



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE GUAYAQUIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

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

**TÍTULO:**

**ANÁLISIS DE UN SISTEMA TRIFÁSICO DE TRANSFORMADORES EN  
CONEXIÓN Y - D**

**AUTORES:**

**WALTER RAFAEL CASTRO FREIRE  
ANDRÉS ROBERTO ANDRADE SANTISTEVAN**

**TUTOR:**

**MASTER GARY AMPUÑO AVILÉS**

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**ENERO 2019**

## **CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Andrés Roberto Andrade Santistevan y Walter Rafael Castro Freire autorizamos a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además, declaramos que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, febrero, 2019

Firma \_\_\_\_\_

Autor: Andrés Andrade Santistevan

Cédula: 0930579461

Firma \_\_\_\_\_

Autor: Walter Castro Freire

Cédula: 0950133157

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

Yo, **ANDRÉS ROBERTO ANDRADE SANTISTEVAN**, con documento de identificación N° 0930579461, manifiesto mi voluntad y cedo a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos primordiales en virtud de que soy el autor del trabajo de grado titulado **“ANÁLISIS DE UN SISTEMA TRIFÁSICO DE TRANSFORMADORES EN CONEXIÓN Y - D”** mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la ley de propiedad intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, febrero, 2019

Firma \_\_\_\_\_

Autor: Andrés Andrade Santistevan

Cédula: 0930579461

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

Yo, **WALTER RAFAEL CASTRO FREIRE**, con documento de identificación N° 0950133157, manifiesto mi voluntad y cedo a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos primordiales en virtud de que soy el autor del trabajo de grado titulado “**ANÁLISIS DE UN SISTEMA TRIFÁSICO DE TRANSFORMADORES EN CONEXIÓN Y - D**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la ley de propiedad intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, febrero, 2019

Firma \_\_\_\_\_

Autor: Walter Castro Freire

Cédula: 0950133157

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

Yo, **GARY OMAR AMPUÑO AVILES**, tutor del proyecto de titulación denominado **“ANÁLISIS DE UN SISTEMA TRIFÁSICO DE TRANSFORMADORES EN CONEXIÓN Y - D”** mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, realizado por los estudiantes: Andrés Roberto Andrade Santistevan y Walter Rafael Castro Freire, certifico que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, febrero, 2019

Firma \_\_\_\_\_

Msc. Gary Ampuño Avilés

## **DEDICATORIA**

Le dedico el tiempo y la culminación de este trabajo a Dios, quien es el que me da las fuerzas y la voluntad para seguir con la vida misma.

A mis padres les estoy agradecido por tanto amor, dedicación y esfuerzo; siempre han procurado proporcionarme de todo lo necesario para que me convierta en un hombre de bien y un excelente profesional, el resultado es el cumplimiento de esta meta.

A mis hermanos, primos, tíos por demostrar preocupación, ánimos y comprensión en todo el tiempo del desarrollo de esta etapa.

Andrés Andrade

Dedico este trabajo principalmente este trabajo a Dios, porque sin la fuerza, paciencia y voluntad que me ha brindado, no hubiera sido posible esto.

Agradezco a mis padres, que siempre estuvieron presentes en todo momento a lo largo de estos años con su apoyo y confianza para que pudiera culminar esta carrera de pregrado, a los ingenieros Alberto Ramírez y Andrés Rivera que aportaron con su experiencia y conocimiento para el avance de este trabajo.

Al ingeniero Gary Ampuño por su dedicación y constante apoyo durante el tiempo de desarrollo de este trabajo, con sus enseñanzas y consejos en todo momento.

Walter Castro

## RESUMEN

El desarrollo de este trabajo tiene como objetivo principal hacer el análisis mediante un modelo matemático, que se usara para la posterior validación de los parámetros reales como curvas de corriente y voltaje en un banco de transformadores en conexión Y - D.

Para hacer el análisis de un banco de transformadores en conexión Y - D, se necesitan datos fundamentales de cada uno de los transformadores monofásicos que están ubicados en el laboratorio de transformadores de la Universidad Politécnica Salesiana. Para obtener las características básicas de los transformadores se procedió a someterlos a las 3 pruebas fundamentales: La prueba de polaridad que nos proporcionara el sentido en el que los devanados han sido colocados al momento de la construcción de cada transformador sirve para la interconexión entre transformadores, de la prueba de circuito abierto obtenemos la admitancia de excitación del núcleo ferromagnético y en la prueba de cortocircuito conoceremos la impedancia equivalente de cada transformador.

Con estos datos se puede hacer el análisis en estado de vacío y fue sometido a diferentes tipos de cargas (resistiva, inductiva y resistiva – inductiva), para estudiar el comportamiento que tienen los parámetros para cada uno de los casos.

Mediante el módulo de adquisición de datos se obtuvieron los parámetros reales en tiempo real de cada uno de los ensayos con diferentes tipos de carga así se construyeron las curvas de operación reales; para hacer la validación de estos datos se desarrolló un modelado matemático mediante Matlab®/Simulink® propiedad de MathWorks® que nos ayudara a simular las curvas de operación. Para la comprobación se ha comparado las curvas simuladas y las curvas reales experimentales dando como resultado un margen de error de aceptable en general para todas las pruebas realizadas; el desarrollo de este trabajo puede servir como base para futuros temas de investigación por parte de la Universidad Politécnica Salesiana.

## ABSTRACT

The development of this work has as a main objective to perform the analysis using a mathematical model, which will be used for the subsequent validation of the real parameters such as current and voltage curves in a transformer bank in Y – D connection.

To make the analysis of a transformer bank in Y – D connection, fundamental data of each of the single - phase transformers that are located in Transformer Laboratory of Universidad Politécnica Salesiana are needed. For getting the basic characteristics of the transformers we proceeded to submit them to the 3 fundamental tests: The polarity test that will give us the sense in which the windings have been placed at the time of construction of each transformer serves for the interconnection between transformers, from the open circuit test we obtain the excitation admittance of the ferromagnetic core and in the test of short circuit we will know the equivalent impedance of each transformer.

With this data the analysis can be done in a vacuum state and was subjected to different types of loads (resistive, inductive and resistive - inductive), to study the behavior of the parameters for each of the cases.

By means of the data acquisition module, the real parameters were obtained in real time of each one of the tests with different types of load, thus the real operation curves were constructed; To validate these data, a mathematical modeling was developed using Matlab® / Simulink® owned by MathWorks® that will help us simulate the operating curves. For the verification, the simulated curves and the experimental real curves have been compared resulting in an acceptable margin of error in general for all the tests performed; The development of this work can serve as a basis for future research topics by the Universidad Politécnica Salesiana.

## INTRODUCCIÓN

En este trabajo de estudio se encuentra el análisis de un banco de transformadores en conexión Y - D, utilizando herramientas como Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> que es un software especializado en la resolución de sistemas matemáticos complejos, a través de él se logró minimizar los tiempos para el desarrollo de las ecuaciones diferenciales planteadas que mostraran los resultados precisos de manera simulada y gráfica.

Para el desarrollo del trabajo fueron necesarios los conocimientos adquiridos a lo largo de este proceso educativo así, como de otras fuentes de información artículos científicos, libros, fuentes digitales, tesis de grado desde el repositorio de la Universidad mediante los cuales consolidamos las bases en relación al caso de estudio a desarrollar: modelo real, comportamiento de un banco de transformadores y el modelado matemático.

Para la comprobación fueron necesarias las pruebas experimentales planteadas usando un banco de transformadores monofásicos y el módulo de adquisición de datos.

El análisis se basa en estudiar en cómo se comportan los parámetros medidos a la salida del banco de transformadores 3Ø, mediante el módulo de adquisición de datos se recopilaron los parámetros a analizar para cada una de las pruebas con las diferentes cargas propuestas y así formar las curvas reales experimentales que serán usadas para el objetivo final. Para desarrollar el modelo matemático se necesitó de conocer los datos característicos de cada transformador, se obtuvieron mediante las 3 pruebas fundamentales que son: prueba de polaridad, circuito abierto y de corto circuito; teniendo todos los datos necesarios se hizo uso de la herramienta Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> para modelar/ simular las curvas de los parámetros antes mencionados para su posterior comparación con las curvas experimentales.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	II
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS .....	III
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS .....	IV
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR .....	V
DEDICATORIA .....	VI
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT.....	VIII
INTRODUCCIÓN .....	IX
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	X
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	XIII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	XV
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIX
CAPÍTULO I .....	1
1. EL PROBLEMA.....	1
1.1. Descripción del Problema .....	1
1.2. Antecedentes.....	1
1.3. Importancia y alcance. ....	2
1.4. Delimitación.....	2
1.5. Objetivos .....	3
1.5.1. Objetivo general.....	3
1.5.2. Objetivos específicos .....	3
1.6. Marco metodológico. ....	3
CAPÍTULO II.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Conceptos Básicos .....	4
2.1.1. Máquina eléctrica.....	4
2.1.2. Ley de Faraday.....	4
2.1.3. Ley de Lenz.....	5
2.2. Transformador.....	6
2.2.1. Transformador monofásico ideal. ....	6

2.2.2 Relación de transformación. ....	7
2.3 Transformador real.....	8
2.3.1 Circuito equivalente de un transformador real.....	8
2.4 Pruebas básicas del transformador.....	9
2.4.1 Prueba de polaridad.....	9
2.4.1.1. Procedimiento experimental .....	9
2.4.2 Prueba de circuito abierto .....	10
2.4.2.1 Procedimiento experimental .....	11
2.4.3 Prueba de corto circuito .....	11
2.4.3.1 Procedimiento experimental .....	11
2.5 Banco trifásico de transformadores .....	12
2.6. Sistema trifásico de voltajes.....	12
2.6.1. Secuencia de fases.....	13
2.6.1.1 Secuencia negativa.....	14
2.7. Conexiones trifásicas de transformadores. ....	15
2.7.1 La conexión Y/Y.....	15
2.7.2 La conexión Y/D.....	16
2.8 Comunicación .....	16
2.8.1 Protocolo de comunicación Modbus® .....	17
2.8.1.1 Descripción general del protocolo .....	18
<b>CAPÍTULO III: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y COMUNICACIÓN DEL MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL SISTEMA TRIFÁSICO DE TRANSFORMADORES .....</b>	<b>19</b>
3.1. Diseño y construcción del módulo didáctico. ....	19
3.1.1. Fase de corte y pintado de la estructura metálica. ....	20
3.2. Distribución y conexión de elementos en el módulo didáctico. ....	21
3.2.1. Dispositivos instalados en el módulo.....	22
3.2.1.2. Fuente regulada de voltaje. ....	23
3.3. Comunicación de los equipos para la toma de datos. ....	24
3.3.1. Comunicación PLC – PC.....	25
3.3.2. Comunicación del Analizador de red – PLC. ....	29
3.3.3. Comunicación PLC – HMI. ....	35
<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE UN SISTEMA TRIFÁSICO DE TRANSFORMADORES EN CONEXIÓN Y - D Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>45</b>
4.1. Modelado Matemático .....	45
4.1.1. Acoplamiento de transformadores monofásicos para una conexión Y - D. ....	45

4.1.2. Modelo real aproximado de cada transformador monofásico.....	46
4.1.3. Análisis a vacío del sistema trifásico de transformadores en conexión Y– D. ....	51
4.1.4. Análisis con carga del sistema trifásico de transformadores en conexión Y– D. ....	55
4.2. Validación del modelo matemático. ....	62
4.2.1. Simulación .....	62
4.2.2. Prueba experimental con carga resistiva.....	63
4.2.3. Prueba experimental con carga inductiva. ....	68
4.2.4. Prueba experimental con carga resistiva - inductiva.....	73
4.2.5. Prueba experimental con cargas temporizadas. ....	76
CONCLUSIONES .....	83
RECOMENDACIONES.....	84
BIBLIOGRAFÍA .....	86

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Ley de Faraday .....	4
Ecuación 2: Ley de Faraday con N número de espiras .....	5
Ecuación 3: Relación de transformación voltaje y número de espiras .....	7
Ecuación 4: Relación de transformación corriente y número de espiras .....	7
Ecuación 5: Relación de transformación voltaje .....	8
Ecuación 6: Relación de transformación corriente .....	8
Ecuación 7: Impedancia equivalente .....	12
Ecuación 8: Ángulo de la impedancia de corto circuito. ....	47
Ecuación 9: Impedancia serie equivalente de corto circuito.....	47
Ecuación 10: Impedancia serie equivalente representada por sus componentes rectangulares .....	47
Ecuación 11: Ángulo de la admitancia de magnetización .....	48
Ecuación 12: Admitancia de magnetización.....	48
Ecuación 13: Impedancia de excitación a partir de la admitancia.....	48
Ecuación 14: Impedancia de excitación en representación rectangular.....	48
Ecuación 15: Relación fundamental de transformación .....	49
Ecuación 16: Relación fundamental de transformación según las impedancias.....	49
Ecuación 17: Corrientes a vacío del lado secundario conexión Y– D.....	53
Ecuación 18: Ley de Kirchhoff aplicada en circuito equivalente del sistema trifásico .....	54
Ecuación 19: Caída de tensión en las inductancias del sistema trifásico a vacío .....	54
Ecuación 20: Corriente de vacío en los secundarios de los transformadores .....	54
Ecuación 21: Voltaje secundario en las fases RS (Transformador T1) .....	54
Ecuación 22: Voltaje secundario en las fases ST (Transformador T2) .....	54
Ecuación 23: Voltaje secundario en las fases TR (Transformador T3).....	54
Ecuación 24: Corriente de línea R en función de las corrientes de fase de la carga.....	56
Ecuación 25: Corriente de línea S en función de las corrientes de fase de la carga .....	56
Ecuación 26: Corriente de línea T en función de las corrientes de fase de la carga .....	56
Ecuación 27: Corriente de línea R en función de las corrientes de fase del transformador ...	56
Ecuación 28: Corriente de línea S en función de las corrientes de fase del transformador....	56
Ecuación 29: Corriente de línea T en función de las corrientes de fase del transformador....	56
Ecuación 30: Corriente de línea $I_r$ .....	56
Ecuación 31: Corriente de línea $I_s$ .....	56

Ecuación 32: Corriente de línea $I_l$ .....	56
Ecuación 33: Corriente $I_{rs}$ en función de la resistencia de carga .....	57
Ecuación 34: Corriente $I_{st}$ en función de la resistencia de carga.....	57
Ecuación 35: Corriente $I_{tr}$ en función de la resistencia de carga.....	57
Ecuación 36: Corriente del secundario del transformador T1 .....	57
Ecuación 37: Corriente del secundario del transformador T2 .....	57
Ecuación 38: Corriente del secundario del transformador T3 .....	57
Ecuación 39: Voltaje secundario en las fases RS (Transformador T1) .....	58
Ecuación 40: Voltaje secundario en las fases ST (Transformador T2) .....	58
Ecuación 41: Voltaje secundario en las fases TR (Transformador T3).....	58
Ecuación 42: Corriente $I_{rs}$ en función de la carga inductiva .....	59
Ecuación 43: Corriente $I_{st}$ en función de la carga inductiva .....	59
Ecuación 44: Corriente $I_{tr}$ en función de la carga inductiva.....	59
Ecuación 45: Voltaje secundario RS en los terminales de la carga .....	60
Ecuación 46: Corriente $I_{rs}$ en función de la carga resistiva - inductiva .....	61
Ecuación 47: Voltaje secundario ST en los terminales de la carga .....	61
Ecuación 48: Corriente $I_{st}$ en función de la carga resistiva - inductiva.....	61
Ecuación 49: Voltaje secundario TR en los terminales de la carga.....	61
Ecuación 50: Corriente $I_{tr}$ en función de la carga resistiva - inductiva.....	61

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Ley de Lenz .....	5
Ilustración 2: Transformador monofásico ideal .....	7
Ilustración 3: Circuito equivalente del transformador real .....	9
Ilustración 4: Circuito de conexión para prueba de polaridad .....	10
Ilustración 5: Polaridad de los terminales según prueba.....	10
Ilustración 6: Circuito de conexión para prueba de circuito abierto .....	11
Ilustración 7: Sistema trifásico en corriente alterna.....	13
Ilustración 8: Secuencia de fases .....	13
Ilustración 9: Secuencia de fase positiva .....	14
Ilustración 10: Secuencia de fase negativa .....	14
Ilustración 11: Conexión Y- Y .....	15
Ilustración 12: Conexión Y- D.....	16
Ilustración 13: Protocolos de comunicación .....	17
Ilustración 14: Diseño de la estructura en AutoCAD® del módulo de adquisición de datos (vista isométrica).....	19
Ilustración 15: Diseño de la estructura en AutoCAD® del módulo de adquisición de datos (vista superior) .....	20
Ilustración 16. Estructura metálica corte y construcción con plancha galvanizada.....	20
Ilustración 17: Estructura del módulo terminada y pintada .....	21
Ilustración 18: Diseño en AutoCAD® de la distribución de elementos .....	22
Ilustración 19: Montaje terminado de elementos en la estructura del módulo .....	22
Ilustración 20: PLC marca Schneider Electric Modicon M221CE16R .....	23
Ilustración 21: Fuente regulada de voltaje .....	24
Ilustración 22: Distribución esquemática general de comunicación.....	24
Ilustración 23: Comunicación PLC - PC mediante protocolo TCP/IP .....	25
Ilustración 24: Software SoMachine Basic de Schneider Electric.....	25
Ilustración 25: En el Software SoMachine se crea un nuevo proyecto para prueba.....	26
Ilustración 26: En el Software SoMachine se elige el modulo correspondiente y se configura .....	26
Ilustración 27: Programación LADDER de prueba .....	27
Ilustración 28: Puesta en marcha y configuración de dirección de los dispositivos.....	27

Ilustración 29: Configuración de direcciones IP entre los dispositivos .....	28
Ilustración 30: Inicio de sesión en el controlador. ....	28
Ilustración 31: Configuración de los parámetros de comunicación del analizador de red ....	29
Ilustración 32: Configuración de línea serie en el SoMachine .....	31
Ilustración 33: Configuración Modbus® para la comunicación.....	32
Ilustración 34: Programación LADDER en el SoMachine para la adquisición de datos .....	32
Ilustración 35: Parametrización del bloque READ_VAR en sus 4 salidas .....	34
Ilustración 36: Lectura en tiempo real de parámetros tomados desde el analizador de red....	34
Ilustración 37: Software TIA PORTAL® V15.....	35
Ilustración 38: Se crea proyecto nuevo para el desarrollo de un HM I virtual .....	36
Ilustración 39: Creación de nuevo proyecto en el software TIA PORTAL® V15.....	36
Ilustración 40: Configuración de nuevo dispositivos.....	37
Ilustración 41: Agregar dispositivo WinCC® RT Advanced .....	37
Ilustración 42: Aplicación HMI de WinCC® PC SIMATIC® .....	38
Ilustración 43: Agregar módulo IE GENERAL a la PC SIMATIC®.....	38
Ilustración 44: Configuración de direcciones IP para compatibilidad de modulo con la red .	39
Ilustración 45: Creación de imagen virtual.....	39
Ilustración 46: Interfaz gráfica HMI de prueba .....	40
Ilustración 47: Configuración del controlador para lectura de variables .....	40
Ilustración 48: Configuración de variables relacionadas con la respectiva conexión y direcciones .....	41
Ilustración 49: Configuración del protocolo Modbus® para la conexión entre WinCC® y SoMachine .....	42
Ilustración 50: Verificación de estado de lectura de variables .....	42
Ilustración 51: Lectura real del parámetro de prueba mediante la imagen HMI del WinCC®	43
Ilustración 52: Lectura real del parámetro de prueba mediante el software So Machine.....	43
Ilustración 53: Montaje de equipos para la adquisición de datos .....	44
Ilustración 54: Acoplamiento de transformadores monofásicos para la conexión Y– D .....	45
Ilustración 55: Banco trifásico de transformadores en conexión Y- D.....	46
Ilustración 56: Modelo real aproximado del Transformador T1 visto desde el secundario ...	49
Ilustración 57: Modelo real del transformador T2 visto desde el secundario.....	50
Ilustración 58: Modelo real del transformador T3 visto desde el secundario.....	51
Ilustración 59: Modelo real del banco trifásico de transformadores referido al secundario.....	52
Ilustración 60: Análisis a vacío de la conexión Y– D.....	53

Ilustración 61: Análisis del sistema trifásico Y- D con carga resistiva .....	55
Ilustración 62: Análisis del sistema trifásico Y- con carga inductiva.....	59
Ilustración 63: Análisis del sistema trifásico Y- D con carga resistiva-inductiva.....	60
Ilustración 64: Bloques en Simulink® .....	62
Ilustración 65: Script de Matlab®.....	63
Ilustración 66: Bloques "From workspace" de Simulink®.....	63
Ilustración 67: Banco de pruebas para transformadores con carga resistiva conectada. ....	64
Ilustración 68: Diagrama de conexiones de la prueba experimental con carga resistiva.....	64
Ilustración 69: Aplicación HMI del sistema trifásico con carga resistiva. ....	65
Ilustración 70: Curvas de corriente $I_{rs}$ con carga resistiva real y simulada.....	66
Ilustración 71: Curvas de corriente $I_{st}$ con carga resistiva real y simulada.....	66
Ilustración 72: Curvas de corriente $I_{tr}$ con carga resistiva real y simulada.....	67
Ilustración 73: Curvas de voltaje secundario $V_{rs}$ con carga resistiva real y simulado.....	67
Ilustración 74: Curvas de voltaje secundario $V_{st}$ con carga resistiva real y simulado.....	68
Ilustración 75: Curvas de voltaje secundario $V_{tr}$ con carga resistiva real y simulado.....	68
Ilustración 76: Prueba experimental con carga inductiva. ....	69
Ilustración 77: Diagrama de conexiones de la prueba experimental con carga inductiva. ....	69
Ilustración 78: Aplicación HMI del sistema trifásico con carga inductiva.....	70
Ilustración 79: Curvas de corriente secundaria $I_{rs}$ con carga inductiva real y simulada.....	70
Ilustración 80: Curvas de corriente secundaria $I_{st}$ con carga inductiva real y simulada.....	71
Ilustración 81: Curvas de corriente secundaria $I_{tr}$ con carga inductiva real y simulada.....	71
Ilustración 82: Curvas de voltaje secundario $V_{rs}$ con carga inductiva real y simulado.....	72
Ilustración 83: Curvas de voltaje secundario $V_{st}$ con carga inductiva real y simulado.....	72
Ilustración 84: Curvas de voltaje secundario $V_{tr}$ con carga inductiva real y simulado.....	73
Ilustración 85: Diagrama de conexiones de la prueba experimental con carga resistiva inductiva.....	73
Ilustración 86: Aplicación HMI del sistema trifásico con carga resistiva - inductiva. ....	74
Ilustración 87: Curvas de corriente secundaria $I_{rs}$ con carga resistiva - inductiva, real y simulada.....	74
Ilustración 88: Curvas de corriente secundaria $I_{st}$ con carga resistiva - inductiva real y simulada.....	75
Ilustración 89: Curvas de corriente secundaria $I_{tr}$ con carga resistiva - inductiva real y simulada.....	75

Ilustración 90: Curvas de voltaje secundario $V_{rs}$ con carga resistiva - inductiva real y simulado.....	75
Ilustración 91: Curvas de voltaje secundario $V_{st}$ con carga resistiva - inductiva real y simulado.....	76
Ilustración 92: Curvas de voltaje secundario $V_{tr}$ con carga resistiva - inductiva real y simulado.....	76
Ilustración 93: Prueba experimental con cargas temporizadas.....	77
Ilustración 94: Diagrama de conexiones de prueba experimental con cargas temporizadas..	78
Ilustración 95: Programación del PLC para las salidas físicas.....	78
Ilustración 96: Diagrama eléctrico de control y fuerza para la prueba experimental.....	79
Ilustración 97: Curvas de corriente secundaria $I_{rs}$ prueba experimental temporizada real y simulada.....	80
Ilustración 98: Curvas de corriente secundaria $I_{st}$ prueba experimental temporizada real y simulada.....	80
Ilustración 99: Curvas de corriente secundaria $I_{tr}$ prueba experimental temporizada real y simulada.....	80
Ilustración 100: Curvas de voltaje secundario $V_{rs}$ prueba experimental temporizada real y simulada.....	81
Ilustración 101: Curvas de voltaje secundario $V_{st}$ prueba experimental temporizada real y simulada.....	81
Ilustración 102: Curvas de voltaje secundario $V_{tr}$ prueba experimental temporizada real y simulada.....	82

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros configurados para la comunicación .....	30
Tabla 2: Analizador de red PM 5100.....	30
Tabla 3: Parámetros de configuración del bloque de comunicación READ_VAR.....	33
Tabla 4: Resultados de pruebas fundamentales en Transformador T1 .....	47
Tabla 5: Resultados de pruebas fundamentales en Transformador T2 .....	50
Tabla 6: Resultados de pruebas fundamentales en transformador T3 .....	50

# CAPÍTULO I

## 1. EL PROBLEMA

### 1.1.Descripción del Problema

La Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil tiene en sus laboratorios bancos de prueba para prácticas de transformadores trifásicos, pero no cuenta con modelos que permitan la simulación y que engloben las ecuaciones principales, que puedan describir el comportamiento en cualquier momento del tiempo y bajo cualquier modificación de sus parámetros.

### 1.2.Antecedentes.

La Universidad Politécnica Salesiana siempre busca la excelencia en la formación profesional de sus estudiantes, en consecuencia, está en constante búsqueda de herramientas que permitan dicho objetivo.

La carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil tiene como objetivo formar profesionales con la capacidad para desarrollarse en el mercado laboral, para esto se vuelve de vital importancia que los conocimientos teóricos adquiridos en las aulas de clases se desarrollen mediante el uso de herramientas que simulen y hagan un análisis profundo que respalden sus conocimientos para así resolver problemáticas que en la actualidad forman parte del sector industrial, en donde la tecnología digital y la automatización de procesos están en constante crecimiento.

### **1.3.Importancia y alcance.**

Mediante el proyecto de titulación propuesto por los estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil permitirá satisfacer las necesidades de los estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica que cursan del quinto al décimo ciclo en: Desarrollar profundamente sus conocimientos en los principios de las maquinas eléctricas estacionarias.

Se desarrollará un software de simulación, esta herramienta será útil para entender y poder explicar a los estudiantes el comportamiento de los elementos que forman parte del banco de pruebas, además se generaran diversos casos de estudio para que sean analizados en las aulas o laboratorios de la Universidad, el trabajo que se desarrollara constara de todos los pasos que se dieron y la información necesaria para la obtención del modelo y el software de simulación.

### **1.4.Delimitación**

El tiempo que se aproximó para el desarrollo del trabajo es de 12 meses.

Para el desarrollo de este trabajo se hizo de vital importancia contar con una herramienta que nos permita la adquisición en tiempo real de los parámetros que se necesitan para plantear el modelo y que nos ayudara básicamente a la simulación en un software de esta índole, la herramienta cuenta con: un autómata programable un PLC producto Modicon modelo M221CE16R elemento primordial para la automatización y captura de los parámetros.

Mediante el análisis y la simulación de las pruebas correspondientes del banco de transformadores trifásicos, se permitirá dar un mejor enfoque de los conocimientos en máquinas eléctricas a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, pudiendo experimentar con los parámetros eléctricos para reforzar su aprendizaje.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

- 1.5.1.1.** Analizar el comportamiento de un sistema trifásico de transformadores en conexión Y - D.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- 1.5.2.1.** Comprobar los fundamentos básicos para el funcionamiento de un transformador.
- 1.5.2.2.** Comprobar las condiciones para realizar la conexión de un banco trifásico de transformadores.
- 1.5.2.3.** Simular en software el comportamiento de los transformadores en conexión trifásica.
- 1.5.2.4.** Comparar los resultados obtenidos del banco de pruebas.
- 1.5.2.5.** Construir un módulo que permita la captura de los datos reales en las pruebas realizadas en campo.

## **1.6. Marco metodológico.**

Se usó un método analítico – deductivo en busca de resolver la problemática que tiene la carrera de Ingeniería Eléctrica, por tanto, a esto se planteó el proyecto a desarrollar.

El proyecto cuenta de 3 etapas principales:

- Un estudio de conceptos fundamentales, comprende el estudio de conceptos principales sobre transformadores, leyes fundamentales del electromagnetismo, circuitos equivalentes y conexiones trifásicas.
- Captura de los datos reales mediante la herramienta de adquisición, voltajes de línea y fase, intensidades de corriente línea y fase por ultimo potencias trifásicas.
- Análisis de ecuaciones de control; con la simulación de los modelos equivalentes se obtendrán resultados que serán comparados y evaluados.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Conceptos Básicos

##### 2.1.1. Máquina eléctrica

La máquina eléctrica es un dispositivo convertidor de energía eléctrica a mecánica o de energía mecánica a eléctrica. Cuando esta se utiliza en convertir la energía eléctrica en mecánica pasa a llamarse motor, cuando se usa para generar energía eléctrica mediante energía mecánica se denominará generador. Todas las maquinas eléctricas como motores o generadores basan la conversión de la energía mediante la presencia de campos magnéticos dentro de las maquinas.(Chapman, 2012)

El transformador es otro de dispositivo eléctrico que se relaciona con las demás maquinas antes mencionadas. Esta máquina eléctrica tiene como función cambiar los niveles de voltaje o tensión de mayor a menor y viceversa (Chapman, 2012), así como entra en el estudio de las máquinas eléctricas también se puede asegurar que el principio en el que se basa su capacidad de cambiar niveles de voltaje y tensión se debe a la acción del campo magnético.

##### 2.1.2. Ley de Faraday

La ley de Faraday nos dice, si a través de una espira de alambre conductor pasa un flujo, en este se originará un voltaje que será directamente proporcional a la tasa de cambio del flujo en un periodo de tiempo (Al-Jaber, 2011). Se expresa mediante la ecuación:

$$E_{ind} = - \frac{d\phi}{dt}$$

*Ecuación 1: Ley de Faraday*

(Chapman, 2012)

En donde el  $E_{ind}$  será el voltaje inducido en la espira y  $\phi$  es el flujo que pasa a través del conductor. En una bobina se tiene  $N$  número de vueltas, entonces si el mismo flujo atraviesa a todas, el  $E_{ind}$  en toda la bobina estará representado bajo la ecuación:

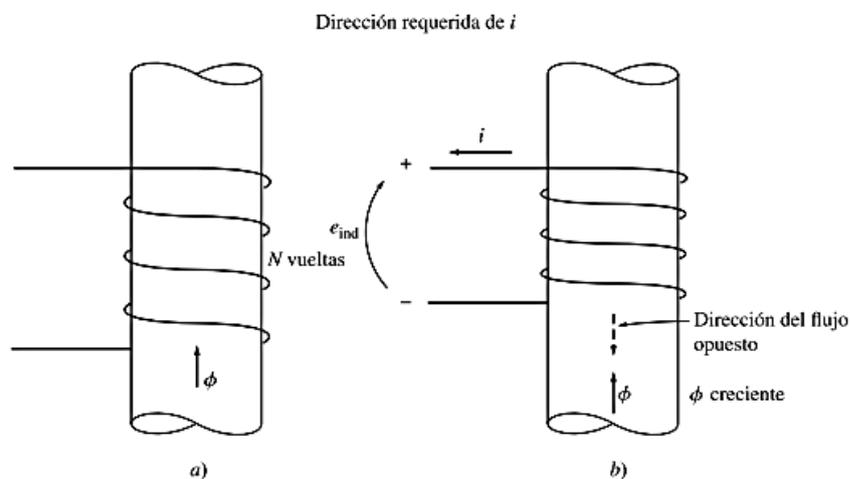
$$E_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt}$$

*Ecuación 2: Ley de Faraday con  $N$  número de espiras*

(Chapman, 2012)

### 2.1.3. Ley de Lenz

Establece que el sentido en el que está dirigido el voltaje inducido en la bobina es igual a que los terminales en sus puntas estén cortocircuitados, por ende producirá una corriente que generara un flujo en sentido contrario al original. Dado este caso el voltaje inducido se contrapone al sentido del flujo original, por esto en la ecuación que gobierna esta ley se incluye un signo menos.



*Ilustración 1: Ley de Lenz*

Fuente: (Chapman, 2012)

## **2.2. Transformador.**

El transformador es uno de los dispositivos eléctricos de mayor relevancia en los sistemas eléctricos de potencia debido a que sin ellos es imposible de realizar la transmisión de la energía eléctrica a través de todo el territorio al que se desea brindar el servicio eléctrico, esto sería por las altas caídas de tensión que se presentaría por la resistencia presente en los conductores por donde se transporta la energía.

El transformador es un dispositivo que cambia el nivel de tensión basado en la interacción de un campo magnético. (Chapman, 2012)

Los transformadores son dispositivos eléctricos cuya función principal es la de elevar o disminuir los niveles de voltaje o tensión. Estos dispositivos son básicamente dos bobinas acopladas por un núcleo ferromagnético, una de las bobinas generara un campo magnético debido a un voltaje aplicado, generando así en la segunda bobina una inducción electromagnética (voltaje) por la incidencia del campo magnético de la primera bobina.(AGUIRRE & CABRERA, 2015)

### **2.2.1. Transformador monofásico ideal.**

Máquina eléctrica, que está conformada básicamente por 2 bobinados uno de entrada y salida respectivamente, el dispositivo se encuentra relacionado eléctricamente por los parámetros de voltaje y corriente en la entrada y la salida (BARZALLO, 2015). Los transformadores ideales son una forma conceptual de idealizar a los transformadores reales, donde se omiten varios aspectos que si se consideran en el transformador real, aquí se tiene un núcleo ferromagnético sin pérdidas, además la permeabilidad relativa en núcleo es infinita y corrientes parásitas iguales a cero. (Kumbhar et al., 2007)



Ilustración 2: Transformador monofásico ideal

Fuente: (Chapman, 2012)

### 2.2.2 Relación de transformación.

Nos permite indicar la variación del nivel de las tensiones de entrada con respecto a la tensión de salida (SEGOVIA, 2013).

Según la ilustración 2 representa que en el núcleo se encuentra en sus extremos enrollada una cantidad N de espiras tanto en la entrada ( $N_p$ ) como en la salida ( $N_s$ ). La relación entre la tensión que se aplique en la entrada del transformador  $V_p(t)$  y la tensión generada en la salida  $V_s(t)$  en referencia al número de vueltas en los bobinados es:

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a$$

Ecuación 3: Relación de transformación voltaje y número de espiras

Fuente: (Chapman, 2012)

La relación del número de espiras en el transformador esta expresado como:  $a = \frac{N_p}{N_s}$

Debido a la presencia de voltaje tanto en la entrada como en la salida del transformador, los bobinados generarán corrientes  $I_p(t)$  para el primario y  $I_s(t)$  para el secundario:

$$\frac{I_p(t)}{I_s(t)} = \frac{N_p}{N_s}$$

Ecuación 4: Relación de transformación corriente y número de espiras

Fuente: (Chapman, 2012)

Los parámetros de voltaje y corriente del transformador en cantidades fasoriales están relacionados, como se describen a continuación:

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} = a$$

*Ecuación 5: Relación de transformación voltaje*

Fuente: (Chapman, 2012)

$$\frac{I_p(t)}{I_s(t)} = a$$

*Ecuación 6: Relación de transformación corriente*

Fuente: (Chapman, 2012)

## **2.3 Transformador real.**

Los transformadores reales no omiten los aspectos antes mencionados en el transformador ideal conceptual, para el análisis se toman en cuenta todos estos aspectos que de una u otra forma influirán en la capacidad y rendimiento que pueda llegar a tener la máquina. (CAJAMARCA & SIGUA, 2010)

### **2.3.1 Circuito equivalente de un transformador real.**

Se puede establecer un circuito equivalente en donde se toma en consideración los imperfectos más relevantes en los transformadores reales. Se toman en cuenta todas estas imperfecciones además de incluirse sus efectos para el modelo del transformador (Chapman, 2012).

Este circuito equivalente permite modelar al transformador real para su análisis, contiene los parámetros principales que gobiernan su funcionamiento, se puede utilizar este modelo también para transformadores trifásicos (Martínez-Velasco & de León, 2011).

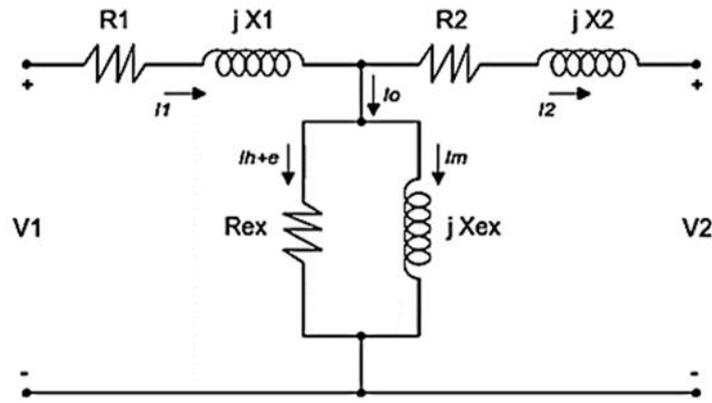


Ilustración 3: Circuito equivalente del transformador real

Fuente: (Chapman, 2012)

## 2.4 Pruebas básicas del transformador

Las pruebas básicas que se hacen a los transformadores son: prueba de cortocircuito en los devanados, prueba de circuito abierto y prueba de polaridad, los resultados de estas pruebas nos proporcionarían valores reales que son necesarios para el modelamiento del circuito equivalente del transformador. (AGUIRRE & CABRERA, 2015)

### 2.4.1 Prueba de polaridad

La prueba de polaridad básicamente nos da como resultado la determinación e identificación de las polaridades que tienen las bobinas con que fueron construidos los transformadores (sentido de vueltas), esto ayudaría a que no surjan inconvenientes cuando se realicen conexiones entre transformadores pueden ser estas series, paralelos o trifásicas en el caso de armar un banco trifásico. (Burbano & Di Lorenzo, 2015)

#### 2.4.1.1. Procedimiento experimental

Este procedimiento básicamente consiste en aplicar un voltaje o tensión de prueba menor o igual al voltaje nominal del lado de baja tensión del transformador (recomendación), se realiza un puente como se muestra en la Ilustración 4 en conexión serie para los devanados primario y secundario.

Se coloca el voltímetro entre los terminales X2 y H2 donde medimos:

Voltaje medido > voltaje de prueba, la polaridad es aditiva  
 Voltaje medido < voltaje de prueba, la polaridad es sustractiva.

En la figura se muestra como se quedan identificadas las polaridades en los

terminales del transformador.

La nomenclatura a utilizar para la identificación de los terminales en función de los niveles de voltaje o tensión viene dada como H1 y H2 para los terminales de alta tensión y para los terminales de baja tensión X1y X2

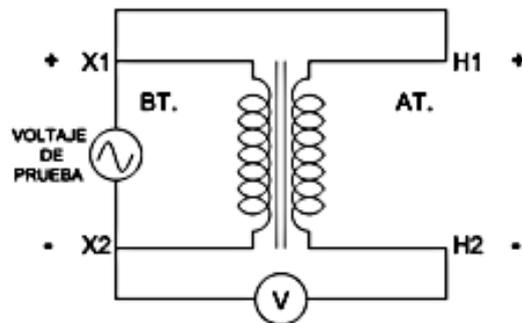


Ilustración 4: Circuito de conexión para prueba de polaridad

Fuente: (AGUIRRE & CABRERA, 2015)

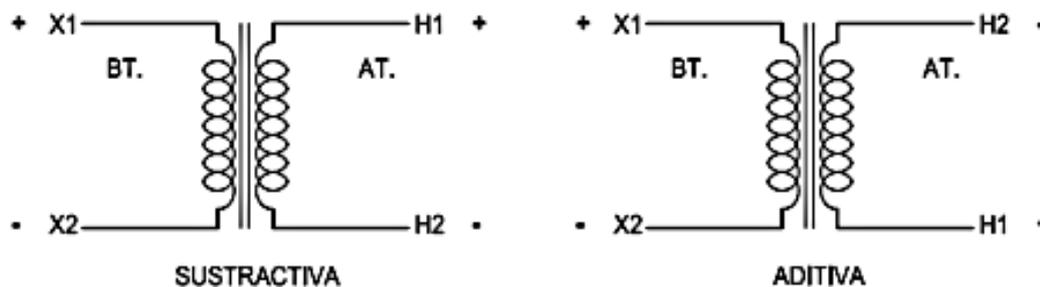


Ilustración 5: Polaridad de los terminales según prueba

Fuente: (AGUIRRE & CABRERA, 2015)

#### 2.4.2 Prueba de circuito abierto

Esta prueba se realizará para obtener la admitancia de excitación del núcleo ferromagnético con este valor se puede calcular las pérdidas magnéticas que tiene dicho núcleo, las corrientes en vacío del transformador y las corrientes de magnetización.

### 2.4.2.1 Procedimiento experimental

El procedimiento empleado para la realización de esta prueba consiste en excitar uno de los devanados del transformador de preferencia el lado de B.T. a voltaje nominal mientras que el otro devanado deberá permanecer en circuito abierto (sin carga)(AGUIRRE & CABRERA, 2015).

Conectando los equipos de medición, voltímetro, amperímetro y vatímetro del lado de baja tensión ilustración 6 los valores medidos que se obtengan estarán referidos al lado de baja tensión del transformador, para después mediante cálculo obtener la admitancia de excitación.

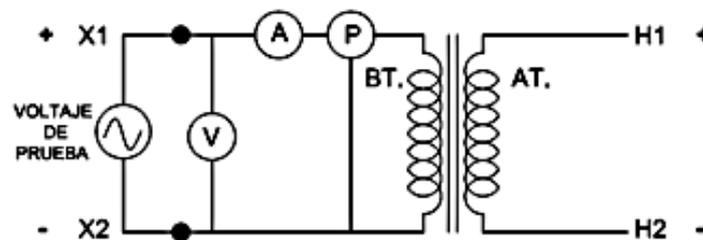


Ilustración 6: Circuito de conexión para prueba de circuito abierto

Fuente: (AGUIRRE & CABRERA, 2015)

### 2.4.3 Prueba de corto circuito

La prueba de cortocircuito determina el valor de la impedancia equivalente de un transformador, mediante cálculo se determinan las pérdidas existentes por los devanados del transformador.

Básicamente para realizar la prueba se necesita que uno de los devanados este cortocircuitado, por consiguiente en el otro devanado se aplicara una tensión del 5% - 15% del voltaje nominal (AGUIRRE & CABRERA, 2015).

#### 2.4.3.1 Procedimiento experimental

Para realizar esta prueba se recomienda colocar una fuente de voltaje variable y los equipos de medición a utilizar del lado de alta tensión y así cortocircuitar del lado de baja tensión.

Se comienza aplicando una tensión de 0v, la fuente variable de voltaje debe ir aumentando su valor hasta que se consiga una corriente igual a la nominal del lado de alta tensión, a esta corriente se denomina corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ) y el

voltaje que se aplicó para conseguir la  $I_{cc}$  se denomina voltaje de cortocircuito ( $V_{cc}$ ), mediante un cálculo simple se deduce que el producto de estos dos parámetros se obtiene la potencia de cortocircuito ( $P_{cc}$ ).

Luego de la determinación de estos parámetros mediante la prueba, se puede calcular mediante la siguiente formula la impedancia equivalente ( $Z_{eq}$ ) del transformador:

$$Z_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \cos(\theta Fp_{cc}) + j \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \operatorname{sen}(\theta Fp_{cc})$$

*Ecuación 7: Impedancia equivalente*

Fuente: (AGUIRRE & CABRERA, 2015)

## 2.5 Banco trifásico de transformadores

Un banco trifásico de transformadores es un arreglo que consiste en la conexión de tres transformadores monofásicos para conseguir los parámetros deseados, hay solo ciertas condiciones bajo las cuales se pueden conectar los transformadores monofásicos para formar un banco trifásico estas son:

- Iguales en capacidad en KVA.
- Iguales en voltajes nominales en alta tensión y baja tensión.
- Igual relación de transformación.
- Igualdad en polaridad.

Una de las ventajas de un banco trifásico en comparación con un transformador trifásico, es la capacidad operativa que tiene el banco trifásico en el caso de presentarse una falla, ya que permite el reemplazo de una unidad y en consecuencia tiene la capacidad de seguir proporcionando un sistema trifásico con solo dos unidades bajo ciertas condiciones.(Chapman, 2012)

## 2.6. Sistema trifásico de voltajes.

Un sistema trifásico está conformado con tres corrientes de igual frecuencia y amplitud desfasadas entre si  $120^\circ$ , y están dadas bajo cierto orden determinado (secuencia definida). Cada una de las corrientes que conforman el sistema se las denomina corrientes de fase.

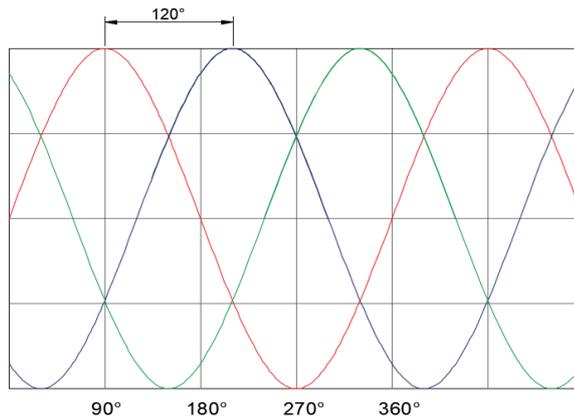


Ilustración 7: Sistema trifásico en corriente alterna

Fuente: Los autores

En la ilustración 7 se muestran las tres corrientes de fase que están desfasadas  $120^\circ$  cada una entre sí, se puede distinguir de una manera clara por los colores que las distinguen.

En un sistema trifásico en donde sus corrientes son iguales, se puede asegurar que las cargas están en pleno equilibrio o balanceadas entre las tres fases, en el caso que las corrientes sean desiguales se asegura que se tiene un sistema en desequilibrio o desbalanceado.

### 2.6.1. Secuencia de fases.

Es el sentido de consideración de las fases tomando como punto de partida un voltaje, existen 2 secuencias.

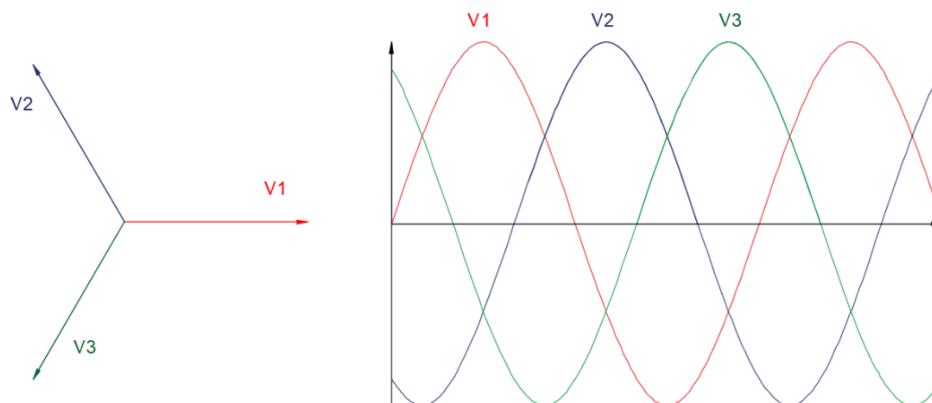
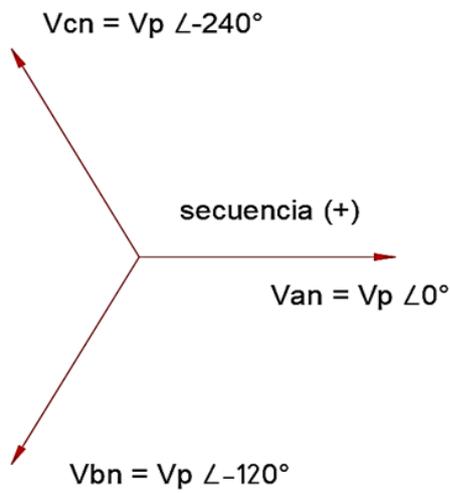


Ilustración 8: Secuencia de fases

Fuente: Los autores.

#### 2.6.1.1 Secuencia positiva

Haciendo referencia en uno de los tres vectores de voltaje giran en sentido opuesto a las manecillas del reloj y estos se trasladan por la referencia en secuencia positiva.

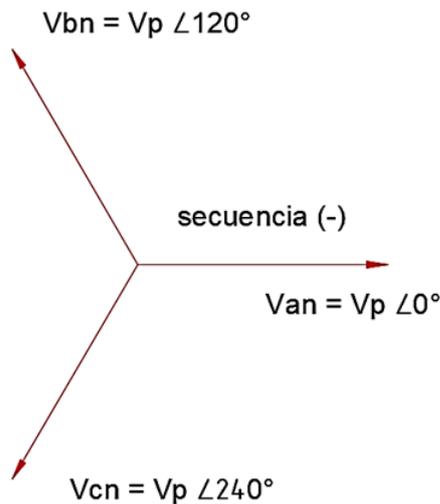


*Ilustración 9: Secuencia de fase positiva*

Fuente: (Chapman, 2012)

### 2.6.1.1 Secuencia negativa

Haciendo referencia en uno de los tres vectores de voltaje giran en sentido favorable a las manecillas del reloj estos se trasladan por la referencia en secuencia negativa.



*Ilustración 10: Secuencia de fase negativa*

Fuente: (Chapman, 2012)

## 2.7. Conexiones trifásicas de transformadores.

Estas conexiones son utilizadas para transformar el nivel de tensión de una fuente de voltaje trifásico, mediante el arreglo de 3 transformadores monofásicos de iguales características o también empleando un transformador trifásico que tenga un núcleo común.

Para este caso de análisis se utilizarán transformadores monofásicos de iguales características de: capacidad en KVA, voltajes nominales en alta tensión y baja tensión, relación de transformación, polaridad(W. H. Castro & Rodríguez, 2015).

### 2.7.1 La conexión Y/Y.

Para este grupo de conexión se consideran dos neutros respectivamente para cada grupo de bobinas estas sean del lado del primario y del secundario. Surgen inconvenientes serios cuando la masa o tierra no se encuentra adecuadamente conectada, dado que las ondas senoidales en la salida salen con un grado alto de distorsión.(MALDONADO & MENA, 2017) Esto equivale al problema de no poder suministrar energía de manera eficiente cuando se tienen cargas desequilibradas, adicionalmente se generan armónicos por esta razón. (Salvador et al., 2015).

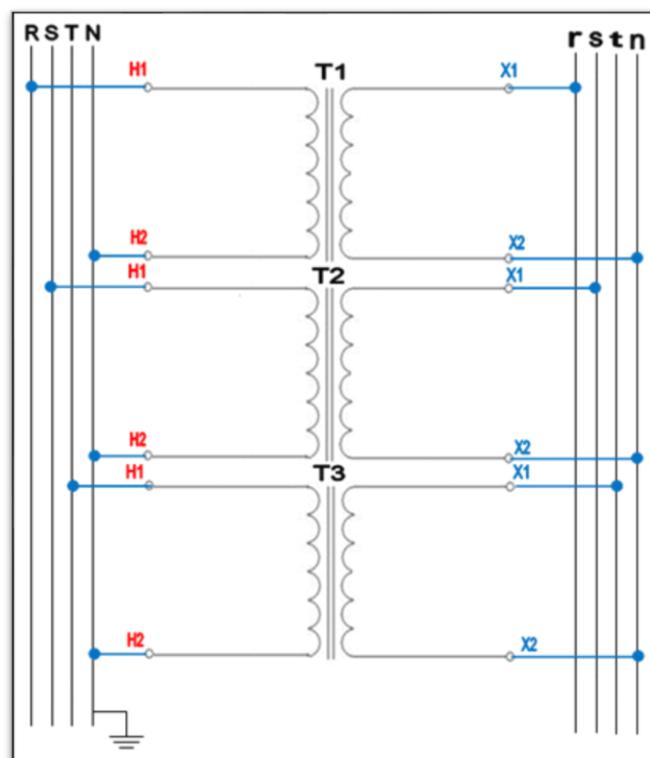


Ilustración 11: Conexión Y- Y

Fuente: Los autores

### 2.7.2 La conexión Y/D.

Para este grupo de conexión la corriente circulante en las bobinas del secundario es igual a un 58% de la corriente que circula por la carga. En esta conexión las distorsiones en las ondas senoidales de la salida no representan inconvenientes que si ocasionan en la conexión Y/Y. Para esta conexión se desfazan las tensiones de entrada y salida en  $30^\circ$  (MALDONADO & MENA, 2017).

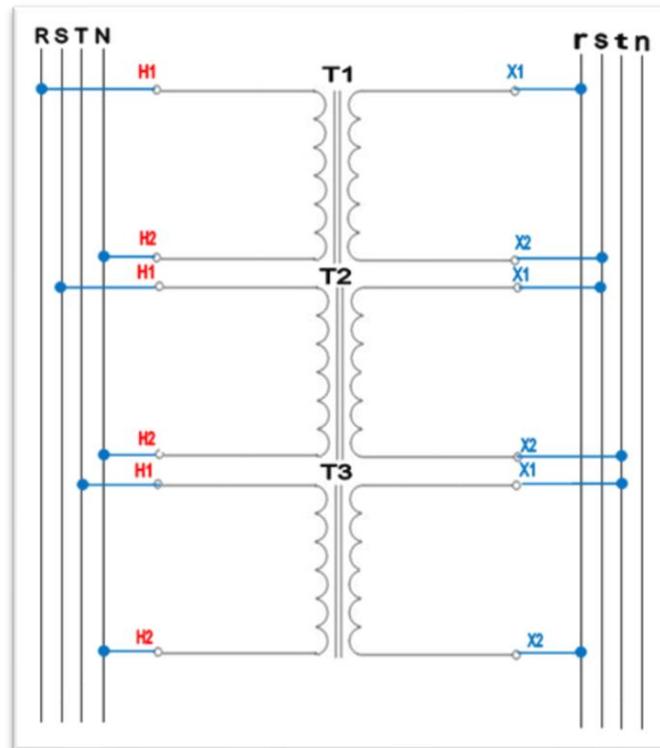


Ilustración 12: Conexión Y- D

Fuente: Los autores.

## 2.8 Comunicación

La comunicación en el sector industrial es un tema imprescindible para los procesos industriales en la era moderna. Los sistemas están en su mayoría conformados por dispositivos o equipos de diferentes fabricantes que funcionan en conjunto en varios niveles de automatización, en consecuencia, hay estándares que buscan que todos sean compatibles para así lograr un resultado óptimo del proceso, esta integración total se denomina CIM (Computer Integrated Manufacturing).

El objetivo principal de esta integración total de los equipos en el sector industrial es

proporcionar nuevas posibilidades en los procesos y para lograr el máximo rendimiento (C. Castro & Alvarado, 2017)

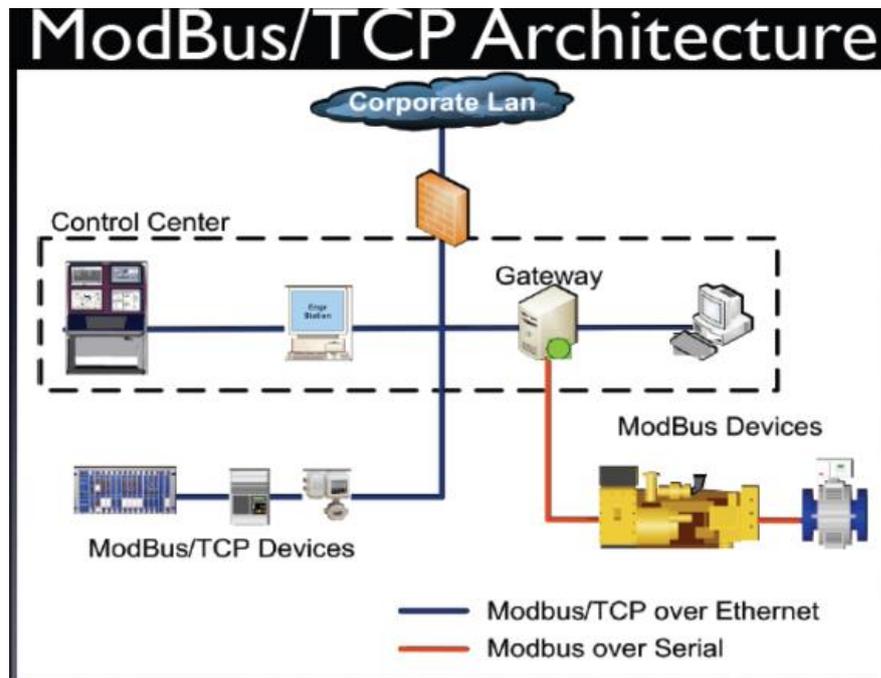


Ilustración 13: Protocolos de comunicación

(Hernández, 2016)

### 2.8.1 Protocolo de comunicación Modbus®

El protocolo Modbus® apareció en 1979 para recibir y transmitir los datos de control que se compartían entre los controladores y los sensores que estaban enlazados por el puerto RS-232 (comunicación punto a punto), con una distancia de alcance de máximo 350 metros.(C. Castro & Alvarado, 2017)

El protocolo no está estandarizado, pero todas sus características están disponibles, funciona como un sistema maestro/esclavo, funciona de dos maneras:

- En modo ASCII que envía dos caracteres (2 bytes) en cada mensaje, con hasta un segundo de tiempo de diferencia entre mensaje y mensaje.
- Modo RTU (Remote Terminal Unit), envía 4 caracteres hexadecimales (4 bits cada uno) en cada mensaje. Este modo es el más utilizado para la transmisión inalámbrica.(C. Castro & Alvarado, 2017)

### **2.8.1.1 Descripción general del protocolo**

(C. Castro & Alvarado, 2017) describe a Modbus® como un protocolo de comunicación sin estado esto quiere decir que, el esclavo tratará de manera única e independiente las solicitudes hechas por el maestro y se tomara en cuenta de la misma manera sin relación alguna a las anteriores a esa, logrando que los datos sean elevadamente resistentes a fracturas por ruido y que solo requieran de información mínima para sostener la transacción en cada uno de los terminales.

En las operaciones de programación por el otro lado, esperan que las máquinas que dan el origen y las que dan el destino final establezcan un canal de comunicación para así poder transferir datos. Algunas de estas operaciones están siendo aplicadas de diversas maneras por los diferentes tipos de variantes del protocolo Modbus® (Modbus® RTU, Modbus® ASCII, Modbus® PLUS).

En este protocolo la la información no se ve alterada de ninguna forma a los tipos de datos, por tanto, significa facilidad en el intercambio de la misma. El bus está compuesto de una estación principal y de varias estaciones subordinadas de estas solo la estación principal tiene la capacidad de iniciar un intercambio de información siendo imposible para las estaciones subordinadas establecer comunicación con la estación principal.

### CAPÍTULO III: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y COMUNICACIÓN DEL MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL SISTEMA TRIFÁSICO DE TRANSFORMADORES

Uno de los requisitos para poder realizar un estudio de cualquier sistema eléctrico es poder obtener datos en tiempo real para la posterior interpretación y análisis de resultados. Precisamente esta es la finalidad del módulo didáctico, el cual ha sido diseñado de la manera más compacta posible para optimizar el espacio, transporte y manipulación; y que nos permite utilizarlo en múltiples aplicaciones como la automatización, Sistemas SCADA, entre otras. A continuación, se describirá el proceso de diseño, construcción del módulo didáctico y su comunicación con los equipos necesarios para el análisis de un sistema eléctrico.

#### 3.1. Diseño y construcción del módulo didáctico.

La fabricación empezó diseñando un boceto inicial donde se muestre la distribución de los elementos en toda su superficie. Las medidas generales de la estructura metálica se muestran a continuación, seguidas de las placas de la parte superior en la que se montarán posteriormente todos los elementos.

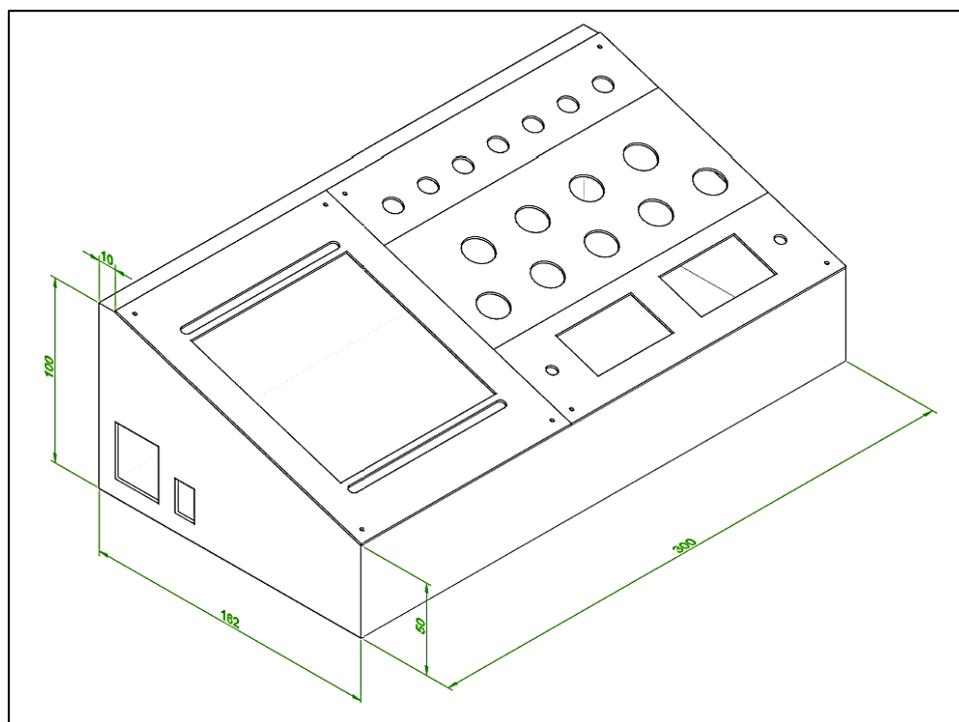


Ilustración 14: Diseño de la estructura en AutoCAD® del módulo de adquisición de datos (vista isométrica)

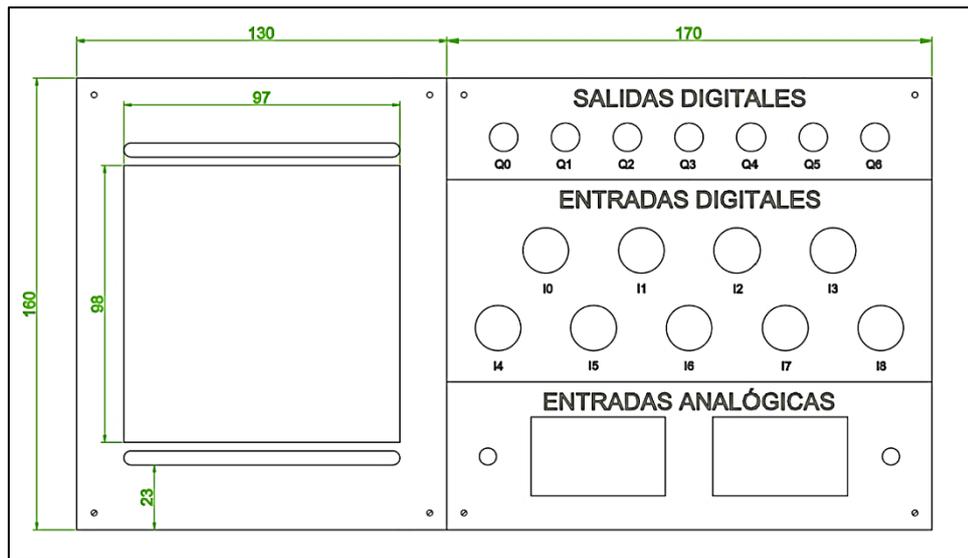


Ilustración 15: Diseño de la estructura en AutoCAD® del módulo de adquisición de datos (vista superior)

Fuente: Los autores.

### 3.1.1. Fase de corte y pintado de la estructura metálica.

La estructura metálica del módulo fue construida con plancha galvanizada de 1,3mm de espesor, siguiendo el diseño planteado en el punto anterior realizado en AutoCAD®. Las planchas fueron sometidas a un proceso de corte, soldadura y troquelado para obtener el siguiente resultado:



Ilustración 16. Estructura metálica corte y construcción con plancha galvanizada

Fuente: Los autores.

Posterior a esto hay que retirar todos los excesos de limaduras producidas en el corte y demás operaciones mecánicas, la estructura metálica ingresa al área de pintado, donde se le aplican capas de pintura electrostática y finalmente entra en un proceso de secado de la pintura.



*Ilustración 17: Estructura del módulo terminada y pintada*

Fuente: Los autores.

### **3.2. Distribución y conexión de elementos en el módulo didáctico.**

Los elementos están distribuidos siguiendo tomando en cuenta de optimizar el mayor espacio posible recordando que es un módulo compacto y que permita un fácil acceso para el mantenimiento, las partes principales son las siguientes:

Entradas digitales: Conformadas por 4 pulsadores de color verde y 5 selectores de 3 posiciones.

Entradas analógicas: Conformadas por dos circuitos electrónicos, independientes entre sí, que regulan los 24VDC de la fuente a un rango de 0-10VDC por medio de los potenciómetros. Estas entradas están conectadas a dos voltímetros digitales para visualizar el valor de dicha entrada.

Salidas digitales: Conformadas por 7 luces piloto de color rojo.

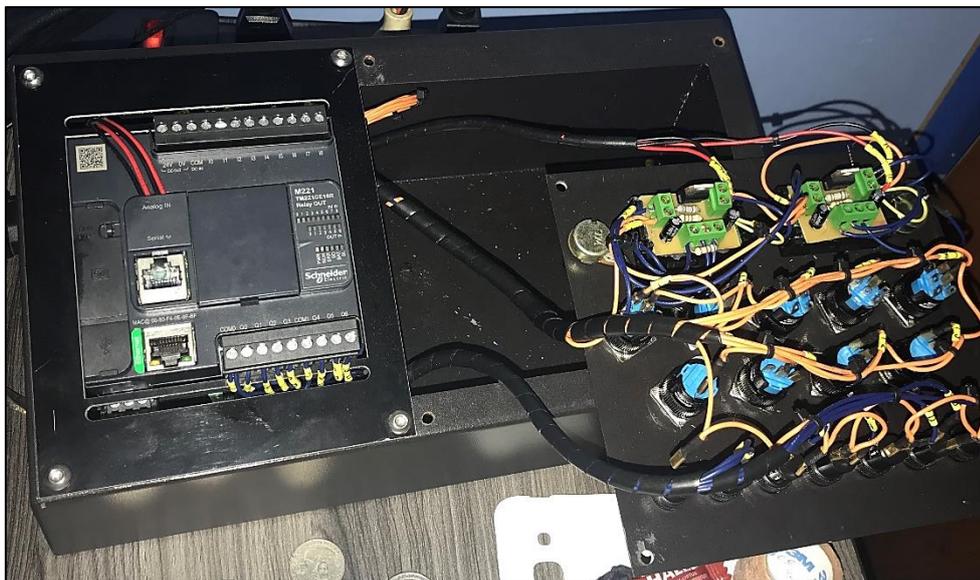
Autómata programable: Se ha utilizado un PLC de la marca Schneider Electric modelo M221CE16R como elemento principal para la automatización y captura de datos.



*Ilustración 18: Diseño en AutoCAD® de la distribución de elementos*

Fuente: Los autores.

Siguiendo el diseño realizado previamente se procede a distribuir los elementos a lo largo de la superficie de las placas. Se realiza el cableado de todos los elementos hacia el PLC etiquetando todos los cables y asegurándolos mediante candados plásticos y espiral.



*Ilustración 19: Montaje terminado de elementos en la estructura del módulo*

Fuente: Los autores.

### **3.2.1. Dispositivos instalados en el módulo.**

#### **3.2.1.1. Controlador Lógico**

El controlador lógico programable que se ha instalado en nuestro módulo es de la marca Schneider Electric producto Modicon modelo M221CE16R, el cual permite

realizar un gran número de tareas destinadas a la automatización de procesos, así como también la captura de e intercambio de datos entre diferentes equipos que utilicen el mismo protocolo de comunicación.

Este modelo en particular cuenta con un rango de alimentación desde 100 hasta 240VAC y tiene incorporada una fuente de 24VDC. Posee 9 entradas digitales que funcionan con 24VDC en lógica positiva o negativa, 7 salidas digitales de tipo relé normalmente abierto, dos entradas analógicas con rango de 0 a 10VDC, además cuenta con protocolo de comunicación Ethernet y enlace serie Modbus® con interfaz RS232/RS485.

En términos generales éste es un equipo muy compacto y útil para la finalidad que se desea y permite codificar las instrucciones tanto en lenguaje AWL y LADDER de una manera muy práctica e intuitiva. (Schneider Electric, 2018)

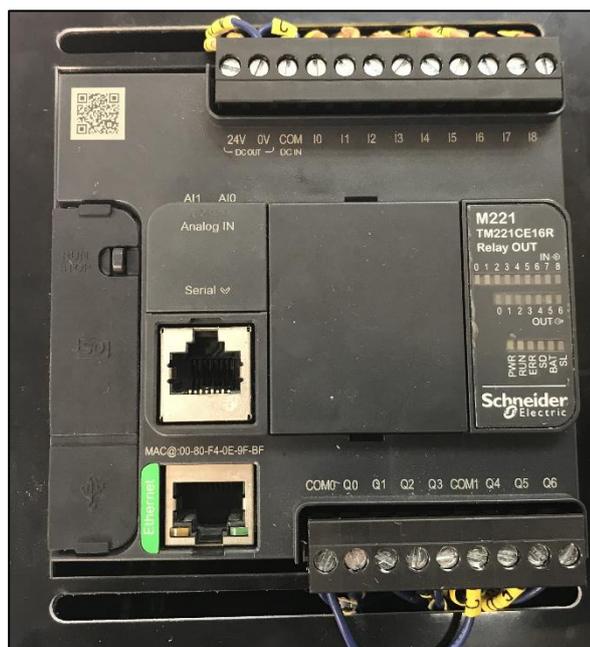


Ilustración 20: PLC marca Schneider Electric Modicon M221CE16R

Fuente: Los autores.

### 3.2.1.2. Fuente regulada de voltaje.

Para poder conectar las entradas analógicas del PLC, los 24VDC que entrega el equipo no pueden ser utilizados de manera directa por lo que hay que emplear un circuito adicional que permita regular este nivel de tensión hacia 0 – 10VDC que es lo requerido. Con el circuito mencionado se diseñó el diagrama PCB tomando en cuenta

optimizar al máximo el espacio dentro del módulo, se necesita 2 circuitos impresos para utilizarlos en las 2 entradas analógicas, respectivamente.



Ilustración 21: Fuente regulada de voltaje

Fuente: Los autores.

### 3.3. Comunicación de los equipos para la toma de datos.

Esquema generalizado a usar de la comunicación que se va a emplear para tomar datos en tiempo real del sistema trifásico de transformadores, orientándolo a una aplicación HMI a pequeña escala en el cual se tomará 1 único dato de voltaje de la red monofásica.

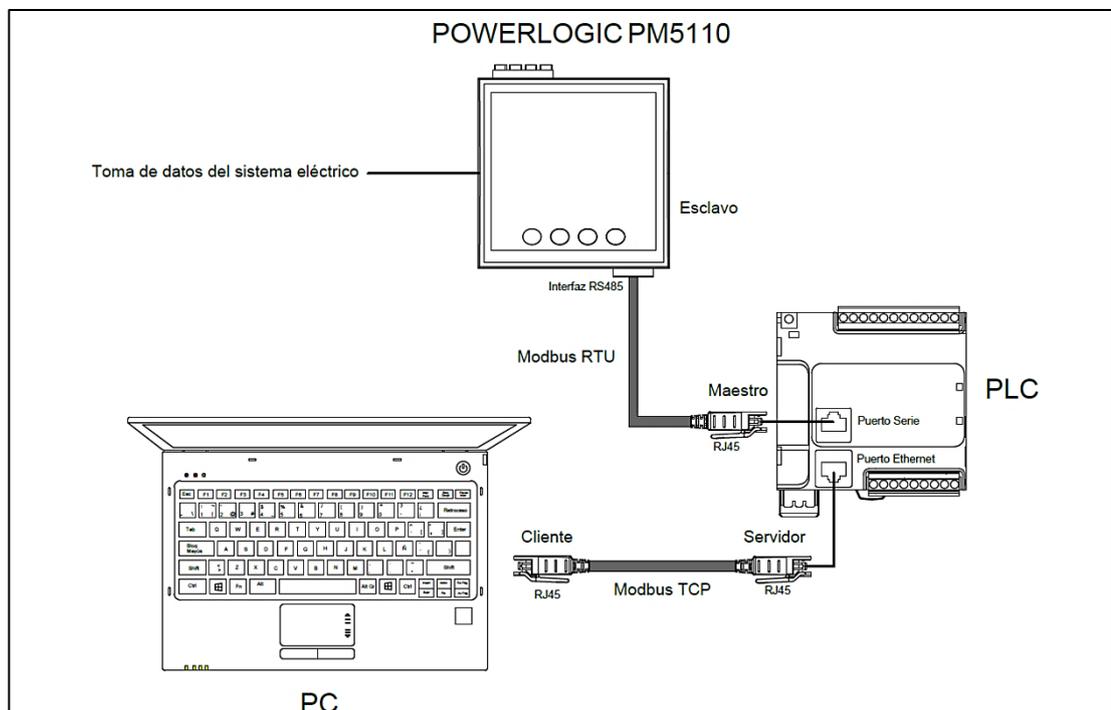
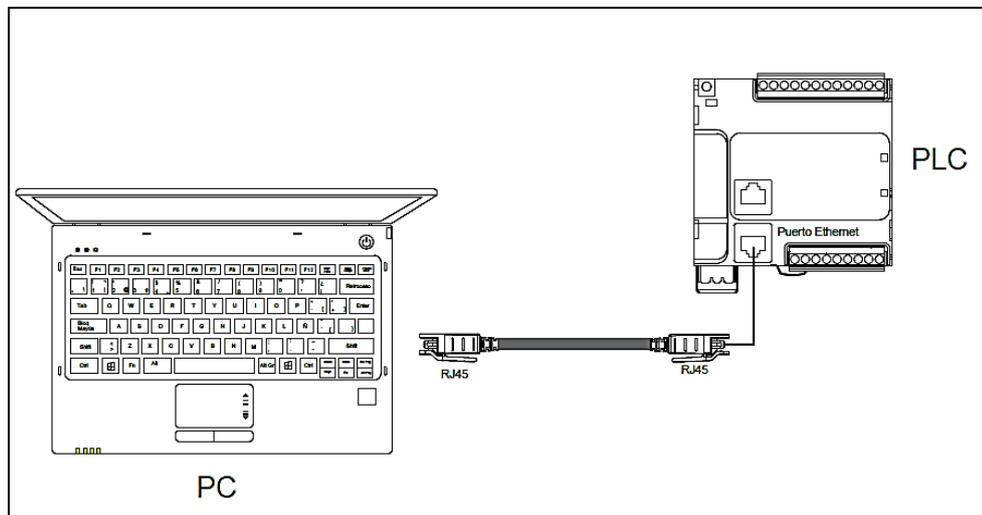


Ilustración 22: Distribución esquemática general de comunicación

Fuente: Los autores.

### 3.3.1. Comunicación PLC – PC.

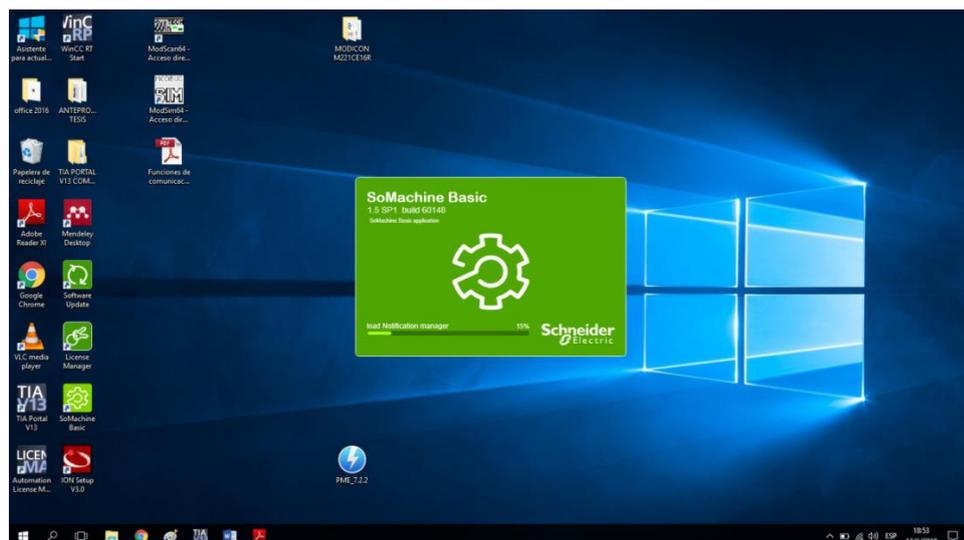
Una vez se tenga el módulo didáctico operativo se procederá a realizar la comunicación con la PC utilizando el protocolo TCP/IP, para este fin se necesitará un cable de red (UTP) conectado a terminales RJ45 en ambos extremos mediante la categoría T568 B.



*Ilustración 23: Comunicación PLC - PC mediante protocolo TCP/IP*

Fuente: Los autores.

Para probar la comunicación se tendrá que iniciar el Software SoMachine Basic de Schneider Electric para de esta manera cargar una programación de prueba al PLC.(Schneider Electric, 2017)



*Ilustración 24: Software SoMachine Basic de Schneider Electric*

Fuente: Los autores.

Una vez aquí se crea un **Nuevo Proyecto** para empezar a configurar el dispositivo.

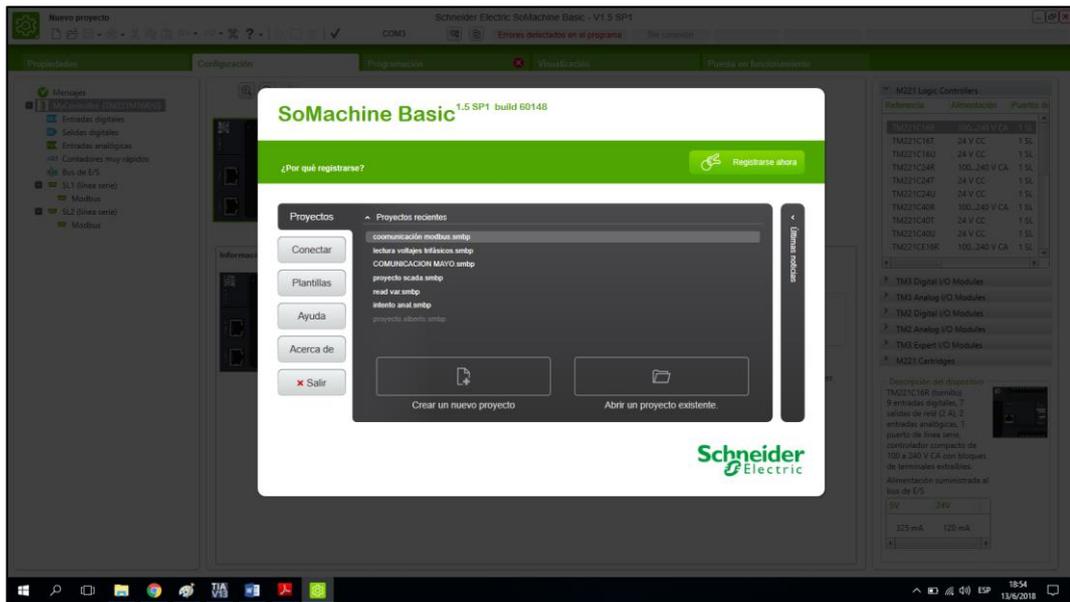


Ilustración 25: En el Software SoMachine se crea un nuevo proyecto para prueba

Fuente: Los autores.

En primer lugar, se tendrá que seleccionar el modelo del dispositivo para empezar a configurarlo, cabe destacar que hay que seleccionar el modelo adecuado teniendo muy en cuenta sus características técnicas.

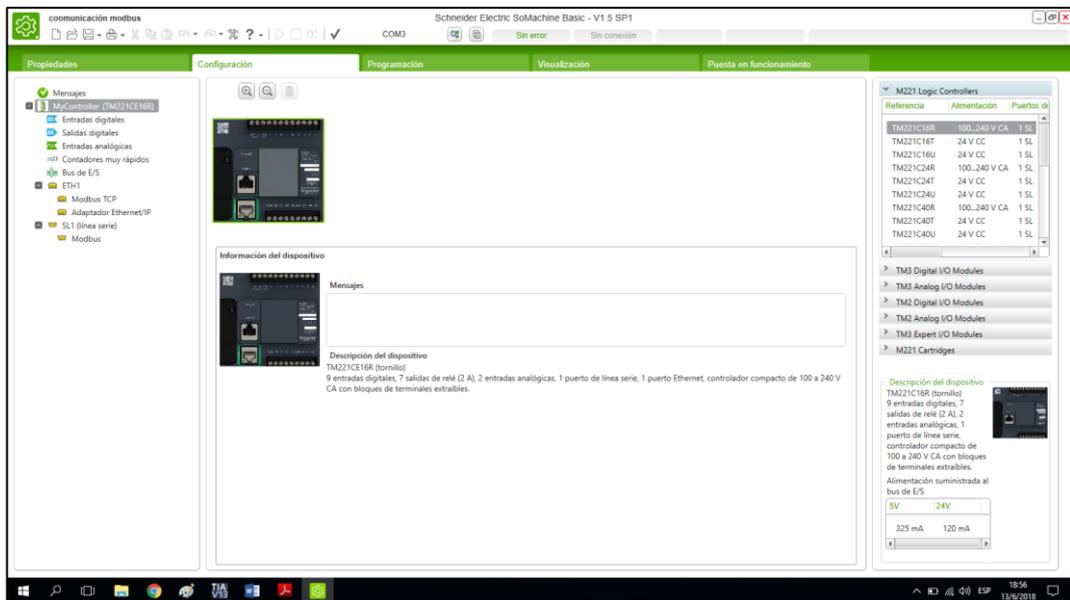


Ilustración 26: En el Software SoMachine se elige el modulo correspondiente y se configura

Fuente: Los autores.

Se ubica en la pestaña de **Programación** para realizar una codificación de prueba en lenguaje LADDER.

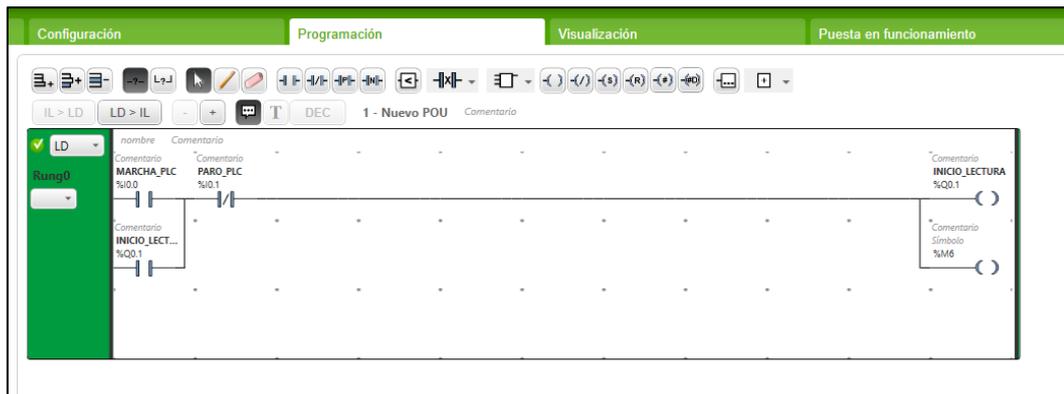


Ilustración 27: Programación LADDER de prueba

Fuente: Los autores.

Se dirige a la pestaña de **Puesta en funcionamiento**, donde se debe tener conectado el cable de red entre el puerto Ethernet del PLC y el de la PC. Aquí se puede observar la lista de dispositivos Ethernet que se han detectado, se configura la dirección del dispositivo dando clic al botón mostrado en la siguiente figura:

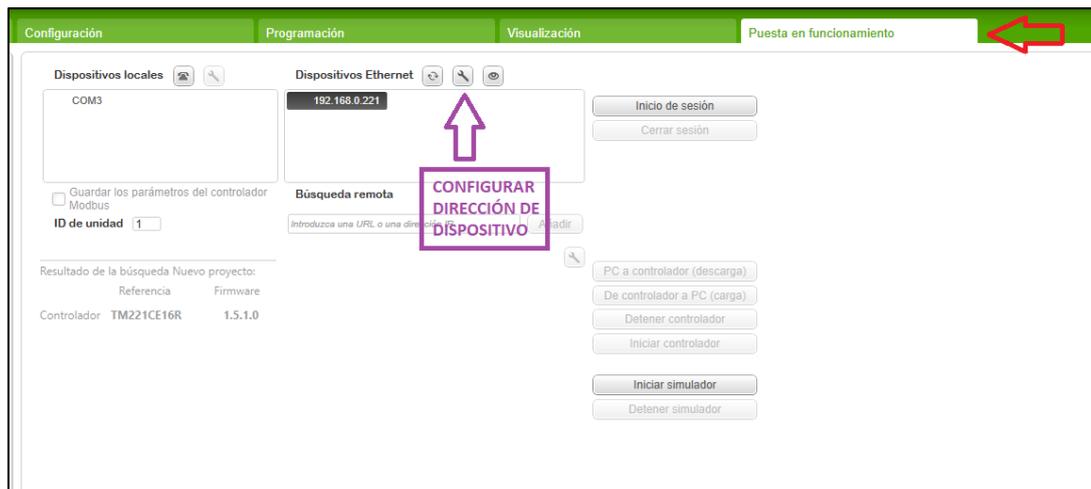


Ilustración 28: Puesta en marcha y configuración de dirección de los dispositivos

Fuente: Los autores.

Es importante acotar que la dirección del PLC y PC deben estar en la misma subred para que no existan inconvenientes. Una vez configurada la dirección se da clic en **Aplicar**.

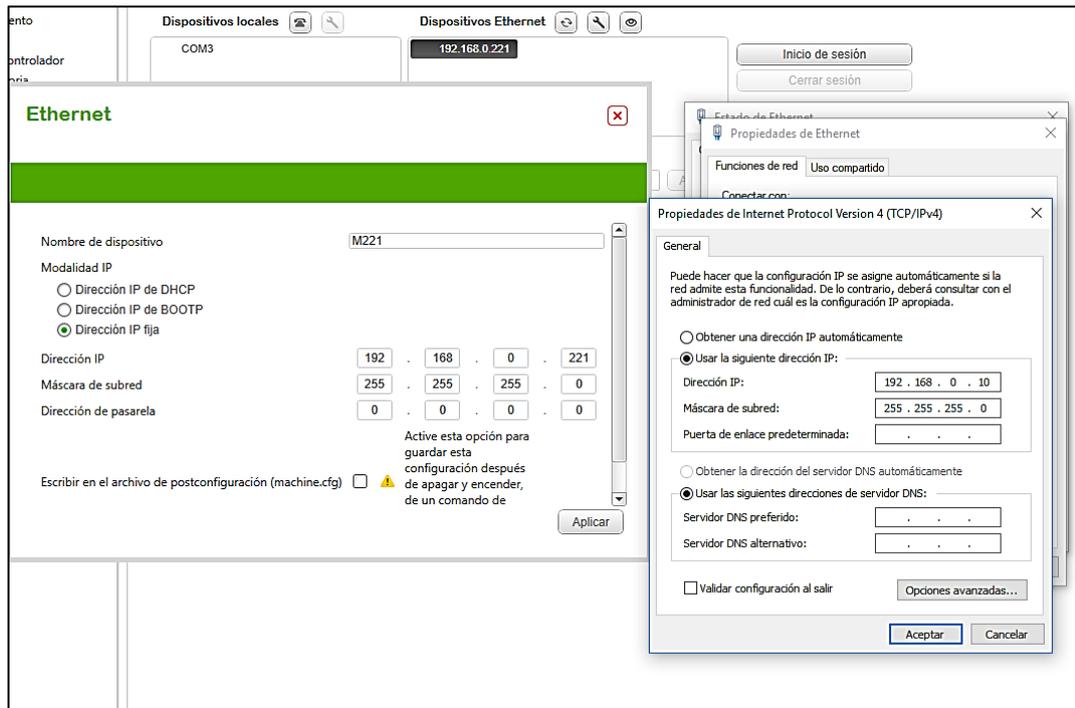


Ilustración 29: Configuración de direcciones IP entre los dispositivos

Fuente: Los autores.

Una vez que se tiene la dirección IP del dispositivo configurada, se da clic en **Inicio de sesión**, luego se descarga la aplicación de la PC al controlador y por último se da inicio al controlador. (Nota: Se debe asegurar de que el firmware del PLC y del software sean compatibles)

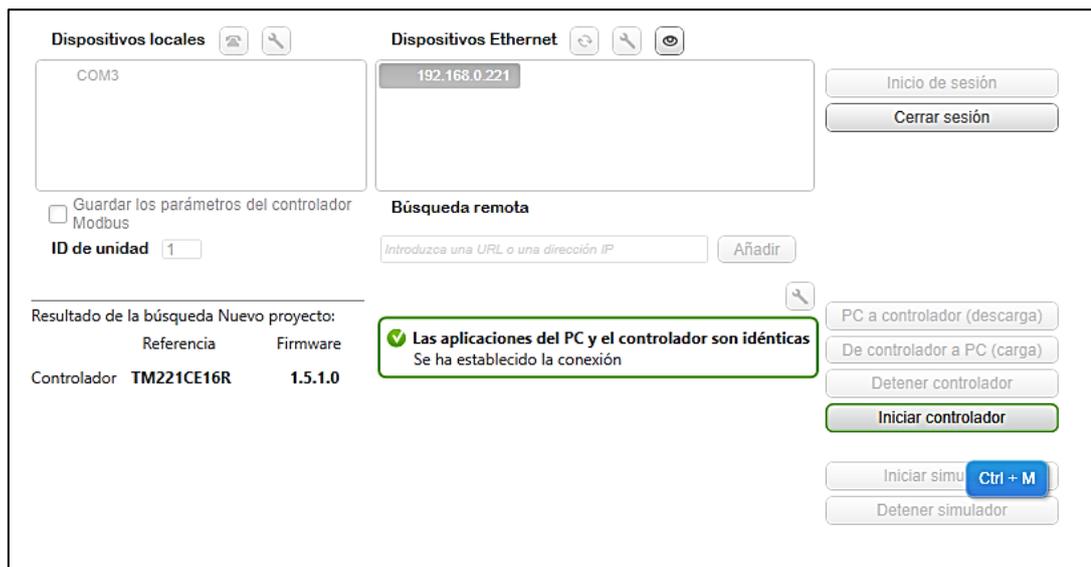


Ilustración 30: Inicio de sesión en el controlador.

Fuente: Los autores.

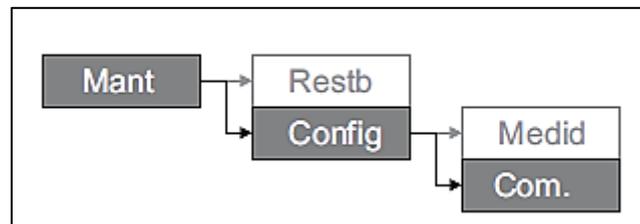
Al presionar el pulsador **%IO** en el módulo se comprobará el funcionamiento de la programación cargada en el controlador.

### 3.3.2. Comunicación del Analizador de red – PLC.

Para esta prueba se utilizará un analizador de red marca Schneider Electric PowerLogic PM5100 comunicado por medio del protocolo Modbus® RS-485 hacia el módulo PLC, para de esta manera adquirir y registrar todos los datos medidos por el analizador.

Se alimentará el analizador de red con una tensión de 120 VAC, en los terminales de medida de voltaje le aplicamos tensión  $V_{L-N}$  del mismo valor y precisamente éste es el dato (Voltaje de Línea a Neutro) que se va a capturar en el PLC.

Se procede a configurar la comunicación serie del analizador siguiendo el árbol de procesos mostrado a continuación:



*Ilustración 31: Configuración de los parámetros de comunicación del analizador de red*

Fuente: (Schneider Electric, 2013)

1. En la pantalla principal se dirigirá a **Mant > Config**.
2. Escriba la contraseña de configuración (la contraseña predeterminada es “0000”) y, a continuación, se pulsa **OK**.
3. Pulsando **Com** se accede al menú de comunicaciones.
4. Desplace el cursor de modo que quede señalado el parámetro que desea modificar y, a continuación, pulse **Editar**.
5. Modifique el parámetro según convenga, de acuerdo a la siguiente tabla:

Parámetro	Valor	Descripción
Protocolo	Modbus®	Este protocolo deberá ser usado en todos los dispositivos de comunicación conectados.
Dirección	1 - 255	Se establece una dirección única para cada dispositivo. Se coloca el valor de “9”.
Velocidad en baudios	9600, 19200, 38400	Velocidad de transmisión de datos. Se coloca el valor de “12600”.
Paridad	Par, Impar, Ninguna	Este ajuste de paridad deberá ser el mismo en todos los dispositivos. Se selecciona “Par”.

Tabla 1: Parámetros configurados para la comunicación

Fuente: Los autores.

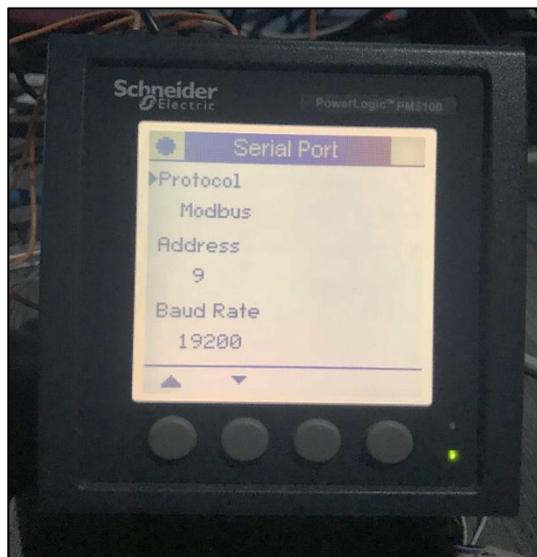


Tabla 2: Analizador de red PM 5100

Fuente: Los autores.

6. Pulse ▲ pasa salir. Pulse **Sí** para guardar los cambios.

Una vez configurada la comunicación del analizador, se apertura un proyecto en **SoMachine Basic** para realizar la programación necesaria para la lectura del dato requerido. Primero se configurará el protocolo de comunicación en el PLC, dentro de la pestaña **Configuración** se busca el apartado de comunicaciones y se da clic en “SL1 (línea serie)” para poder configurar el puerto serie, se deberá dejar los campos mostrados en la figura con los mismos valores que se configuraron previamente en el

anizador de red, estos son: Protocolo, Velocidad de Transmisión, Paridad y Medio Físico.

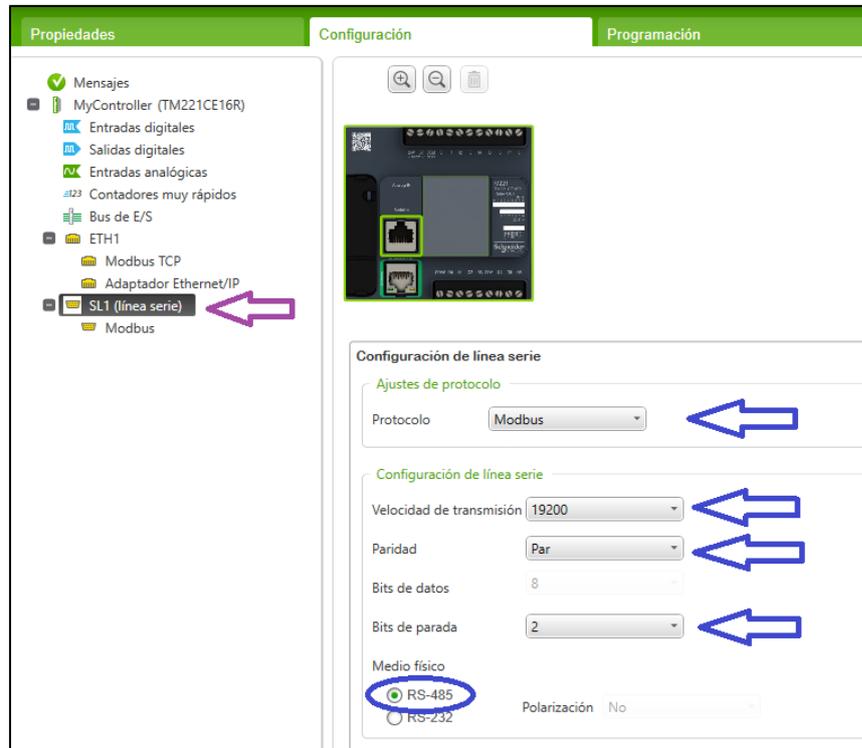


Ilustración 32: Configuración de línea serie en el SoMachine

Fuente: Los autores.

Se da clic en la pestaña **Modbus**<sup>®</sup> para continuar con la configuración, aquí se selecciona “RTU” para el modelo de transmisión de datos y el direccionamiento como “Maestra” puesto que, el PLC será el maestro y el analizador quedará como esclavo.

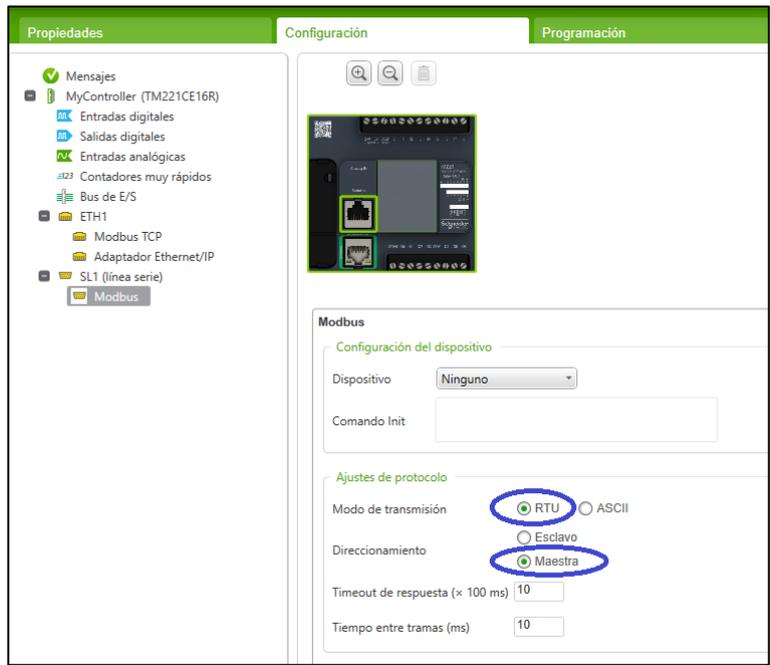


Ilustración 33: Configuración Modbus® para la comunicación

Fuente: Los autores.

Se dirige hacia la pestaña de programación y se codifica el siguiente programa en lenguaje LADDER, el cual está descrito de la siguiente manera: El primer bloque contiene una marcha y paro para la lectura del dato, el segundo y tercer bloque contienen el disparo temporizado de una salida %M2 que servirá como habilitador para el bloque de comunicación que se describirá más adelante.

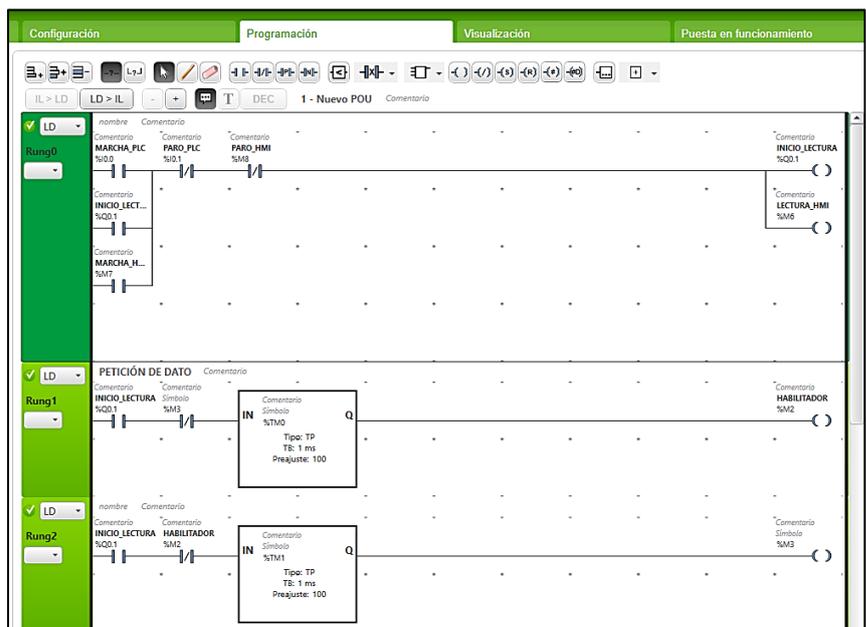


Ilustración 34: Programación LADDER en el SoMachine para la adquisición de datos

Fuente: Los autores.

A continuación, se va a describir el bloque de comunicación llamado “**READ\_VAR**”, el cual permite leer un dato registrado en el analizador. Para este caso particular el bloque **READ\_VAR0** será habilitado por **%M2** para su ejecución. Se necesita configurar los parámetros del bloque de la siguiente manera:

<b>Propiedad</b>	<b>Descripción</b>
<b>Link</b>	Selección del puerto, en este caso “SL1” que es el existente en el PLC.
<b>ID</b>	Identificador del dispositivo del que se leerá el dato, tiene un valor de “9” puesto que es la dirección Modbus® del analizador de red previamente configurado.
<b>Timeout</b>	Tiempo de espera máximo para la recepción de un dato.
<b>Obj Type</b>	Tipo de objeto que se va a leer, su valor lo colocamos en “0” que es el asignado para un registro de mantenimiento.
<b>First Obj</b>	Dirección del objeto (dato) del dispositivo del que se va a leer, en este caso el valor será “3027” que es el asignado para el voltaje de línea-neutro.
<b>Quantity</b>	Número de objetos que se van a leer, el valor será de “2” ya que la longitud es 16 bits y cada dato contiene 8 bits.
<b>IndexData</b>	Dirección de palabra de memoria “%MW” donde se va a guardar el dato.

*Tabla 3: Parámetros de configuración del bloque de comunicación READ\_VAR*

Fuente: Los autores.

A la salida del bloque se puede observar 4 salidas las que se han conectado a 4 señales de disparo para indicar el estado de la lectura.

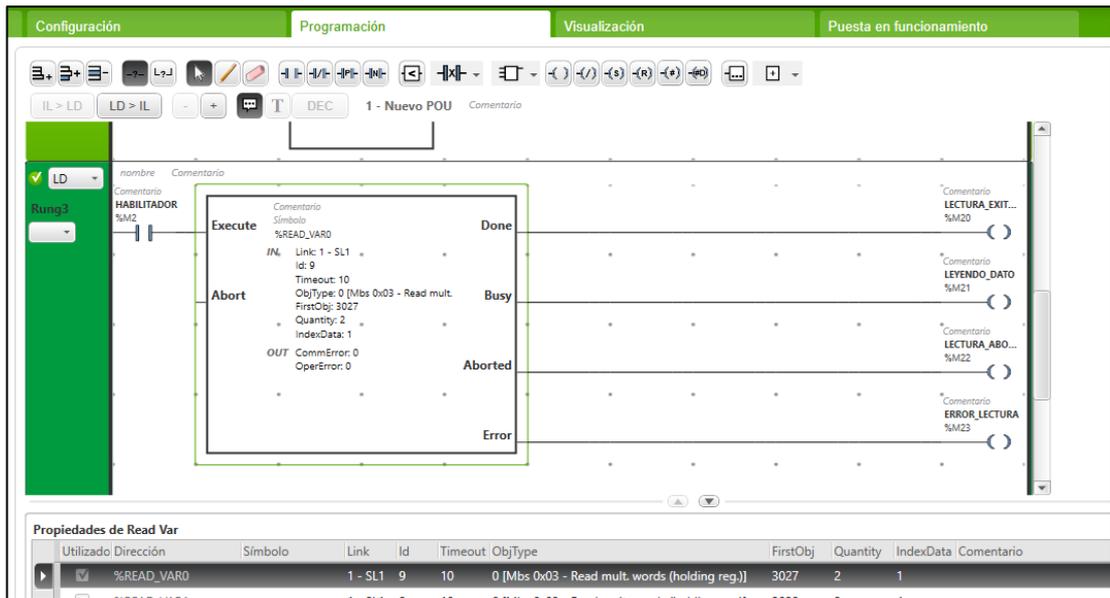


Ilustración 35: Parametrización del bloque READ\_VAR en sus 4 salidas

Fuente: Los autores.

Una vez que se configura el bloque y se tiene todos nuestros datos identificados se procede a compilar y cargar el programa en el PLC. Se da inicio al sistema asegurándose de que los cables de comunicación estén conectados correctamente, el resultado es el siguiente:

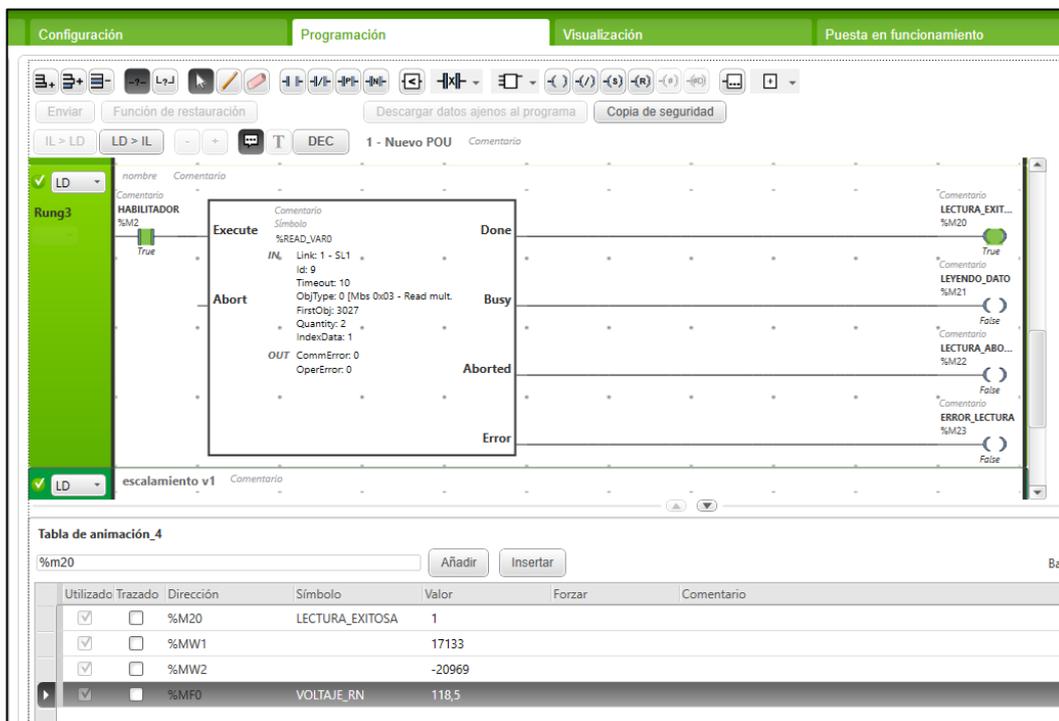


Ilustración 36: Lectura en tiempo real de parámetros tomados desde el analizador de red

Fuente: Los autores.

La salida **%M20** denominada **LECTURA\_EXITOSA**, en estado lógico “1”, indica que el procedimiento de lectura se ha completado correctamente, posterior a esto se muestra los registros de las dos palabras de memoria (**%MW1** y **%MW2**) donde se escribió el dato y por último el registro de **%MF0** denominado **VOLTAJE\_RN** que muestra el dato en formato real.

### 3.3.3. Comunicación PLC – HMI.

La adquisición de datos que se ha realizado mediante el módulo de PLC Schneider modelo M221, que permite poder comunicar estos datos en tiempo real con una interfaz humano – máquina (HMI), dicha interfaz se visualizará en la plataforma WinCC®.

Para comenzar se tiene que iniciar el software TIA PORTAL® instalado en la PC:

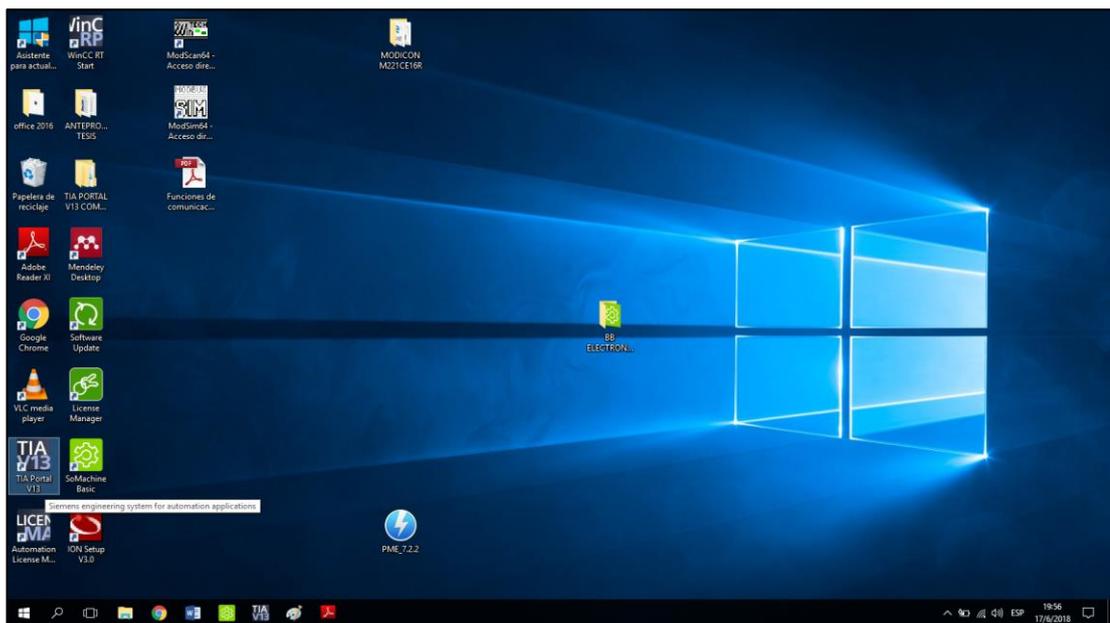


Ilustración 37: Software TIA PORTAL® V13

Fuente: Los autores.

Una vez iniciado el software se encontrará con la interfaz del TIA PORTAL® que da las opciones de abrir proyectos existentes o crear proyectos. Se da clic en la opción **Crear Proyecto**.

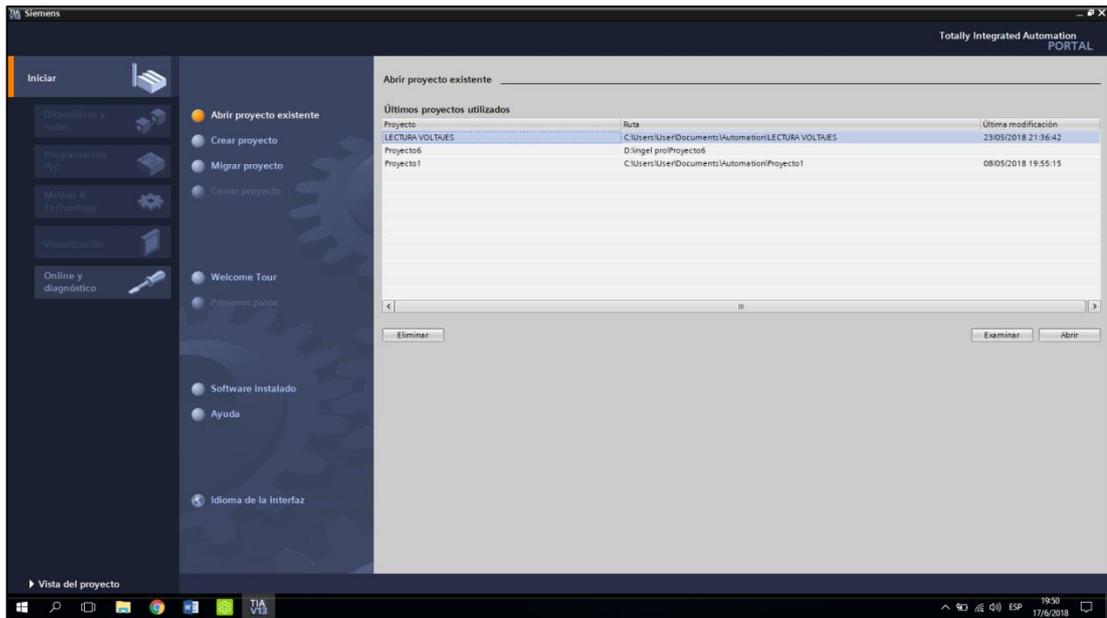


Ilustración 38: Se crea proyecto nuevo para el desarrollo de un HMI virtual

Fuente: Los autores.

Se procede a llenar los campos de información acerca del proyecto y se hace clic en el botón **Crear**, se aguardará un momento hasta que se produzca la creación del proyecto.

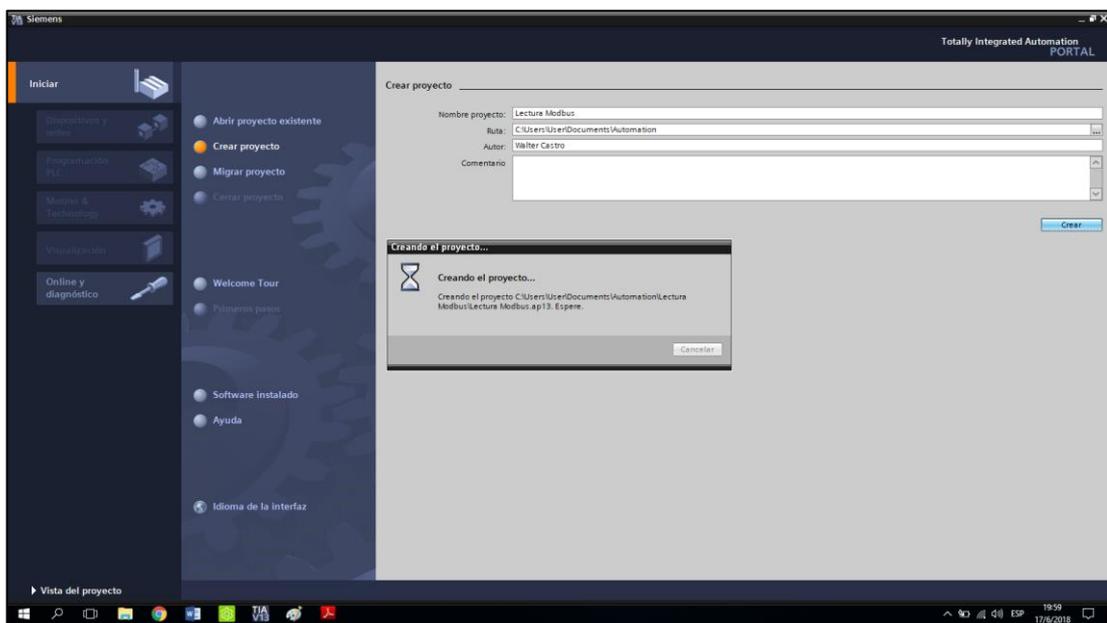


Ilustración 39: Creación de nuevo proyecto en el software TIA PORTAL® V15

Fuente: Los autores.

Aparecerán las opciones para dar los primeros pasos en el proyecto, para el caso al ser un proyecto nuevo desde cero lo primero que se debe hacer es configurar un

dispositivo. En el apartado de “Dispositivos y Redes” se da clic en **Configurar nuevo dispositivo**.

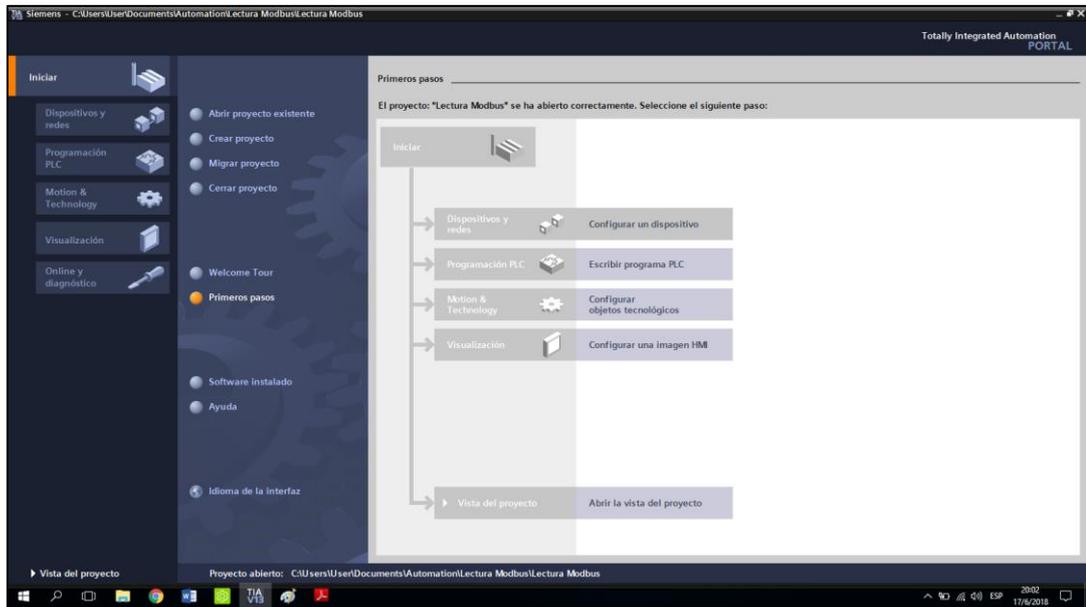


Ilustración 40: Configuración de nuevo dispositivos

Fuente: Los autores.

En el nuevo menú se da clic en la opción **Agregar Dispositivo**, aparecerán las 3 categorías de dispositivos disponibles, se ubica en el apartado de “Sistemas PC”, en busca de la carpeta SIMATIC® HMI APPLICATION, se selecciona la opción **WinCC® RT Advanced**. Se da clic en **Agregar**.

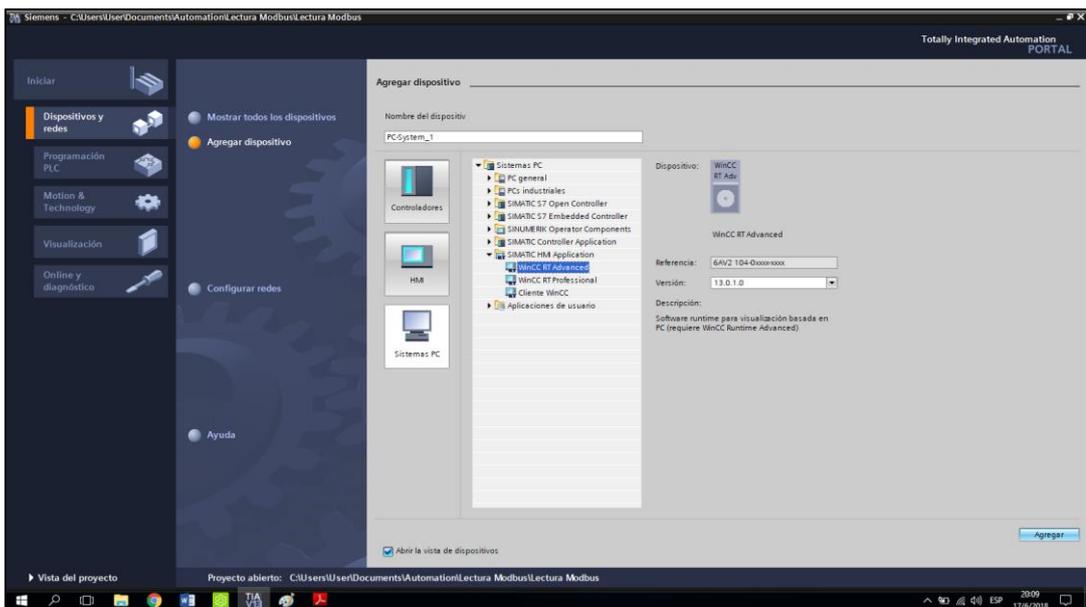


Ilustración 41: Agregar dispositivo WinCC® RT Advanced

Fuente: Los autores.

Aparecerá la vista previa del proyecto donde se encuentra el dispositivo que es una aplicación HMI de WinCC®. En la parte derecha de la pantalla se encontrará el catálogo de módulos que pueden añadirse eventualmente, se da clic en la carpeta **Módulos de comunicación**.

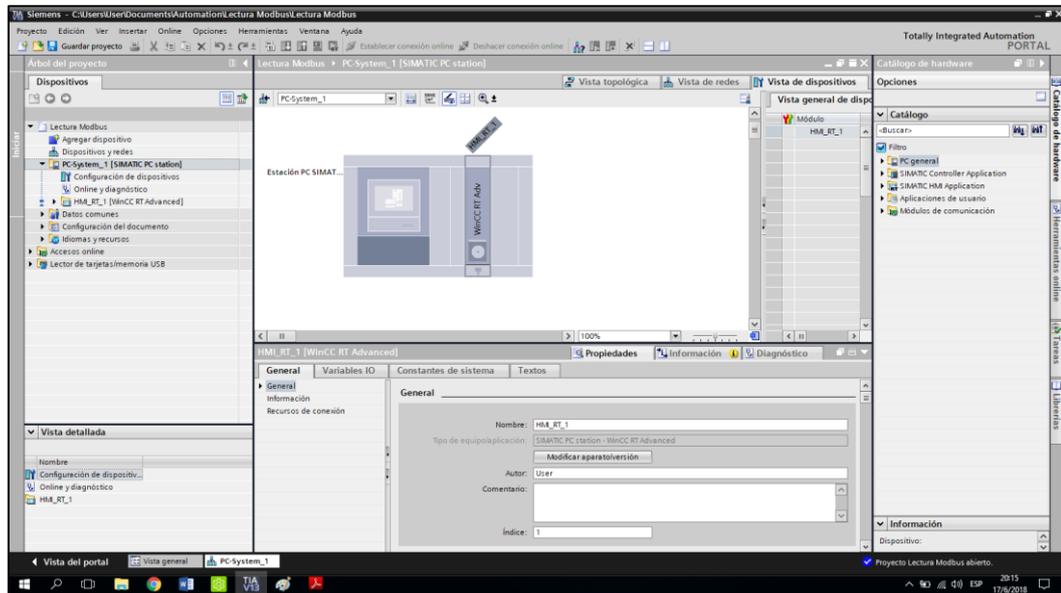


Ilustración 42: Aplicación HMI de WinCC® PC SIMATIC®

Fuente: Los autores.

En la carpeta PROFINET/ETHERNET, se selecciona IE GENERAL y se añade arrastrando el módulo de comunicación a la estación PC SIMATIC®.

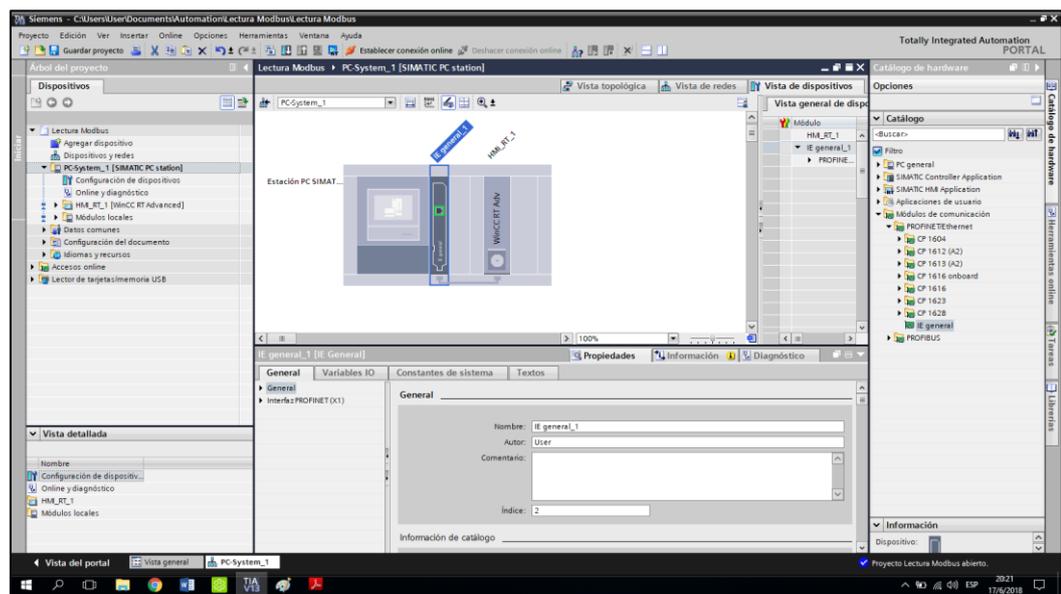


Ilustración 43: Agregar módulo IE GENERAL a la PC SIMATIC®

Fuente: Los autores.

Se procede a configurar la dirección IP de este módulo dando clic en el ícono del puerto ETHERNET y colocando en el campo correspondiente la dirección y la máscara de subred, cabe acotar que esa dirección IP debe ser la misma que la que tiene la tarjeta de red de nuestra PC.

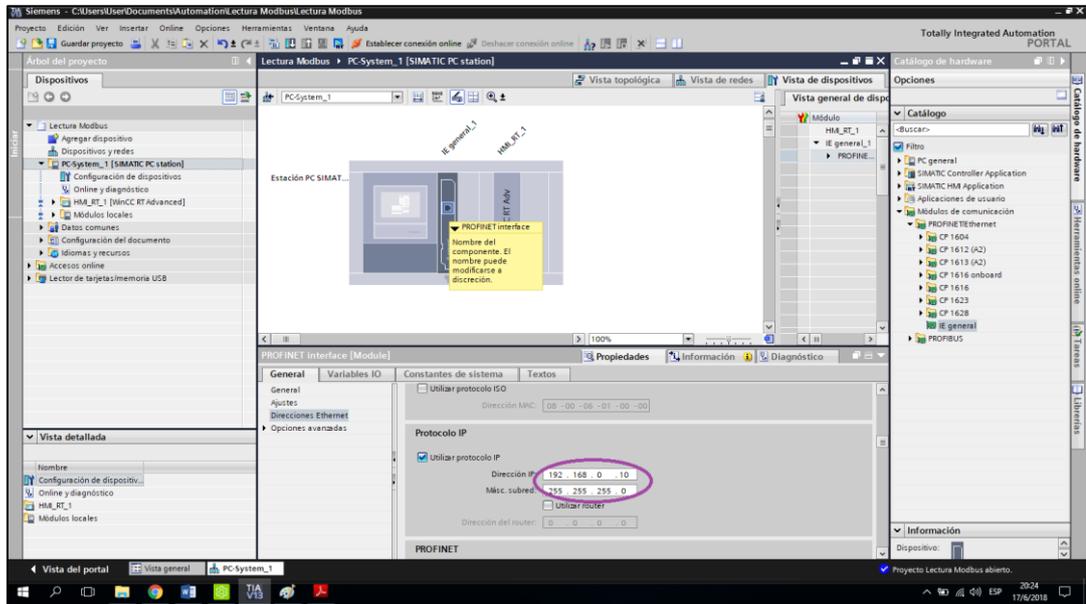


Ilustración 44: Configuración de direcciones IP para compatibilidad de módulo con la red

Fuente: Los autores.

En dirección hacia el árbol de proyectos, se despliega la pestaña **HMI\_RT\_1** que es el de la aplicación HMI, posterior a esto se abre la pestaña **Imágenes** y se da clic en **Crear Imagen**.

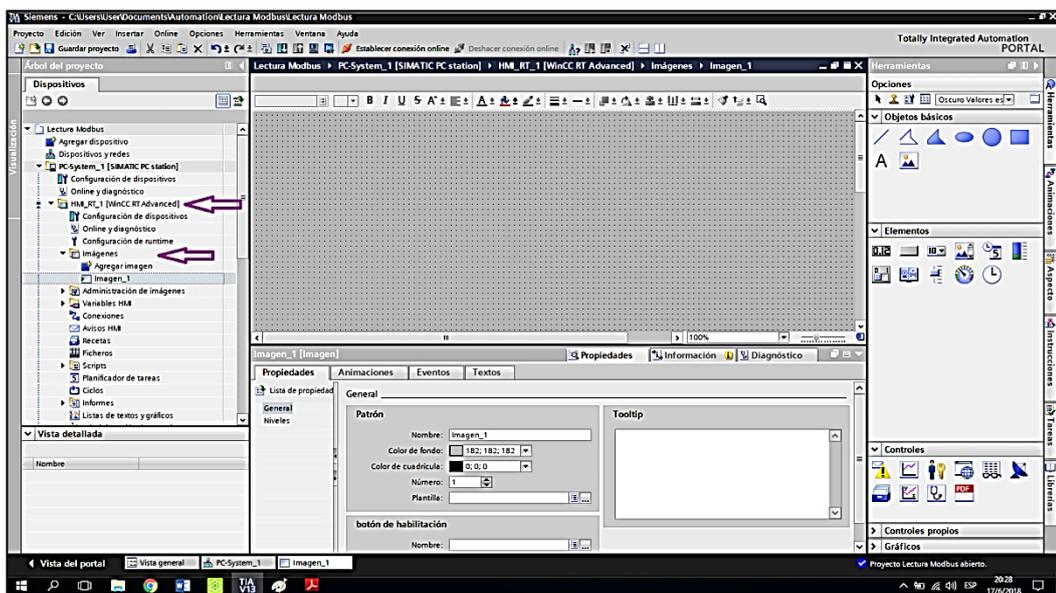


Ilustración 45: Creación de imagen virtual

En la imagen que sea crea, se diseña una pequeña interfaz colocando los elementos necesarios para la visualización: Marcha, paro, lectura.

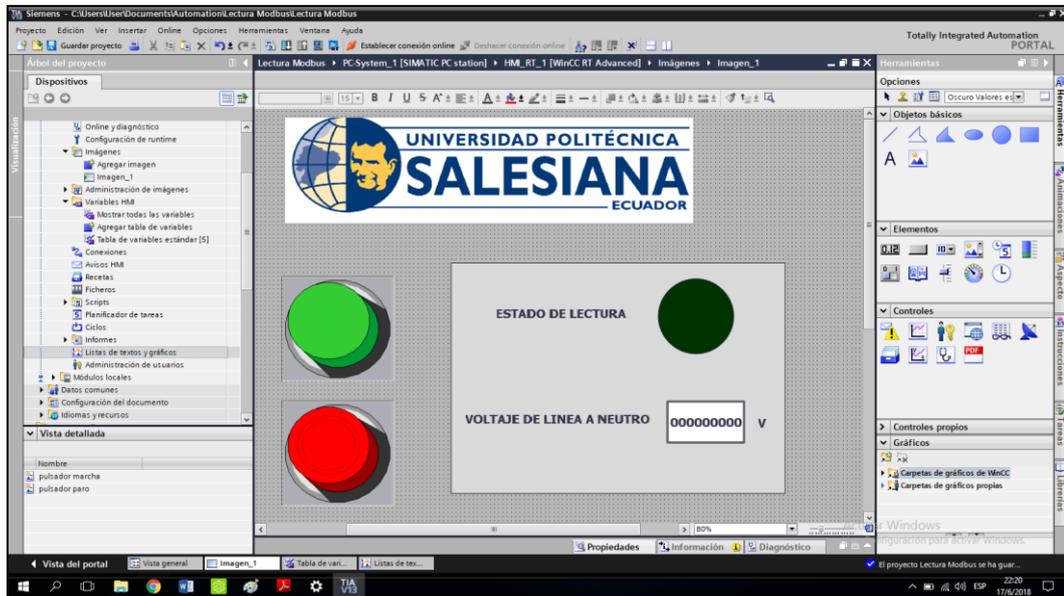


Ilustración 46: Interfaz gráfica HMI de prueba

Fuente: Los autores.

Para establecer las variables que se deben comunicar primero debe establecerse una conexión, en el árbol del proyecto vamos a buscar la pestaña **Conexiones**, se hace clic y crea una nueva conexión con los datos requeridos. El valor del driver de comunicación se deja en “Modicon Modbus<sup>®</sup> TCP/IP” y en la dirección del servidor se coloca la IP del PLC.

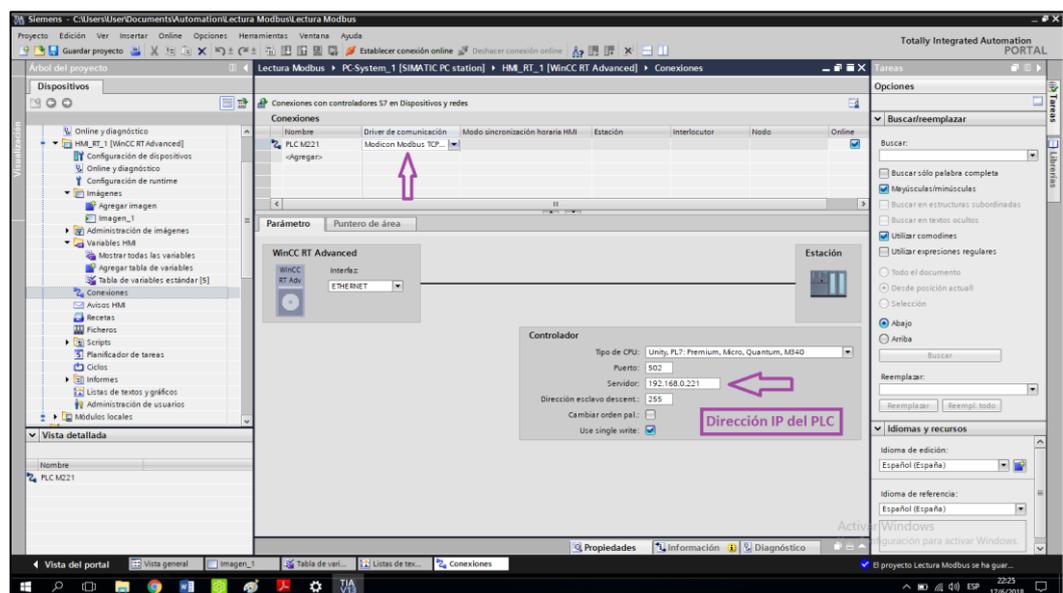


Ilustración 47: Configuración del controlador para lectura de variables

Se procede a definir las variables para lo cual se da clic en la opción Tabla de variables estándar para poder crear las variables relacionadas, con su respectiva conexión (PLC M221) y direcciones.

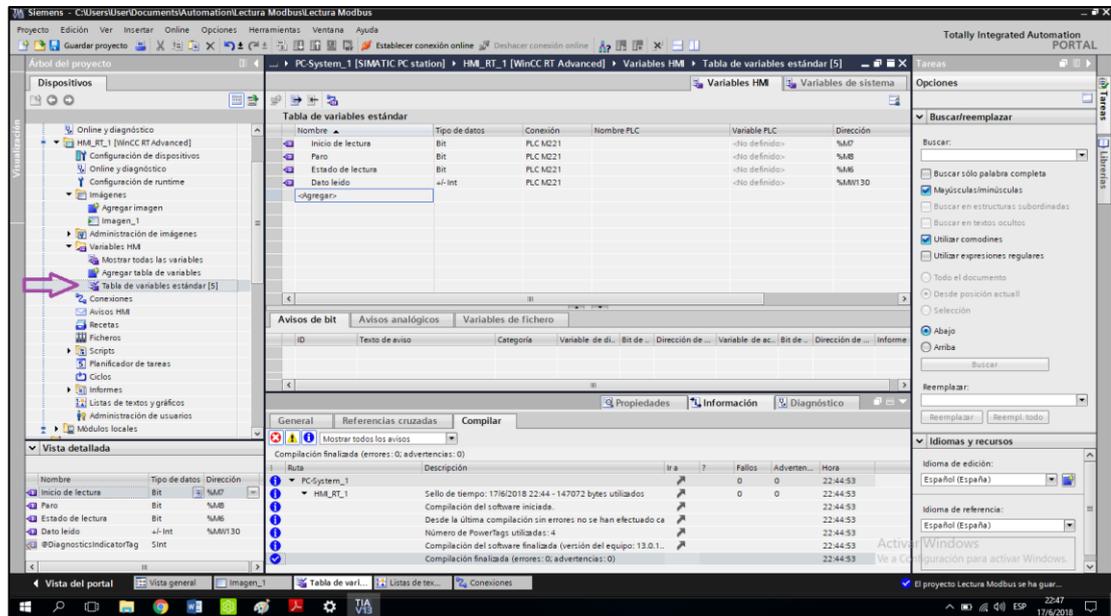


Ilustración 48: Configuración de variables relacionadas con la respectiva conexión y direcciones

Fuente: Los autores.

Una vez hecho esto, hay que comenzar con la comunicación de las variables del PLC para esto se abre el software SoMachine Basic con el programa que se trabajó anteriormente ya cargado. Se ubicará en la sección de Configuración, se da clic en la opción Modbus® TCP y se configura la dirección IP del cliente, que en este caso será la aplicación HMI con la dirección que se configuró previamente la cual es: 192.168.0.10. Con esto ya está configurada la conexión y se procede a probar.

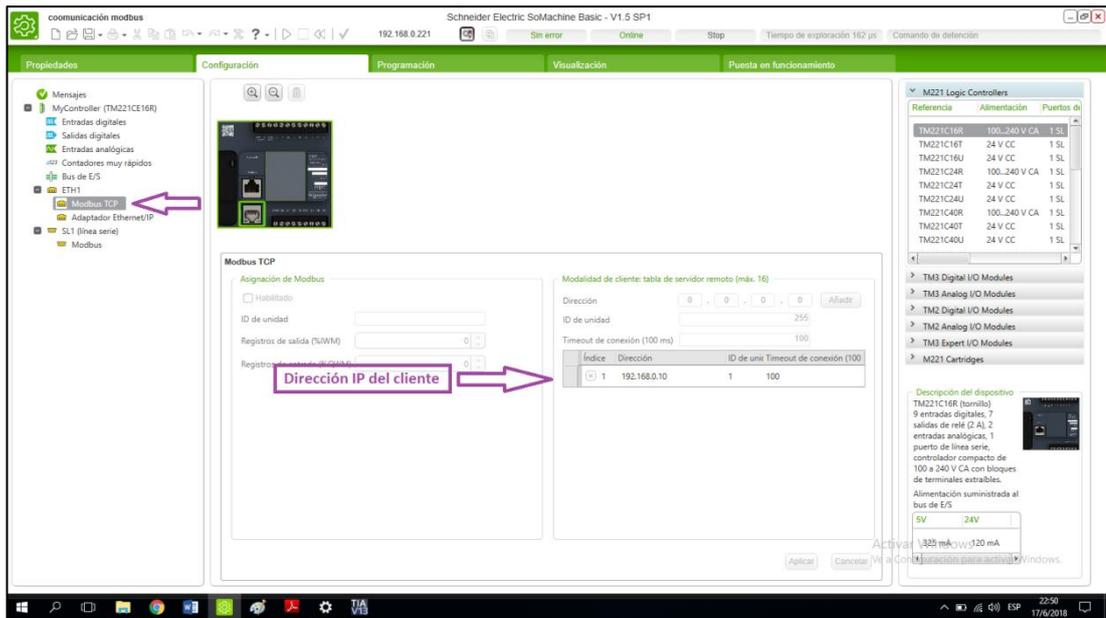


Ilustración 49: Configuración del protocolo Modbus® para la conexión entre WinCC® y SoMachine

Fuente: Los autores.

Se da inicio el programa en el PLC y se verifica el estado de las variables HMI.

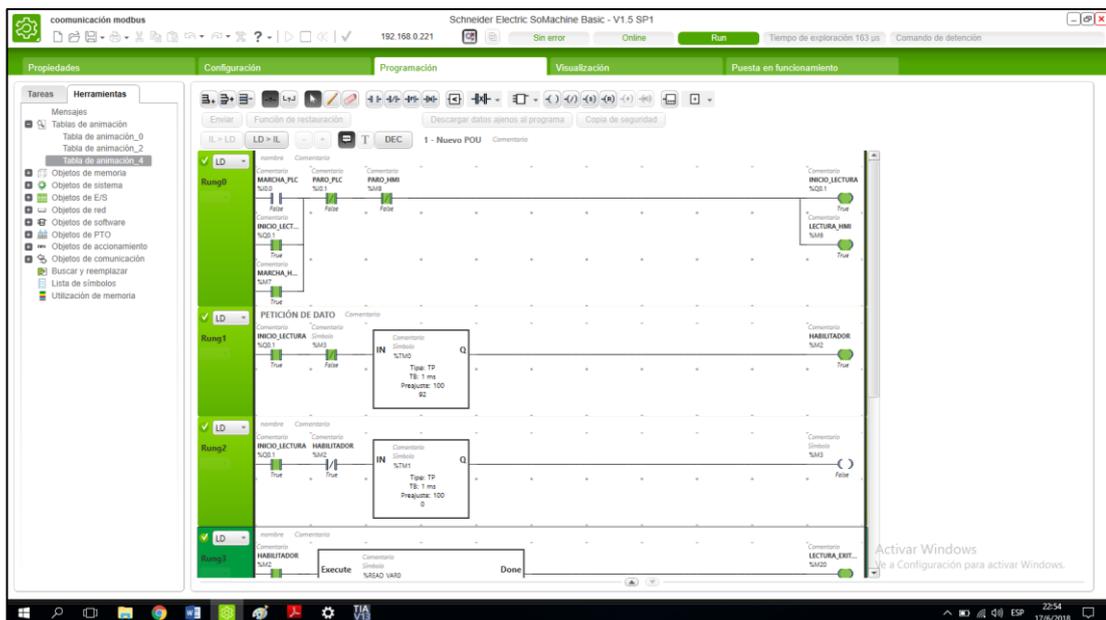


Ilustración 50: Verificación de estado de lectura de variables

Fuente: Los autores.

En el TIA PORTAL® se compila el proyecto y se ejecuta, si la lectura se produjo correctamente, se mostrará el dato en la aplicación HMI de WinCC®. Se realizará la comparación del valor registrado en %MF0, que coincide con el valor que marca el indicador numérico en la aplicación HMI.



Ilustración 51: Lectura real del parámetro de prueba mediante la imagen HMI del WinCC®

Fuente: Los autores.

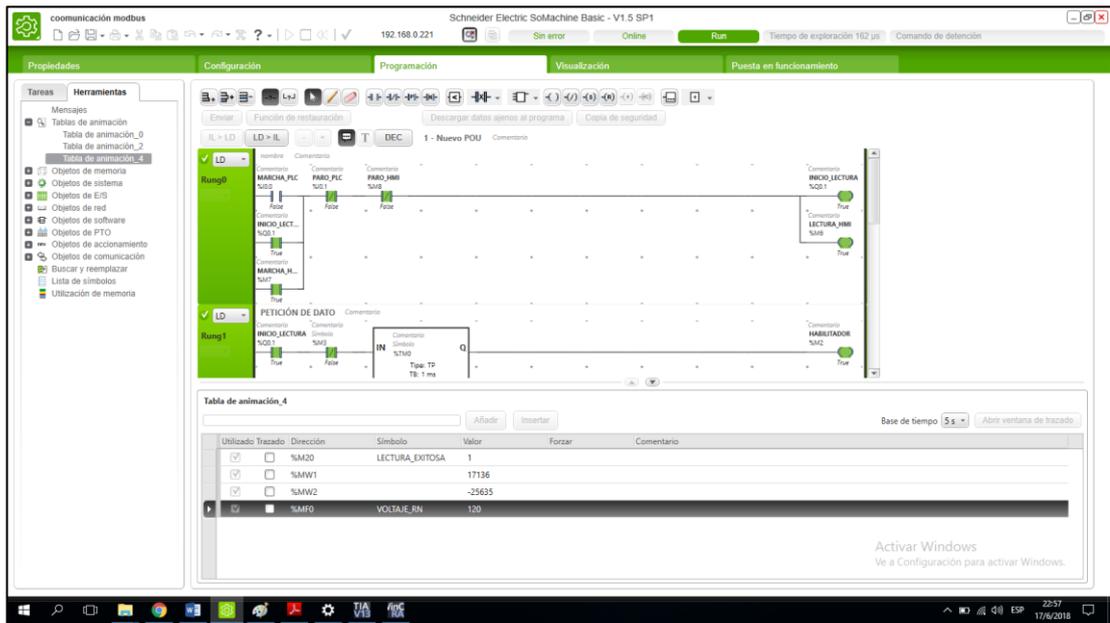
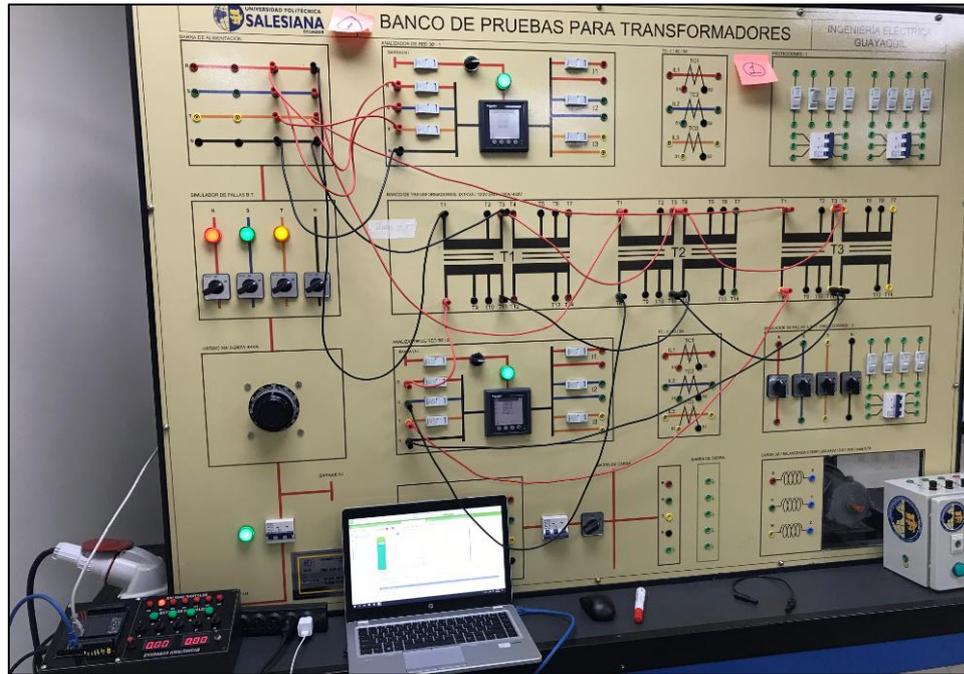


Ilustración 52: Lectura real del parámetro de prueba mediante el software So Machine

Fuente: Los autores.



*Ilustración 53: Montaje de equipos para la adquisición de datos*

Fuente: Universidad Politécnica Salesiana.

# CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE UN SISTEMA TRIFÁSICO DE TRANSFORMADORES EN CONEXIÓN Y - D Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS.

## 4.1. Modelado Matemático

### 4.1.1. Acoplamiento de transformadores monofásicos para una conexión Y - D.

Un sistema trifásico se puede obtener a partir del acoplamiento de tres transformadores monofásicos que mantengan características similares. En la figura se muestra la conexión “Y” en la bobina del primario del transformador, mientras que en la bobina del secundario se observa la conexión “D”.

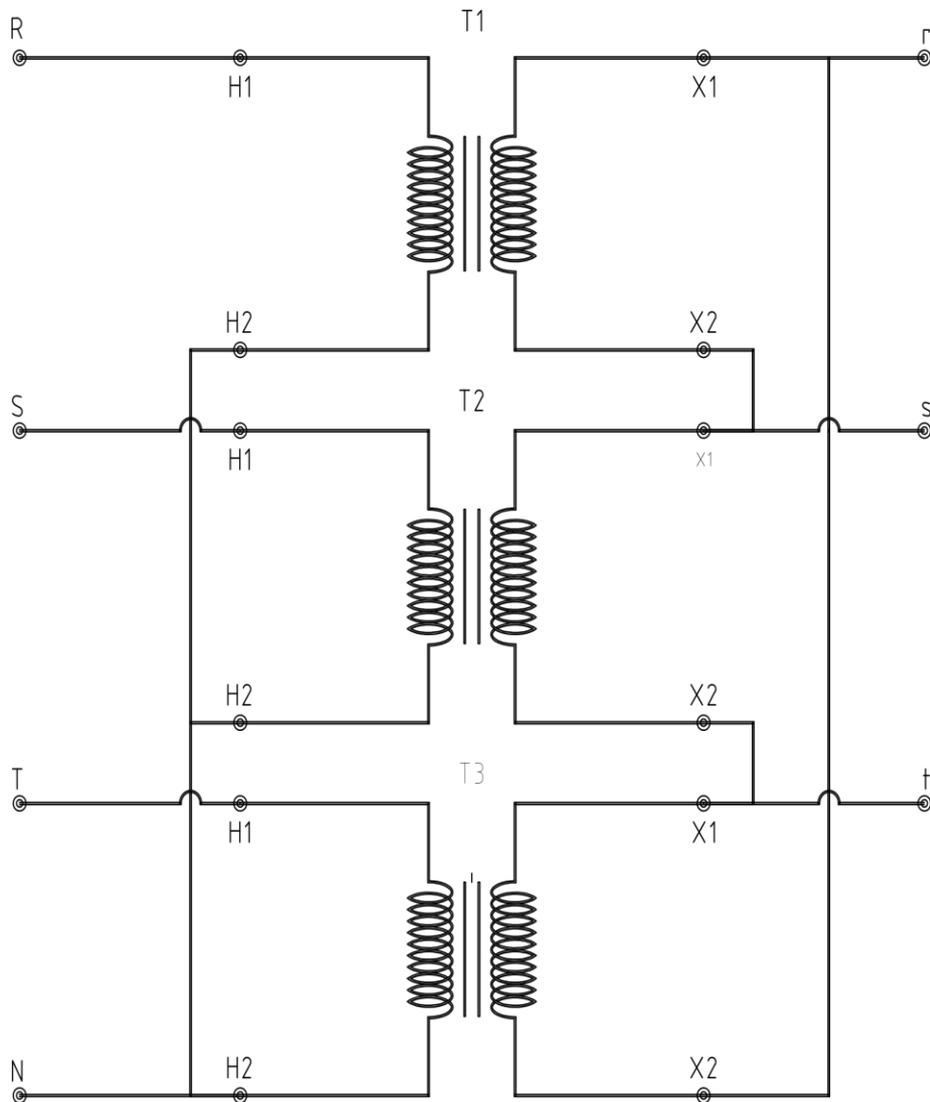


Ilustración 54: Acoplamiento de transformadores monofásicos para la conexión Y - D

Fuente: Los autores.

Para el estudio analítico del cómo se comporta este sistema trifásico, se ha bosquejado de la siguiente manera el banco trifásico para simplificar el análisis y mejorar la comprensión del mismo:

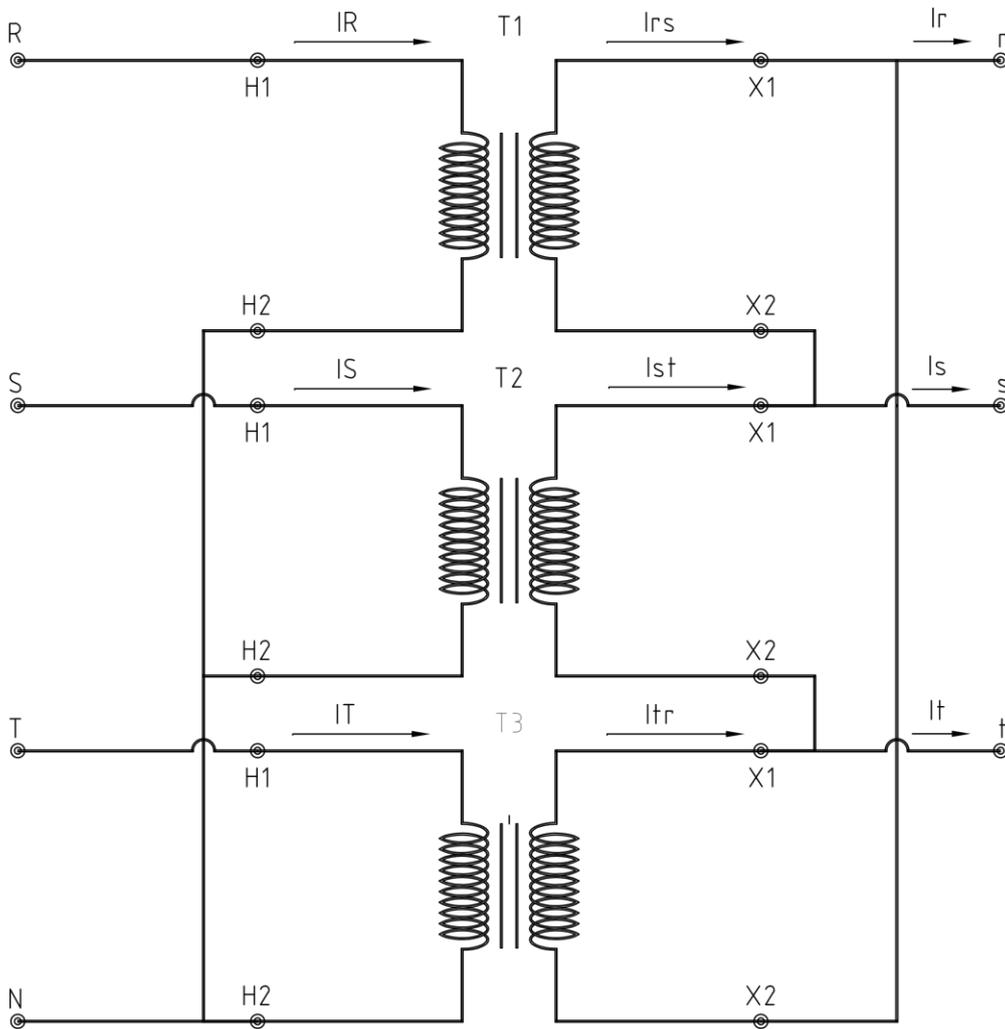


Ilustración 55: Banco trifásico de transformadores en conexión Y-D

Fuente: Los autores.

#### 4.1.2. Modelo real aproximado de cada transformador monofásico.

A continuación, se detalla el procedimiento para obtener el modelo real aproximado de cada transformador monofásico. Se realizaron las correspondientes pruebas de circuito abierto y de corto circuito a cada transformador y luego calcular los valores de las impedancias serie y del ramal de excitación.

<b>Datos Nominales Transformador T1</b>	$V_{Prim} = 120V$ $V_{Sec} = 240V$ $S_{Nom} = 500VA$
<b>Prueba de corto circuito (En B.T.)</b>	<b>Prueba de circuito abierto (En A.T.)</b>
$P_{CC} = 6W$	$P_{CA} = 24W$
$V_{CC} = 6V$	$V_{CA} = 120V$
$I_{CC} = 1.011A$	$I_{CA} = 1.237A$

Tabla 4: Resultados de pruebas fundamentales en Transformador T1

Fuente: Los autores.

Como consecuencia de la obtención de estos datos por los ensayos realizados antes mencionados, se puede calcular el valor de cada parámetro que servirá para el modelo real del transformador. De las pruebas de corto circuito se obtienen los valores de la impedancia equivalente de los devanados del transformador, las ecuaciones que se utilizarán son las siguientes:

$$\theta_{FP_{cc}} = \cos^{-1} \left( \frac{P_{cc}}{V_{cc} * I_{cc}} \right)$$

Ecuación 8: Ángulo de la impedancia de corto circuito.

$$Z_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \cos(\theta_{FP_{cc}}) + j \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \text{sen}(\theta_{FP_{cc}})$$

Ecuación 9: Impedancia serie equivalente de corto circuito

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$$

Ecuación 10: Impedancia serie equivalente representada por sus componentes rectangulares

Fuente: Los autores.

Dónde:

$\theta_{FP_{cc}}$  : Ángulo de la impedancia de corto circuito

$Z_{eq}$ : Impedancia serie equivalente de corto circuito

$V_{cc}$ : Voltaje de corto circuito

$I_{cc}$ : Intensidad de corriente de corto circuito

$P_{cc}$ : Potencia de corto circuito

$R_{eq}$ : Resistencia serie de corto circuito

$X_{eq}$ : Reactancia serie de cortocircuito

Para determinar la impedancia en paralelo del ramal de excitación, se utilizan los resultados provenientes de la prueba de circuito abierto, empleando las siguientes ecuaciones:

$$\theta_{FP_{Ym}} = \cos^{-1} \left( \frac{P_{CA}}{V_{CA} * I_{CA}} \right)$$

*Ecuación 11: Ángulo de la admitancia de magnetización*

$$Ym = \frac{I_{CA}}{V_{CA}} \cos(\theta_{FP_{Ym}}) - j \frac{I_{CA}}{V_{CA}} \operatorname{sen}(\theta_{FP_{Ym}})$$

*Ecuación 12: Admitancia de magnetización*

$$Z_{ex} = Ym^{-1}$$

*Ecuación 13: Impedancia de excitación a partir de la admitancia*

$$Z_{ex} = R_{ex} + jX_{ex}$$

*Ecuación 14: Impedancia de excitación en representación rectangular*

Fuente: Los autores.

Dónde:

$\theta_{FP_{Ym}}$  : Ángulo de la admitancia de magnetización

$Z_{ex}$ : Impedancia de excitación

$V_{CA}$ : Voltaje de circuito abierto

$I_{CA}$ : Intensidad de corriente de circuito abierto

$P_{CA}$ : Potencia de circuito abierto

$R_{ex}$ : Resistencia de excitación

$X_{ex}$ : Reactancia de excitación

Dependiendo de donde se realicen estas pruebas, los valores que se obtengan estarán referidos al primario o al secundario del transformador. En el caso la prueba de corto circuito se realizó respecto al devanado secundario ó de 240V, pero la prueba de circuito abierto se la realizó respecto al devanado primario ó de 120V. El análisis se enfocará al modelo real del transformador visto desde el devanado secundario, por lo que tendremos que referir los valores que se obtengan por medio de la relación de transformación.

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

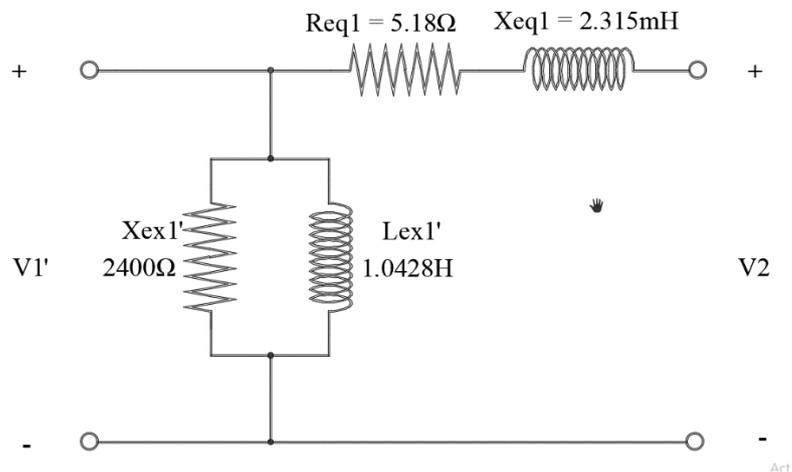
*Ecuación 15: Relación fundamental de transformación*

$$a^2 = \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)$$

*Ecuación 16: Relación fundamental de transformación según las impedancias*

Fuente: Los autores.

Una vez referidos los valores correspondientes, el modelo real del transformador T1 visto desde el lado secundario se muestra en la ilustración 56.



*Ilustración 56: Modelo real aproximado del Transformador T1 visto desde el secundario*

Fuente: Los autores.

El proceso es exactamente el mismo con el transformador T2 Y T3.

<b>Datos Nominales Transformador T2</b>	$V_{Prim} = 120V$ $V_{Sec} = 240V$ $S_{Nom} = 500VA$
<b>Prueba de corto circuito (En B.T.)</b>	<b>Prueba de circuito abierto (En A.T.)</b>
$P_{CC} = 5W$	$P_{CA} = 26W$
$V_{CC} = 5V$	$V_{CA} = 120V$
$I_{CC} = 1.054A$	$I_{CA} = 1.518A$

Tabla 5: Resultados de pruebas fundamentales en Transformador T2

Fuente: Los autores.

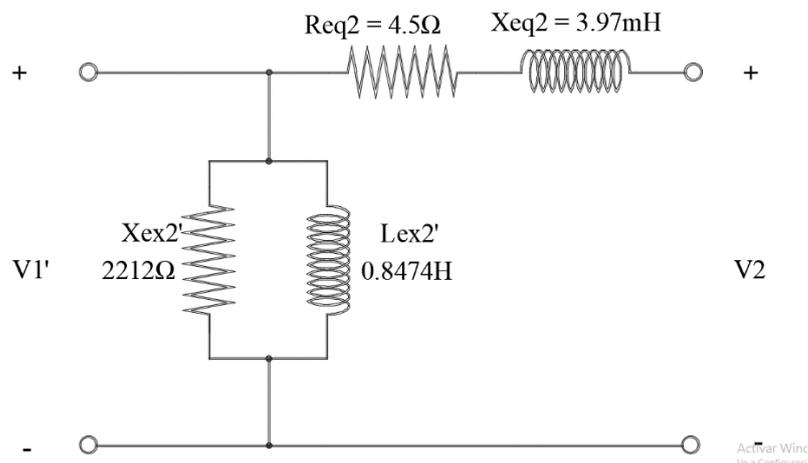


Ilustración 57: Modelo real del transformador T2 visto desde el secundario

Fuente: Los autores.

<b>Datos Nominales Transformador T3</b>	$V_{Prim} = 120V$ $V_{Sec} = 240V$ $S_{Nom} = 500VA$
<b>Prueba de corto circuito (En B.T.)</b>	<b>Prueba de circuito abierto (En A.T.)</b>
$P_{CC} = 6W$	$P_{CA} = 30W$
$V_{CC} = 6V$	$V_{CA} = 120V$
$I_{CC} = 1.076A$	$I_{CA} = 2.066A$

Tabla 6: Resultados de pruebas fundamentales en transformador T3

Fuente: Los autores.

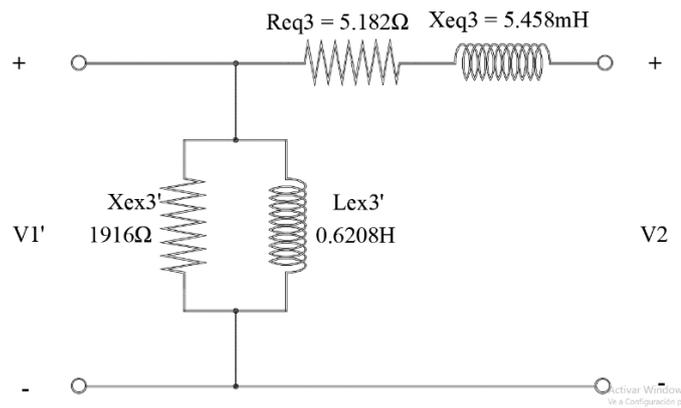


Ilustración 58: Modelo real del transformador T3 visto desde el secundario

Fuente: Los autores.

#### 4.1.3. Análisis a vacío del sistema trifásico de transformadores en conexión Y–D.

Para poder realizar el análisis a vacío de este sistema trifásico se hace uso de los modelos reales equivalentes de cada transformador acoplado según la conexión Y–D, para así poder determinar las ecuaciones de corriente y voltaje en el secundario de cada transformador.

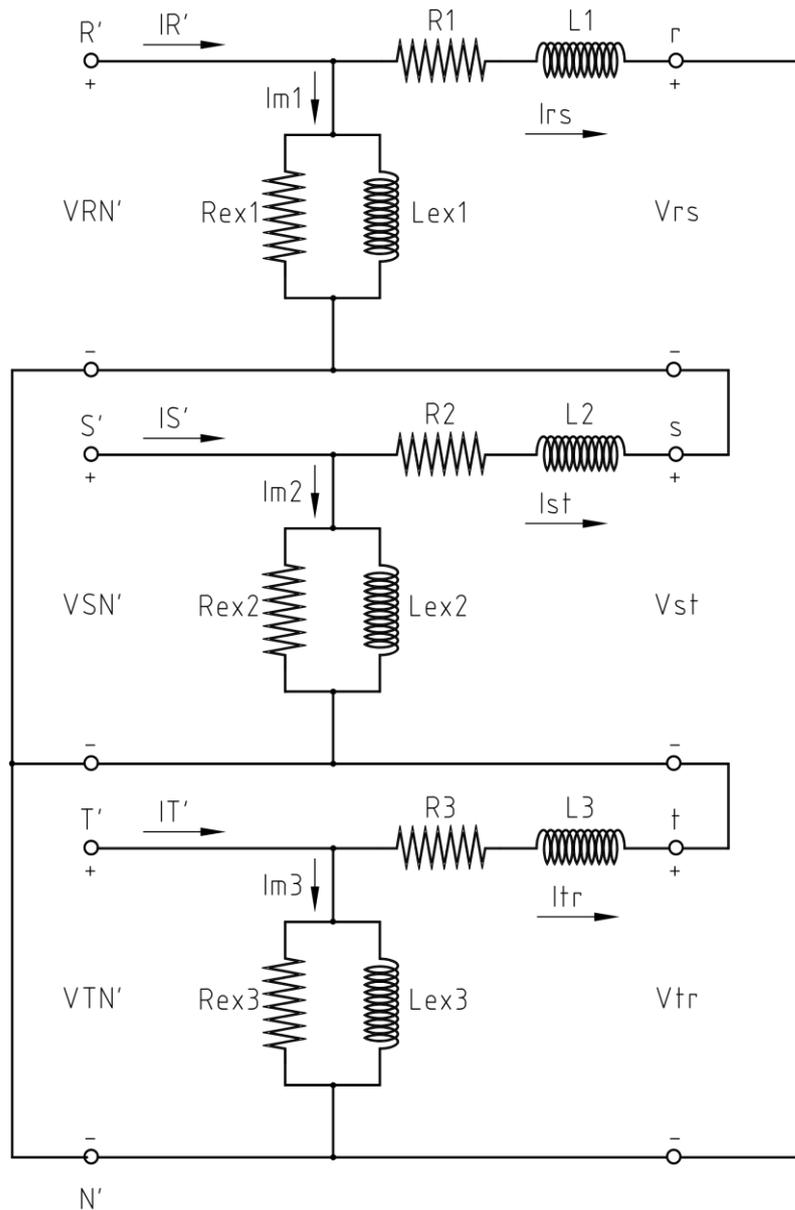


Ilustración 59: Modelo real del banco trifásico de transformadores referido al secundario.

Fuente: Los autores.

Como se puede apreciar, el voltaje entre los terminales del ramal de excitación es el mismo del voltaje de entrada de la fuente, por lo que se lo puede considerar como una fuente y de esa manera simplificar el análisis con un circuito más sencillo, como se muestra:

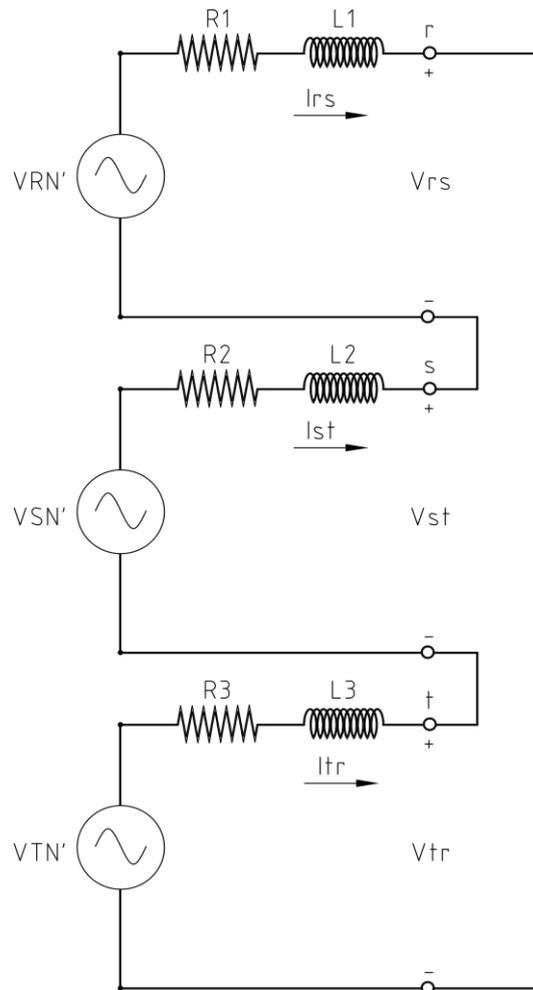


Ilustración 60: Análisis a vacío de la conexión Y-D

Fuente: Los autores.

De esta manera se establece una ecuación para determinar la corriente secundaria que será la misma en todas las fases debido a que resulta una conexión serie de las impedancias equivalentes de cada uno de los transformadores.

$$I_{rs} = I_{st} = I_{tr} = I_o$$

Ecuación 17: Corrientes a vacío del lado secundario conexión Y-D

Fuente: Los autores.

Con este circuito equivalente se puede analizar con Ley de Voltajes de Kirchhoff, entonces queda:

$$-V_{RN}' + R_3 I_o + L_3 \frac{dI_o}{dt} - V_{SN}' + R_2 I_o + L_2 \frac{dI_o}{dt} - V_{TN}' + R_1 I_o + L_1 \frac{dI_o}{dt} = 0$$

*Ecuación 18: Ley de Kirchhoff aplicada en circuito equivalente del sistema trifásico*

Fuente: Los autores.

$$(L_1 + L_2 + L_3) \frac{dI_o}{dt} = V_{RN}' + V_{SN}' + V_{TN}' - (R_1 + R_2 + R_3) I_o$$

*Ecuación 19: Caída de tensión en las inductancias del sistema trifásico a vacío*

Fuente: Los autores.

Así se puede concluir que la corriente a vacío en el lado secundario del transformador es:

$$\frac{dI_o}{dt} = \frac{V_{RN}' + V_{SN}' + V_{TN}' - (R_1 + R_2 + R_3) I_o}{(L_1 + L_2 + L_3)}$$

*Ecuación 20: Corriente de vacío en los secundarios de los transformadores*

Fuente: Los autores.

De esta manera, las ecuaciones que definen el comportamiento de los voltajes secundarios de cada transformador a vacío son;

$$V_{rs} = V_{RN}' - R_1 I_o - L_1 \frac{dI_o}{dt}$$

*Ecuación 21: Voltaje secundario en las fases RS (Transformador T1)*

Fuente: Los autores.

$$V_{st} = V_{SN}' - R_2 I_o - L_2 \frac{dI_o}{dt}$$

*Ecuación 22: Voltaje secundario en las fases ST (Transformador T2)*

Fuente: Los autores.

$$V_{tr} = V_{TN}' - R_3 I_o - L_3 \frac{dI_o}{dt}$$

*Ecuación 23: Voltaje secundario en las fases TR (Transformador T3)*

Fuente: Los autores.

#### 4.1.4. Análisis con carga del sistema trifásico de transformadores en conexión Y-D.

El análisis lo se realizara visto desde el secundario de los transformadores tal como en el inciso anterior y se basará del mismo circuito de manera elemental, al que se añadirán las cargas.

##### 4.1.4.1. Análisis con carga resistiva.

Al analizar el sistema trifásico en conexión Y- D se utiliza el circuito equivalente del análisis en vacío, considerando todo desde el secundario, agregándole una carga trifásica resistiva en D.

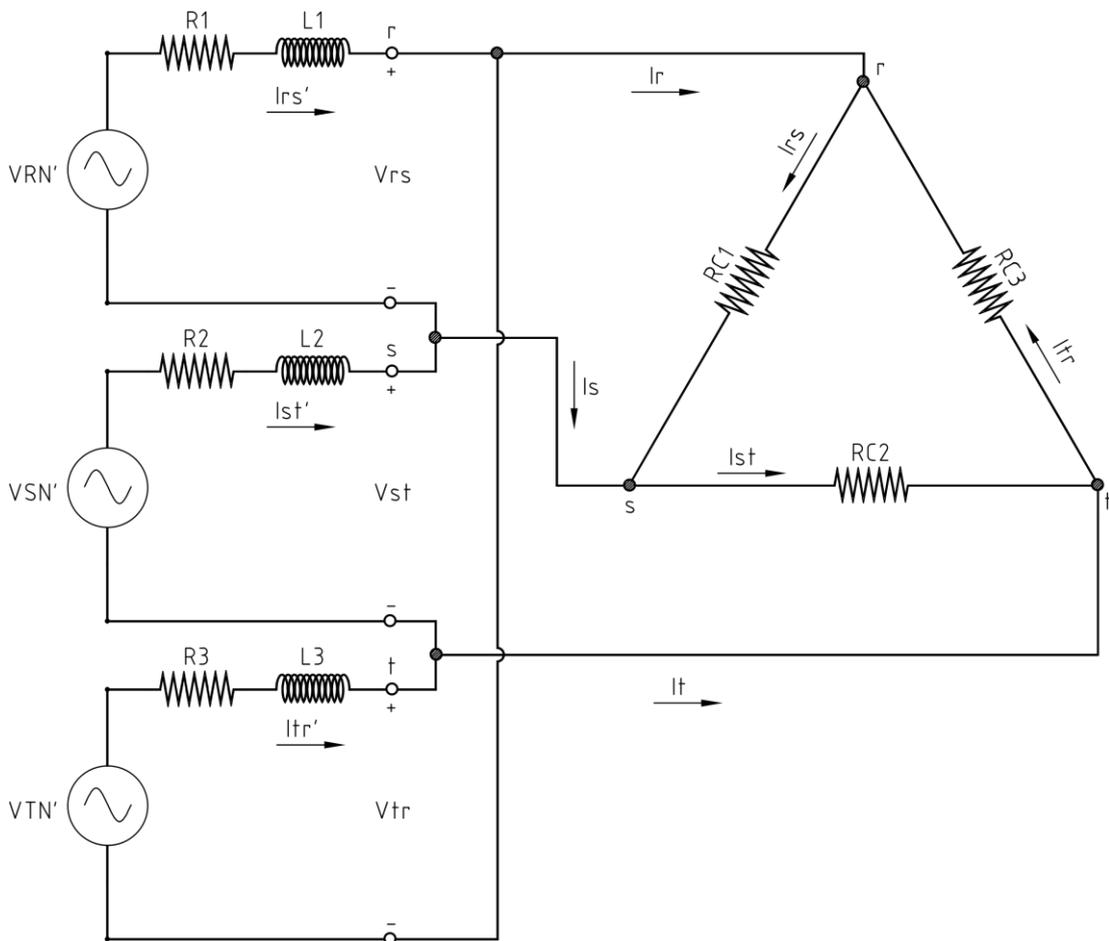


Ilustración 61: Análisis del sistema trifásico Y- D con carga resistiva

Fuente: Los autores

Se procede a plantear las ecuaciones de corriente desde el lado de la carga, con la finalidad de llegar hasta el ramal serie de cada transformador.

$$I_r = I_{rs} - I_{tr}$$

*Ecuación 24: Corriente de línea R en función de las corrientes de fase de la carga.*

**Fuente: Los autores**

$$I_s = I_{st} - I_{rs}$$

*Ecuación 25: Corriente de línea S en función de las corrientes de fase de la carga*

**Fuente: Los autores**

$$I_t = I_{tr} - I_{st}$$

*Ecuación 26: Corriente de línea T en función de las corrientes de fase de la carga*

**Fuente: Los autores**

$$I_r = I_{rs}' - I_{tr}'$$

*Ecuación 27: Corriente de línea R en función de las corrientes de fase del transformador*

**Fuente: Los autores**

$$I_s = I_{st}' - I_{rs}'$$

*Ecuación 28: Corriente de línea S en función de las corrientes de fase del transformador*

**Fuente: Los autores**

$$I_t = I_{tr}' - I_{st}'$$

*Ecuación 29: Corriente de línea T en función de las corrientes de fase del transformador*

**Fuente: Los autores**

Al igualar la corriente de línea en función de la carga y la corriente de línea en función de las corrientes de fase del transformador, resulta que:

$$I_{rs} - I_{tr} = I_{rs}' - I_{tr}'$$

*Ecuación 30: Corriente de línea  $I_r$*

**Fuente: Los autores**

$$I_{st} - I_{rs} = I_{st}' - I_{rs}'$$

*Ecuación 31: Corriente de línea  $I_s$*

**Fuente: Los autores**

$$I_{tr} - I_{st} = I_{tr}' - I_{st}'$$

*Ecuación 32: Corriente de línea  $I_t$*

**Fuente: Los autores**

Finalmente, se puede concluir que las corrientes de fase del lado del transformador son iguales a las corrientes de fase del lado de la carga.

Las corrientes de fase que circulan por las resistencias de carga, vistas monofásicamente, quedarían de la siguiente manera:

$$I_{rs} = \frac{V_{rs}}{R_{C1}}$$

*Ecuación 33: Corriente  $I_{rs}$  en función de la resistencia de carga*

Fuente: Los autores

$$I_{st} = \frac{V_{st}}{R_{C2}}$$

*Ecuación 34: Corriente  $I_{st}$  en función de la resistencia de carga*

Fuente: Los autores

$$I_{tr} = \frac{V_{tr}}{R_{C3}}$$

*Ecuación 35: Corriente  $I_{tr}$  en función de la resistencia de carga*

Fuente: Los autores

Por tanto, las corrientes secundarias en cada transformador serían las siguientes:

$$I_{rs}' = \frac{V_{rs}}{R_{C1}}$$

*Ecuación 36: Corriente del secundario del transformador T1*

Fuente: Los autores

$$I_{st}' = \frac{V_{st}}{R_{C2}}$$

*Ecuación 37: Corriente del secundario del transformador T2*

Fuente: Los autores

$$I_{tr}' = \frac{V_{tr}}{R_{C3}}$$

*Ecuación 38: Corriente del secundario del transformador T3*

Fuente: Los autores

Las ecuaciones que definen el comportamiento de la caída de voltaje en el secundario de cada transformador son:

$$V_{rs} = V_{RN}' - R_1 I_{rs}' - L_1 \frac{dI_{rs}'}{dt}$$

*Ecuación 39: Voltaje secundario en las fases RS (Transformador T1)*

Fuente: Los autores.

$$V_{st} = V_{SN}' - R_2 I_{st}' - L_2 \frac{dI_{st}'}{dt}$$

*Ecuación 40: Voltaje secundario en las fases ST (Transformador T2)*

Fuente: Los autores.

$$V_{tr} = V_{TN}' - R_3 I_{tr}' - L_3 \frac{dI_{tr}'}{dt}$$

*Ecuación 41: Voltaje secundario en las fases TR (Transformador T3)*

Fuente: Los autores.

#### **4.1.4.2. Análisis con carga inductiva**

Al analizar el sistema trifásico en conexión Y - D se utilizará el circuito equivalente del análisis en vacío, considerando todo desde el secundario, agregándole una carga trifásica inductiva conectada en D.

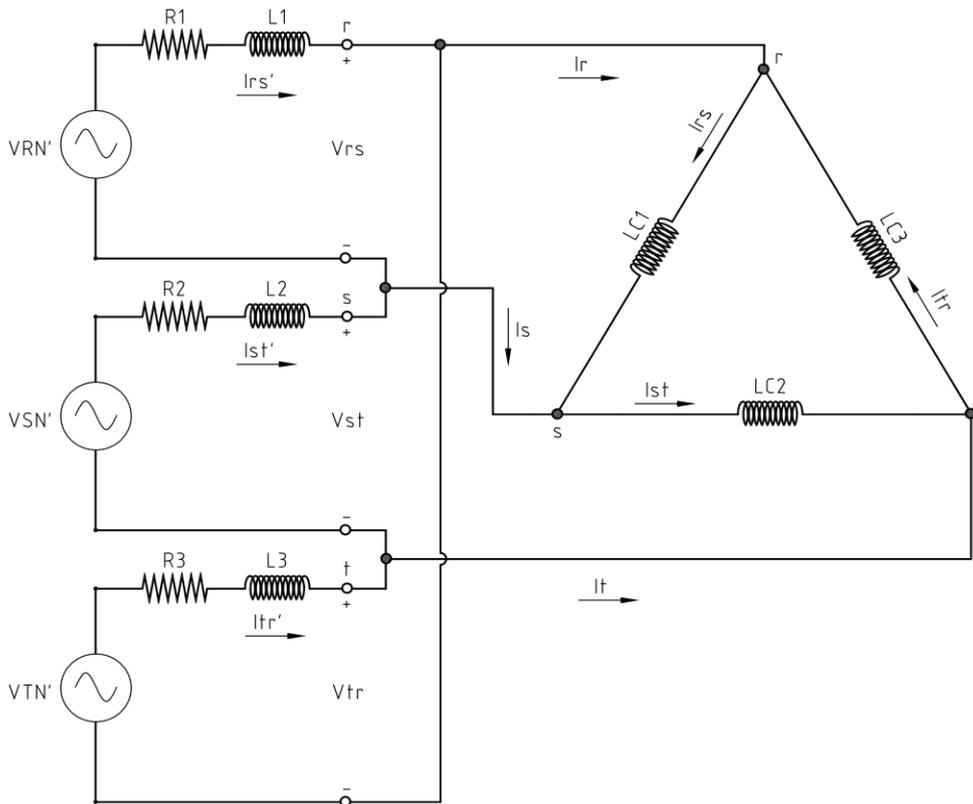


Ilustración 62: Análisis del sistema trifásico Y- D con carga inductiva.

Fuente: Los autores.

Las corrientes de fase que circulan por la carga inductiva, vistas monofásicamente, quedarían de la siguiente manera:

$$I_{rs} = \int \frac{V_{rs}}{L_{C1}} dt$$

Ecuación 42: Corriente  $I_{rs}$  en función de la carga inductiva

Fuente: Los autores

$$I_{st} = \int \frac{V_{st}}{L_{C2}} dt$$

Ecuación 43: Corriente  $I_{st}$  en función de la carga inductiva

Fuente: Los autores

$$I_{tr} = \int \frac{V_{tr}}{L_{C3}} dt$$

Ecuación 44: Corriente  $I_{tr}$  en función de la carga inductiva

Fuente: Los autores

Las ecuaciones que definen el comportamiento de la caída de voltaje en el secundario de cada transformador con carga inductiva son las mismas descritas en las ecuaciones 39, 40 y 41.

#### 4.1.4.3. Análisis con carga resistiva – inductiva.

Al analizar el sistema trifásico en conexión Y- D se utilizará el circuito equivalente del análisis en vacío, considerando todo desde el secundario, agregándole una carga trifásica resistiva - inductiva conectada en D.

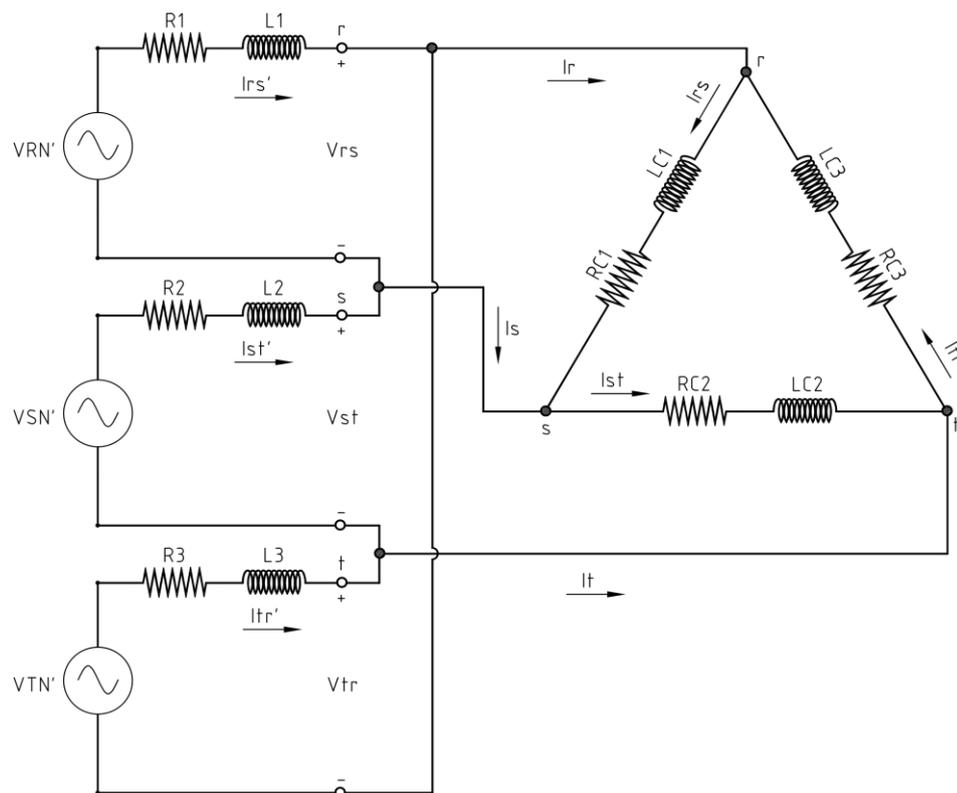


Ilustración 63: Análisis del sistema trifásico Y- D con carga resistiva-inductiva

Fuente: Los autores.

Al analizar el lazo que se forma en el lado de la carga, se puede describir el voltaje secundario en los terminales de la carga para poder encontrar la corriente circulante a través de la misma.

$$V_{rs} = I_{rs}R_{C1} + L_{C1} \frac{dI_{rs}}{dt}$$

Ecuación 45: Voltaje secundario RS en los terminales de la carga

Fuente: Los autores

Despejando, obtenemos la corriente que circula a través de la carga en las fases RS.

$$I_{rs} = \int \frac{V_{rs} - I_{rs}R_{C1}}{L_{C1}} dt$$

*Ecuación 46: Corriente  $I_{rs}$  en función de la carga resistiva - inductiva*

Fuente: Los autores

$$V_{st} = I_{st}R_{C2} + L_{C2} \frac{dI_{st}}{dt}$$

*Ecuación 47: Voltaje secundario ST en los terminales de la carga*

Fuente: Los autores

Despejando, obtenemos la corriente que circula a través de la carga en las fases ST.

$$I_{st} = \int \frac{V_{st} - I_{st}R_{C2}}{L_{C2}} dt$$

*Ecuación 48: Corriente  $I_{st}$  en función de la carga resistiva - inductiva*

Fuente: Los autores

$$V_{tr} = I_{tr}R_{C3} + L_{C3} \frac{dI_{tr}}{dt}$$

*Ecuación 49: Voltaje secundario TR en los terminales de la carga*

Fuente: Los autores

Despejando, obtenemos la corriente que circula a través de la carga en las fases ST.

$$I_{tr} = \int \frac{V_{tr} - I_{tr}R_{C3}}{L_{C3}} dt$$

*Ecuación 50: Corriente  $I_{tr}$  en función de la carga resistiva - inductiva*

Fuente: Los autores

## 4.2. Validación del modelo matemático.

### 4.2.1. Simulación

Para la simulación del sistema trifásico que se analizará con los diferentes tipos de cargas en este trabajo se ha utilizado la herramienta Matlab<sup>®</sup>. Empleando el código de programación propio del programa se han podido integrar datos externos obtenidos de manera experimental propios de las pruebas que se detallarán posteriormente; y con el uso de la programación gráfica de Simulink<sup>®</sup> se han introducido las ecuaciones del modelado matemático para la observación de los resultados.

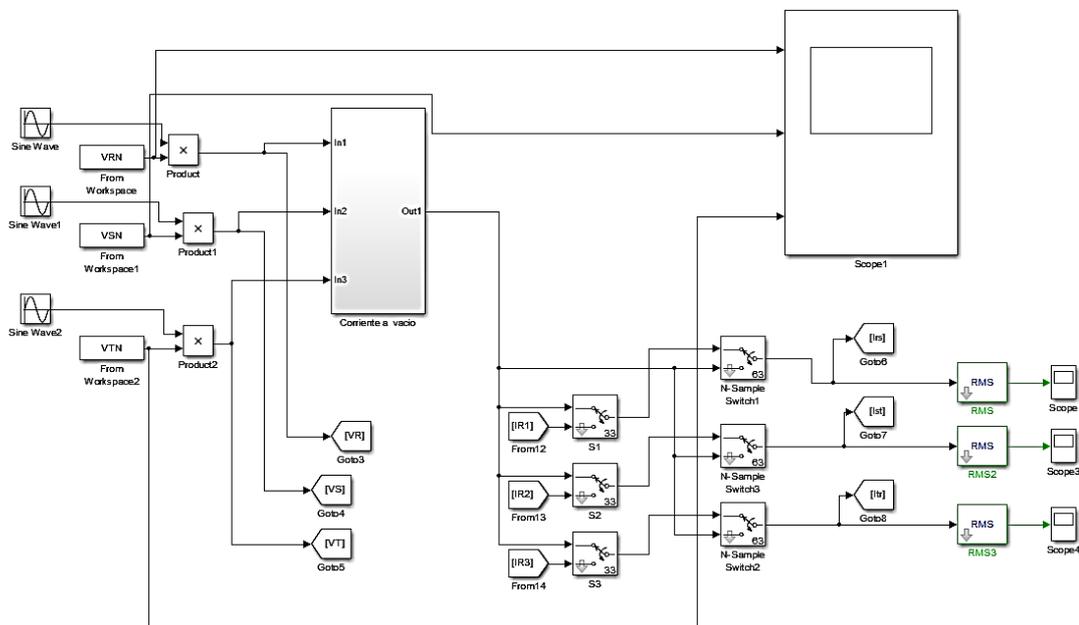


Ilustración 64: Bloques en Simulink<sup>®</sup>

Fuente: Los autores

Para poder introducir los datos reales como elementos de entrada para el voltaje de la fuente trifásica en las ecuaciones del modelado se hicieron uso de scripts en los que se describe las funciones de lectura para los ficheros obtenidos desde el módulo de adquisición de datos, en la ilustración 65 se muestra el código utilizado para poder leer los datos de los ficheros, declararlos como arreglos bidimensionales que serán enlazados a las ecuaciones de Simulink<sup>®</sup> con el bloque “From workspace” (Ilustración 66).

```

LOAD_R.m x
1 - V1 = xlsread('REAL','A2:A95');
2 - V1T = transpose(V1);
3 - VRN = double([(0:93)',V1T]);
4
5 - V2 = xlsread('REAL','B2:B95');
6 - V2T = transpose(V2);
7 - VSN = double([(0:93)',V2T]);
8
9 - V3 = xlsread('REAL','C2:C95');
10 - V3T = transpose(V3);
11 - VTN = double([(0:93)',V3T]);
12
13 - Vrs = xlsread('REAL','E2:E95');
14 - Vst = xlsread('REAL','F2:F95');
15 - Vtr = xlsread('REAL','G2:G95');
16
17 - Irs = xlsread('REAL','H2:H95');
18 - Ist = xlsread('REAL','I2:I95');
19 - Itr = xlsread('REAL','J2:J95');

```

Ilustración 65: Script de Matlab®

Fuente: Los autores.

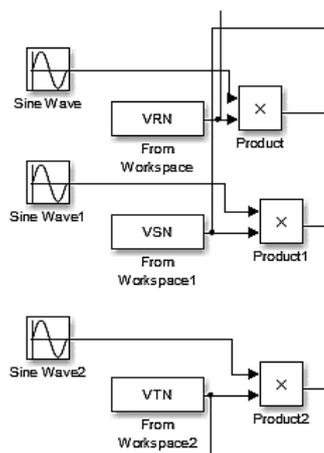


Ilustración 66: Bloques "From workspace" de Simulink®.

Fuente: Los autores.

#### 4.2.2. Prueba experimental con carga resistiva

Las pruebas experimentales se realizaron en el Laboratorio de Transformadores de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, se ha empleado un módulo de transformadores que consta de transformadores monofásicos de 1000 VA a un nivel de tensión de 120V/240V por devanado, bancos de resistencia variable, analizadores de red marca Schneider PM5100, módulo de adquisición de datos con PLC y una aplicación HMI para obtener datos del sistema eléctrico que se va a analizar.

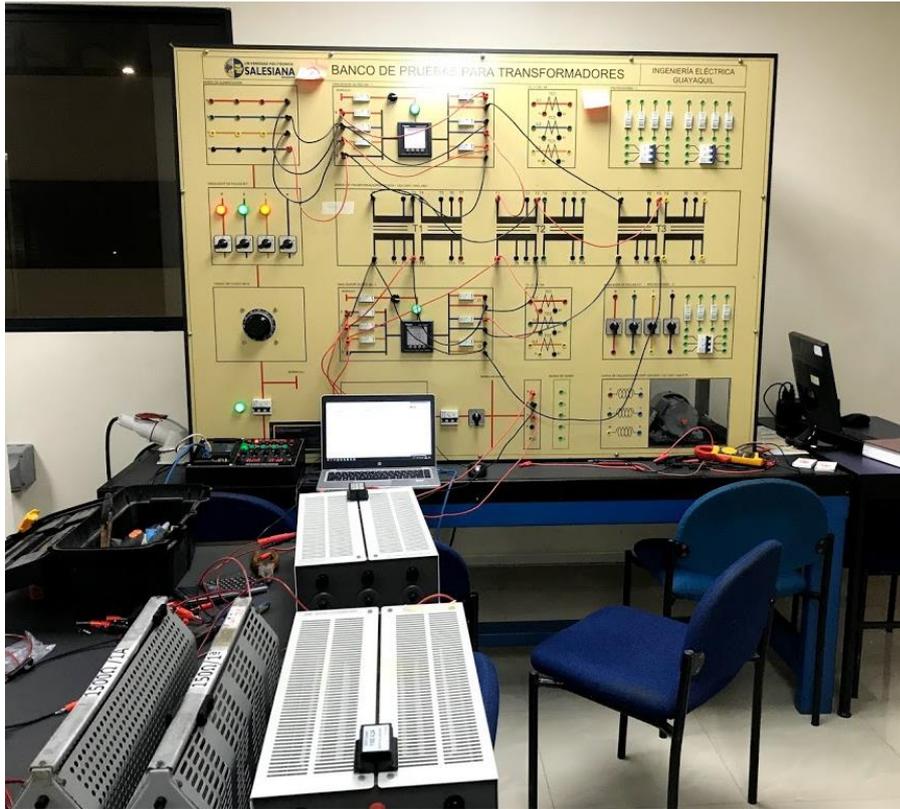


Ilustración 67: Banco de pruebas para transformadores con carga resistiva conectada.

Fuente: Universidad Politécnica Salesiana.

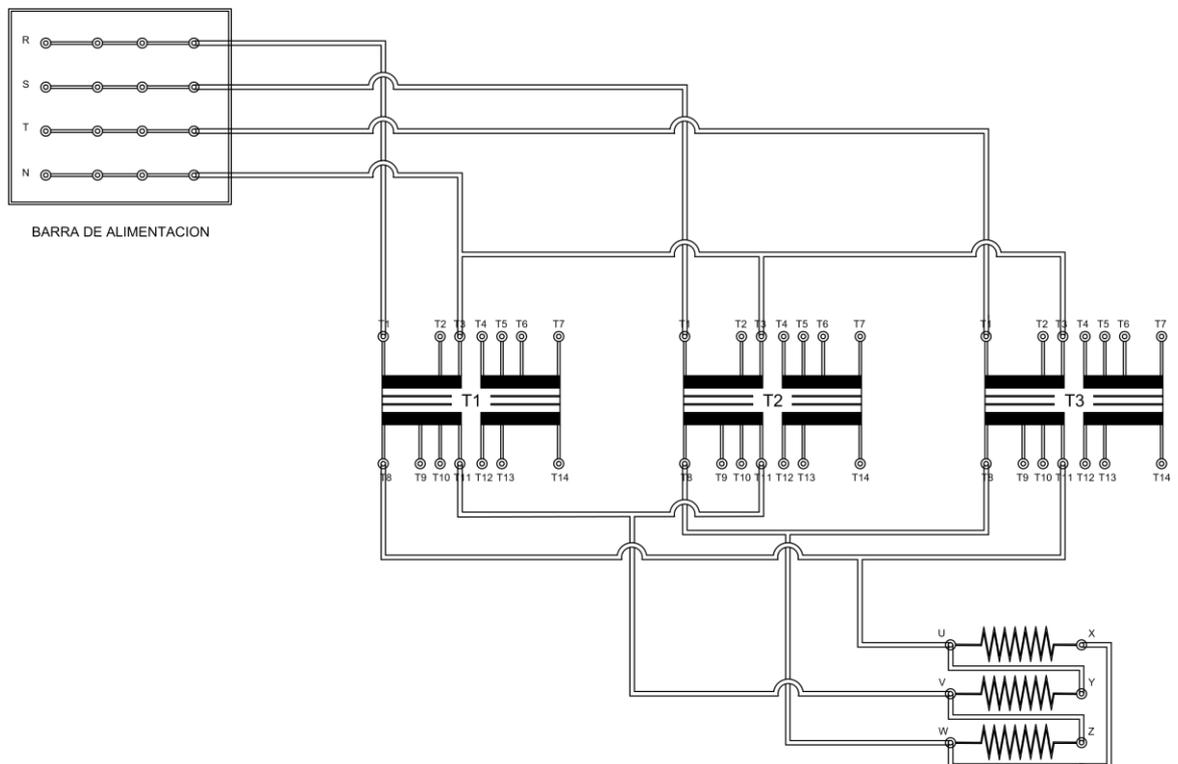


Ilustración 68: Diagrama de conexiones de la prueba experimental con carga resistiva.

Fuente: Los autores.

Por medio de una aplicación HMI de WinCC® se logran adquirir los datos de los analizadores de red en tiempo real y se los almacena en ficheros para poder comparar estos resultados posteriormente.

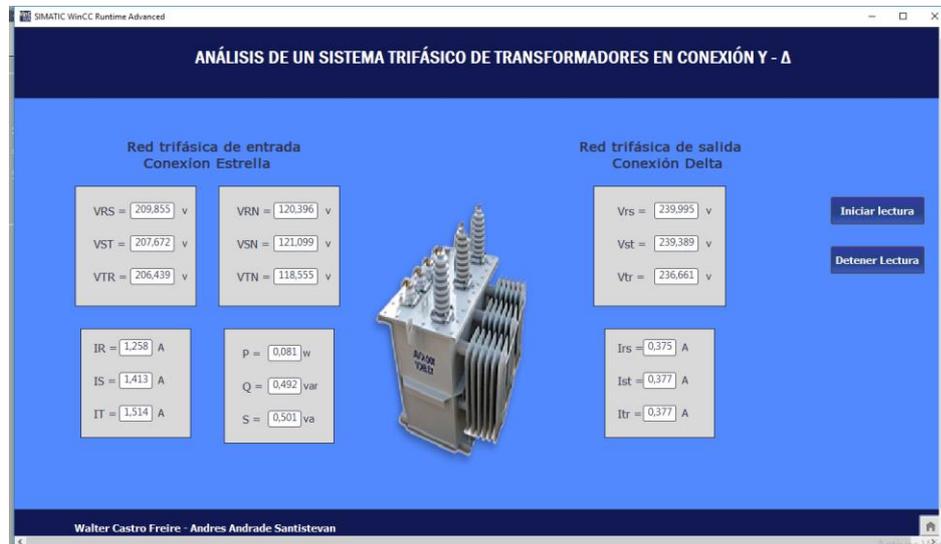


Ilustración 69: Aplicación HMI del sistema trifásico con carga resistiva.

Fuente: Los autores.

Posteriormente a que se adquirieron los datos necesarios para la modelación, se procede a ingresarlos en el software Matlab® y Simulink®, para realizar la simulación, generar las curvas que serán comparadas con las experimentales.

#### 4.2.2.1. Comparación de resultados con carga resistiva.

La adquisición de datos del inciso anterior permitió evaluar el sistema en 2 condiciones las cuales están descritas en 3 períodos de tiempo, estos son:

- Primer período: Sistema trifásico de transformadores a vacío.
- Segundo período: Sistema trifásico de transformadores con carga resistiva
- Tercer período: Sistema trifásico de transformadores a vacío.

Estos estados de operación se pueden apreciar en las gráficas de la curvas generadas por Matlab®, para la comparación de las mismas. En la ilustración 70 se describe la

corriente de fase en el secundario del sistema trifásico de transformadores, por medio de la curva real de  $I_{rs}$  (en color rojo) y la curva simulada de la misma  $I_{rs}$  (en color azul). En las ilustraciones 71 y 72 se describen del mismo modo las corrientes secundarias de las fases restantes.

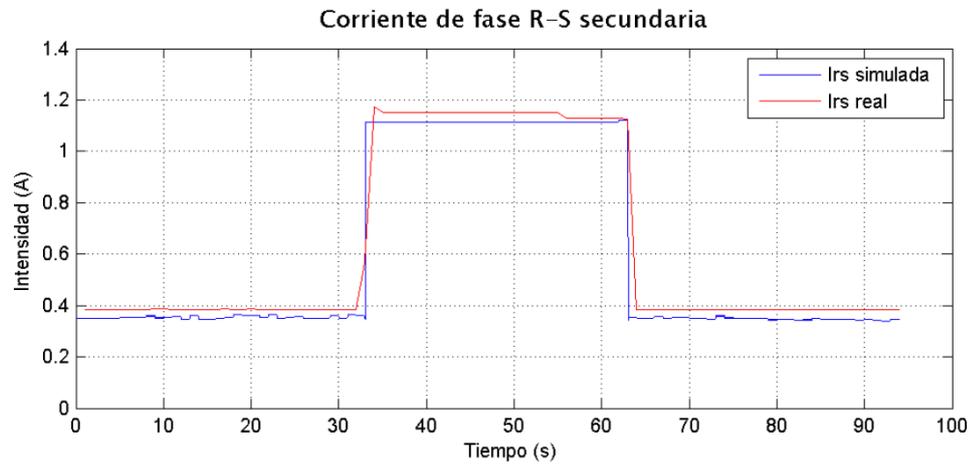


Ilustración 70: Curvas de corriente  $I_{rs}$  con carga resistiva real y simulada.

Fuente: Los autores.

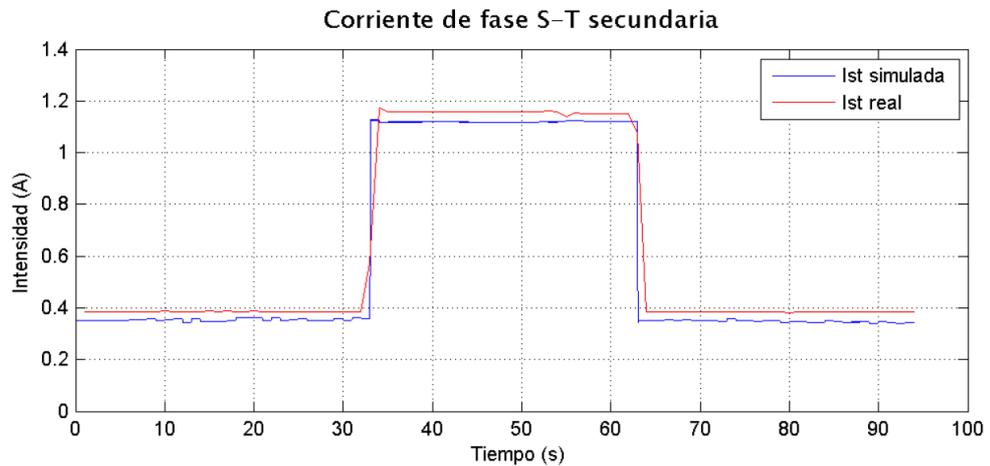


Ilustración 71: Curvas de corriente  $I_{st}$  con carga resistiva real y simulada.

Fuente: Los autores.

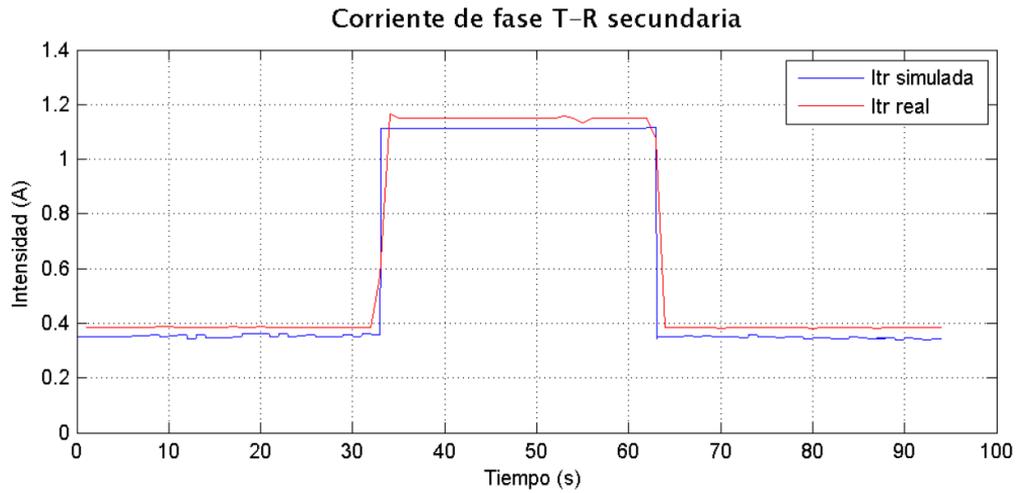


Ilustración 72: Curvas de corriente  $I_{tr}$  con carga resistiva real y simulada

Fuente: Los autores.

Se puede observar en los estados de operación cómo se comporta la corriente mientras esté el sistema a vacío y cuando se introduce una carga resistiva, del mismo modo, con el voltaje secundario del sistema trifásico de transformadores se podrá observar su desempeño en estado de vacío y con carga.

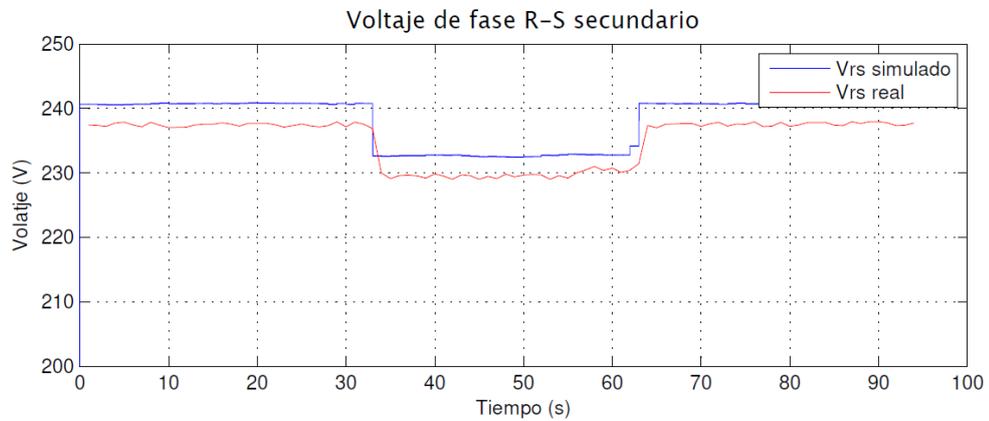


Ilustración 73: Curvas de voltaje secundario  $V_{rs}$  con carga resistiva real y simulado.

Fuente: Los autores.

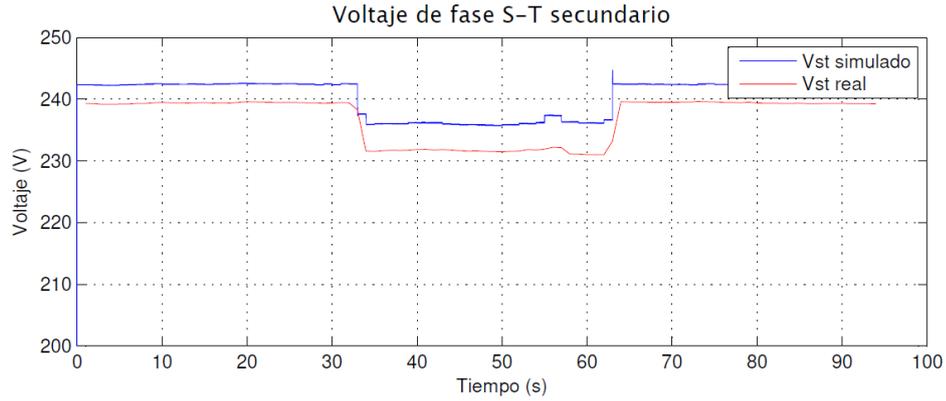


Ilustración 74: Curvas de voltaje secundario  $V_{st}$  con carga resistiva real y simulado.

Fuente: Los autores.

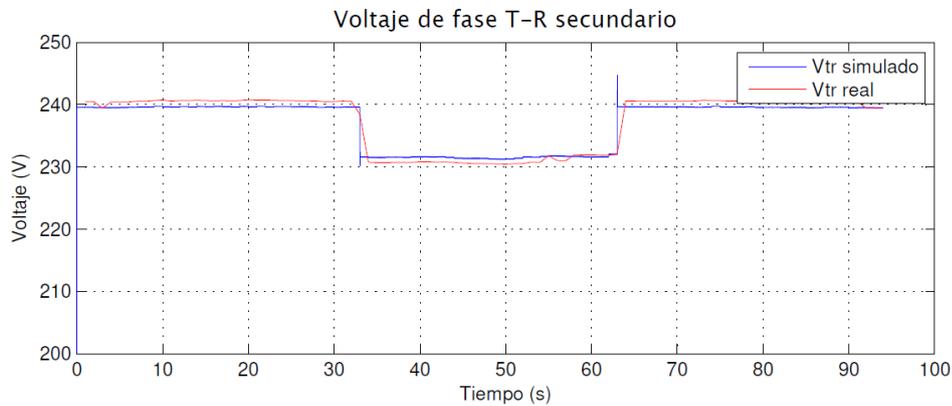


Ilustración 75: Curvas de voltaje secundario  $V_{tr}$  con carga resistiva real y simulado.

Fuente: Los autores.

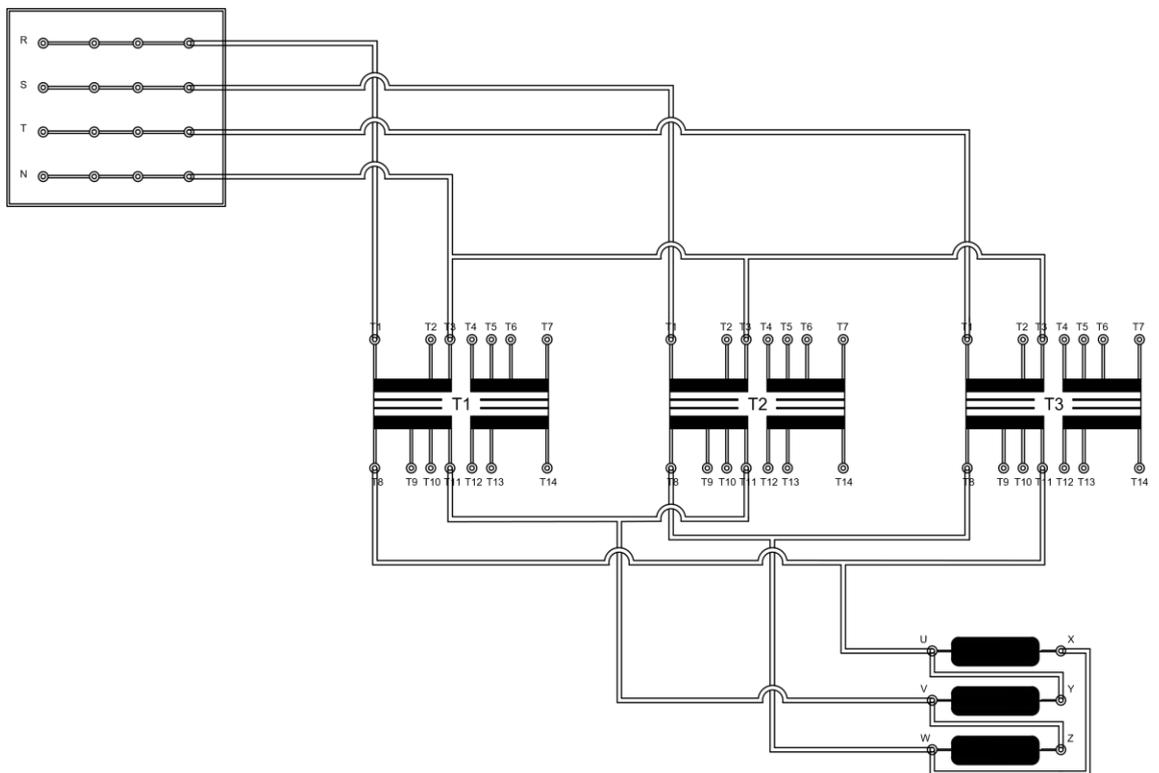
#### 4.2.3. Prueba experimental con carga inductiva.

Para esta prueba se utilizó el mismo banco de pruebas de transformadores en el cual se implementó la conexión Y – D, como carga se utilizó un motor de inducción trifásico, los analizadores de red PM5100 para la medición de los parámetros eléctricos de entrada y salida, y el módulo de adquisición de datos.



*Ilustración 76: Prueba experimental con carga inductiva.*

Fuente: Universidad Politécnica Salesiana



*Ilustración 77: Diagrama de conexiones de la prueba experimental con carga inductiva.*

Fuente: Los autores.

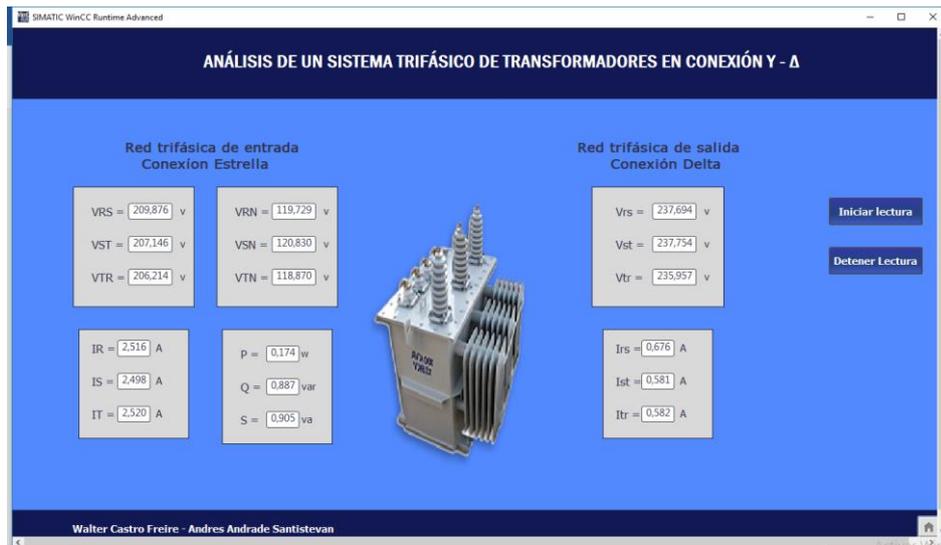


Ilustración 78: Aplicación HMI del sistema trifásico con carga inductiva.

Fuente: Los autores.

#### 4.2.3.1. Comparación de resultados con carga inductiva.

La adquisición de datos de la prueba con carga inductiva permitió evaluar el sistema también en 2 condiciones las cuales están descritas en 3 períodos de tiempo, estos son:

- Primer período: Sistema trifásico de transformadores a vacío.
- Segundo período: Sistema trifásico de transformadores con carga inductiva.
- Tercer período: Sistema trifásico de transformadores a vacío.

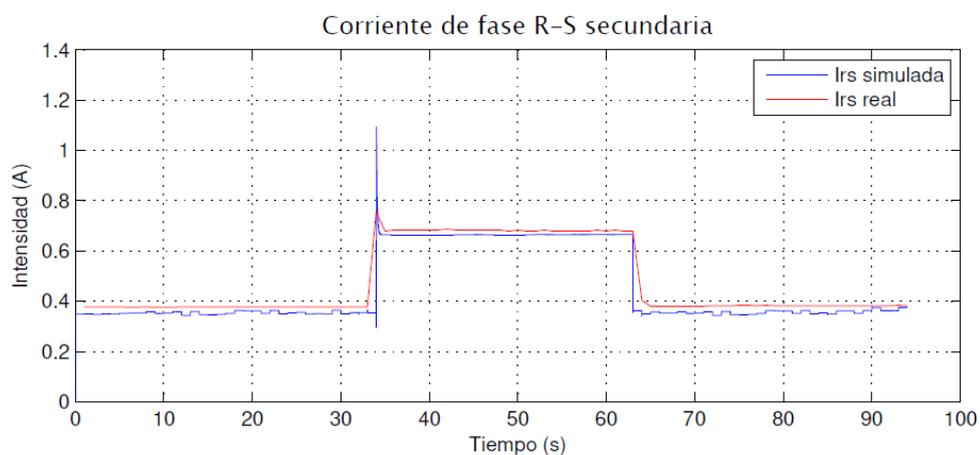


Ilustración 79: Curvas de corriente secundaria  $I_{rs}$  con carga inductiva real y simulada

Fuente: Los autores.

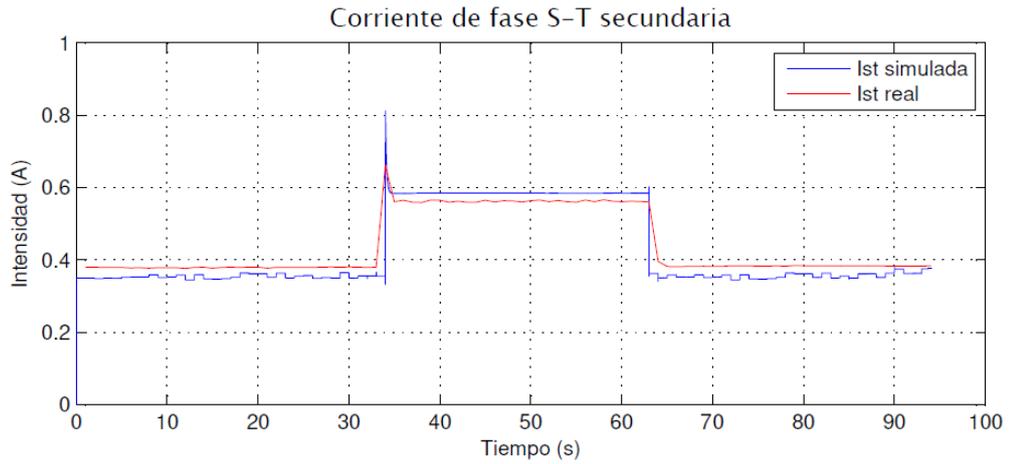


Ilustración 80: Curvas de corriente secundaria  $I_{st}$  con carga inductiva real y simulada

Fuente: Los autores.

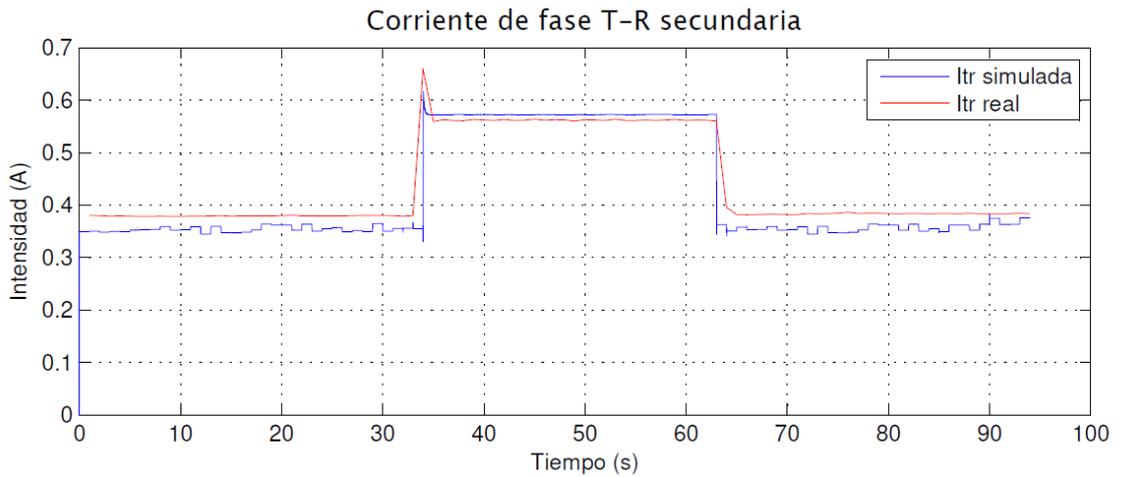


Ilustración 81: Curvas de corriente secundaria  $I_{tr}$  con carga inductiva real y simulada

Fuente: Los autores.

Se puede observar en los estados de operación cómo se comporta la corriente mientras esté el sistema a vacío y cuando se introduce una carga inductiva, del mismo modo, con el voltaje secundario del sistema trifásico de transformadores se podrá observar su desempeño en estado de vacío y con carga.

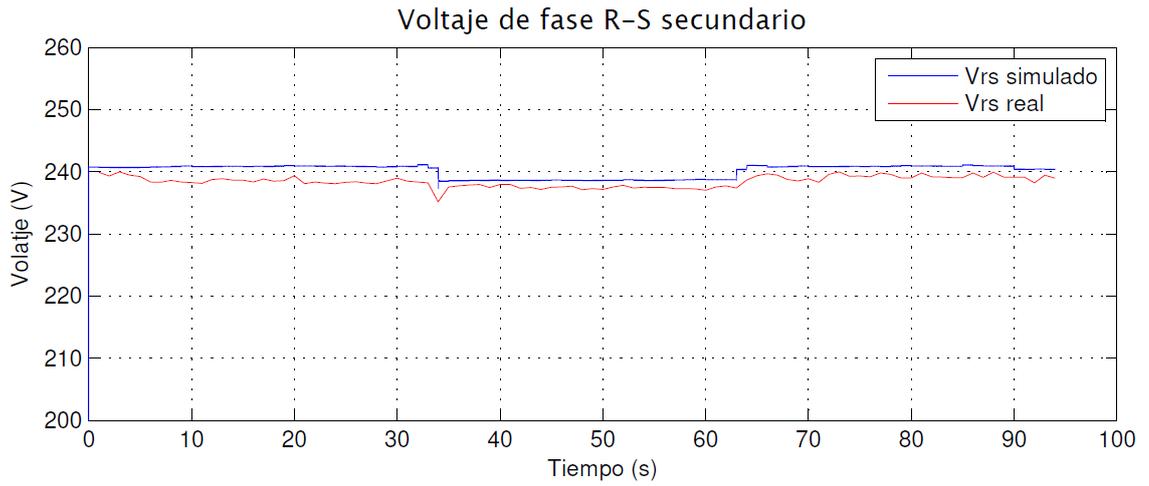


Ilustración 82: Curvas de voltaje secundario  $V_{rs}$  con caga inductiva real y simulado.

Fuente: Los autores.

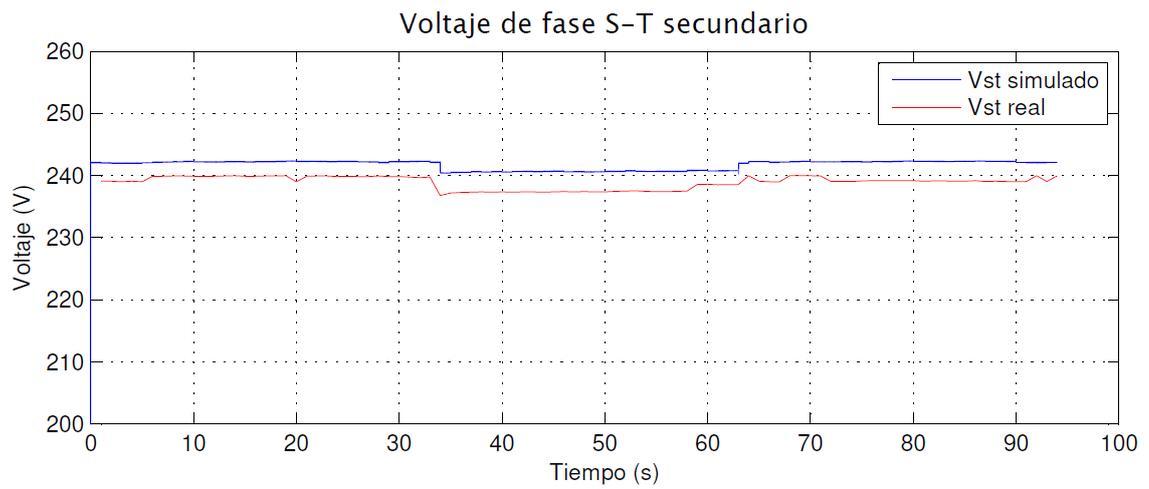


Ilustración 83: Curvas de voltaje secundario  $V_{st}$  con caga inductiva real y simulado.

Fuente: Los autores.

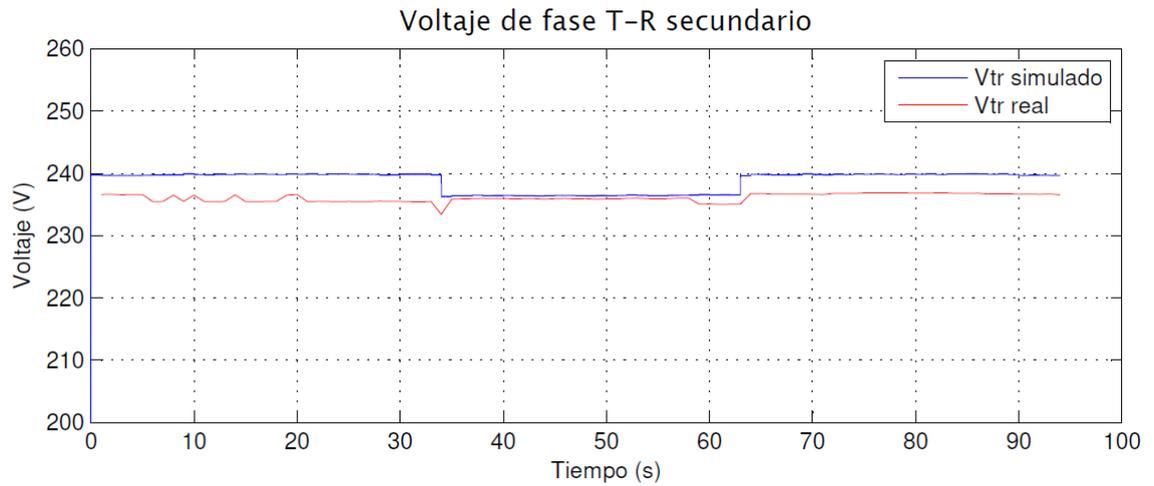


Ilustración 84: Curvas de voltaje secundario  $V_{tr}$  con carga inductiva real y simulado.

Fuente: Los autores.

#### 4.2.4. Prueba experimental con carga resistiva - inductiva.

Para esta prueba se utilizó el mismo banco de pruebas de transformadores en el cual se implementó la conexión Y – D, como carga se utilizó un banco de resistencias en serie a un motor de inducción trifásico, los analizadores de red PM5100 para la medición de los parámetros eléctricos de entrada y salida, y el módulo de adquisición de datos.

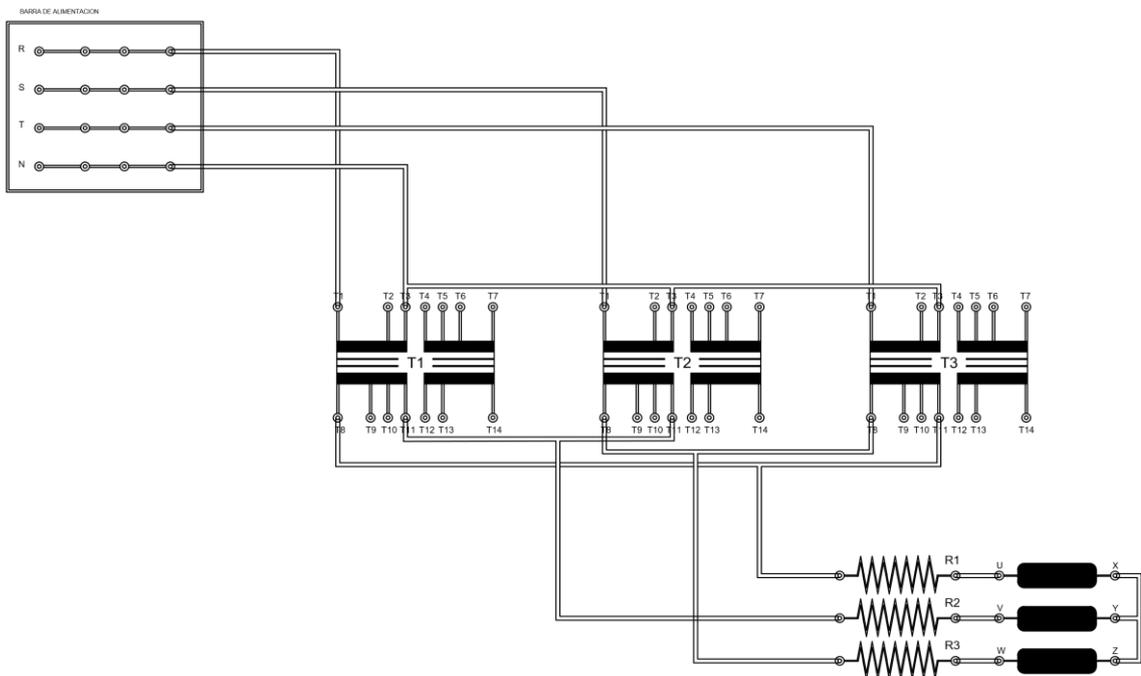


Ilustración 85: Diagrama de conexiones de la prueba experimental con carga resistiva inductiva.

Fuente: Los autores.

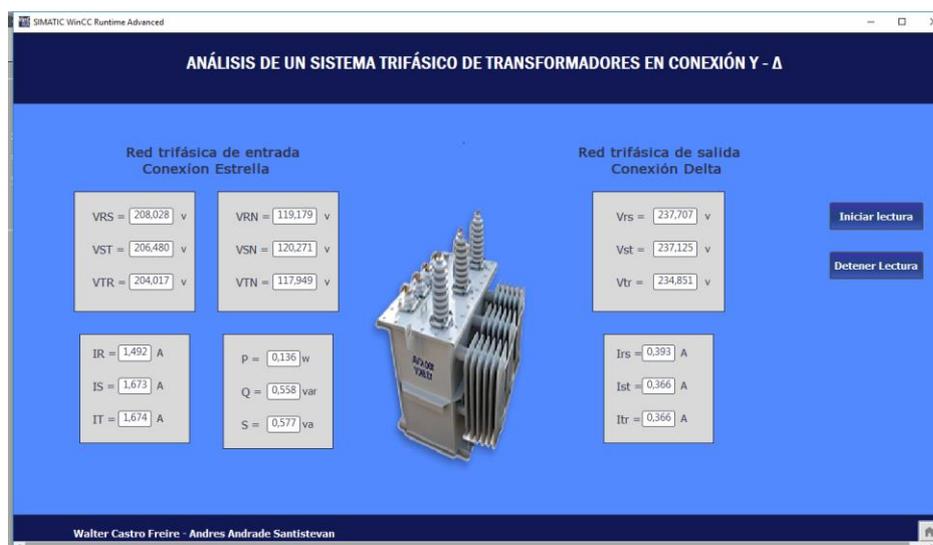


Ilustración 86: Aplicación HMI del sistema trifásico con carga resistiva - inductiva.

Fuente: Los autores.

#### 4.2.4.1. Comparación de resultados con carga resistiva – inductiva.

La adquisición de datos de la prueba con carga inductiva permitió evaluar el sistema también en 2 condiciones las cuales están descritas en 3 períodos de tiempo, estos son:

- Primer período: Sistema trifásico de transformadores a vacío.
- Segundo período: Sistema trifásico de transformadores con carga inductiva.
- Tercer período: Sistema trifásico de transformadores a vacío.

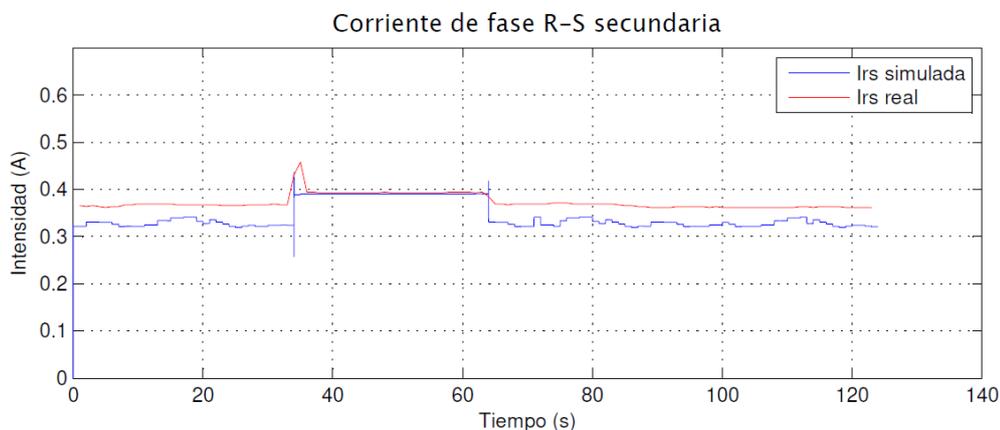


Ilustración 87: Curvas de corriente secundaria  $I_{rs}$  con carga resistiva - inductiva, real y simulada

Fuente: Los autores.

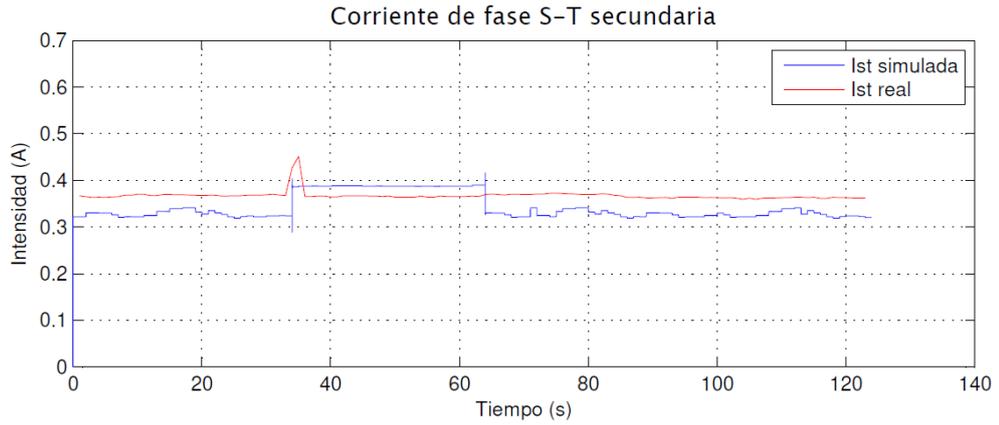


Ilustración 88: Curvas de corriente secundaria  $I_{st}$  con carga resistiva - inductiva real y simulada

Fuente: Los autores.

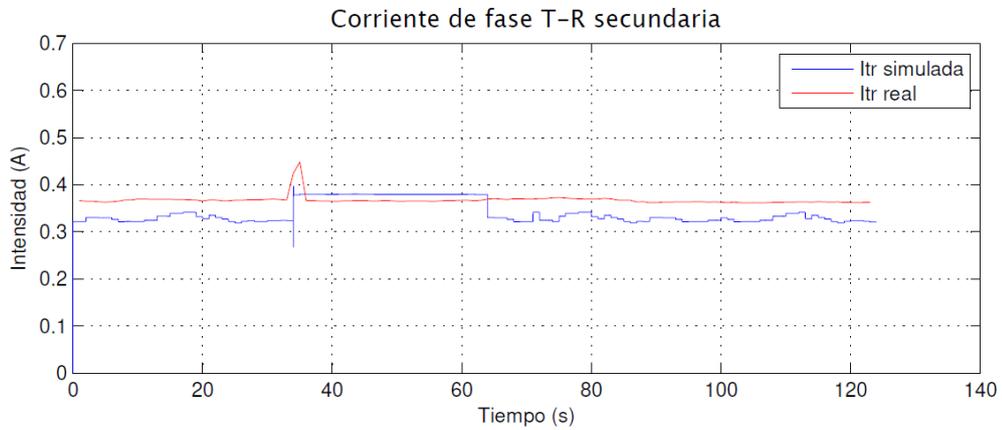


Ilustración 89: Curvas de corriente secundaria  $I_{tr}$  con carga resistiva - inductiva real y simulada

Fuente: Los autores.

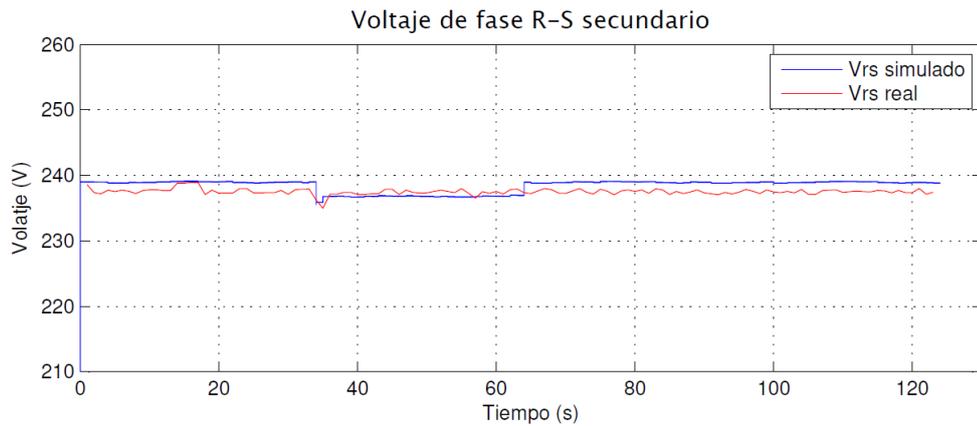


Ilustración 90: Curvas de voltaje secundario  $V_{rs}$  con carga resistiva - inductiva real y simulado.

Fuente: Los autores.

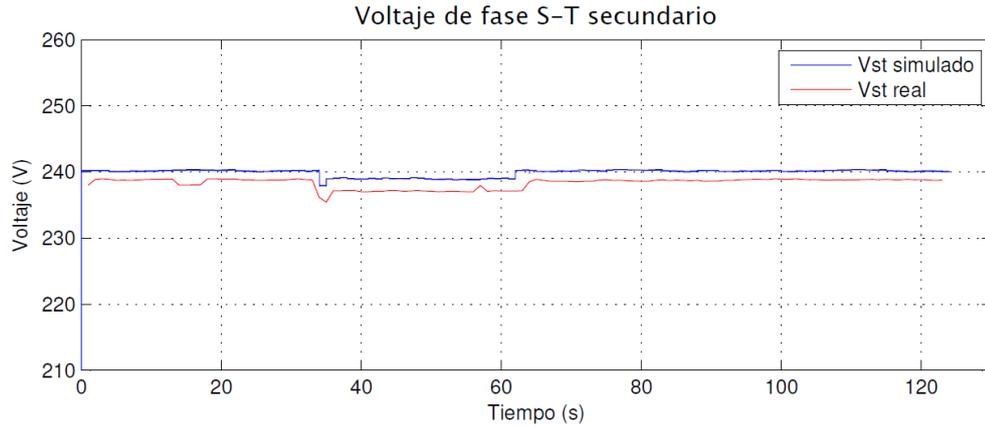


Ilustración 91: Curvas de voltaje secundario  $V_{st}$  con caga resistiva - inductiva real y simulado.

Fuente: Los autores

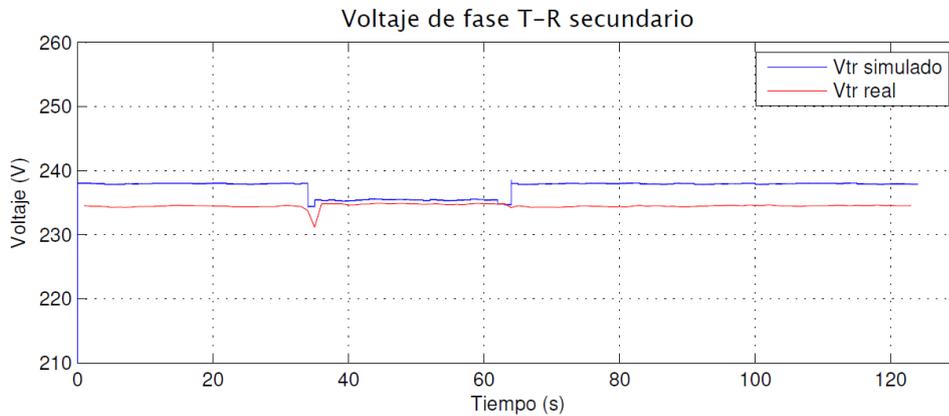


Ilustración 92: Curvas de voltaje secundario  $V_{tr}$  con caga resistiva - inductiva real y simulado.

Fuente: Los autores

#### 4.2.5. Prueba experimental con cargas temporizadas.

Al momento de realizar esta prueba que permitirá observar el comportamiento del sistema trifásico con diferentes cargas en períodos de tiempo, fue necesario emplear un módulo de transformadores que consta de transformadores monofásicos de 1000 VA a un nivel de tensión de 120V/240V por devanado, bancos de resistencia variable, motor de inducción trifásico, un banco de contactores, analizadores de red marca Schneider PM5100, módulo de adquisición de datos con PLC y una aplicación HMI para obtener datos del sistema eléctrico que se va a analizar.

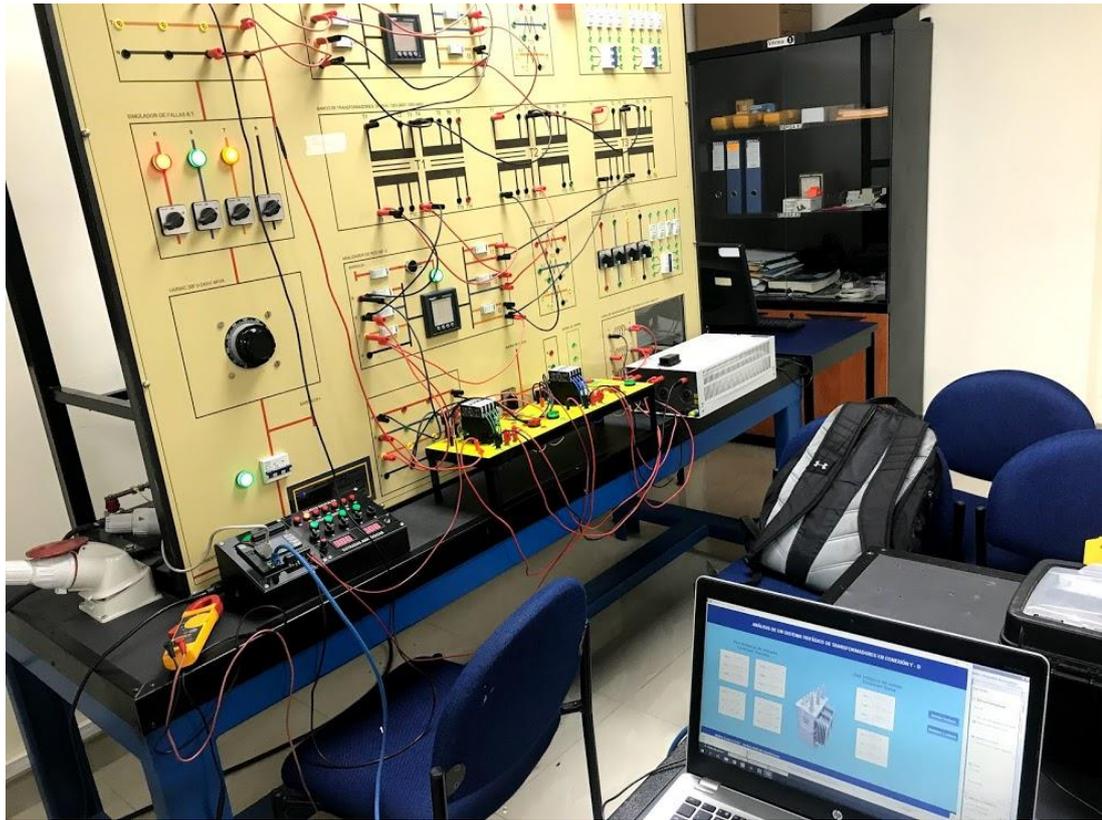


Ilustración 93: Prueba experimental con cargas temporizadas.

Fuente: Universidad Politécnica Salesiana.

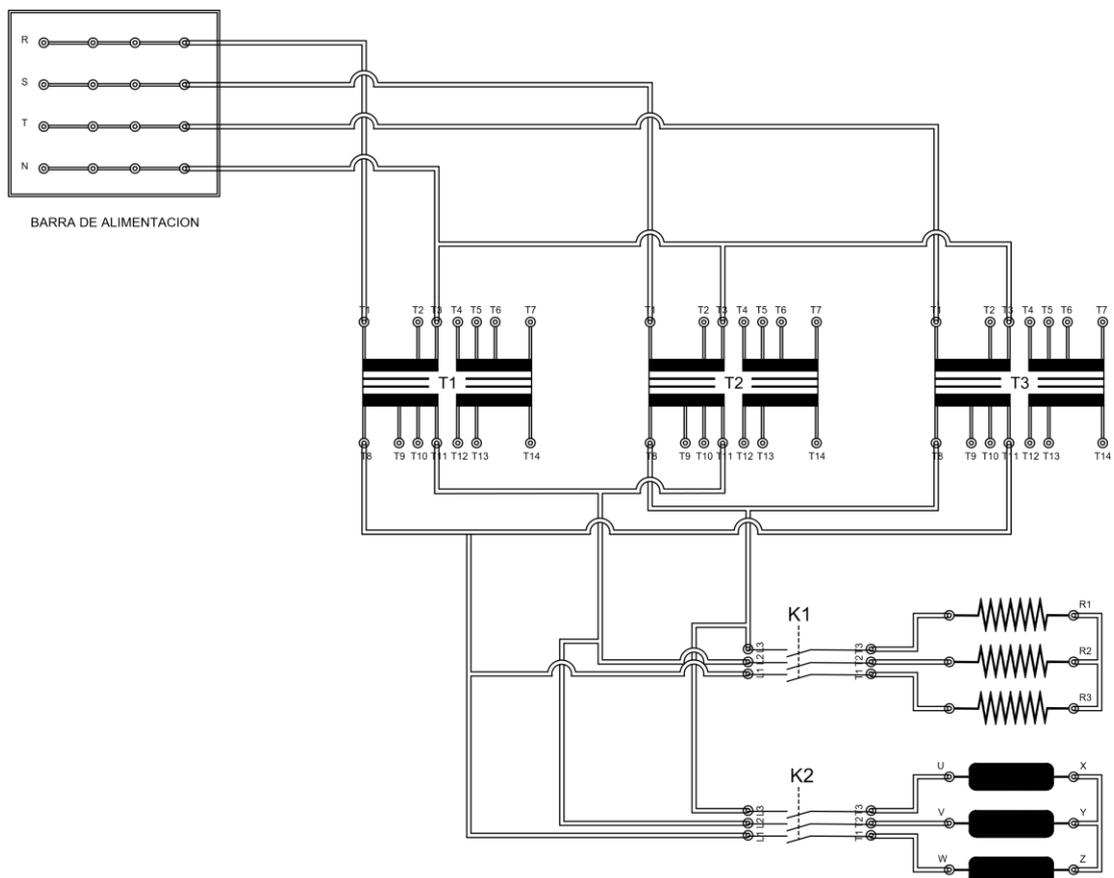


Ilustración 94: Diagrama de conexiones de prueba experimental con cargas temporizadas.

Fuente: Los autores.

Se utilizan 2 contactores, los cuales denominaremos K1 y K2, conectados a la carga resistiva y la carga inductiva respectivamente en el circuito de fuerza, como se muestra en la ilustración 94. Estos contactores estarán controlados directamente por el PLC de nuestro módulo de adquisición de datos, el cual está configurado para activar las salidas %Q0.5 Y %Q0.6 como salidas físicas para la bobina de cada contactor, del mismo modo las salidas %Q0.2 y %Q0.3 muestran el estado en una luz piloto del módulo de adquisición de datos.

Para automatizar el proceso de conexión de cada carga se programó al PLC para habilitar las salidas antes mencionadas, con la siguiente secuencia de operación:

- Estado a vacío (20 segundos).
- Ingreso de carga resistiva (20 segundos)
- Ingreso de carga inductiva (20 segundos)
- Salida de carga resistiva (20 segundos)
- Salida de carga inductiva (20 segundos)
- Estado a vacío (Fin del ciclo)

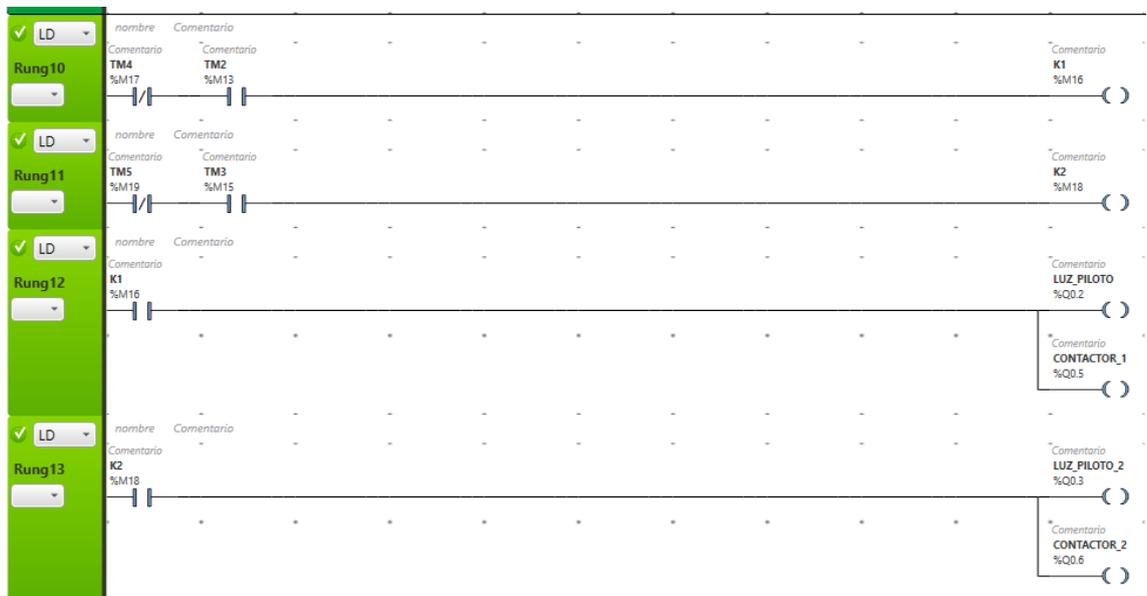


Ilustración 95: Programación del PLC para las salidas físicas.

Fuente: Los autores.

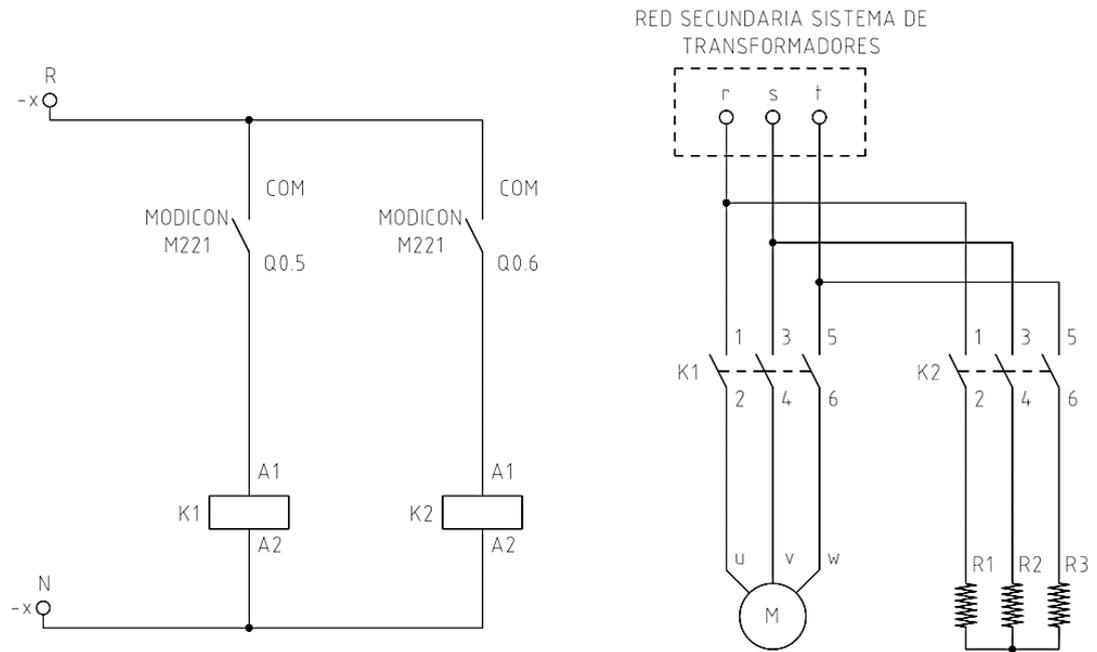
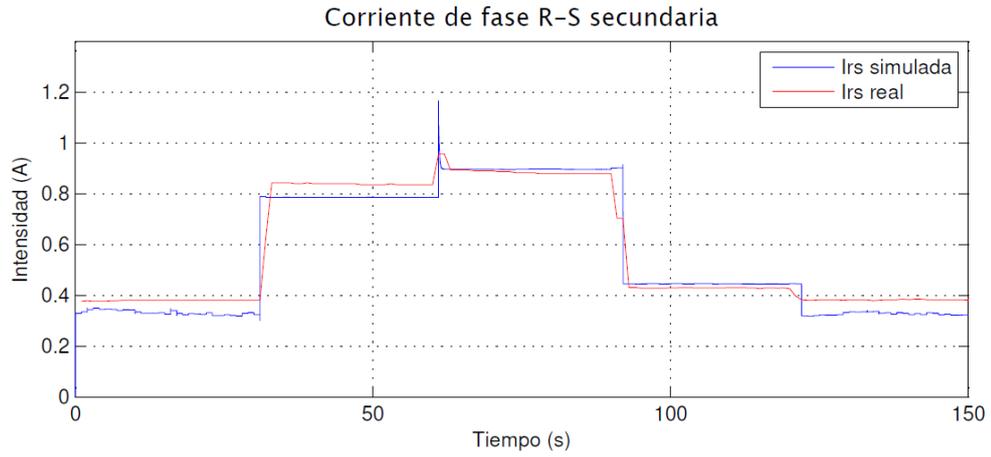


Ilustración 96: Diagrama eléctrico de control y fuerza para la prueba experimental.

Fuente: Los autores.

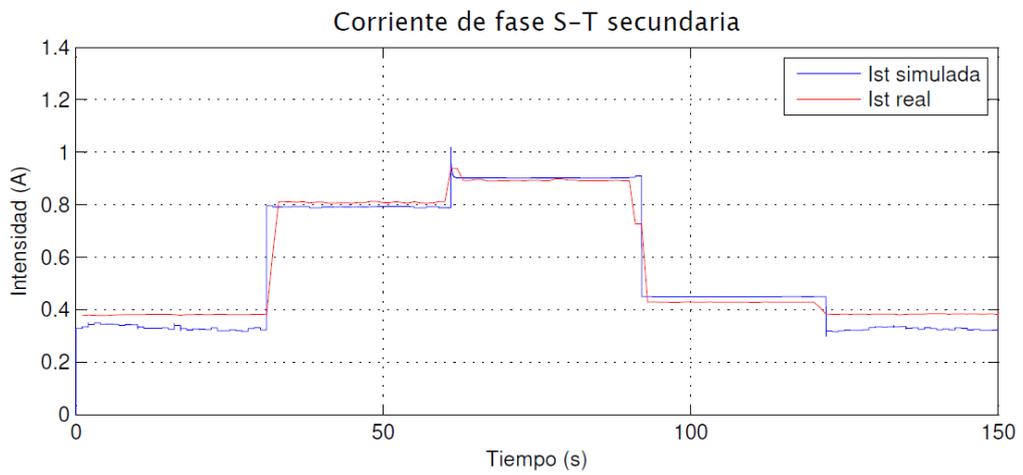
#### 4.2.5.1. Comparación de resultados con cargas temporizadas.

Después de realizar la prueba experimental, se puede analizar los datos adquiridos observando justamente cuando es el momento en el que una carga ingresa y sale del sistema. En este caso se tiene un mayor aporte de corriente por parte de la carga resistiva y es la carga inductiva quien produce un pico de corriente al momento de ingresar al sistema, que es transitorio luego de lo cual entra a un período de estabilidad. Del mismo modo como en las pruebas anteriores, se procede a simular las corrientes y voltajes del secundario en Simulink®.



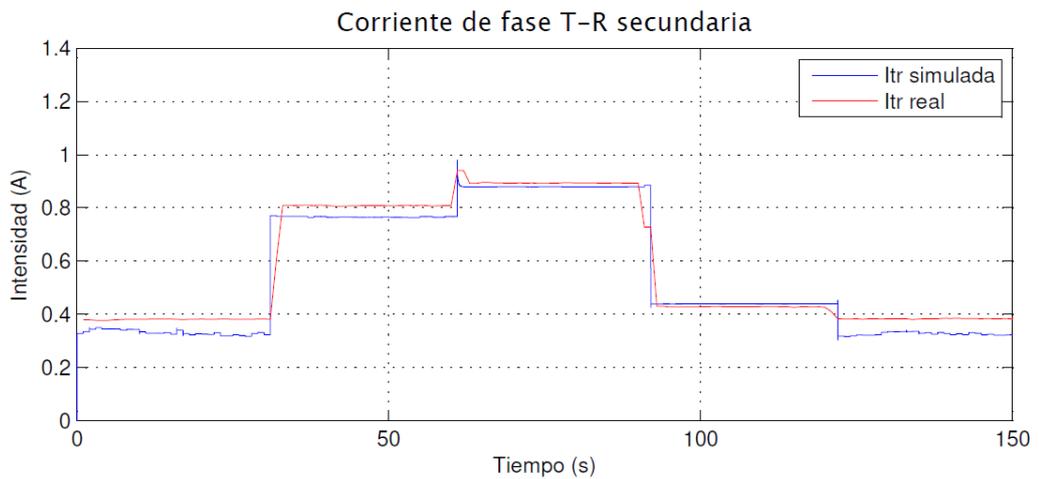
*Ilustración 97: Curvas de corriente secundaria  $I_{rs}$  prueba experimental temporizada real y simulada*

Fuente: Los autores.



*Ilustración 98: Curvas de corriente secundaria  $I_{st}$  prueba experimental temporizada real y simulada*

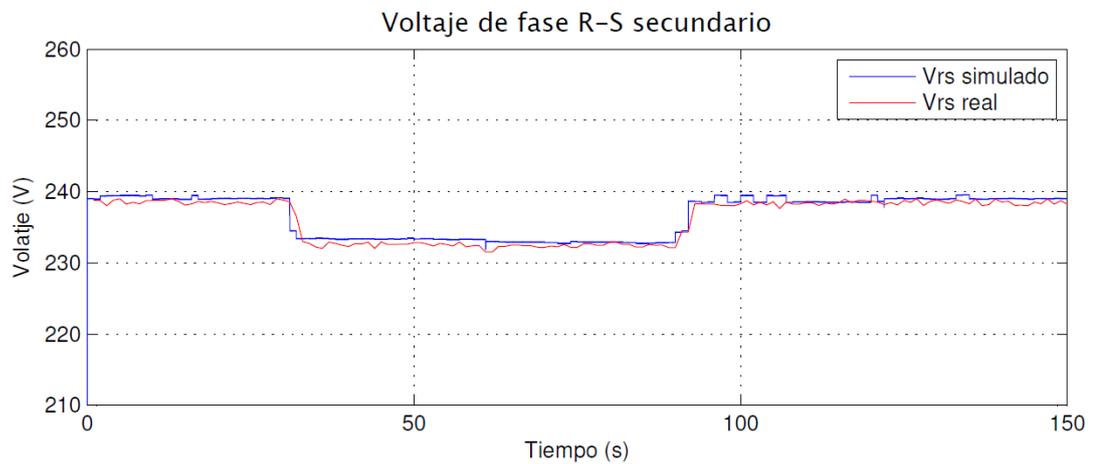
Fuente: Los autores.



*Ilustración 99: Curvas de corriente secundaria  $I_{tr}$  prueba experimental temporizada real y simulada*

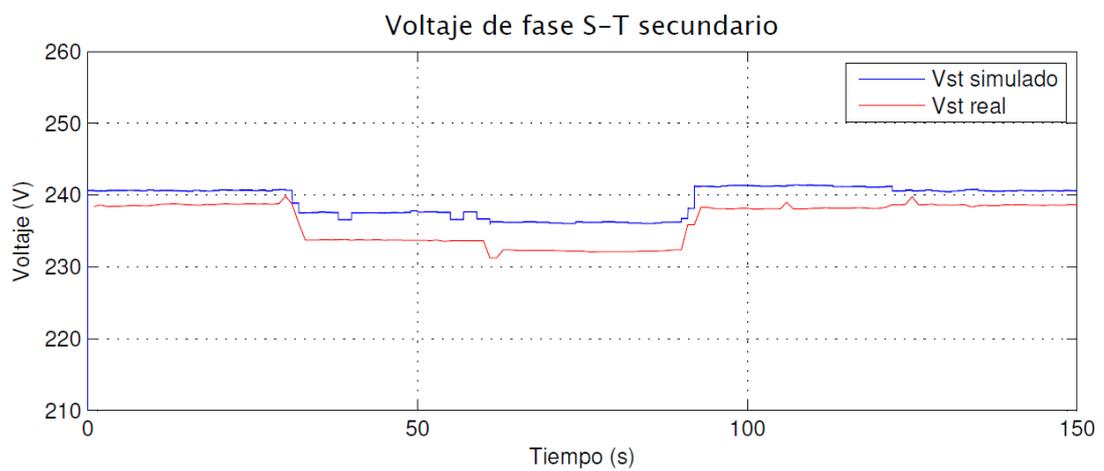
Fuente: Los autores.

Simulando el voltaje secundario entre cada fase podemos notar los momentos en los que su nivel cae a razón de la carga que se fue introduciendo al sistema durante el tiempo que duró la prueba experimental.



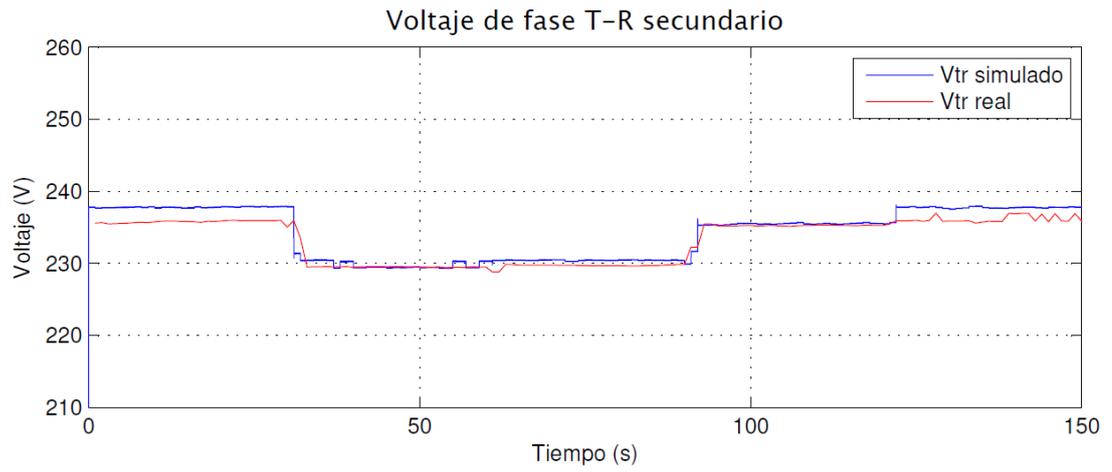
*Ilustración 100: Curvas de voltaje secundario  $V_{rs}$  prueba experimental temporizada real y simulada*

Fuente: Los autores.



*Ilustración 101: Curvas de voltaje secundario  $V_{st}$  prueba experimental temporizada real y simulada*

Fuente: Los autores.



*Ilustración 102: Curvas de voltaje secundario  $V_{tr}$  prueba experimental temporizada real y simulada*

Fuente: Los autores.

## CONCLUSIONES

El objetivo del presente trabajo es analizar cómo se comporta un sistema trifásico de transformadores en conexión Y- D, mediante la toma de datos en tiempo real y la simulación matemática para poder comparar los valores y curvas en los diferentes estados de operación ya sea a vacío y con carga.

Mediante la realización de las pruebas fundamentales a cada transformador se ha podido comprobar los principios básicos para la correcta operación de un transformador y su posterior integración a un sistema trifásico. Por ejemplo, al realizar las pruebas de polaridad se pudo determinar el sentido del flujo magnético en función del sentido de bobinado en la construcción de cada transformador, los cuales son de fabricación manual, se encontró que uno de los transformadores posee una polaridad diferente a los demás en uno de sus devanados. Realizando las pruebas de circuito abierto y corto circuito se ha podido hallar los valores de impedancia para el modelo real de cada transformador, lo que lleva a la conclusión que todos estos datos en conjunto son de vital importancia para establecer una conexión trifásica y que deben satisfacer una simetría entre ellos.

Para la simulación del modelado matemático que se describió en este trabajo, se hizo uso de la herramienta Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> la cual ayudó bastante para la resolución y que brindará datos precisos y en cortos periodos de tiempo. Para cada prueba que se realizó, se tiene una simulación con datos de entrada vinculados desde la adquisición de datos.

Se analizaron los datos obtenidos del banco de pruebas, comparándolos con los resultados de la simulación. En el caso del estado de operación a vacío del sistema trifásico, tenemos corriente que circula en los devanados de cada transformador producto del desequilibrio de las magnitudes de la fuente de alimentación trifásica que se tenía en el laboratorio y las impedancias equivalentes de cada transformador. Para el estado de operación con los diferentes tipos de carga se tuvieron que hacer ensayos

independientes a cada una para determinar sus valores reales y así poderlos simular, para el caso de pruebas en las que se utilizaron cargas inductivas notamos que existe un incremento transitorio de la corriente que circula en los terminales de cada transformador. Finalmente, la validación de estos datos nos dejó un margen de error de 5% en general para todas las pruebas

Se construyó con éxito un módulo de adquisición de datos utilizando un PLC Schneider que nos fue de mucha ayuda al momento de comunicar los datos provenientes de los analizadores de red del sistema trifásico, empleando protocolos de comunicación Modbus<sup>®</sup> Serial y TCP/IP realizamos un pequeño sistema de control y monitoreo para el sistema que se analizó, pudiendo registrar todos los datos en tiempo real y posteriormente fueron comparados con la simulación.

## **RECOMENDACIONES**

Los datos en los que se basa el modelo real de un transformador se derivan de las pruebas fundamentales, estas proporcionan las polaridades de las bobinas de los transformadores que son de suma relevancia e importancia para interconectar y formar los grupos de conexión, la impedancia equivalente propia de los transformadores y la admitancia de excitación del núcleo ferromagnético; todos son parte fundamental del estudio/modelado desarrollado, por consiguiente deben ser datos precisos que solo se consiguen con pruebas precisas.

En la realización de las pruebas experimentales hay que tener la precaución de los parámetros del analizador de red este correctamente configurados para la conexión que en la que se irá a hacer la lectura, porque si no se hace esto se tendrán falsos datos que al procesarlos nos darán falsos resultados y la verificación será completamente errónea.

La comunicación entre el analizador de red/PLC y PLC/ PC debe ser la adecuada para que la toma de datos en tiempo real sea lo más precisa posible, porque se usaran para la posterior comparación entre los datos reales y los modelados/simulados en un software, además de la visualización en una interfaz HMI.

Utilización de Matlab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> ya que ayuda en resolver sistemas matemáticos complejos, y que permite modelar/simular de una manera precisa y así obtener de ella un resultado con mucha confiabilidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- AGUIRRE, J., & CABRERA, M. (2015). ANÁLISIS DE SISTEMAS TRIFÁSICOS DE TRANSFORMADORES CONEXIÓN D - D.
- Al-Jaber, S. M. (2011). Path Integral Approach to Faraday's Law of Induction. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 3, 184–186. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2011.36030>
- BARZALLO, J. P. (2015). *MODELO MATEMÁTICO DE UN TRANSFORMADOR REAL MONOFÁSICO DE DOS DEVANADOS*. Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10256/1/UPS-GT001350.pdf>
- Burbano, M., & Di lorenzo, I. (2015). *Análisis para sistemas trifásicos de transformadores conexiones abiertas y especiales*. Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10249/1/UPS-GT001336.pdf>
- CAJAMARCA, E., & SIGUA, X. (2010). CARGABILIDAD EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA, INCIDENCIA EN LA VIDA ÚTIL, PÉRDIDAS DE ENERGÍA Y CONDICIONES OPERATIVAS. Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1105/13/UPS-CT001990.pdf>
- Castro, C., & Alvarado, J. (2017). Implementación de una Red MODBUS TCP Wireless con integración de tecnología Siemens Y Schneider para prácticas estudiantiles del laboratorio de automatización industrial.
- Castro, W. H., & Rodríguez, F. O. (2015). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA TRANSFORMADORES. Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10242/1/UPS-GT001322.pdf>
- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas Eléctricas*.
- Hernández, M. (2016). *Desarrollo e implementación de una red de datos basada en Modbus y Ethernet para autómatas industriales*. Escuela Superior Técnica de Sevilla. Retrieved from <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90946/fichero/marhertin.pdf>
- Kumbhar, G. B., Kulkarni, S. V., & Joshi, V. S. (2007). Analysis of Half-Turn Effect in Power Transformers Using Nonlinear-Transient FE Formulation. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, 22(1). <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.876663>
- MALDONADO, J., & MENA, V. (2017). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO PARA EL CONTROL DE VOLTAJE EN EL LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA*. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18074/1/CD-8119.pdf>
- Martínez-Velasco, J. A., & de León, F. (2011). Circuito equivalente de un transformador con regulación. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 19(1), 93–109. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052011000100010>
- Salvador, L., Jácome, C., Andrés, R., González, M., Fernando, D. I., & Sc, B. G. M. (2015). *Análisis de un Sistema de Distribución Trifásico*. Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10254/1/UPS-GT001346.pdf>

- Schneider Electric. (2013). Central de medida de potencia y energía de la serie PM5100 de PowerLogic™.
- Schneider Electric. (2017). *SoMachine Basic Guía de funcionamiento*.
- Schneider Electric. (2018). Controlador Lógico - Modicon M221 TM221CE16R, 1–17.
- SEGOVIA, A. (2013). *MANTENIMIENTO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN EN C.A.* Retrieved from <http://dspace.ucacue.edu.ec/bitstream/reducacue/5620/1/TESIS.pdf>