadores.....	17
<b>3.</b>	<b>Sección 3 PLAN DE MANTENIMIENTO</b> .....	<b>18</b>
3.1	Listado de elementos.....	18
3.2	Mantenimiento.....	18
	Causa de problemas y fallas en transformadores.....	20

# SECCIÓN 1. ESPECIFICACIONES

## 1.1 Transformadores monofásicos

La **Figura 1-1** representa los seis transformadores monofásicos que constituyen el módulo, cada uno posee cuatro bobinas con sus respectivas borneras de conexión para conductores adicionalmente los puntos de color negro señalan la polaridad de cada bobina (parámetro constructivo).



**Figura 1-1.** Transformadores monofásicos con su respectiva polaridad.

El módulo está formado por 6 transformadores monofásicos, que poseen 4 bobinados independientes con porta fusibles de protección (fusibles 127v/5amp), e instalados en la estructura soporte.



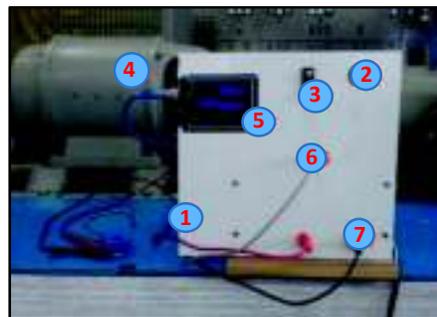
**Figura 1-2.** Transformadores monofásicos en su estructura soporte.

Para la identificar cada transformador, se ha nominado de acuerdo a la siguiente numeración T1, T2, T3 T4, T5 y T6.

## 1.2 Sistema de mediciones.

Se detalla el panel del sistema de mediciones conformado por: voltímetro, amperímetro y cosfímetro.

### 1.2.1 Panel del sistema de mediciones.

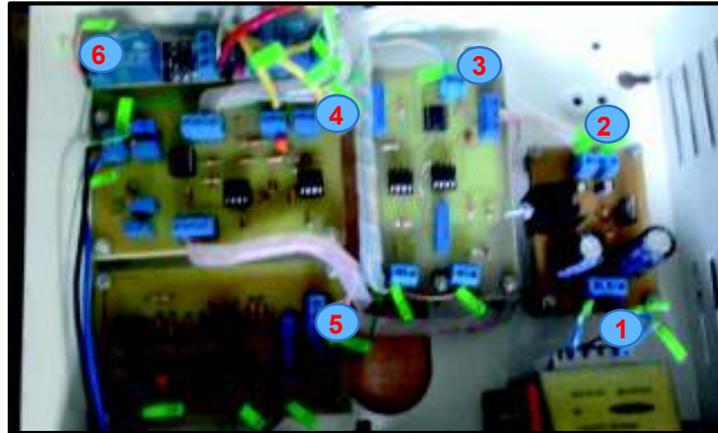


**Figura 1-3.** Panel de medición voltajes corrientes y factor de potencia.

**Tabla 1-1.** Descripción del panel de mediciones.

No	Denominación
1	Panel de control sistema de mediciones
2	Interruptor para fuente +/- 9vdc de circuitos sensores
3	Fusible fuente +/- 9vdc
4	Cable alimentación Arduino fuente independiente +9vdc
5	Pantalla táctil + screen adapter shield + Arduino acoplados
6	Bornera sensor de corriente pinza TC
7	Borneras de conexión puntas de voltaje

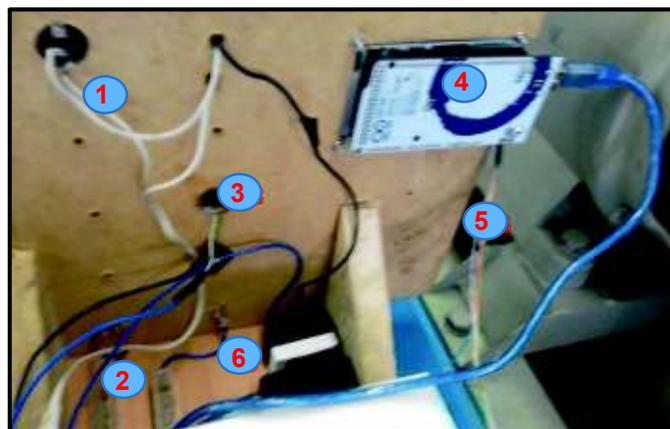
Nota: el cable de alimentación independiente de Arduino también se puede usar como cable de datos serial.



**Figura 1-4.** Fuente y circuitos sensores del panel de mediciones.

**Tabla 1-2.** Circuitos del sistema de mediciones fuente y circuitos.

No	Denominación
1	Transformador relación 10:1
2	Fuente +/- 9vdc para circuitos sensores (voltaje, corriente y detector de cruces por cero)
3	Placa circuito detector de cruces por cero para señal de voltaje y corriente
4	Placa circuito sensor de voltaje
5	Placa circuito sensor de corriente
6	Relés rangos del divisor de voltaje para circuito sensor de voltaje



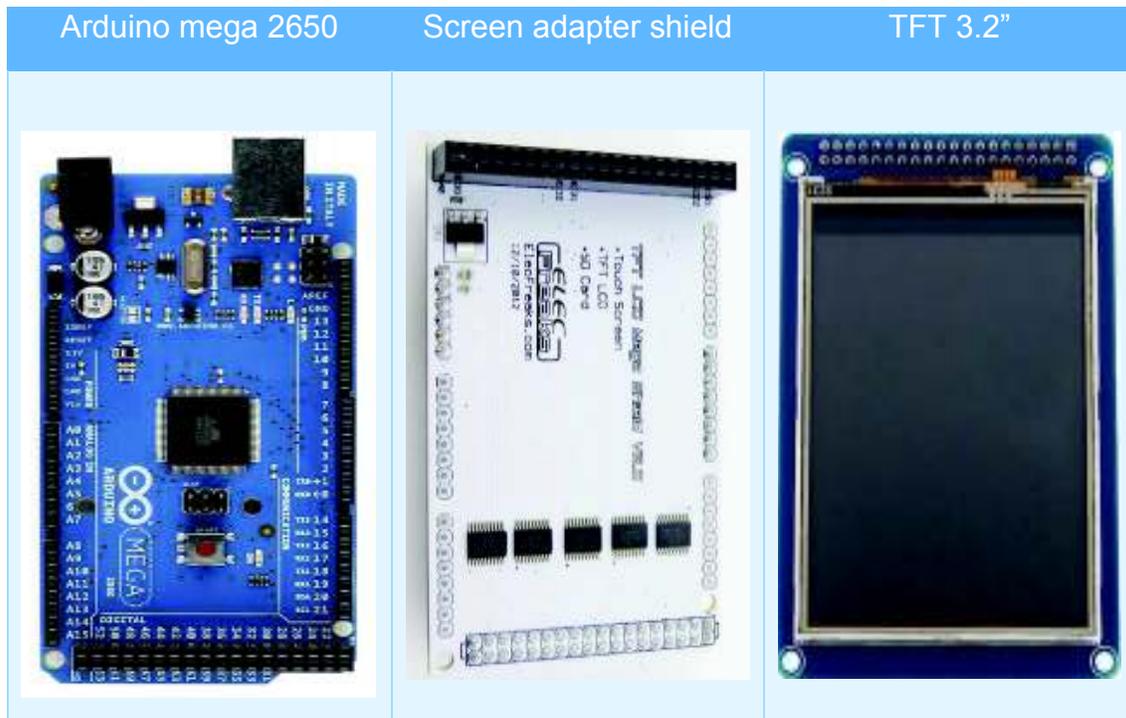
**Figura 1-5.** Parte posterior del panel de medición.

**Tabla 1-3.** Descripción de conexiones parte posterior del módulo de medición.

No	Denominación
1	Conexiones posteriores del panel de control
2	Entrada de señal de voltajes (borneras) con fusibles (puntas de voltaje)
3	Entrada señal de sensor de corrientes (Jack) Pinza SCT 013 000
4	Arduino acoplado con pantalla TFT y touch
5	Conductores UTP señal de circuitos sensores hacia el Arduino
6	Fuente de Alimentación independiente para Arduino +9vdc

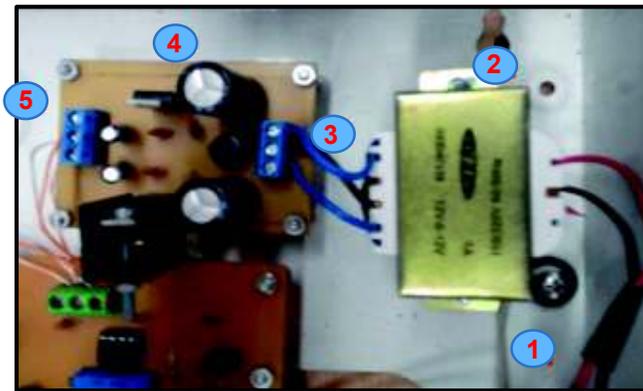
### 1.2.2 Arduino y sus componentes para pantalla táctil.

Conectar shield táctil (Tarjeta acopladora de redireccionamiento de pines), en los pines digitales de Arduino y la pantalla TFT 3.2” en el shield.



**Figura 1-6.** Arduino y componentes de la pantalla táctil.

### 1.2.3 Fuente de alimentación +/- 9vdc circuitos de tratamiento de señales.



**Figura 1-7.** Fuente de alimentación +/- 9Vdc para circuitos de tratamiento de señales.

**Tabla 1-4.** Partes de la fuente +/- 9 Vdc.

No	Denominación
1	Conductores de alimentación 120vac para fuente de sensores y alimentación de Arduino con tierra en carcasa
2	Transformador 120V/9Vac
3	Entrada al circuito rectificador +/- 9VAC Bornera de tres terminales, la bornera intermedia corresponde a tierra.
4	Circuito rectificador mediante reguladores de voltaje
5	Bornera de salida +/- 9vdc 3 terminales bornera del centro tierra.

### 1.2.4 Alimentación para Arduino.

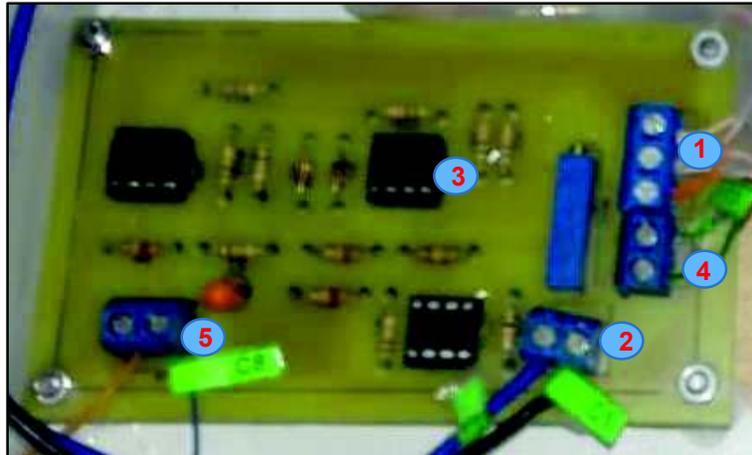


**Figura 1-8.** Fuente de alimentación para Arduino.

A partir de la derivación de los conductores de alimentación de 120vac está acoplado un adaptador de voltaje, este suministra +5vdc que es el valor nominal de trabajo para

la plataforma Arduino Mega, es de gran utilidad debido a que se aísla el Arduino de los otros circuitos.

### 1.2.5 Circuito de tratamiento de señal de corriente.



**Figura 1-9.** Circuito sensor de corriente.

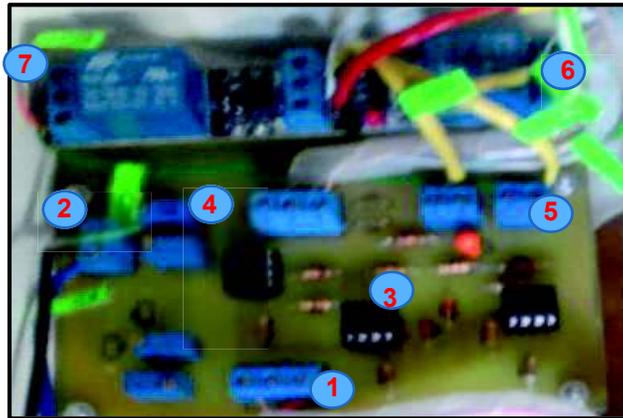
**Tabla 1-5.** Etapas del circuito sensor de corriente.

No	Denominación
1	Bornera (3 terminales) de alimentación +/-9 Vdc terminal central tierra. Verificar la polaridad del voltaje con voltímetro en caso de montaje.
2	Recepción de señal de corriente alterna sensor tipo pinza SCT 013 000.
3	Etapas de acondicionamiento, seguimiento, rectificación y filtración de señales mediante TL 082 y OP07
4	Señales de salida para el detector de cruces por cero. Estas señales se toman únicamente en la etapa de acondicionamiento de señal.
5	Señales de salida de corriente para el Arduino (amperímetro). Estas se toman de la etapa de rectificación y filtrado.



**Figura 1-10.** Sensor de corriente SCT 013000.

## 1.2.6 Circuito de señal de voltaje.



**Figura 1-11.** Circuito de sensor de voltaje.

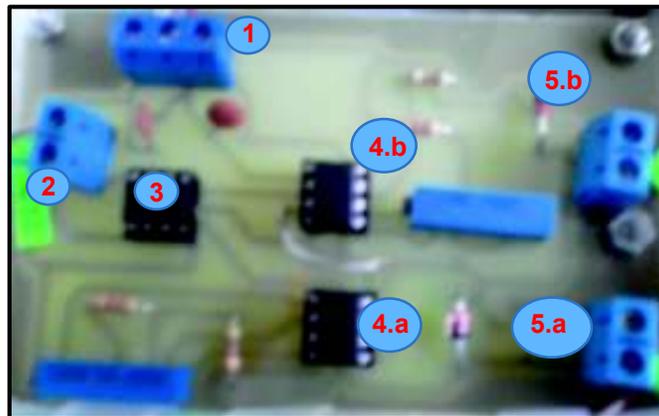
**Tabla 1-6.** Etapas del circuito sensor de voltaje.

No	Denominación
1	Bornera (3 terminales) de alimentación +/-9 vdc terminal central tierra. Verificar la polaridad del voltaje con voltímetro en caso de montaje.
2	Recepción de señal de voltaje alterno mediante puntas de voltímetro.
3	Etapas de acondicionamiento, seguimiento, rectificación y filtración de señales mediante TL 082 y OP07.
4	Señal de salida para el detector de cruces por cero. Se toma únicamente en la etapa de acondicionamiento de señal.
5	Señales de salida de voltaje para el Arduino (voltímetro). Se toma de la etapa de rectificación y filtrado.
6	Relé 1 selector rangos del divisor de tensiones para señal de entrada del circuito sensor de voltaje
7	Relé 2 selector rangos del divisor de tensiones para señal de salida del circuito sensor de voltaje a pines análogos Arduino



**Figura 1-12.** Puntas de voltaje para obtener la señal de voltaje.

## 1.2.7 Circuito detector de cruces por cero



**Figura 1-13.** Circuito detector de cruces por cero.

**Tabla 1-7.** Etapas del circuito detector de cruces por cero

No	Denominación
1	Bornera (3 terminales) de alimentación +/-9 vdc terminal central tierra. Verificar la polaridad del voltaje con voltímetro en caso de montaje.
2	Entrada de señal alterna de voltaje y corriente para pulsos.
3	Etapa seguidora de señales mediante TL 082.
4	Etapa del detector de cruces por cero.
4.a	Voltaje mediante LM 311.
4.b	Corriente mediante LM 311.
5	Salida señal de pulsos a los pines que activan y desactivan las interrupciones del Arduino.
5.a	Voltajes Pin 18 (Arduino)
5.b	Corrientes Pin 19 (Arduino)

Nota: para el funcionamiento del mismo deben estar conectados los sensores de voltaje y de corriente para obtener el ángulo de desfase, las salidas de los pulsos se conectan al Arduino para activar las interrupciones.

## 1.2.8 Tabla de identificación de conductores.

Código	Tipo	Color	Conexión		
C1	AWG	Negro	Jack (Bornera Sensor de corriente)	Bornera recepción de señal Sensor SCT-013-000	Tierra
C2	AWG	Azul	Jack (Bornera Sensor de corriente)	Bornera recepción de señal Sensor SCT-013-000	Señal
C3	AWG	Negro	Bornera puntas de voltaje con fusible	Bornera de señal voltaje	Tierra
C4	AWG	Azul	Bornera puntas de voltaje con fusible	Bornera de señal voltaje	Señal
C5	UTP	Café-Blanco	Bornera Intermedia salida +/- 9VDC Fuente	Bornera intermedia alimentación +/- 9vdc.	Tierra
C6	UTP	Naranja	Salida Fuente +/- 9vdc	Alimentación +/- 9vdc sensores voltaje, corriente y pulsos.	-9vdc
C7	UTP	Blanco-Naranja	Salida Fuente +/- 9vdc	Alimentación +/- 9vdc sensores voltaje, corriente y pulsos.	+9vdc
C8	UTP	Azul	PIN Análogo A3 Arduino	Salida circuito Sensor de Corriente	Señal corriente
C9	UTP	Naranja	PIN Análogo A1 Arduino	Salida circuito Sensor de voltaje rango (0-130v)	Señal voltaje 1
C10	UTP	Verde	PIN Tierra Arduino	Tierra común de fuente, sensores voltaje, corriente y pulsos	Tierra
C11	UTP	Azul	Bornera salida de señal para detector de cruce por cero (sensor corriente)	Entrada circuito de pulsos corriente	Señal
C12	UTP	Verde-Blanco	Bornera salida de señal para detector de cruces por cero (sensor voltaje)	Entrada Circuito de pulsos Voltaje	Señal
C13	UTP	Blanco-Azul	Salida circuito de pulsos voltaje	PIN 18 INT5 Arduino	Señal
C14	UTP	Blanco-Naranja	Salida circuito de pulsos corriente	PIN 19 INT4 Arduino	Señal
C15	USB	Azul	Fuente independiente	Alimentación Arduino	Fuente +9vdc
C16	AWG	Negro	Alimentación Cargador	Fuente Arduino	Fuente +9vdc
C17	AWG	Azul	Alimentación Cargador	Fuente Arduino	Fuente +9vdc
C18	AWG	Negro	Secundario Transformador salida +/-9 VAC Bornera Intermedia	Entrada Fuente +/- 9Vac Bornera Intermedia	Tierra
C19	AWG	Azul	Secundario Transformador salida +/-9 VAC	Entrada Fuente +/- 9vac	9vac

C20	AWG	Azul	Secundario Transformador salida +/-9 VAC	Entrada Fuente +/- 9vac	9vac
C21	AWG	Rojo	120 VAC Bornera Intermedia	Primario Transformador	9vac
C22	AWG	Negro	120 VAC Bornera Intermedia	Primario Transformador	9vac retorno
C23	AWG par	Negro	120vac	Fuente +/- 9v	Fuente de sensores
C24	AWG	blanco	Tierra de carcasa	Protección	Tierra
C25	AWG	Blanco	120vac	Interruptor Fusible de fuente	Alimentación
C26	UTP	Café-blanco	PIN Análogo A7 Arduino	Salida circuito Sensor de voltaje rango (130-260v)	Señal voltaje 2
C27	UTP	Verde	Salida circuito Sensor de voltaje	Relé selector de pines análogos A7 – A1	Señal de voltaje general
C28	UTP	Naranja-blanco	Pin digital 10 Arduino Control relé	Vin Relé 1 Señal de entrada divisor de tensión	Selector rangos de voltaje
C29	UTP	Azul-blanco	Pin digital 11 Arduino Control relé	Vin Relé 2 señal de salida Pines análogos Arduino	Selector rango de voltaje
C30	UTP	Azul-blanco	Vcc 5v Arduino	Vcc Relés	Alimentación de relés
C31	UTP	Azul-blanco	Común de relé 1	Rangos de señal de entrada circuito sensor de voltaje	Señal de voltaje
C32	UTP	Azul-blanco	Divisor de voltaje 10K	Entrada circuito sensor de voltaje	Señal de voltaje Rango 0-130v
C33	UTP	Naranja-blanco	Divisor de voltaje 4k	Entrada circuito sensor de voltaje	Señal de voltaje Rango 130 - 260v
P1	AWG	Negro	Devanados primarios de cada transformador monofásico	Bornera – Fusible de panel de conexiones	Alimentación de fuente de red Trifásica o monofásica
P2	AWG	Negro			
S1	AWG	Rojo	Devanados secundarios de cada transformador monofásico	Bornera – Fusible de panel de conexiones	Alimentación de fuente de red Trifásica o monofásica
S2	AWG	Rojo			

## SECCIÓN 2.

### PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN.

#### 2.1 Voltímetro, amperímetro y cosfímetro.

1. Conectar el sensor de corriente SCT-013-000 en su respectivo Jack del módulo de control.  
Nota: el sensor SCT-013-000 es tipo pinza debe colocarse de manera que el conductor pase por la sección de la pinza o sensor TC.
2. Conectar las puntas de voltaje es las borneras, su empleo es similar al del voltímetro.



Figura 3-1. Sensor Tc de corriente y puntas de voltaje.

3. Encender el interruptor de la fuente.

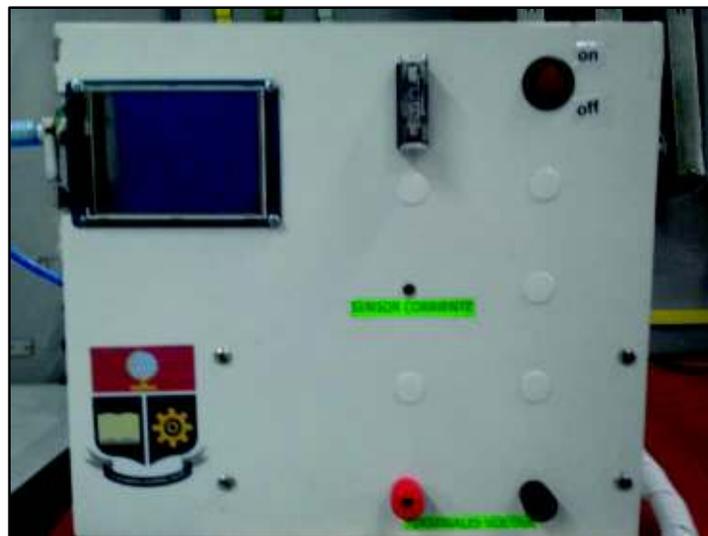


Figura 3-2. Panel del sistema de mediciones.

4.- Al encender el interruptor se despliega el menú en la pantalla táctil



**Figura 3-3.** Botones de pantalla táctil.

El menú despliega las siguientes opciones:

<b>f.p.</b>	Factor potencia
<b>VOLTAJE (0-130V).</b>	Voltímetro
<b>VOLTAJE (130-260v).</b>	Voltímetro
<b>CORRIENTE (0-20A).</b>	Amperímetro

**Tabla 3-1.** Descripción del menú principal.

Botón	Función
f.p.	Para obtener los valores deben estar conectados la pinza (amperímetro) y puntas de voltaje. Recomendado en Pruebas de vacío y cortocircuito de transformadores
Voltaje	Para obtener lecturas se debe colocar las puntas de voltaje en los terminales donde se requiera la medición. El rango de uso comprende entre 0 a 260V. Recomendado para cualquier tipo de ensayo de laboratorio.
Corriente	Para obtener lecturas se debe conectar el sensor SCT-013-000 por encima del conductor. El rango de uso comprende entre 0 a 20A. Recomendado para cualquier tipo de ensayo de laboratorio.
Atrás	Botón de retorno al menú principal

## 2.2 Pruebas a realizarse en los transformadores.

### 2.2.1 Prueba N° 1: Transformador Monofásico y Autotransformador.

#### Objetivos:

- Determinar la polaridad relativa de cada devanado de un transformador monofásico.
- Determinar el comportamiento del transformador monofásico y autotransformador bajo condiciones de vacío y carga.

#### Equipo

- Tablero principal.
- TC sensor de corrientes SCT 013-000.
- Transformadores monofásicos
- Cargas resistivas monofásicas.
- Sensor de voltaje.

#### Diagramas

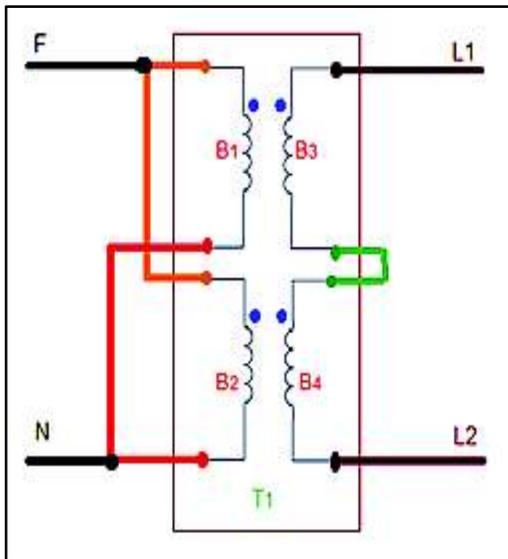


Figura 3-4. Transformador Elevador

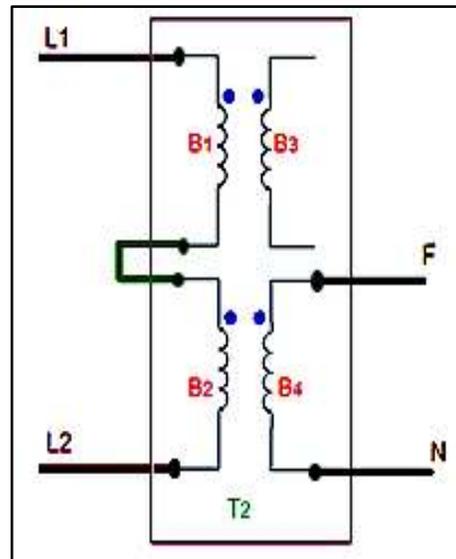


Figura 3-5. Transformador Reductor

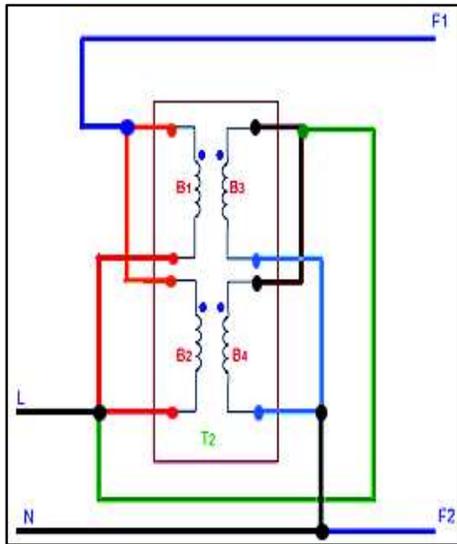


Figura 3-6. Autotransformador elevador.

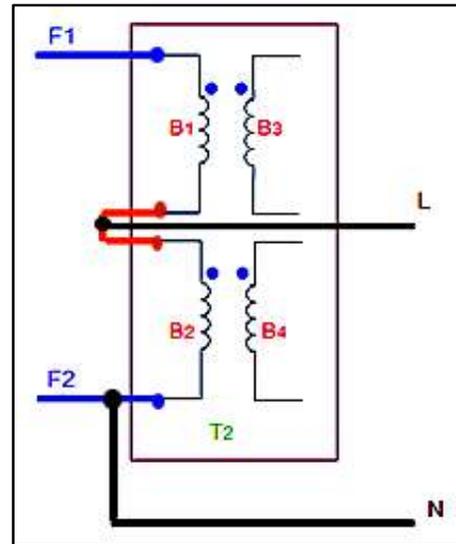


Figura 3-7. Autotransformador reductor.

## 2.2.2 Prueba N<sup>a</sup> 2: Pruebas en transformadores monofásicos.

### Objetivo

- a. Determinar los parámetros eléctricos de un transformador monofásico (de laboratorio) mediante la realización de pruebas de circuito abierto y cortocircuito.

### Equipo

1. Tablero principal del Laboratorio de Máquinas Eléctricas
2. Sensor de corriente SCT 013 000
3. Medidor de Factor de Potencia
4. Transformadores monofásicos
5. Sensor de voltaje

### Diagramas

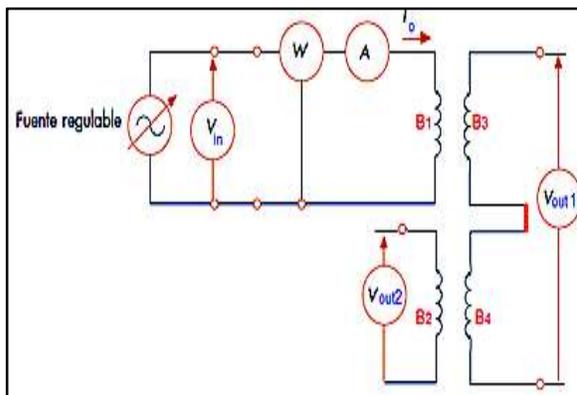


Figura 3-8. Prueba de vacío.

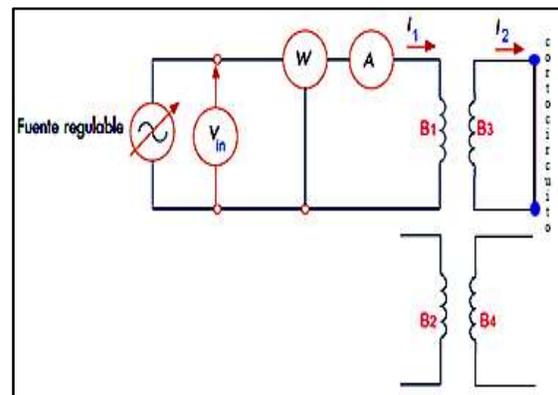


Figura 3-9. Prueba de cortocircuito.

## 2.2.3 Prueba N<sup>a</sup> 3: Banco de Transformadores

### Objetivos

- Realizar las conexiones estrella y triangulo utilizando 1 banco de transformación trifásico.
- Conocer experimentalmente los diferentes grupos de conexión

### Equipo

- Tablero Principal del Laboratorio de Máquinas Eléctricas
- Sensor de corrientes SCT 013 000
- Sensor de voltajes
- Transformadores monofásicos

### Diagrama

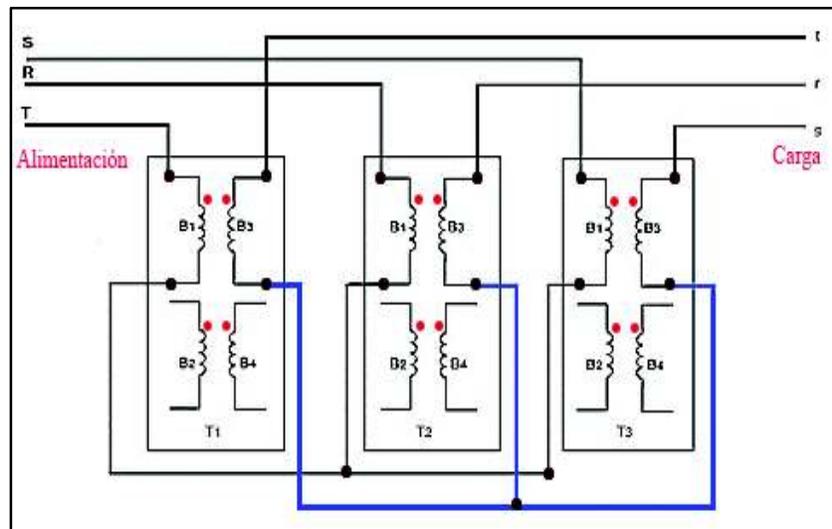


Figura 3-10. Conexión YY0.

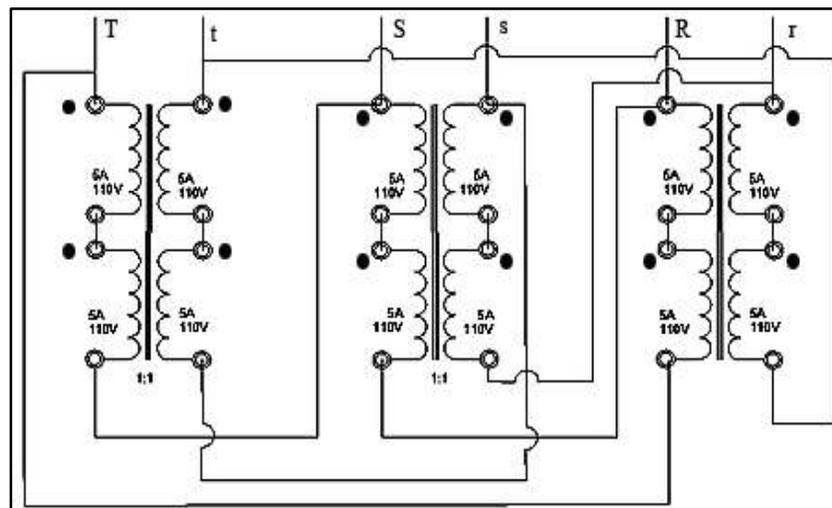


Figura 3-11. Conexión DD0.

## Sección 3 PLAN DE MANTENIMIENTO

Es el conjunto de acciones y tareas de mantenimiento seleccionadas y dirigidas a proteger la función de un activo, estableciendo una frecuencia de ejecución de las mismas y el personal destinado a realizarlas.

### 3.1 Listado de elementos.

A continuación, se muestran los elementos del módulo de transformadores.

**Tabla 3-1** Equipos que constituyen el módulo.

Cant	Denominación	Elemento	Potencia [VA]	Tensión [V]	Corriente [Amp]
1	T1	Transformador	1100	127	5
1	T2	Transformador	1100	127	5
1	T3	Transformador	1100	127	5
1	T4	Transformador	1100	127	5
1	T5	Transformador	1100	127	5
1	T6	Transformador	1100	127	5
1	Fuente DC	Placa circuito impreso		+/- 9	
1	Sensor de Voltaje	Placa circuito impreso		+/- 9	
1	Sensor de Corriente	Placa circuito impreso		+/- 9	
1	Comparador de Tensiones	Placa circuito impreso		+/- 9	

### 3.2 Mantenimiento

Los transformadores están expuestos a una cantidad de eventos que afectan su normal funcionamiento, se enumeran las siguientes:

- **Eléctricos:** Sobre voltajes, descargas atmosféricas, descargas internas parciales
- **Térmico:** Sobrecargas, sobre excitación.
- **Mecánico:** Corto circuito, golpes, vibraciones.
- **Físico:** Humedad, desgastes por envejecimiento, corrosión.

Las pruebas para diagnóstico se realizan periódicamente o ante una circunstancia especial, con el fin de determinar la condición del transformador, si es la normalmente esperada o si hay tendencias que indiquen la posible tendencia de una falla.

#### Mantenimiento de rutina

Una inspección visual en chequeo de tornillos y partes de acople en los transformadores, revisión de los circuitos eléctricos, con el objetivo de obtener una larga vida y asegurar la confiabilidad.

## Trabajos de reparación media

Incluye el desarmado del transformador para inspección y/o reparación del conjunto núcleo/bobinas según sea necesario ejemplo: reparación de soportes, reemplazo de anclajes en los transformadores.

## Trabajos de reparación mayores

Los trabajos de reparación mayores se llevan a cabo después de una falla interna seria o después de un periodo de servicio prolongado de 8 a 10 años. Se lleva a cabo si el transformador ha estado en servicio por varios años y sujeto a sobrecargas severas que dan como resultado un debilitamiento del aislamiento de las bobinas o a su vez el transformador ha estado en cortocircuito durante un periodo largo.

**Tabla 3-2** Cronograma de actividades para el mantenimiento de transformadores.

ACTIVIDAD	EQUIPO/HERRAMIENTAS	FRECUENCIA	CONDICIÓN
Limpieza general de la unidad	Compresor de aire	Semanal	Desenergizado
Ajustes de partes mecánicas	Llaves para pernos/ destornilladores para bornes	Semanal	Desenergizado
Verificación de la temperatura	Visual y táctil	semanal	Luego de aplicar carga máxima en los devanados
Verificación de conexiones	Visual.	semestral	Bajo parámetros de cada practica
Verificación de paso a tierra	Fluke función continuidad	semestral	Desenergizado Continuidad entre bobinados y tierra y núcleo de transformadores
Medición de voltaje primario y secundario	Instrumento para medición de voltajes Arduino	anual	En vacío/ con carga
Relación de transformación	Instrumento para medición de voltajes Arduino	anual	En vacío/ con carga
Resistencia de Aislamiento en CC	Megger	anual	Desenergizado
Verificar Ruido y Vibraciones	Ultrasonido	Anual	Bajo carga y vacío

## Causa de problemas y fallas en transformadores

Se detallan algunas posibles fallas y su correspondiente causa en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-3** Causas y fallas en el módulo.

PROBLEMA	CAUSA POSIBLE	COMENTARIO
<b>Sobrecalentamiento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobrecarga</li> <li>- Alta temperatura ambiente</li> <li>- Corrientes circulantes</li> <li>- Corrientes armónicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar que exista suficiente ventilación.</li> <li>- Reducir carga en el transformador.</li> <li>- Cuando la temperatura ambiente es alta reducir la carga en el transformador.</li> <li>- Cuando la sobrecarga son cíclicas y por periodos largos poner los transformadores en paralelo.</li> </ul>
<b>Cortocircuitos frecuentes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acumulación de polvo o contaminantes sobre los aislantes.</li> <li>- Envejecimiento de aislamiento.</li> <li>- Malas uniones soldadas produciendo puntos calientes.</li> <li>- Mala conexión realizada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los devanados del transformador deben ser capaces de soportar cortocircuitos repetitivos.</li> <li>- Revisar diagrama de conexiones.</li> </ul>
<b>Lecturas erróneas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acumulación de polvo en circuitos.</li> <li>- Partes electrónicas quemadas</li> <li>- Entradas de señales flojas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limpiar la parte electrónica con liquido disolvente</li> <li>- Verificar fuente dc</li> <li>- Ajustar los tornillos de los sensores corriente y voltaje.</li> </ul>