



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS TRIFÁSICOS CON TRANSFORMADORES
CONEXIÓN D-Y**

**AUTORES:
NESTOR SANTIAGO RODRÍGUEZ MANCERA
IGNACIO WILSON CHIRIBOGA VELÁSQUEZ**

**DIRECTOR:
DAVID HUMBERTO CÁRDENAS VILLACRÉS**

AGOSTO 2019

GUAYAQUIL –ECUADOR

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, **NESTOR SANTIAGO RODRÍGUEZ MANCERA** e **IGNACIO WILSON CHIRIBOGA VELASQUEZ**, autorizamos a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**, la publicación total o parcial de este proyecto de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

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

Guayaquil, agosto, 2019

Firma: _____

Autor: Nestor Santiago Rodríguez Mancera

Cédula: 091500276-0

Firma: _____

Autor: Ignacio Wilson Chiriboga Velásquez

Cédula: 091532373-7

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

Nosotros, **NESTOR SANTIAGO RODRÍGUEZ MANCERA**, con documento de identificación N° 091500276-0, e **IGNACIO WILSON CHIRIBOGA VELASQUEZ**, con documento de identificación N° 091532373-7, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**, la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos los autores del proyecto de grado titulado “**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS TRIFÁSICOS CON TRANSFORMADORES CONEXIÓN D-Y**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

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

Guayaquil, agosto, 2019

Firma: _____

Autor: Nestor Santiago Rodríguez Mancera

Cédula: 0915002760

Firma: _____

Autor: Ignacio Wilson Chiriboga Velásquez

Cédula: 091532373-7

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

Yo, **DAVID HUMBERTO CÁRDENAS VILLACRÉS**, director del proyecto de titulación con el tema “**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS TRIFÁSICOS CON TRANSFORMADORES CONEXIÓN D-Y**” realizado por los estudiantes **NESTOR SANTIAGO RODRÍGUEZ MANCERA** e **IGNACIO WILSON CHIRIBOGA VELÁSQUEZ**, certifico que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, agosto, 2019

Firma: _____

DAVID HUMBERTO CÁRDENAS VILLACRÉS

DEDICATORIA

Quisiera dedicar este proyecto a mi papá, José Rodríguez, y a mi mamá, Cecilia Mancera, que, con su apoyo incondicional, sus sabios consejos y mucha paciencia, me inspiran a ser mejor persona día a día y perseverar siempre para alcanzar mis metas. A mis hermanos, Danilo, Myrna y Fabián, que siempre han sido mi ejemplo a seguir. A mi familia de Ecuador y Colombia, en especial a mi Padrino Juan Carlos y a mi Madrina Dora, cuyo cariño y afecto traspasa fronteras. A mis abuelos, que sé que desde el cielo están presentes. Y a mi enamorada, Shayna Benítez, gracias por estar a mi lado en esta etapa tan importante de mi vida.

RODRÍGUEZ MANCERA NESTOR SANTIAGO

Quiero dedicar el presente trabajo a mi padre, por ser mi inspiración y ejemplo de tenacidad, esfuerzo, y constancia. A mi madre por su amor incondicional que ha sido para mí, refugio y motivación, aun en momentos difíciles. Un agradecimiento especial a mis hijos por su comprensión. Y principalmente a nuestro santo padre celestial por haber permitido que todas las circunstancias se den favorablemente para la culminación de este trabajo.

CHIRIBOGA VELÁSQUEZ IGNACIO WILSON

AGRADECIMIENTOS

Luego de haber concluido este proyecto de grado, queremos agradecer primero a Dios, por tantas bendiciones y permitirnos cumplir una etapa más de nuestras vidas; a nuestros padres y familiares, que siempre estuvieron para brindarnos su apoyo incondicional; a nuestros profesores, que con su paciencia y vocación supieron compartir sus conocimientos; a nuestro tutor; el Ing. David Cárdenas, por guiarnos en la culminación de la tesis; y a la Institución en general, la Universidad Politécnica Salesiana, que año a año se caracteriza por la formación de profesionales de calidad, buenos cristianos y honrados ciudadanos.

RODRÍGUEZ MANCERA NESTOR SANTIAGO

CHIRIBOGA VELÁSQUEZ IGNACIO WILSON

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xxiii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xxv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xxvi
ABREVIATURAS	xxvii
VARIABLES Y SIMBOLOGÍA	xxviii
RESUMEN.....	xxix
ABSTRACT.....	xxx
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2. JUSTIFICACIÓN	2
1.3. IMPORTANCIA Y ALCANCE.....	3
1.4. BENEFICIARIOS.....	3
1.5. OBJETIVOS	3
1.5.1. OBJETIVOS GENERALES	3
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.6. MARCO METODOLÓGICO.....	4
CAPÍTULO II	6
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. EL TRANSFORMADOR.....	6
2.1.1. PRINCIPALES ASPECTOS CONSTRUCTIVOS	6

2.1.1.1.	NÚCLEO (CIRCUITO MAGNÉTICO)	6
2.1.1.2.	DEVANADOS (CIRCUITO ELÉCTRICO).....	7
2.1.1.3.	SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN	8
2.1.2.	LEY DE FARADAY: PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES.....	8
2.1.3.	EL TRANSFORMADOR IDEAL	9
2.1.3.1.	RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN	10
2.1.3.2.	POLARIDAD DEL TRANSFORMADOR	11
2.1.3.3.	DIAGRAMA FASORIAL TRANSFORMADOR IDEAL BAJO CARGA 11	
2.1.3.4.	POTENCIA DEL TRANSFORMADOR IDEAL.....	13
2.1.4.	EL TRANSFORMADOR REAL.....	13
2.1.4.1.	CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR	14
2.1.4.2.	RESISTENCIA DEL DEVANADO	14
2.1.4.3.	FLUJO DE DISPERCIÓN	15
2.1.4.4.	PERMEABILIDAD FINITA	15
2.1.4.5.	PRUEBA DE POLARIDAD.....	16
2.1.4.6.	PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO Y DE CORTOCIRCUITO	17
2.1.4.7.	CONEXIÓN EN SERIE Y EN PARALELO DE DEVANADOS DE TRANSFORMADOR.....	19
2.1.5.	EL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.....	20
2.1.5.1.	SECUENCIA DE FASES	21
2.1.5.2.	CONEXIÓN ESTRELLA – ESTRELLA (Y-y)	21
2.1.5.3.	CONEXIÓN ESTRELLA – DELTA (Y-d).....	23
2.1.5.4.	CONEXIÓN DELTA – ESTRELLA (D-y).....	24
2.1.5.5.	CONEXIÓN DELTA – DELTA (D-d)	26

2.2.	IMPEDANCIAS Y TIPOS DE CARGAS ELECTRICAS	27
2.2.1.	CARGA RESISTIVA	28
2.2.2.	CARGA INDUCTIVA.....	28
2.2.3.	CARGA CAPACITIVA.....	29
2.3.	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE.....	30
2.4.	PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN	31
2.5.	LABVIEW	31
CAPÍTULO III.....		33
3.	IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA PARA ADQUISICIÓN DE DATOS	33
3.1.	CONSTRUCCION MÓDULO DEL PLC.....	33
3.1.1.	ELEMENTOS.....	34
3.1.2.	CABLEADO	34
3.2.	SOMACHINE BASIC: CONFIGURACIÓN.....	36
3.2.1.	CONEXIÓN ETHERNET: PLC – LAPTOP.....	38
3.2.2.	CONEXIÓN SERIAL: PLC – MEDIDOR DE PARÁMETROS.....	41
3.3.	SOMACHINE BASIC: PROGRAMACIÓN	42
3.3.1.	PROGRAMACIÓN DE ENTRADAS DIGITALES	42
3.3.2.	PROGRAMACIÓN DE SALIDAS DIGITALES	43
3.3.3.	PROGRAMACIÓN DE ENTRADAS ANALÓGICAS.....	44
3.3.4.	PROGRAMACIÓN PUERTO SERIAL (MEDIDOR DE PARÁMETROS)	44
3.4.	SOMACHINE BASIC: PUESTA EN FUNCIONAMIENTO	45
3.5.	OPC SERVER: CONFIGURACIÓN	46
3.6.	LABVIEW: PROGRAMACIÓN.....	58
3.7.	MEDIDOR DE PARÁMETROS: CONFIGURACIÓN	64
3.7.1.	CONEXIÓN MODBUS: MEDIDOR DE PARAMETROS - PLC	65
CAPÍTULO IV.....		66

4.	SIMULACIÓN Y ANÁLISIS	66
4.1.	PRUEBA N°1: ANÁLISIS DE LA CONEXIÓN D-Y AL CONECTAR UNA CARGA RESISTIVA VARIABLE EN ESTRELLA.....	66
4.1.1.	DIAGRAMA.....	66
4.1.2.	RECURSOS	66
4.1.3.	PROCEDIMIENTO	67
4.1.4.	VENTANA GRÁFICA: DIAGRAMAS FASORIALES VOLTAJE Y CORRIENTE.....	67
4.1.5.	VENTANA GRÁFICA: TRIÁNGULOS DE POTENCIA	71
4.1.6.	CÁLCULOS TEÓRICOS	75
4.1.7.	CUADROS COMPARATIVOS	78
4.1.8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	81
4.2.	PRUEBA N°2: ANÁLISIS DE LA CONEXIÓN D-Y AL CONECTAR UNA CARGA INDUCTIVA-RESISTIVA TRIFÁSICA Y UNA CARGA RESISTIVA MONOFÁSICA.	82
4.2.1.	DIAGRAMA.....	82
4.2.2.	RECURSOS	82
4.2.3.	PROCEDIMIENTO	83
4.2.4.	VENTANA GRÁFICA: DIAGRAMAS FASORIALES VOLTAJE Y CORRIENTE.....	83
4.2.5.	VENTANA GRÁFICA: TRIÁNGULOS DE POTENCIA	85
4.2.6.	CÁLCULOS TEÓRICOS	87
4.2.7.	CUADROS COMPARATIVOS	88
4.2.8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	89
4.3.	PRUEBA N°3: ANÁLISIS DE LA CONEXIÓN D-Y AL CONECTAR UNA CARGA INDUCTIVA-RESISTIVA TRIFÁSICA, SIMULANDO LA PÉRDIDA DE UNA LÍNEA. 90	

4.3.1. DIAGRAMA.....	90
4.3.2. RECURSOS	90
4.3.3. PROCEDIMIENTO	91
4.3.4. VENTANA GRÁFICA: DIAGRAMAS FASORIALES VOLTAJE Y CORRIENTE.....	91
4.3.5. VENTANA GRÁFICA: TRIÁNGULOS DE POTENCIA	96
4.3.6. CÁLCULOS TEÓRICOS	100
4.3.7. CUADROS COMPARATIVOS	101
4.3.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS	102
4.4. PRUEBA N°4: ANÁLISIS DE LA CONEXIÓN D-Y AL CONECTAR UNA CARGA CAPACITIVA TRIFÁSICA.	103
4.4.1. DIAGRAMA.....	103
4.4.2. RECURSOS	103
4.4.3. PROCEDIMIENTO	104
4.4.4. VENTANA GRÁFICA: DIAGRAMAS FASORIALES VOLTAJE Y CORRIENTE.....	104
4.4.5. VENTANA GRÁFICA: TRIÁNGULOS DE POTENCIA	106
4.4.6. CÁLCULOS TEÓRICOS	108
4.4.7. CUADROS COMPARATIVOS	109
4.4.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS	110
4.5. PRUEBA N°5: ANÁLISIS DE LA CONEXIÓN D-Y AL CONECTAR UNA CARGA TRIFÁSICA CONFORMADA POR CAPACITORES Y RESISTENCIAS EN SERIE CONECTADOS EN ENTRELLA.	111
4.5.1. DIAGRAMA.....	111
4.5.2. RECURSOS	111
4.5.3. PROCEDIMIENTO	112

4.5.4. VENTANA GRÁFICA: DIAGRAMAS FASORIALES VOLTAJE Y CORRIENTE.....	112
4.5.5. VENTANA GRÁFICA: TRIÁNGULOS DE POTENCIA	114
4.5.6. CÁLCULOS TEÓRICOS	116
4.5.7. CUADROS COMPARATIVOS	117
4.5.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS	118
4.6. PRUEBA N°6: ANÁLISIS DE LA CONEXIÓN D-Y AL CONECTAR UNA CARGA INDUCTIVA-RESISTIVA TRIFÁSICA EN ESTRELLA Y EN PARALELO UNA CARGA CAPACITIVA TRIFASICA EN ESTRELLA.....	119
4.6.1. DIAGRAMA.....	119
4.6.2. RECURSOS	119
4.6.3. PROCEDIMIENTO	120
4.6.4. VENTANA GRÁFICA: DIAGRAMAS FASORIALES VOLTAJE Y CORRIENTE.....	120
4.6.5. VENTANA GRÁFICA: TRIÁNGULOS DE POTENCIA	122
4.6.6. CÁLCULOS TEÓRICOS	124
4.6.7. CUADROS COMPARATIVOS	125
4.6.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS	126
CAPÍTULO V	127
5. CONCLUSIONES.....	127
CAPÍTULO VI.....	128
6. RECOMENDACIONES.....	128
CAPÍTULO VII	129
7. BIBLIOGRAFÍA	129
ANEXOS.....	132
ANEXO 1: LISTA DE REGISTROS PM5110.....	132

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1: Clasificación de transformadores por su núcleo</i>	<i>7</i>
<i>Ilustración 2: Clasificación de los transformadores por su devanado</i>	<i>7</i>
<i>Ilustración 3: Ley de Faraday.....</i>	<i>9</i>
<i>Ilustración 4: Transformador ideal sin carga</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 5: Transformador ideal con carga</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 6: Circuito equivalente de un transformador real.....</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 7: Prueba de polaridad de un transformador</i>	<i>17</i>
<i>Ilustración 8: Esquema eléctrico del ensayo en vacío.....</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 9: Esquema eléctrico del ensayo de cortocircuito.....</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 10: Conexión serie y paralelo de devanados de transformadores de igual voltaje</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 11: Secuencias de fases</i>	<i>21</i>
<i>Ilustración 12: Esquema de transformador trifásico conexión Y-y.....</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 13: Diagrama fasorial de transformador trifásico conexión Y-y.....</i>	<i>23</i>
<i>Ilustración 14: Esquema de transformador trifásico conexión Y-d.....</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 15: Diagrama fasorial de transformador trifásico conexión Y-d.....</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 16: Esquema de transformador trifásico conexión D-y</i>	<i>25</i>
<i>Ilustración 17: Diagrama fasorial de transformador trifásico conexión D-y.....</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 18: Esquema de transformador trifásico conexión D-d</i>	<i>27</i>
<i>Ilustración 19: Diagrama fasorial de transformador trifásico conexión D-d.....</i>	<i>27</i>
<i>Ilustración 20: Diagramas circuito resistivo puro</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 21: Diagramas circuito inductivo puro</i>	<i>29</i>

<i>Ilustración 22: Diagramas circuito capacitivo puro</i>	<i>29</i>
<i>Ilustración 23: PLC Schneider TM221CE16R</i>	<i>30</i>
<i>Ilustración 24: Módulo del PLC</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 25: Alimentación del PLC</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 26: Salidas digitales</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 27: Entradas digitales</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 28: Entradas analógicas.....</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 29: Crear un nuevo proyecto.....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 30: Seleccionar modelo del PLC</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 31: Conexión ethernet – Cambiar configuración del adaptador</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 32: Conexión ethernet – Cambiar configuración del adaptador</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 33: Conexión ethernet – Propiedades de la red Ethernet</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 34: Conexión ethernet – Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4).....</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 35: Conexión ethernet – Dirección IP y Máscara de subred</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 36: Conexión ethernet – Dirección IP y Máscara de subred SoMachine</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 37: Configuración de conexión Serial.....</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 38: Configuración Modbus.....</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 39: Programación - POU's</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 40: Programación – Entradas digitales</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 41: Programación – Salidas digitales</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 42: Programación – Entradas analógicas</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 43: Programación – Lista de registros PM5110.....</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 44: Programación – Puerto serial (medidor de parámetros)</i>	<i>45</i>

<i>Ilustración 45: Programación – Puesta en funcionamiento</i>	46
<i>Ilustración 46: OPC Servers – Configuración.....</i>	46
<i>Ilustración 47: OPC Servers – New Channel</i>	47
<i>Ilustración 48: OPC Servers – New Channel - Identification</i>	47
<i>Ilustración 49: OPC Servers – New Channel – Device Driver</i>	47
<i>Ilustración 50: OPC Servers – New Channel – Communication Serialization</i>	48
<i>Ilustración 51: OPC Servers – New Channel – Network Interface</i>	48
<i>Ilustración 52: OPC Servers – New Channel – Write Optimization</i>	48
<i>Ilustración 53: OPC Servers – New Channel – Non-Normalized Float Handling.....</i>	49
<i>Ilustración 54: OPC Servers – New Channel – Ethernet</i>	49
<i>Ilustración 55: OPC Servers – New Channel – Summary</i>	49
<i>Ilustración 56: OPC Servers – New Device.....</i>	50
<i>Ilustración 57: OPC Servers – New Device - Name</i>	50
<i>Ilustración 58: OPC Servers – New Device - Model.....</i>	50
<i>Ilustración 59: OPC Servers – New Device - ID</i>	51
<i>Ilustración 60: OPC Servers – New Device – Scan Mode.....</i>	51
<i>Ilustración 61: OPC Servers – New Device – Timing</i>	51
<i>Ilustración 62: OPC Servers – New Device – Auto-Demotion</i>	52
<i>Ilustración 63: OPC Servers – New Device – Database Creation</i>	52
<i>Ilustración 64: OPC Servers – New Device – Ethernet.....</i>	52
<i>Ilustración 65: OPC Servers – New Device – Data Access Settings</i>	53
<i>Ilustración 66: OPC Servers – New Device – Data Encoding Settings.....</i>	53
<i>Ilustración 67: OPC Servers – New Device – Block Sizes.....</i>	53

<i>Ilustración 68: OPC Servers – New Device – Variable Import Settings</i>	54
<i>Ilustración 69: OPC Servers – New Device – Error Handling</i>	54
<i>Ilustración 70: OPC Servers – New Device – Summary</i>	54
<i>Ilustración 71: OPC Servers – New Tag Group</i>	55
<i>Ilustración 72: OPC Servers – Crear Tag Groups</i>	55
<i>Ilustración 73: OPC Servers – Tag Groups</i>	55
<i>Ilustración 74: OPC Servers – Tag Properties</i>	56
<i>Ilustración 75: OPC Servers – Tags entradas digitales</i>	56
<i>Ilustración 76: OPC Servers – Tags salidas digitales</i>	56
<i>Ilustración 77: OPC Servers – Tags entradas analógicas</i>	56
<i>Ilustración 78: OPC Servers – Tags medidor de parámetros</i>	57
<i>Ilustración 79: OPC Servers – Launch OPC Quick Client</i>	57
<i>Ilustración 80: OPC Servers – OPC Quick Client</i>	57
<i>Ilustración 81: LabVIEW – Create Project</i>	58
<i>Ilustración 82: LabVIEW – Blank Project</i>	58
<i>Ilustración 83: LabVIEW – I/O Server</i>	58
<i>Ilustración 84: LabVIEW – OPC Client</i>	59
<i>Ilustración 85: LabVIEW – National Instruments.NIOPCServers.V5</i>	59
<i>Ilustración 86: LabVIEW – DCOM Configuration Recommendation</i>	59
<i>Ilustración 87: LabVIEW – Create Bound Variables</i>	60
<i>Ilustración 88: LabVIEW – Add variables</i>	60
<i>Ilustración 89: LabVIEW – Multiple Variable Editor</i>	60
<i>Ilustración 90: LabVIEW – New VI</i>	61

<i>Ilustración 91: LabVIEW – Show Block Diagram</i>	61
<i>Ilustración 92: LabVIEW – Arrastrar variables de entrada a Front Panel</i>	61
<i>Ilustración 93: LabVIEW – Arrastrar variables de salida a Diagrama de Bloques</i>	62
<i>Ilustración 94: LabVIEW – Seleccionar Access Mode Write de cada variable de salida</i>	62
<i>Ilustración 95: LabVIEW – Insertar push button en Panel Frontal por cada variable de salida</i>	62
<i>Ilustración 96: LabVIEW – Conectar elementos diagrama de bloques</i>	63
<i>Ilustración 97: LabVIEW – Ejecutar Programa – Run Continuosly</i>	63
<i>Ilustración 98: LabVIEW – Ejecutar Programa – Deployment Progress</i>	63
<i>Ilustración 99: Medidor de parámetros PM5100</i>	64
<i>Ilustración 100: Disposición de pines Puerto RJ45</i>	65
<i>Ilustración 101: Prueba N°1 – Conexión D-y de transformadores trifásicos con carga resistiva variable</i>	66
<i>Ilustración 102: Prueba N°1 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga resistiva trifásica 80 Ω</i>	67
<i>Ilustración 103: Prueba N°1 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga resistiva trifásica 80 Ω</i>	68
<i>Ilustración 104: Prueba N°1 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga resistiva trifásica 90 Ω</i>	68
<i>Ilustración 105: Prueba N°1 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga resistiva trifásica 90 Ω</i>	68
<i>Ilustración 106: Prueba N°1 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga resistiva trifásica 100 Ω</i>	69

<i>Ilustración 107: Prueba N°1 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga resistiva trifásica 100 Ω</i>	69
<i>Ilustración 108: Prueba N°1 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga resistiva trifásica 80 Ω</i>	69
<i>Ilustración 109: Prueba N°1 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga resistiva trifásica 80 Ω</i>	70
<i>Ilustración 110: Prueba N°1 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga resistiva trifásica 90 Ω</i>	70
<i>Ilustración 111: Prueba N°1 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga resistiva trifásica 90 Ω</i>	70
<i>Ilustración 112: Prueba N°1 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga resistiva trifásica 100 Ω</i>	71
<i>Ilustración 113: Prueba N°1 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga resistiva trifásica 100 Ω</i>	71
<i>Ilustración 114: Prueba N°1 – Triángulos de potencia lado primario. Carga resistiva trifásica 80 Ω</i>	72
<i>Ilustración 115: Prueba N°1 – Triángulos de potencia lado primario. Carga resistiva trifásica 90 Ω</i>	72
<i>Ilustración 116: Prueba N°1 – Triángulos de potencia lado primario. Carga resistiva trifásica 100 Ω</i>	73
<i>Ilustración 117: Prueba N°1 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga resistiva trifásica 80 Ω</i>	73

<i>Ilustración 118: Prueba N°1 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga resistiva trifásica 90 Ω</i>	74
<i>Ilustración 119: Prueba N°1 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga resistiva trifásica 100 Ω</i>	74
<i>Ilustración 120: Prueba N°2 – Conexión D-y de transformadores trifásicos con carga inductiva-resistiva trifásica (motor) y carga resistiva monofásica (foco incandescente)</i>	82
<i>Ilustración 121: Prueba N°2 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga inductiva-resistiva trifásica (motor) y carga resistiva monofásica (foco incandescente)</i>	84
<i>Ilustración 122: Prueba N°2 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) y carga resistiva monofásica (foco incandescente)</i>	84
<i>Ilustración 123: Prueba N°2 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) y carga resistiva monofásica (foco incandescente)</i>	85
<i>Ilustración 124: Prueba N°2 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) y carga resistiva monofásica (foco incandescente)</i>	85
<i>Ilustración 125: Prueba N°2 – Triángulos de potencia lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) y carga resistiva monofásica (foco incandescente)</i>	86
<i>Ilustración 126: Prueba N°2 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) y carga resistiva monofásica (foco incandescente)</i>	86
<i>Ilustración 127: Prueba N°3 – Conexión D-y de transformadores trifásicos con carga inductiva trifásica (motor) y simulación de pérdidas de fase</i>	90
<i>Ilustración 128: Prueba N°3 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga inductiva trifásica (motor)</i>	92

<i>Ilustración 129: Prueba N°3 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga inductiva trifásica (motor)</i>	<i>92</i>
<i>Ilustración 130: Prueba N°3 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado primario</i>	<i>92</i>
<i>Ilustración 131: Prueba N°3 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado primario</i>	<i>93</i>
<i>Ilustración 132: Prueba N°3 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado secundario</i>	<i>93</i>
<i>Ilustración 133: Prueba N°3 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado secundario</i>	<i>93</i>
<i>Ilustración 134: Prueba N°3 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor)</i>	<i>94</i>
<i>Ilustración 135: Prueba N°3 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor)</i>	<i>94</i>
<i>Ilustración 136: Prueba N°3 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado primario</i>	<i>95</i>
<i>Ilustración 137: Prueba N°3 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado primario</i>	<i>95</i>
<i>Ilustración 138: Prueba N°3 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado secundario</i>	<i>95</i>
<i>Ilustración 139: Prueba N°3 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado secundario</i>	<i>96</i>

<i>Ilustración 140: Prueba N°3 – Triángulos de potencia lado primario. Carga inductiva trifásica (motor)</i>	96
<i>Ilustración 141: Prueba N°3 – Triángulos de potencia lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado primario</i>	97
<i>Ilustración 142: Prueba N°3 – Triángulos de potencia lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado secundario</i>	97
<i>Ilustración 143: Prueba N°3 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor)</i>	98
<i>Ilustración 144: Prueba N°3 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado primario</i>	98
<i>Ilustración 145: Prueba N°3 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado secundario</i>	99
<i>Ilustración 146: Prueba N°4 – Conexión D-y de transformadores trifásicos con carga capacitiva trifásica.....</i>	103
<i>Ilustración 147: Prueba N°4 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga capacitiva trifásica</i>	104
<i>Ilustración 148: Prueba N°4 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga capacitiva trifásica</i>	105
<i>Ilustración 149: Prueba N°4 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga capacitiva trifásica</i>	105
<i>Ilustración 150: Prueba N°4 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga capacitiva trifásica.....</i>	105

<i>Ilustración 151: Prueba N°4 – Triángulos de potencia lado primario. Carga capacitiva trifásica</i>	106
<i>Ilustración 152: Prueba N°4 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga capacitiva trifásica</i>	107
<i>Ilustración 153: Prueba N°5 – Conexión D-y de transformadores trifásicos con carga trifásica conformada por capacitores y resistencias en serie conectados en estrella</i>	111
<i>Ilustración 154: Prueba N°5 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga resistiva-capacitiva trifásica</i>	113
<i>Ilustración 155: Prueba N°5 – Diagrama fasorial corriente lado primario. Carga resistiva-capacitiva trifásica</i>	113
<i>Ilustración 156: Prueba N°5 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga resistiva-capacitiva trifásica</i>	113
<i>Ilustración 157: Prueba N°5 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga resistiva-capacitiva trifásica</i>	114
<i>Ilustración 158: Prueba N°5 – Triángulos de potencia lado primario. Carga resistiva-capacitiva trifásica</i>	114
<i>Ilustración 159: Prueba N°5 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga resistiva-capacitiva trifásica</i>	115
<i>Ilustración 160: Prueba N°6 – Conexión D-y de transformadores trifásicos con carga inductiva-resistiva trifásica y en paralelo una carga capacitiva trifásica</i>	119
<i>Ilustración 161: Prueba N°6 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga inductiva-resistiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica</i>	121

<i>Ilustración 162: Prueba N°6 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga inductiva-resistiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica</i>	121
<i>Ilustración 163: Prueba N°6 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga inductiva-resistiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica</i>	122
<i>Ilustración 164: Prueba N°6 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga inductiva-resistiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica</i>	122
<i>Ilustración 165: Prueba N°6 – Triángulos de potencia lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica.....</i>	123
<i>Ilustración 166: Prueba N°6 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica.....</i>	123

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Características principales PLC marca Schneider TM221CE16R.....</i>	30
<i>Tabla 2: Programación – Entradas digitales</i>	43
<i>Tabla 3: Programación – Salidas digitales</i>	43
<i>Tabla 4: Programación – Entradas analógicas.....</i>	44
<i>Tabla 5: Programación – Puerto serial.....</i>	44
<i>Tabla 6: Conexión Puerto Serial – RS485.....</i>	65
<i>Tabla 7: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva trifásica de 80Ω.....</i>	75
<i>Tabla 8: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva trifásica de 90Ω.....</i>	76

<i>Tabla 9: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva trifásica de 100Ω.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 10: Cuadro comparativo de transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva trifásica de 80Ω.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 11: Cuadro comparativo de transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva trifásica de 90Ω.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 12: Cuadro comparativo de transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva trifásica de 100Ω.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 13: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva-inductiva trifásica</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 14: Cuadro comparativo de transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva-inductiva trifásica</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 15: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva-inductiva trifásica (motor)</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 16: Cuadro comparativo de transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva-inductiva trifásica</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 17: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga capacitiva trifásica</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 18: Cuadro comparativo de transformadores trifásicos D-Y con carga capacitiva trifásica</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 19: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva-capacitiva trifásica</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 20: Cuadro comparativo de transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva-capacitiva trifásica.....</i>	<i>117</i>

<i>Tabla 21: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva-inductiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica.....</i>	124
<i>Tabla 22: Cuadro comparativo de transformadores trifasicos D-Y con carga resistiva-inductiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica.....</i>	125

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: Ley de Faraday</i>	8
<i>Ecuación 2: Relación de transformación en transformadores</i>	10
<i>Ecuación 3: Ley de Ohm</i>	11
<i>Ecuación 4: Potencia activa del transformador ideal</i>	13
<i>Ecuación 5: Potencia reactiva y aparente del transformador ideal</i>	13
<i>Ecuación 6: Corriente de excitación de un transformador real</i>	15
<i>Ecuación 7: Corriente de pérdida en el núcleo de un transformador real.....</i>	16
<i>Ecuación 8: Reactancia de magnetización de un transformador real.....</i>	16
<i>Ecuación 9: Relación de vueltas de transformador conexión Y-y</i>	22
<i>Ecuación 10: Relación de vueltas de transformador conexión Y-d.....</i>	23
<i>Ecuación 11: Relación de vueltas de transformador conexión D-y.....</i>	25
<i>Ecuación 12: Relación de vueltas de transformador conexión D-d</i>	26
<i>Ecuación 13: Impedancia resistiva pura</i>	28
<i>Ecuación 14: Impedancia inductiva pura</i>	28
<i>Ecuación 15: Impedancia capacitiva pura</i>	29

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: LISTA DE REGISTROS PM5110	132
--	-----

ABREVIATURAS

PLC	Programmable Logic Controller
DSC	Datalogging and Supervisory Control
OPC	Ole for Process Control
OLE	Object Linking and Embedding
RTU	Remote Terminal Unit
TCP	Transmission Control Protocol
IP	Internet Protocol
fmm	Fuerza Magnetomotriz
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
POU	Program Organization Unit

VARIABLES Y SIMBOLOGÍA

V	Voltaje
I	Corriente
P	Potencia Activa
Q	Potencia Reactiva
S	Potencia Aparente
E	Energía
f	Frecuencia
Fp	Factor de Potencia

RESUMEN

Tema: ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS TRIFÁSICOS CON
TRANSFORMADORES CONEXIÓN D-Y

Palabras clave: TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, CONEXIÓN DELTA – ESTRELLA,
PLC, LABVIEW, SIMULACIÓN, MODBUS

El presente proyecto se enfoca en proveer un análisis a fondo de un sistema de transformadores trifásicos conectados en Delta – Estrella, sus características, aplicaciones, ventajas y desventajas, además de su comportamiento frente a diferentes tipos de cargas.

Para realizar esta simulación y posterior análisis se utilizó algunos elementos para formar parte del sistema de adquisición de datos, tales como un módulo que contiene un PLC, un medidor de parámetros del que se va a extraer la información del sistema trifásico que se va a analizar, y los diferentes softwares que se necesitaron para realizar la configuración y programación de la comunicación de dichos elementos y una aplicación software que nos proporcionará una ventana gráfica con los datos en tiempo real del sistema.

Con la conexión de diferentes tipos de cargas tales como resistivas, inductivas y capacitivas, además de que se podrá simular situaciones de falla tales como pérdidas de fase, este proyecto podrá ayudar a comprender el comportamiento del sistema en estudio y poder prevenir eventos no deseados en situaciones reales.

ABSTRACT

Theme: ANALYSIS AND SIMULATION OF THREE-PHASE SYSTEMS WITH
TRANSFORMERS D-Y CONNECTION

Key words: THREE-PHASE TRANSFORMER, DELTA-STAR CONNECTION, PLC,
LABVIEW, SIMULATION, MODBUS

The present project focuses on providing an in-depth analysis of a system of three-phase transformers connected in Delta-Star, its characteristics, applications, advantages and disadvantages, besides its behavior in front of different types of loads.

To carry out this simulation and subsequent analysis, some elements were used to be part of the system for the data acquisition, such as a module that contains a PLC, a parameter meter from which the information of the three-phase system that is going to be analyzed, will be extracted, and the software that were needed to carry out the configuration and programming of the communication of those elements and a software application that will provide us with a graphic window with the real-time data of the system.

With the connection of different types of loads such as resistive, inductive and capacitive, besides that it will be possible to simulate failure situations such as phase losses, this project can help to understand the behavior of the system under study and prevent unwanted events in real situations.

INTRODUCCIÓN

Para la formación de profesionales altamente capacitados en los temas relacionados a la electricidad, resulta un requisito indispensable el estudio de los transformadores, por este motivo la Universidad Politécnica Salesiana tiene varios tableros con bancos de transformadores donde se pueden realizar diferentes pruebas y análisis. Este proyecto en general es un complemento de dichos tableros, en el cual se profundizará el análisis de la conexión Delta – Estrella en particular, la que se usa normalmente en Subestaciones de distribución.

En el capítulo 1 de este documento se planteará el problema, donde se establecerá su importancia y alcance, así como sus objetivos generales y específicos. Para el capítulo 2 se recopilará la información teórica más relevante al tema, en especial sobre los transformadores trifásicos y sus conexiones, para darle al lector una base apropiada para el análisis. En el capítulo 3 se detallará como se construyó el módulo de adquisición de datos que contiene al PLC, así como la programación para la comunicación de los diferentes elementos del sistema. Y, por último, en el capítulo 4 se realizará el análisis de un sistema trifásico de transformadores conectados en Delta-Estrella simulando diferentes pruebas mediante la aplicación software.

Una vez hecha la simulación, no solamente se podrá analizar y realizar pruebas sobre el comportamiento y características de un sistema de transformadores conectados en Delta – Estrella, sino también se podrá conocer cómo realizar la adquisición de datos por medio de un PLC para cualquier tipo de aplicación que se requiera.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, la Universidad Politécnica Salesiana consta de un banco de transformadores trifásicos que permiten a los estudiantes realizar diferentes tipos de conexiones, entre estas, la conexión denominada Delta – Estrella, y analizar su funcionamiento y como se comporta mediante algunas pruebas.

Para adquirir y analizar los datos de dicha conexión en tiempo real y simularlas en una aplicación software, se requiere de un módulo capaz de recibir y procesar las señales, para luego mostrarlas mediante gráficas que faciliten el entendimiento del sistema a estudiar, al analizar su comportamiento al conectar diferentes tipos de cargas y realizando posibles fallas de pérdida de fase.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Mediante este proyecto el personal estudiantil de la Universidad Politécnica Salesiana, en particular los de la carrera de ingeniería eléctrica, adquirirán las herramientas necesarias para profundizarse en el estudio y análisis de cómo se comporta un sistema de transformadores trifásicos con conexión en Delta – Estrella, además de familiarizarse con el funcionamiento de los PLC y la adquisición de datos en tiempo real, realizando pruebas y verificando datos mediante una aplicación software.

1.3. IMPORTANCIA Y ALCANCE

Se construirá un módulo que permita adquirir los datos del tablero de transformadores trifásicos de la Universidad Politécnica Salesiana, utilizando un PLC marca Schneider modelo TM221CE16R, al cual le ingresarán las señales de voltaje, corriente y potencia necesarias para su análisis, provenientes de un medidor de parámetros marca Schneider modelo PM5110, conectado al bando de transformadores.

Posteriormente se realizará la comunicación entre el módulo de adquisición de datos y un ordenador en el cual se diseñará una aplicación software en LabVIEW que permita visualizar y simular gráficamente los parámetros del sistema. Se realizarán pruebas para el análisis y estudio del comportamiento ante diferentes tipos de eventos tales como fallas de fase.

1.4. BENEFICIARIOS

Este proyecto tiene como beneficiarios a la Universidad Politécnica Salesiana y los estudiantes que optaron por seguir la carrera de ingeniería eléctrica, los cuales podrán realizar pruebas y analizar la conexión Delta – Estrella del banco de transformadores.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVOS GENERALES

Adquirir y analizar los diferentes datos que se pueden obtener de un banco de transformadores conectados en Delta – Estrella, y simular su funcionamiento, comportamiento y los fenómenos que se producen mediante una aplicación software.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir un módulo que permita la adquisición de datos de un banco de transformadores trifásicos conectados en Delta – Estrella.
- Analizar el funcionamiento de un sistema de transformadores trifásicos conectados en Delta – Estrella.
- Experimentar sobre su comportamiento en periodo estable y ante fallas de pérdidas de fase.
- Realizar una aplicación que muestre los parámetros y simule el funcionamiento del banco de transformadores mediante los datos adquiridos.

1.6. MARCO METODOLÓGICO

La finalidad de este proyecto de titulación es analizar cómo se comporta un banco de transformadores trifásicos conectados en Delta-Estrella, a partir de la recolección y análisis de datos en tiempo real, para esto se desarrollarán los siguientes puntos:

- Diseño de la investigación: para esto se implementará la investigación experimental como modelo metodológico para este proyecto, ya que se requiere realizar pruebas reales con los equipos y corroborar los resultados teóricos con los obtenidos de manera práctica.
- Definición de las variables: las variables a utilizarse serán las señales de voltaje, corriente y potencia que se pueden obtener del banco de transformadores.
- Población y muestra: la población serán los transformadores trifásicos conectados en Delta-Estrella y como muestra se utilizará el banco de transformadores que se encuentra en la Universidad Politécnica Salesiana

- Instrumentos: los instrumentos que se van a utilizar serán un PLC marca Schneider modelo TM221CE16R para adquirir los datos y posteriormente una aplicación software en LabVIEW para la representación gráfica
- Procedimientos: inicialmente se analizarán las ecuaciones matemáticas correspondientes, luego se conectarán 2 transformadores trifásicos en Delta-Estrella y se adquirirán los datos por medio de un módulo que contendrá al PLC antes mencionado, que se comunicará con un ordenador en el cual se ejecutará una aplicación software creada en LabVIEW, que presentará gráficamente dichos datos en tiempo real.
- Análisis de los datos: una vez obtenidos los valores teóricos y los valores prácticos, se podrán comparar, analizar y sacar conclusiones sobre el funcionamiento y como se comportan los transformadores trifásicos con conexión Delta-Estrella.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. EL TRANSFORMADOR

Podríamos describir al transformador como una máquina estacionaria que funciona con corriente alterna, la cual está conformada por dos o más bobinas eléctricamente aisladas y acopladas magnéticamente, devanadas sobre un mismo núcleo. Su finalidad es la de transformar la energía eléctrica, de determinados niveles de voltaje y corriente, a magnitudes generalmente diferentes mediante la acción de un campo magnético. (Chapman, 2000, pág. 61)

El transformador en general es uno de los dispositivos eléctricos más utilizados, capaz de transmitir la energía eléctrica en grandes distancias, debido a que cuanto mayor es el nivel de voltaje, menor es la corriente y, por lo tanto, se reduce significativamente la sección de los alimentadores, haciendo dicha transmisión económicamente factible. Además de poder distribuirla de manera segura, ya que se reduce los niveles de voltaje a valores adecuados para las cargas.

La bobina primaria o, de entrada, es la que se conecta a la fuente de energía eléctrica alterna, y las bobinas de salida o secundarias, son las que se conectan a la carga.

2.1.1. PRINCIPALES ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

2.1.1.1. NÚCLEO (CIRCUITO MAGNÉTICO)

El núcleo de un transformador corresponde a un sistema el cual conforma su circuito magnético, conformado por láminas de acero ferromagnéticas, eléctricamente aisladas para lograr disminuir las pérdidas en el hierro. El núcleo consta de las columnas que conforman la parte donde se colocan las bobinas y las culatas que unen magnéticamente las columnas.

Según la ubicación relativa de los devanados y el núcleo, los transformadores se pueden clasificar en acorazados (Ilustración 1.a) y de columna (Ilustración 1.b). (Mora, 2003, pág. 162)

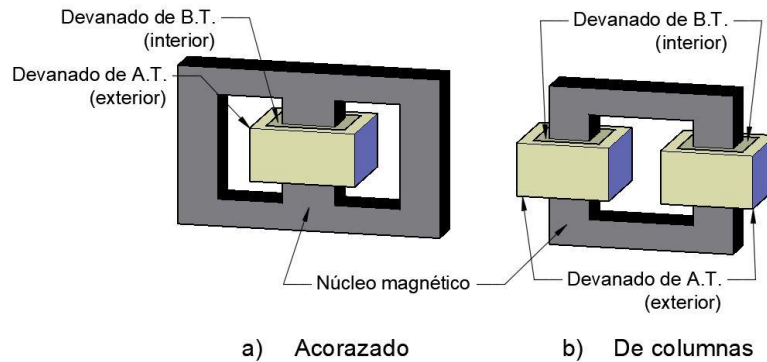


Ilustración 1: Clasificación de transformadores por su núcleo
Fuente: (Mora, 2003)
Elaborado por: Los autores

2.1.1.2. DEVANADOS (CIRCUITO ELÉCTRICO)

Los bobinados del transformador conforman el circuito eléctrico, constituidos por alambres de cobre bañados por una capa aislante usualmente barniz en pequeños transformadores, o varias capas de papel o algodón en el caso de alambres de secciones mayores. Según la ubicación relativa de los bobinados de Alta Tensión y Baja Tensión se clasifican en concéntricos o alternados. (Mora, 2003, pág. 165)

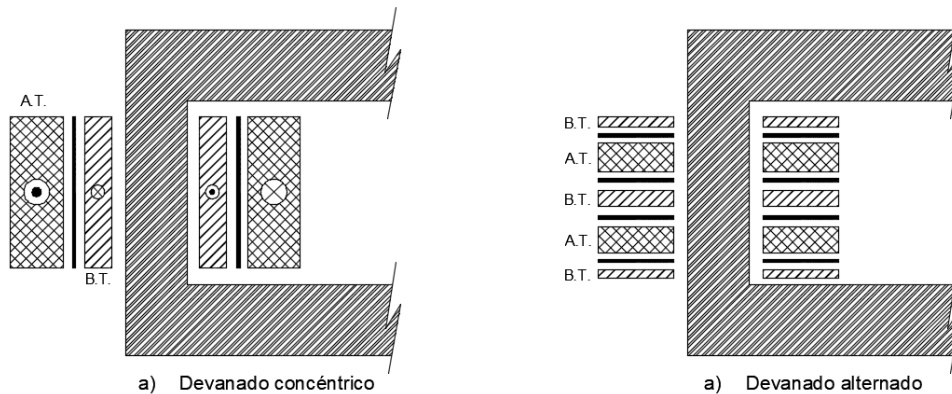


Ilustración 2: Clasificación de los transformadores por su devanado
Fuente: (Mora, 2003)
Elaborado por: Los autores

2.1.1.3. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

En los transformadores existen diferentes pérdidas que se convierten en calor y afectan la vida útil de la máquina y su rendimiento. Para evitar esto un sistema de refrigeración resulta indispensable. En pequeñas potencias es suficiente la superficie externa del transformador, como por ejemplo en los transformadores secos. En potencias mayores, se emplea el aceite como medio para refrigerar además que también cumple la función de aislante, como por ejemplo los transformadores en baño de aceite. (Mora, 2003, pág. 166)

2.1.2. LEY DE FARADAY: PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES

La ley de Faraday indica que, si una espira de alambre conductor es atravesada por un flujo magnético, será inducido en esta un voltaje directamente proporcional a la tasa de cambio del flujo con respecto al tiempo. Una bobina de N espiras en la cual el mismo flujo magnético circula en todas las espiras, el voltaje inducido en la bobina estará dado por

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

Ecuación 1: Ley de Faraday
Fuente: (Chapman, 2000)

donde e_{ind} es el voltaje que se induce en la espira y ϕ es el flujo magnético que atraviesa la espira.

La ley de Lenz expresa que la dirección del voltaje inducido es opuesta al cambio que lo causa, es decir que, si se cortocircuitaran los extremos de la bobina, produciría una corriente que provocaría un flujo opuesto al cambio del flujo inicial, debido a esto se incluye el signo negativo (-) en la ecuación. (Chapman, 2000, pág. 29)

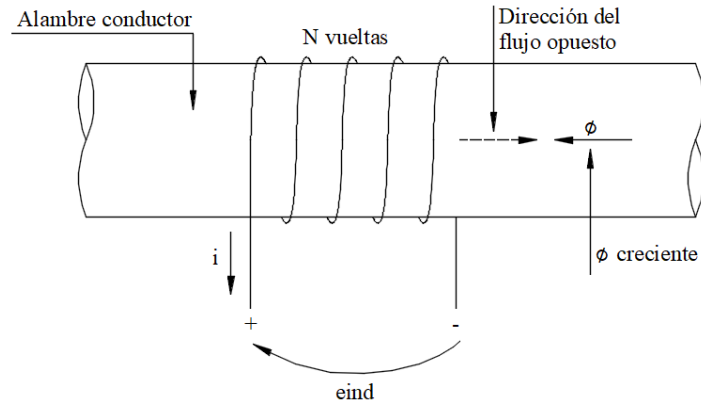


Ilustración 3: Ley de Faraday
Fuente: (Chapman, 2000)
Elaborado por: Los autores

2.1.3. EL TRANSFORMADOR IDEAL

Definiremos el transformador ideal, como un dispositivo eléctrico que no tiene pérdidas, con un bobinado de entrada y uno de salida con las siguientes propiedades:

- Tiene un coeficiente de acoplamiento (k) igual a la unidad.
- Sus bobinados primario y secundario tienen inductancia infinita.
- No contienen reactancia ni resistencia.
- Su flujo de fuga e inductancia de fuga son cero.
- No tiene pérdidas debidas a resistencia, histéresis o corrientes parásitas, su eficiencia en la transferencia de potencia es 100%.
- La relación de vueltas de transformación (α) es la misma relación de sus voltajes entre sus terminales del primario y secundario, y la misma relación de su corriente del secundario y primario.
- La permeabilidad del núcleo (μ) es infinita.

(Kosow, 1993, pág. 548)

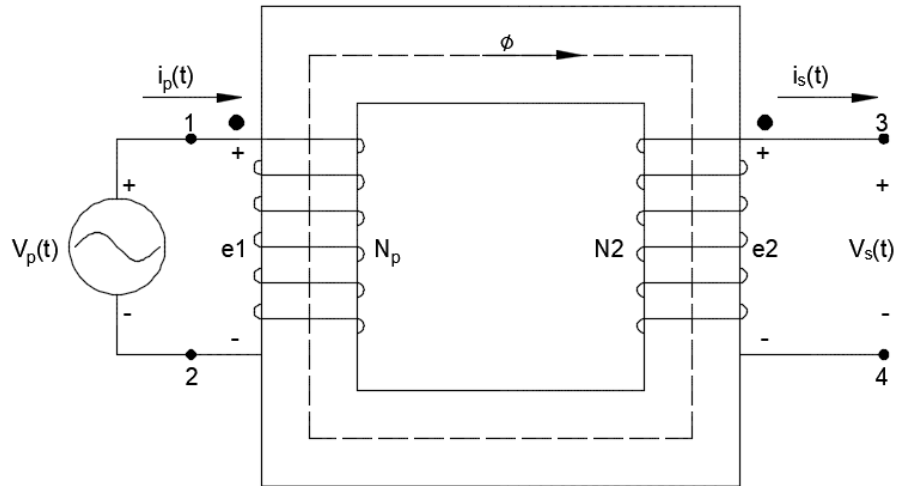


Ilustración 4: Transformador ideal sin carga
Fuente: (Guru & Hiziroglu, 2003)
Elaborado por: Los autores

2.1.3.1. RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

La relación entre los voltajes y corrientes de entrada y salida del transformador están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$a = \frac{N_p}{N_s} ; a = \frac{V_p}{V_s} ; \frac{1}{a} = \frac{I_p}{I_s}$$

Ecuación 2: Relación de transformación en transformadores
Fuente: (Chapman, 2000)

donde, a es la relación de vueltas del transformador, N_p son las vueltas de cable conductor del primario y N_s las vueltas de cable conductor del secundario, V_p es el voltaje aplicado al lado del primario y V_s el voltaje producido en el lado del secundario, I_p es la corriente que ingresa al lado primario del transformador e I_s la corriente que fluye hacia afuera del transformador por el secundario.

El ángulo de fase de V_p es igual que el de V_s , así mismo el ángulo de fase de I_p es el mismo que el de I_s . La relación de vueltas del transformador (a) afecta a las magnitudes, pero no a sus ángulos. (Chapman, 2000, pág. 64)

2.1.3.2. POLARIDAD DEL TRANSFORMADOR

La corriente magnetizante del primario produce un flujo que induce en el secundario una diferencia de potencial que llegará a su máximo al mismo momento que el voltaje aplicado del lado del primario. Es decir, en un instante de tiempo el borne 1 del primario 1 y el borne 3 del secundario tendrán la misma polaridad, así como el borne 2 del primario y el borne 4 del secundario. Para indicar esto los transformadores usan la convención de puntos, se colocan puntos grandes a lado del par de terminales que tienen la misma polaridad, 1 y 3 o 2 y 4 (ilustración 4) y se aplican las siguientes reglas:

1. Una corriente que entra a la terminal del lado primario que tiene marca de polaridad produce una fuerza magnetomotriz (fmm) “positiva” y un flujo “positivo”, la corriente secundaria fluirá hacia afuera de la terminal con marca de polaridad y la dirección de la fmm y el flujo será “negativa”. Es decir, las 2 corrientes producen fmm que se contrarrestan entre sí.
2. Las terminales con marca de polaridad tendrán el mismo signo en función del tiempo, cada una con respecto a su otra terminal del lado primario o secundario correspondiente.

(Wildi, 2007, pág. 186)

2.1.3.3. DIAGRAMA FASORIAL TRANSFORMADOR IDEAL BAJO CARGA

Si conectamos una carga al devanado secundario del transformador que consideramos ideal, inmediatamente una corriente I_2 fluirá, dada por la ecuación:

$$I_2 = \frac{E_2}{Z}$$

Ecuación 3: Ley de Ohm

Fuente: (Wildi, 2007)

Suponiendo que se conecta una carga resistiva, la corriente I_2 se atrasará un ángulo θ con respecto a E_2 . El flujo Φ_m se atrasará 90° con respecto a E_g , pero para esto no es requisito una corriente magnetizante I_m para crear este flujo debido a que el transformador es ideal (ilustración 5). Como ya sabemos las corrientes están en fase, por lo que aumentarán o disminuirán al mismo tiempo y se mantienen las relaciones de transformación vistas anteriormente, lo que perdemos en voltaje se gana en corriente y viceversa. Esto coincide con el requisito de que la entrada de potencia aparente $E_1 I_1$ al devanado primario debe ser la misma que a la salida de potencia aparente $E_2 I_2$ del devanado secundario. (Wildi, 2007, pág. 189)

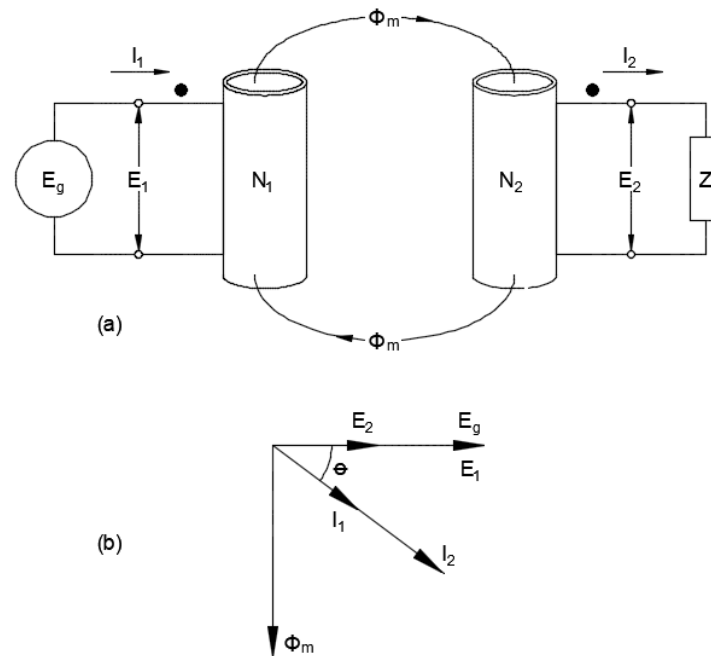


Ilustración 5: Transformador ideal con carga
Fuente: (Wildi, 2007)
Elaborado por: Los autores

2.1.3.4. POTENCIA DEL TRANSFORMADOR IDEAL

Las potencias de un transformador, tanto de entrada como de salida, y considerando que el transformador es ideal, deben ser la misma, y esta dada por la ecuación:

$$\begin{aligned}P_{in} &= P_{out} \\P_{in} &= V_p I_p \cos \theta_p \\P_{out} &= V_s I_s \cos \theta_s\end{aligned}$$

Ecuación 4: Potencia activa del transformador ideal
Fuente: (Chapman, 2000)

donde θ_p es el ángulo entre la corriente y el voltaje del primario y θ_s es el ángulo entre la corriente y el voltaje del secundario. En un transformador ideal, los ángulos de la corriente y voltaje no se afectan y los devanados primario y secundario tienen el mismo factor de potencia.

Esta relación también aplica a las potencias reactiva Q y aparente S :

$$\begin{aligned}Q_{in} &= V_p I_p \sin \theta = V_s I_s \sin \theta = Q_{out} \\S_{in} &= V_p I_p = V_s I_s = S_{out}\end{aligned}$$

Ecuación 5: Potencia reactiva y aparente del transformador ideal
Fuente: (Chapman, 2000)

2.1.4. EL TRANSFORMADOR REAL

Un transformador real tiene diferentes características que se aproximan a las de un transformador ideal hasta cierto punto. En el mundo real, los núcleos no son infinitamente permeables y los devanados tienen resistencia. No todo el flujo producido por el devanado primario es captado por el secundario, por lo tanto, debemos considerar el flujo de dispersión. También los núcleos de hierro producen pérdidas por histéresis y corrientes parásitas, que producen que se eleve la temperatura del transformador. (Wildi, 2007, pág. 197)

2.1.4.1. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR

Las principales pérdidas que suceden en un transformador real, y que deben considerarse para la construcción de un modelo aproximado son:

- Las pérdidas en el cobre (I^2R) que son pérdidas causadas por calentamiento resistivo en los bobinados.
- Pérdidas por calentamiento resistivo en el núcleo o corrientes parásitas.
- Pérdidas relacionadas con los reordenamientos de los dominios magnéticos en el núcleo durante cada semiciclo o también llamadas por histéresis.
- Flujo disperso. Los flujos Φ_{LP} y Φ_{LS} que se dispersan del núcleo y que únicamente pasan por uno de los bobinados son flujos dispersos y la fuga de estos crea una autoinductancia en los devanados primario y secundario.

(Chapman, 2000, pág. 82)

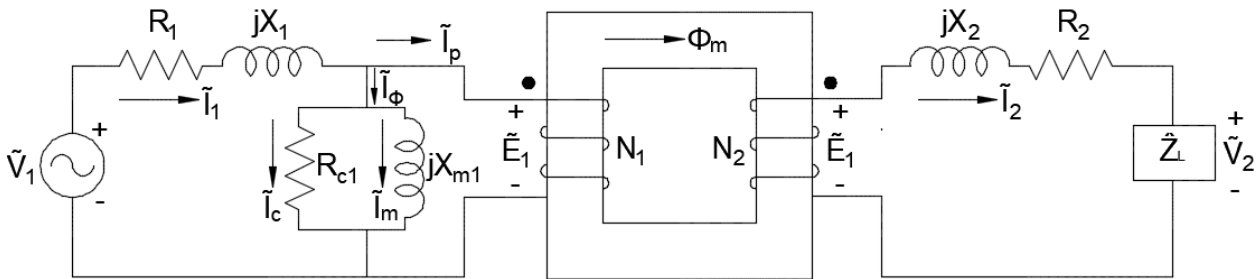


Ilustración 6: Circuito equivalente de un transformador real

Fuente: (Guru & Hiziroglu, 2003)

Elaborado por: Los autores

2.1.4.2. RESISTENCIA DEL DEVANADO

Todo devanado presenta resistencia por más pequeña que pueda ser. Esto se puede representar agregando una resistencia R_1 y R_2 en serie a cada devanado igual a la resistencia del mismo (ver ilustración 6). La inclusión de estas resistencias define lo siguiente:

- a) La potencia de salida debe ser menor que la potencia de entrada.
- b) La fem inducida no es igual a la diferencia de potencial en los terminales.
- c) La eficiencia de un transformador real es menor que %100.

(Guru & Hiziroglu, 2003, pág. 213)

2.1.4.3. FLUJO DE DISPERSIÓN

Cada devanado crea su propio flujo, pero no todo se confina al núcleo magnético, una parte sigue su camino a través del aire y es conocido como flujo de dispersión, el flujo que llega a ambos devanados y que circula en el núcleo se denomina flujo mutuo. Esto es posible de modelar como si fueran dos devanados, uno responsable del flujo de dispersión hacia el aire y el otro de circundar el núcleo. El flujo de dispersión afecta el rendimiento del transformador y es responsable de la caída de voltaje a través de él, por lo que se puede representar con una reactancia de dispersión X_1 y X_2 (ver ilustración 6). (Guru & Hiziroglu, 2003, pág. 214)

2.1.4.4. PERMEABILIDAD FINITA

En un transformador real, el núcleo tiene pérdidas en el núcleo y su permeabilidad es finita. El devanado primario absorbe una corriente conocida como corriente de excitación \tilde{I}_ϕ proveniente de la fuente, que es la suma de dos corrientes: la corriente de pérdida en el núcleo \tilde{I}_c y la corriente de magnetización \tilde{I}_m .

$$\tilde{I}_\phi = \tilde{I}_c + \tilde{I}_m$$

Ecuación 6: Corriente de excitación de un transformador real
Fuente: (Guru & Hiziroglu, 2003)

La corriente de pérdida en el núcleo explica la pérdida magnética (pérdida por corrientes parásitas y por histéresis) en el núcleo del transformador. La corriente de magnetización es la responsable de mantener en el núcleo el flujo mutuo.

$$\tilde{I}_c = \frac{\tilde{E}_1}{R_{c1}}$$

Ecuación 7: Corriente de pérdida en el núcleo de un transformador real
Fuente: (Guru & Hiziroglu, 2003)

$$X_{m1} = \frac{\tilde{E}_1}{j\tilde{I}_m}$$

Ecuación 8: Reactancia de magnetización de un transformador real
Fuente: (Guru & Hiziroglu, 2003)

Al incrementar la carga en el transformador sucede lo siguiente:

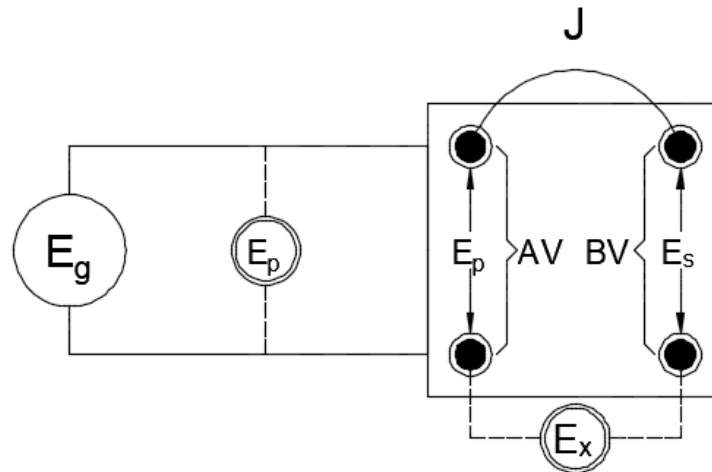
- Aumenta la corriente en el devanado secundario.
- Incrementa la corriente suministrada por la fuente.
- Aumenta la caída de voltaje a través de la impedancia del devanado primario \hat{Z}_1 .
- Se reduce La fem inducida \tilde{E}_1 .
- Debido al decremento en la corriente de magnetización el flujo mutuo se reduce.

(Guru & Hiziroglu, 2003, pág. 218)

2.1.4.5. PRUEBA DE POLARIDAD

Las terminales en los transformadores de instrumento indican su polaridad por medio de puntos, mientras que en los transformadores de potencia para el devanado de alto voltaje (AV) están designados por los símbolos H_1 y H_2 y para el devanado de bajo voltaje (BV) por X_1 y X_2 . Por convención, H_1 tiene la misma polaridad que X_1 . (Wildi, 2007, pág. 204)

Un transformador puede tener polaridad aditiva o sustractiva, y para determinar esto procedemos de la siguiente forma (ver ilustración 7):



*Ilustración 7: Prueba de polaridad de un transformador
Fuente: (Wildi, 2007)
Elaborado por: Los autores*

- El devanado de alto voltaje se conecta a una fuente de ca E_g de bajo voltaje (120 V).
- Se Conecta un puente J entre 2 terminales AV y BV que estén juntas cualesquiera.
- Se conecta un voltímetro E_x entre las otras 2 terminales AV y BV que estén juntas.
- Se conecta otro voltímetro E_p a través del devanado AV.

Si E_x da una lectura más menor que E_p , la polaridad es sustractiva. Esto quiere decir que H_1 y X_1 están adyacentes. Por otra parte, si E_x da una lectura más alta que E_p , la polaridad es aditiva y las terminales H_1 y X_1 están opuestas. (Wildi, 2007, pág. 204)

2.1.4.6. PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO Y DE CORTOCIRCUITO

Para conocer los valores reales de las R_m , X_m , R_p y X_p (resistencias y reactancias magnetizantes y del devanado referido al primario) de un transformador, se realiza una prueba de circuito abierto y cortocircuito.

Para la prueba de circuito abierto o también conocida como ensayo en vacío, se aplica un voltaje nominal al devanado primario y se mide la corriente I_0 , el voltaje E_p y la potencia activa

P_m . Además, se mide el voltaje E_s de circuito abierto en el secundario (ver ilustración 8). Estos valores nos proporcionan la siguiente información:

Potencia activa absorbida por el núcleo = P_m

Potencia aparente absorbida por el núcleo = $S_m = E_p I_0$

Potencia reactiva absorbida por el núcleo = Q_m . Donde $Q_m = \sqrt{S_m^2 - P_m^2}$

Resistencia R_m corresponde a la pérdida en el núcleo es $R_m = E_p^2 / P_m$

La reactancia magnetizante $X_m = E_p^2 / Q_m$

La relación de vueltas $a = N_1 / N_2 = E_p / E_s$

(Wildi, 2007, pág. 212)

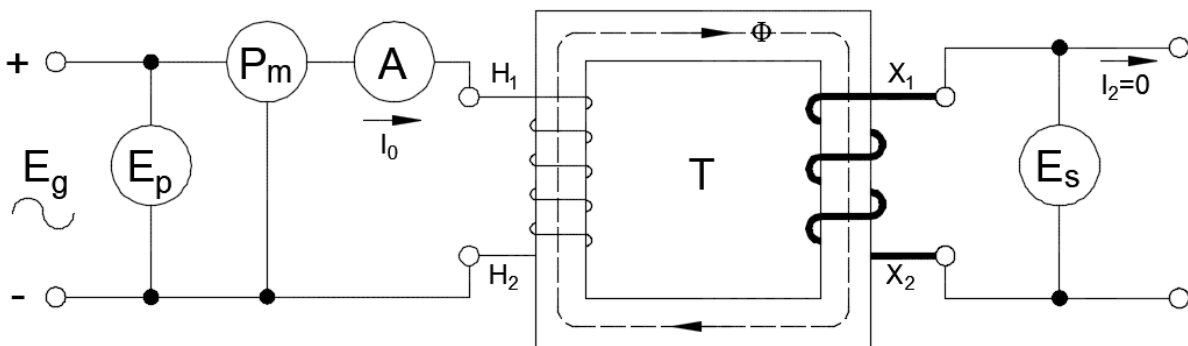


Ilustración 8: Esquema eléctrico del ensayo en vacío

Fuente: (Mora, 2003)

Elaborado por: Los autores

Para la prueba de cortocircuito, el bobinado secundario se cortocircuita y se conecta un voltaje E_g mucho menor que el nominal en el primario. Se mide el voltaje E_{sc} , la corriente I_{sc} y la potencia P_{sc} y se realizan los siguientes cálculos:

La impedancia total del transformador desplazada al primario es $Z_p = E_{sc} / I_{sc}$

La resistencia total del transformador desplazada al primario es $R_p = P_{sc} / I_{sc}^2$

La reactancia de dispersión total del transformador desplazada al primario es $X_p = \sqrt{Z_p^2 - R_p^2}$

(Wildi, 2007, pág. 213)

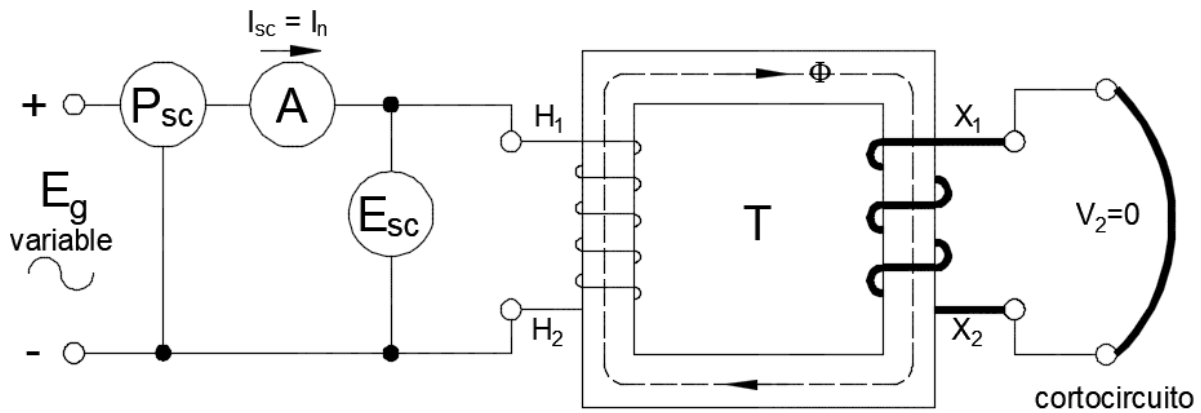


Ilustración 9: Esquema eléctrico del ensayo de cortocircuito

Fuente: (Mora, 2003)

Elaborado por: Los autores

2.1.4.7. CONEXIÓN EN SERIE Y EN PARALELO DE DEVANADOS DE TRANSFORMADOR

Un transformador de varios devanados o diversos transformadores individuales se pueden conectar ya sea en serie o en paralelo para obtener diversos voltajes (ver ilustración 10). Tomando de ejemplo un transformador con dos devanados de alto voltaje a 115V y dos devanados de bajo voltaje de 10V cada uno, cuando se conectan bobinas en paralelo, se conectan los terminales que tienen el mismo voltaje y polaridad. Cuando las bobinas se conectan en serie, las terminales de polaridad opuesta se conectan en la unión de modo que los voltajes se sumen. Si se conectan al contrario los voltajes inducidos se opondrían entre sí, dando voltaje de salida cero. (Kosow, 1993, pág. 609)

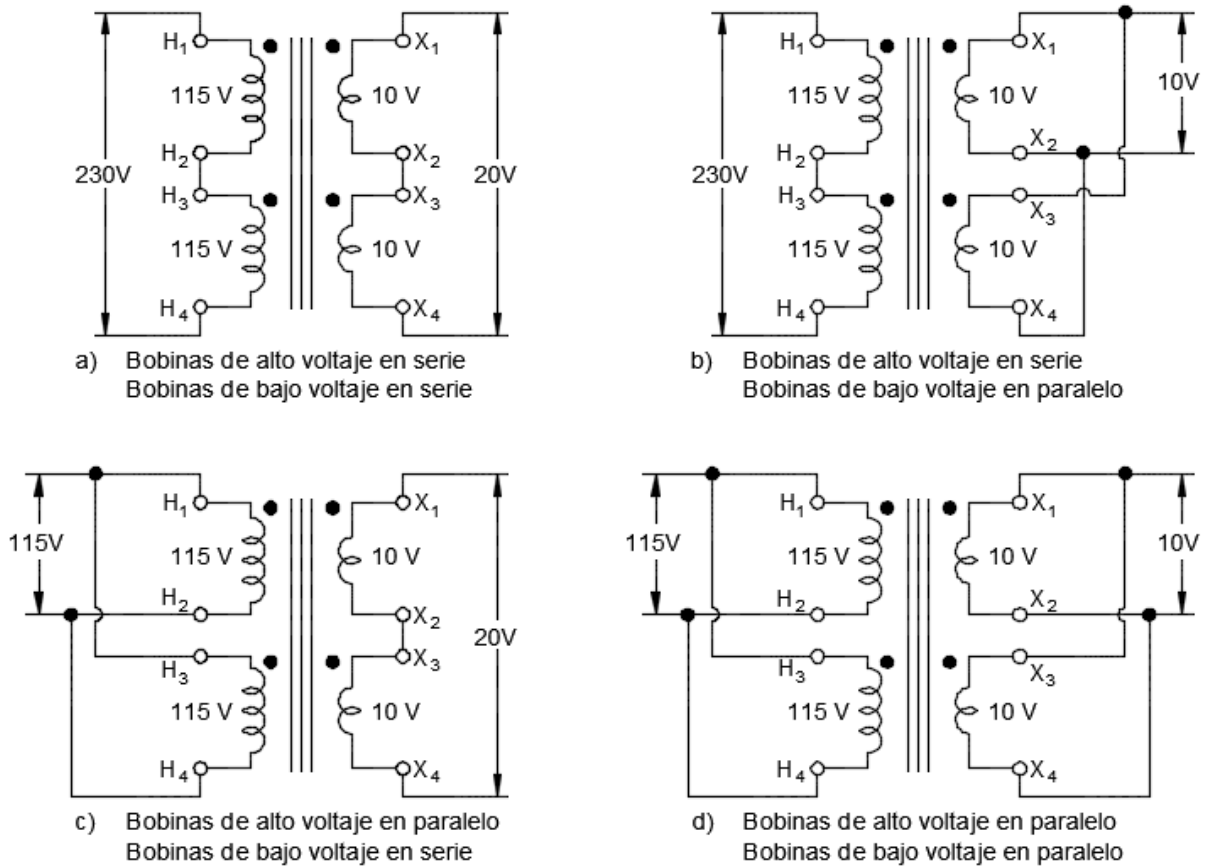


Ilustración 10: Conexión serie y paralelo de devanados de transformadores de igual voltaje
Fuente: (Kosow, 1993)
Elaborado por: Los autores

2.1.5. EL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Los transformadores trifásicos son alimentados por un sistema trifásico que consta de tres voltajes de igual magnitud, pero desfasados 120° entre sí. Usualmente se construyen de dos maneras, una de estas es por medio de tres transformadores monofásicos y conectarlos en un banco trifásico, cuya ventaja es que se puede reemplazar cada unidad individualmente en caso de falla. La otra manera es construyendo un transformador trifásico que consta de tres conjuntos de devanados sobre un núcleo común que también puede ser del tipo núcleo o acorazado. Este último es preferible ya que es más barato, pequeño, liviano y un poco más eficiente. (Chapman, 2000, pág. 117)

2.1.5.1. SECUENCIA DE FASES

Esto es, en que orden los tres voltajes de línea se vuelven positivos sucesivamente. Suponga que los vectores a, b, c están a intervalos de 120° girando lentamente (ver ilustración 11). Si los vectores giran en sentido contrario a las manecillas del reloj, las letras aparecen en la siguiente secuencia a-b-c-a llamada secuencia positiva. En el caso contrario, la secuencia se vuelve a-c-b-a llamada secuencia negativa. Además, podemos cambiar la secuencia solo con intercambiar dos letras cualesquiera. (Wildi, 2007, pág. 175)

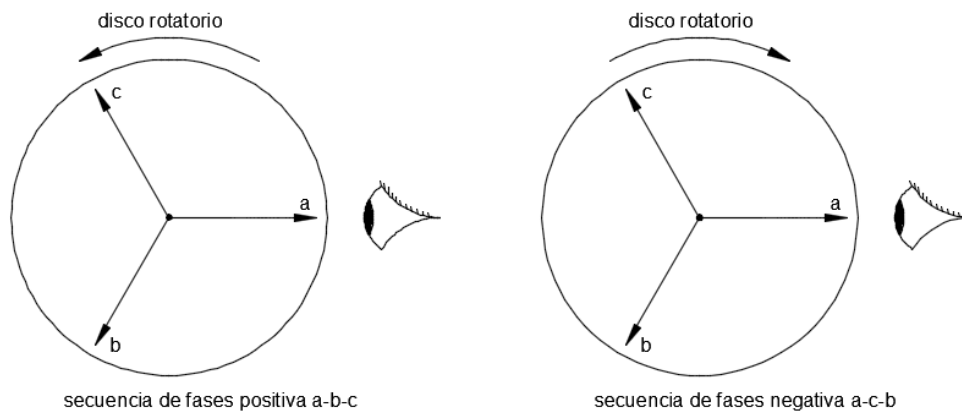


Ilustración 11: Secuencias de fases

Fuente: (Wildi, 2007)

Elaborado por: Los autores

2.1.5.2. CONEXIÓN ESTRELLA – ESTRELLA (Y-y)

La principal ventaja de la conexión Y-y es que se tiene acceso a una terminal neutra en cada lado del transformador y el aislamiento eléctrico se esfuerza únicamente alrededor de 58% del voltaje de línea, así el devanado de un transformador que esté conectado en estrella tendrá menos espiras, un conductor de mayor sección proporcionando devanados mecánicamente fuertes y su construcción menos costosa en comparación a su equivalente conectado en delta, por tales razones esta conexión se considera beneficiosa cuando han de conectarse dos sistemas de

tensiones altas y en determinados casos es ventajoso que no existe desplazamiento de fase entre las tensiones de las bobinas primaria y secundaria, pero tiene dos problemas graves:

- Si el circuito del transformador tiene cargas desbalanceadas, los voltajes de las fases pueden desbalancearse de manera severa.
- Pueden ser grandes los voltajes de terceras armónicas.

Ambos problemas, se pueden solucionar mediante las siguientes técnicas:

1. Los neutros de los transformadores deben aterrizarse sólidamente.
2. Adicionando un tercer devanado (terciario), conectado en Delta, al bando de transformadores.

(Chapman, 2000, pág. 120)

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = a$$

Ecuación 9: Relación de vueltas de transformador conexión Y-y
Fuente: (Chapman, 2000)

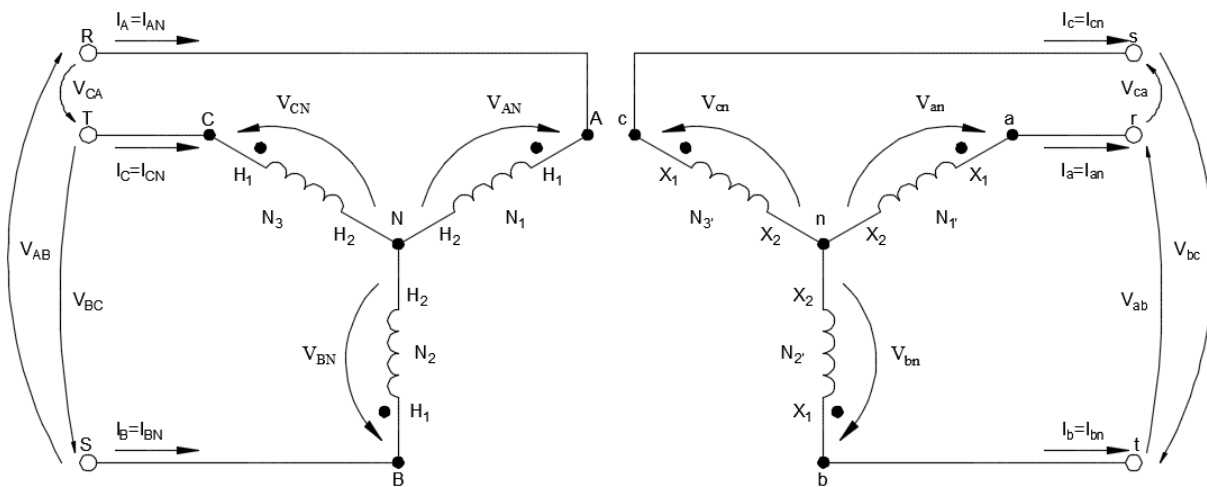
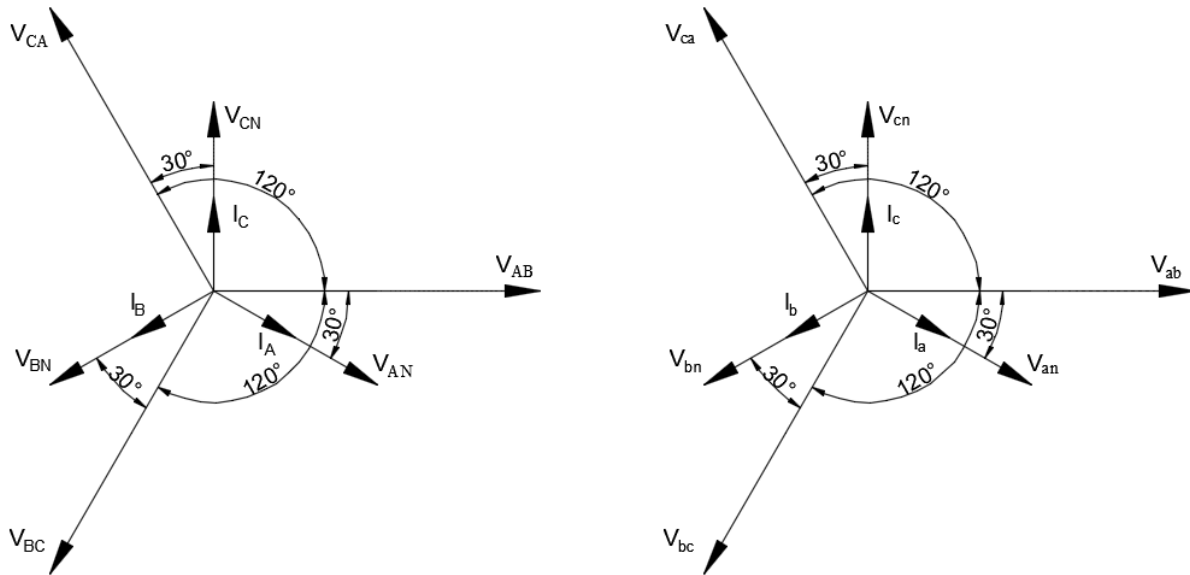


Ilustración 12: Esquema de transformador trifásico conexión Y-y
Fuente: (Chapman, 2000)
Elaborado por: Los autores



*Ilustración 13: Diagrama fasorial de transformador trifásico conexión Y-y
Fuente: (Hayt, Kemmerly, & Durbin, 2007)
Elaborado por: Los autores*

2.1.5.3. CONEXIÓN ESTRELLA – DELTA (Y-d)

Esta conexión es muy adaptable para transformadores en sistemas de alta tensión en el extremo reductor de tensión de la línea y no tiene problemas por componente de tercera armónica en sus voltajes debido a que son consumidos en una corriente que circula en el devanado Delta y es más estable frente a cargas desbalanceadas puesto que la Delta redistribuye de forma parcial cualquier desbalance. Sin embargo, también presenta un problema, el voltaje y la corriente en el primario están fuera de fase con el voltaje y la corriente en el secundario, el voltaje secundario está desfasado 30° con relación al voltaje primario del transformador que en la puesta en paralelo de los secundarios de dos bancos de transformadores puede causar problemas.

(Chapman, 2000, pág. 123)

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = \sqrt{3}a$$

*Ecuación 10: Relación de vueltas de transformador conexión Y-d
Fuente: (Chapman, 2000)*

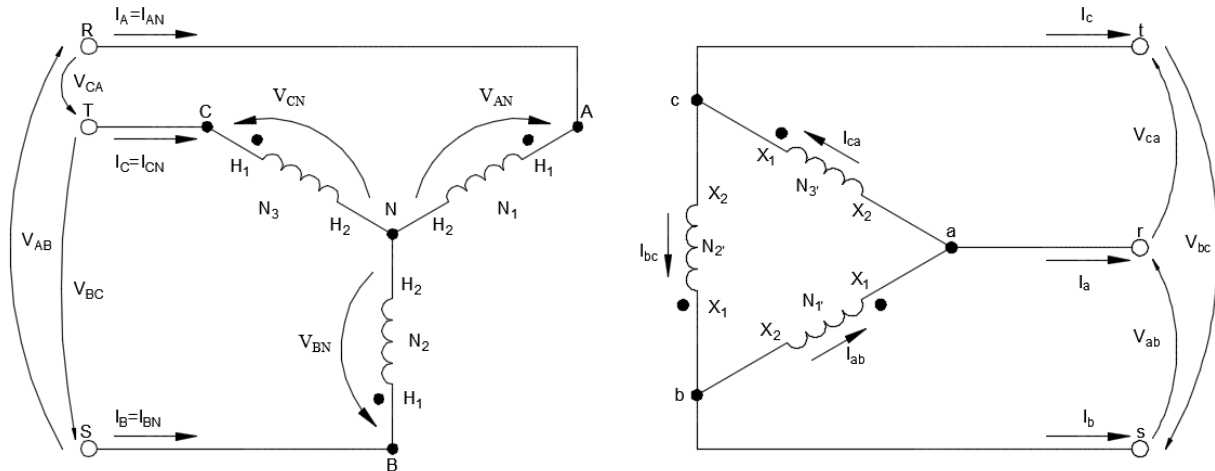


Ilustración 14: Esquema de transformador trifásico conexión Y-d
Fuente: (Chapman, 2000)
Elaborado por: Los autores

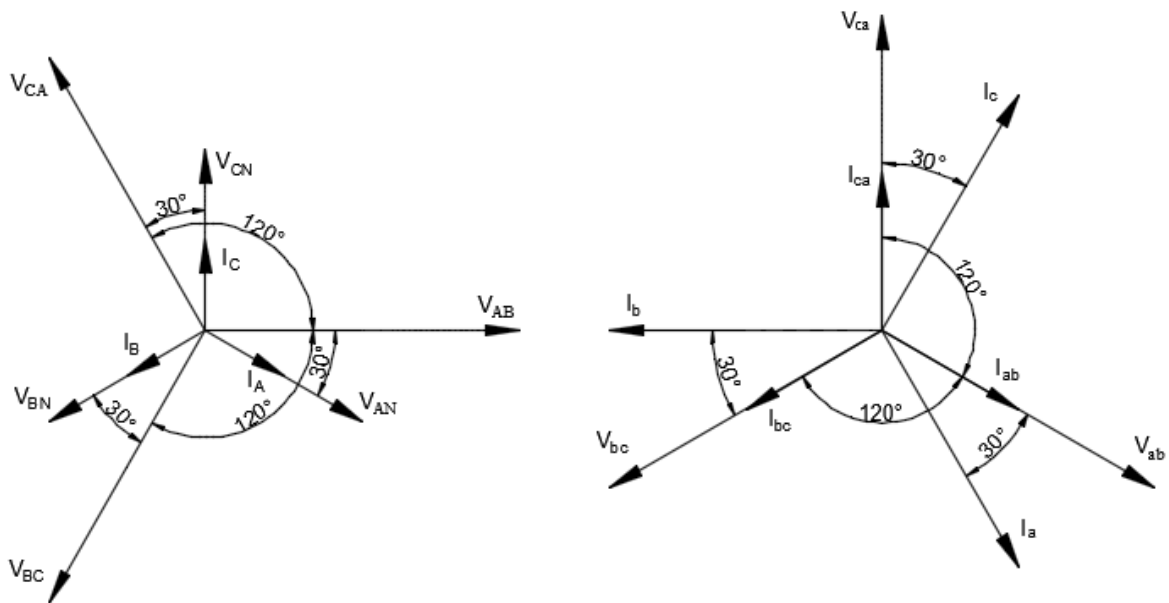


Ilustración 15: Diagrama fasorial de transformador trifásico conexión Y-d
Fuente: (Hayt, Kemmerly, & Durbin, 2007)
Elaborado por: Los autores

2.1.5.4. CONEXIÓN DELTA – ESTRELLA (D-y)

Esta conexión es apropiada para transformadores elevadores en redes de alta tensión, el empleo de la conexión en estrella en la parte de alta tensión permite poner a tierra el punto

neutro, que permite limitar el potencial sobre cualquiera de las fases a la tensión simple del sistema reduciendo el coste de los devanados de Alta Tensión. Tiene las mismas ventajas y desventajas que el caso del transformador Y-d, es decir que presenta el mismo desfase entre primario y secundario. Actualmente se aprovecha también en los transformadores de distribución, correspondiendo la estrella del lado de baja tensión, para satisfacer los requerimientos tanto de cargas monofásicas como trifásicas, para esto se utiliza un secundario de cuatro conductores y las cargas monofásicas son alimentadas por los tres circuitos línea a neutro, intentando distribuir equitativamente entre las tres fases. (Guru & Hiziroglu, 2003, pág. 257)

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = \frac{\sqrt{3}}{a}$$

Ecuación 11: Relación de vueltas de transformador conexión D-y
Fuente: (Chapman, 2000)

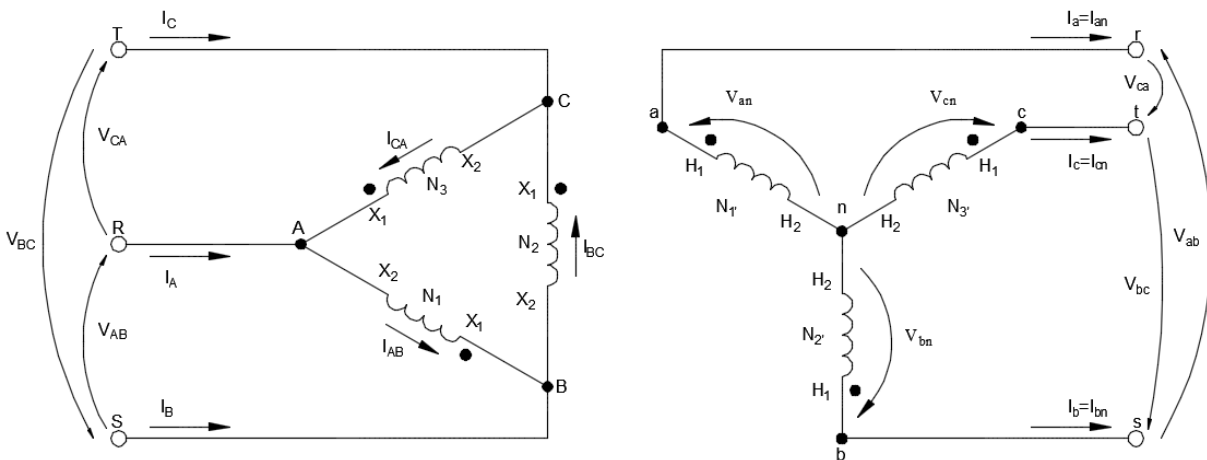


Ilustración 16: Esquema de transformador trifásico conexión D-y
Fuente: (Chapman, 2000)
Elaborado por: Los autores

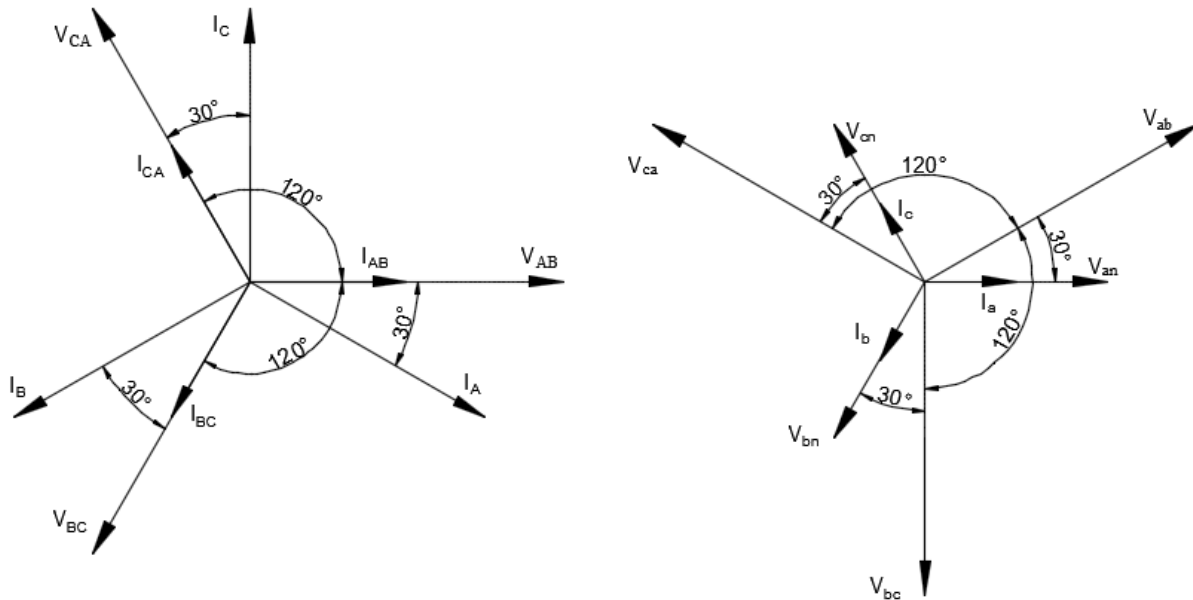


Ilustración 17: Diagrama fasorial de transformador trifásico conexión D-y
Fuente: (Hayt, Kemmerly, & Durbin, 2007)
Elaborado por: Los autores

2.1.5.5. CONEXIÓN DELTA – DELTA (D-d)

Este transformador no presenta desfases asociados a él, o problemas por las cargas desbalanceadas o las armónicas y es útil cuando los voltajes no son altos, ya que se necesitan más espiras/fase de menor sección se utiliza en transformadores de baja tensión, aunque su desventaja es la ausencia de una terminal neutra de cada lado y su aislamiento eléctrico se esfuerza al voltaje de línea, por lo que requerirá un aislamiento más caro que para uno en Y para la misma especificación de potencia. (Mora, 2003, pág. 217)

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a$$

Ecuación 12: Relación de vueltas de transformador conexión D-d
Fuente: (Chapman, 2000)

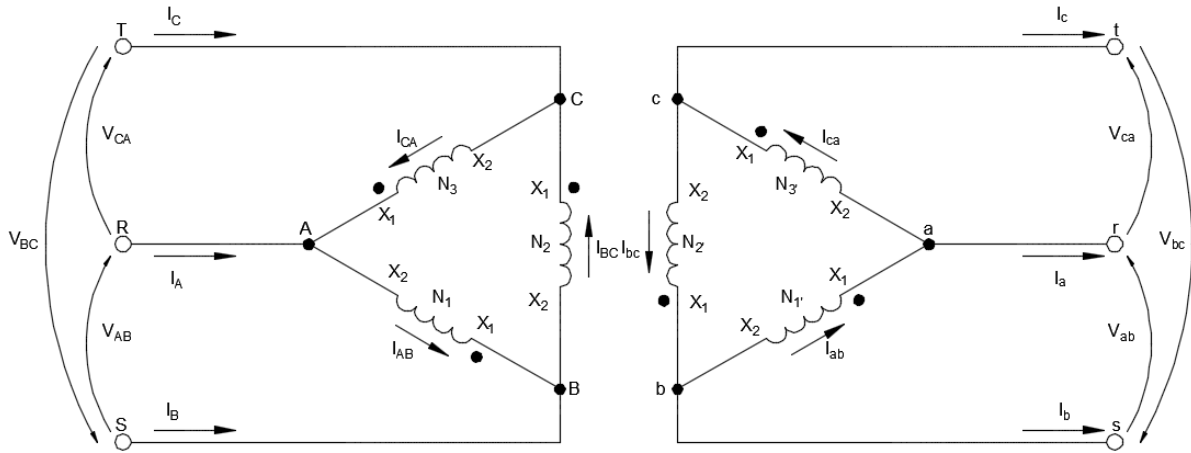


Ilustración 18: Esquema de transformador trifásico conexión D-d
Fuente: (Chapman, 2000)
Elaborado por: Los autores

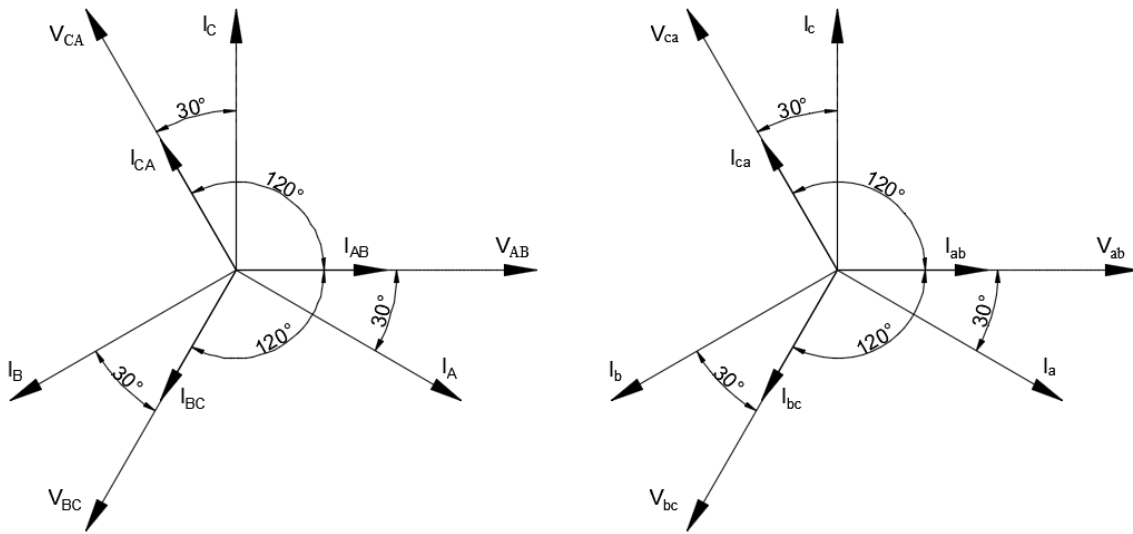


Ilustración 19: Diagrama fasorial de transformador trifásico conexión D-d
Fuente: (Hayt, Kemmerly, & Durbin, 2007)
Elaborado por: Los autores

2.2. IMPEDANCIAS Y TIPOS DE CARGAS ELECTRICAS

Impedancia es la propiedad de un elemento eléctrico para oponerse a la corriente en el dominio de los fasores. Estos elementos pueden ser Resistivos (R), Inductivo (L) y Capacitivo (C) los cuales tienen propiedades eléctricas diferentes. (Robbins & Miller, 2007, pág. 523)

2.2.1. CARGA RESISTIVA

Una carga resistiva se opone a la corriente, y el voltaje y la corriente son directamente proporcionales y están en fase debido a que las formas de onda coinciden. (Hayt, Kemmerly, & Durbin, 2007, pág. 523)

$$Z_R = \frac{V_R}{I} = \frac{V_R \angle \theta}{I \angle \theta} = \frac{V_R}{I} \angle 0^\circ = R \angle 0^\circ = R$$

Ecuación 13: Impedancia resistiva pura
Fuente: (Hayt, Kemmerly, & Durbin, 2007)

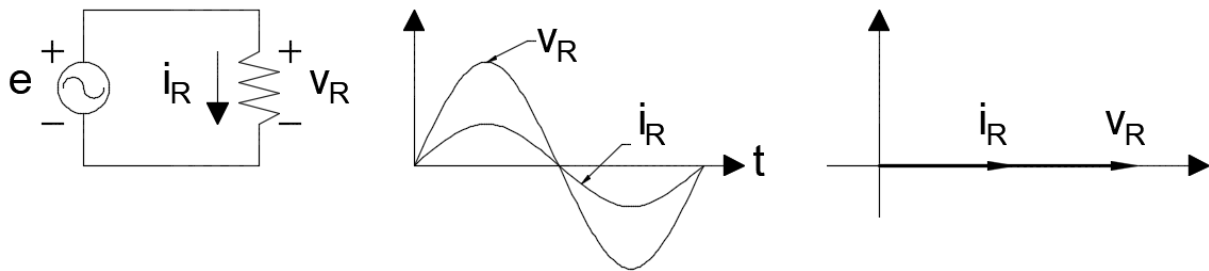


Ilustración 20: Diagramas circuito resistivo puro
Fuente: (Hayt, Kemmerly, & Durbin, 2007)
Elaborado por: Los autores

2.2.2. CARGA INDUCTIVA

Una carga inductiva se opone a cambios en la corriente, debido a esto la corriente se atrasa al voltaje 90° o dicho de otra manera el voltaje se adelanta a la corriente 90° . (Hayt, Kemmerly, & Durbin, 2007, pág. 524)

$$Z_L = \frac{V_L}{I} = \frac{V_L \angle 0^\circ}{I \angle -90^\circ} = \frac{V_L}{I} \angle 90^\circ = \omega L \angle 90^\circ = j\omega L$$

Ecuación 14: Impedancia inductiva pura
Fuente: (Hayt, Kemmerly, & Durbin, 2007)

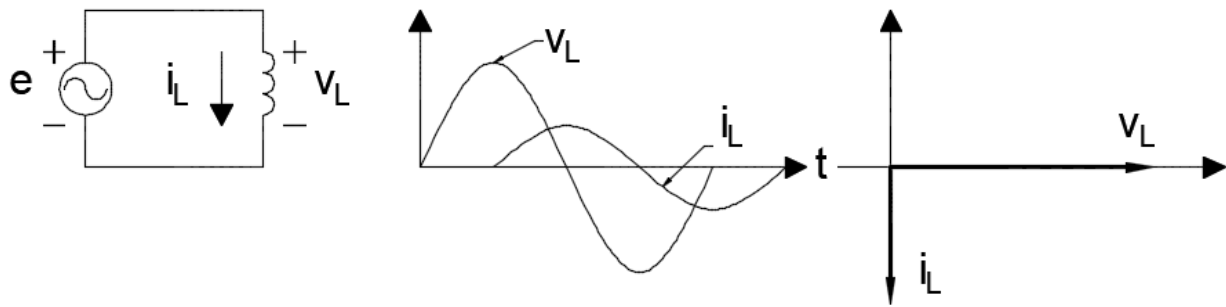


Ilustración 21: Diagramas circuito inductivo puro
Fuente: (Hayt, Kemmerly, & Durbin, 2007)
Elaborado por: Los autores

2.2.3. CARGA CAPACITIVA

Una carga capacitiva se opone a cambios en el voltaje, y la corriente adelanta al voltaje 90° o, dicho de otra manera, el voltaje está en atraso con la corriente en 90°. (Hayt, Kemmerly, & Durbin, 2007, pág. 527)

$$Z_C = \frac{V_C}{I} = \frac{V_C \angle 0^\circ}{I \angle 90^\circ} = \frac{V_C}{I} \angle -90^\circ = \frac{1}{\omega C} \angle -90^\circ = -j \frac{1}{\omega C}$$

Ecuación 15: Impedancia capacitiva pura
Fuente: (Hayt, Kemmerly, & Durbin, 2007)

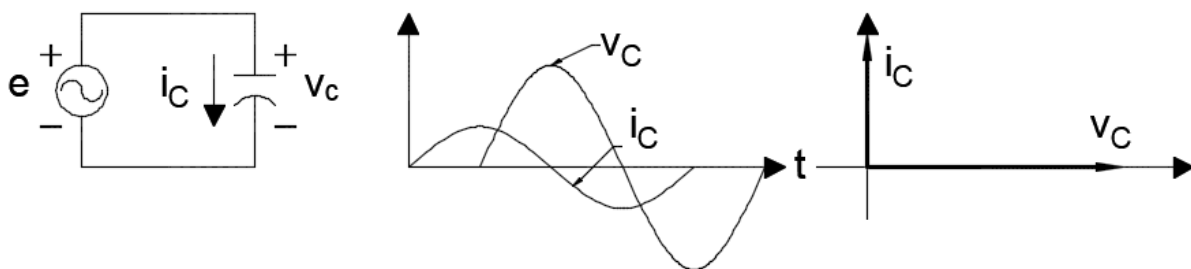


Ilustración 22: Diagramas circuito capacitivo puro
Fuente: (Hayt, Kemmerly, & Durbin, 2007)
Elaborado por: Los autores

2.3. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE

Un Controlador Lógico Programable o PLC según la NEMA se puede definir como “Instrumento electrónico, que utiliza memoria programable para guardar instrucciones sobre la implementación de determinadas funciones, como operaciones lógicas, secuencia de acciones, especificaciones temporales, contadores y cálculos para el control mediante módulos de E/S analógicos o digitales sobre diferentes tipos de máquinas y procesos” y nos ayudara para poder realizar la comunicación de la información del banco de transformadores con la aplicación software.



*Ilustración 23: PLC Schneider TM221CE16R
Fuente: Schneider – Datasheet PLC TM221CE16R*

Main

Range of product	Modicon M221
Product or component type	Logic controller
[Us] rated supply voltage	100...240 V AC
Discrete input number	9 discrete input conforming to IEC 61131-2 Type 1
Analogue input number	2 at input range: 0... 10 V
Discrete output type	Relay normally open
Discrete output number	7 relay
Discrete output voltage	5... 125 V DC 5... 250 V AC
Discrete output current	2 A

*Tabla 1: Características principales PLC marca Schneider TM221CE16R
Fuente: Schneider – Datasheet PLC TM221CE16R*

2.4. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

Para poder realizar la comunicación entre el banco de transformadores y la aplicación software se utilizarán diferentes protocolos de comunicación que permitan una correcta transferencia de información. Un protocolo establece un conjunto de algoritmos, mensajes, reglas y otros mecanismos que permiten a los elementos de una red a comunicarse eficientemente. Establecimiento un formato para la precisión de las reglas que regirán en el intercambio de los mensajes y la elección de esta debe ser previa a la comunicación y conocida por todas las partes involucradas en la misma. Se pueden mencionar tres aspectos independientes de la implementación, que puede ser en hardware o software:

- el aspecto sintáctico que se refiere a la especificación de formatos para los mensajes
- semántico relacionado con la funcionalidad de control para la cual se ha diseñado
- y el sincronismo que define la sintonía de velocidades y secuencias particularmente usadas en la comunicación

(Liberatori, 2018, pág. 34)

2.5. LABVIEW

LabVIEW es un lenguaje de programación gráfico desarrollado para facilitar la recopilación de datos de instrumentos de laboratorio utilizando un sistema de adquisición de datos, haciendo esta tarea definitivamente más fácil usando conectores de cableado para escribir sus programas. LabVIEW se puede utilizar para lo siguiente:

- Adquirir datos de instrumentos
- Procesar datos
- Analizar datos
- Controlar instrumentos y equipos

Para los ingenieros, LabVIEW hace posible traer información del mundo exterior en una computadora, tomar decisiones en base a los datos adquiridos y enviar los resultados computados al mundo para controlar la forma en que una pieza de un equipo funcione. Es decir que este programa nos permitirá primero adquirir los datos del banco de transformadores y posteriormente analizar y simular dichos datos para poder comprobarlos de manera teórica y práctica. (Larsen, 2011, pág. 1)

CAPÍTULO III

3. IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA PARA ADQUISICIÓN DE DATOS

Para implementar el sistema de adquisición de datos del banco de transformadores se necesitarán los siguientes elementos tanto de hardware y software:

- Hardware
 - Modulo del PLC
 - Medidor de parámetros
- Software
 - SoMachine Basic
 - LabVIEW + DSC Module
 - OPC Server

3.1. CONSTRUCCION MÓDULO DEL PLC

Se construirá un módulo que permita interactuar didácticamente con las entradas y salidas digitales y analógicas del PLC, así como de sus puertos de comunicación.



*Ilustración 24: Módulo del PLC
Elaborado por: Los autores*

3.1.1. ELEMENTOS

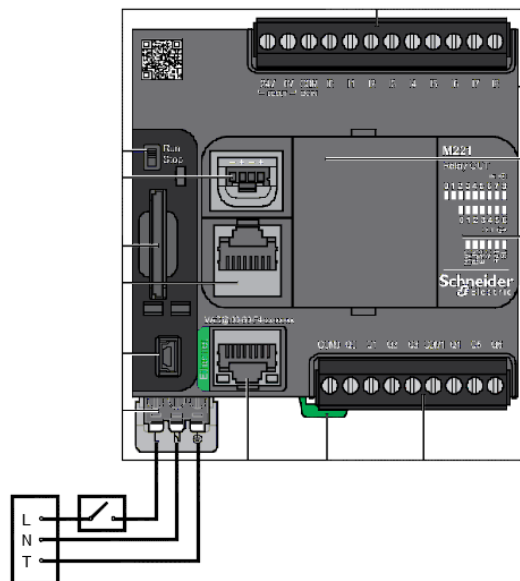
El módulo del PLC contiene los siguientes elementos:

- 1 PLC marca Schneider modelo TM221CE16R
- 7 salidas digitales
 - 7 luces piloto color rojo
- 9 entradas digitales
 - 4 botoneras color verde
 - 5 selectores de 3 posiciones
- 2 entradas analógicas
 - 2 perillas reguladoras de voltaje y 2 pantallas LED

3.1.2. CABLEADO

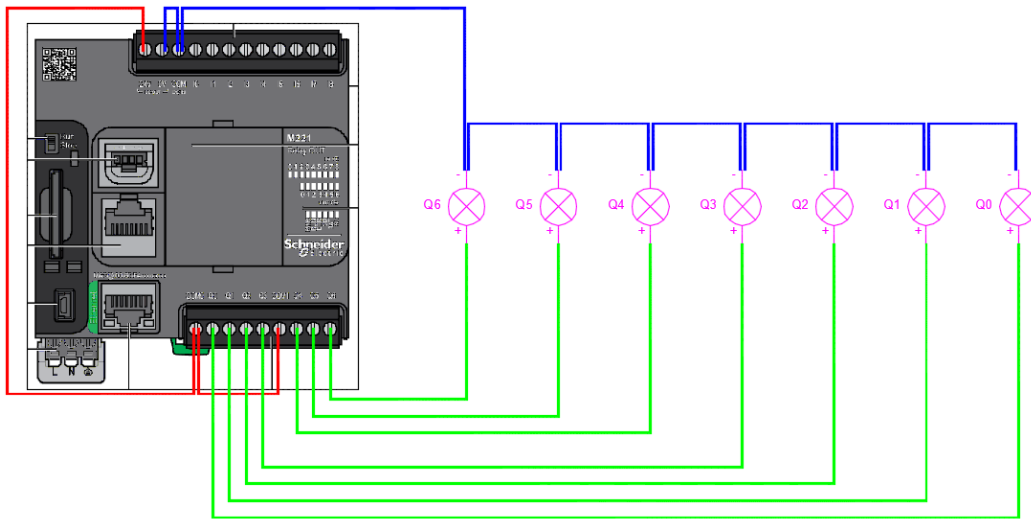
A continuación, detallaremos las conexiones de los elementos en el módulo del PLC.

- Alimentación 120v del PLC con interruptor.



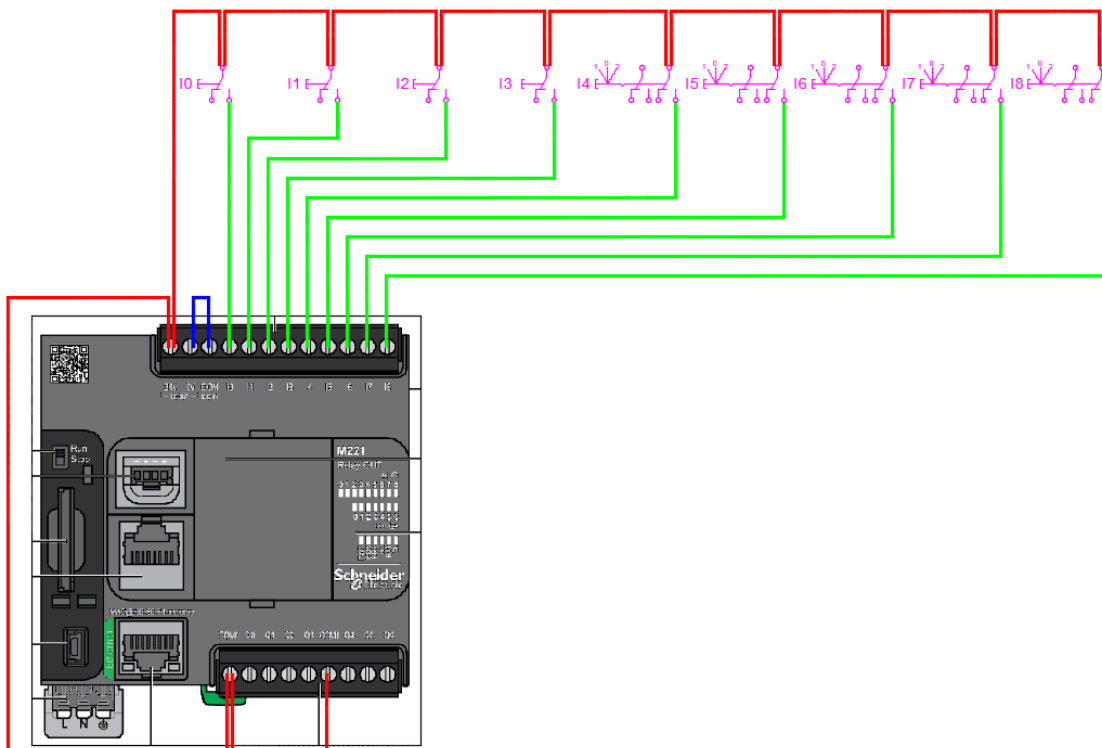
*Ilustración 25: Alimentación del PLC
Elaborado por: Los autores*

- Salidas digitales: 7 luces piloto color rojo.



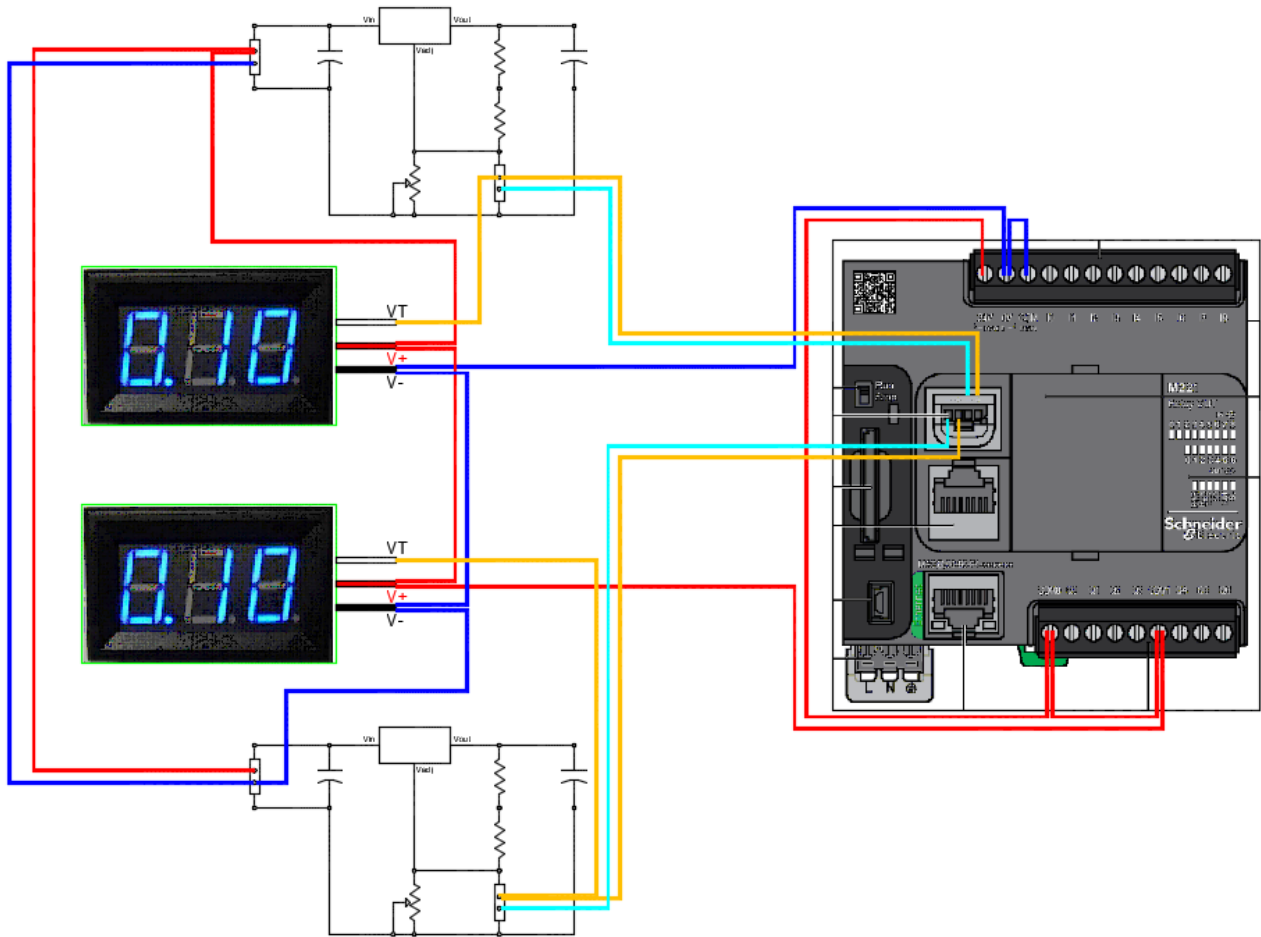
*Ilustración 26: Salidas digitales
Elaborado por: Los autores*

- Entradas digitales: 4 botoneras color verde y 5 selectores de 3 posiciones.



*Ilustración 27: Entradas digitales
Elaborado por: Los autores*

- Entradas analógicas: 2 pantallas led y 2 circuitos reguladores de voltaje de 0 a 10V.



*Ilustración 28: Entradas analógicas
Elaborado por: Los autores*

3.2. SOMACHINE BASIC: CONFIGURACIÓN

Para empezar, necesitamos instalar el programa SoMachine Basic que podemos descargar de la página de Schneider Electric, en este análisis utilizaremos la versión 1.6. Al ejecutar el programa se abrirá una ventana donde elegiremos *Crear un nuevo proyecto*.

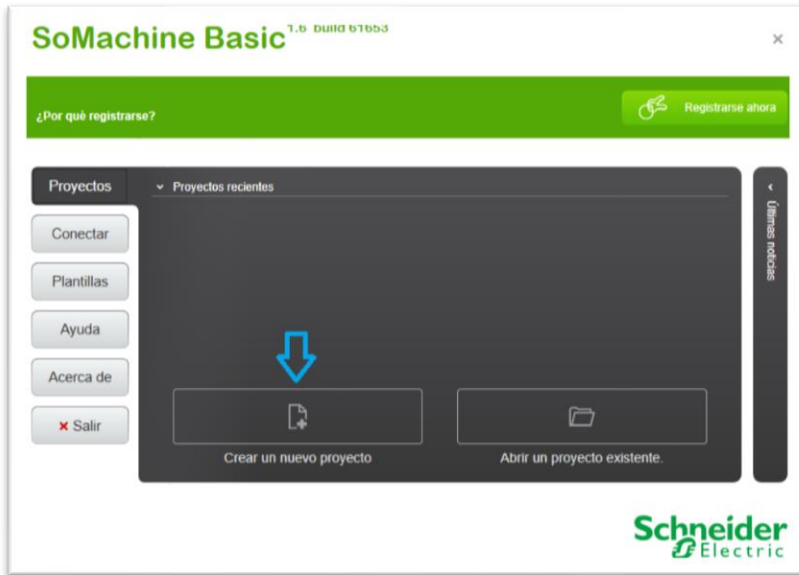


Ilustración 29: Crear un nuevo proyecto
Fuente: SoMachine Basic

En el lado derecho de la pantalla, seleccionar el menú desplegable **M221 Logic Controllers** y en la opción **TM221CE16R** arrastrar hasta la imagen del PLC.

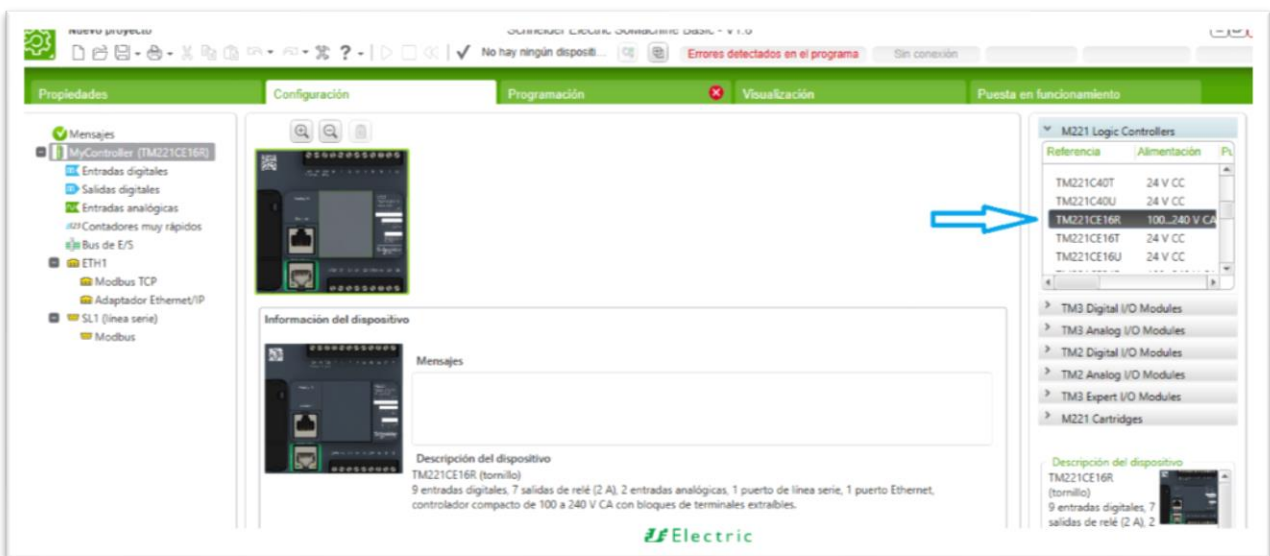


Ilustración 30: Seleccionar modelo del PLC
Fuente: SoMachine Basic

3.2.1. CONEXIÓN ETHERNET: PLC – LAPTOP

Encender el Módulo de adquisición de datos y mediante un cable de red con conectores RJ45, conectar el ordenador con el puerto Ethernet del PLC. En la pestaña de *Puesta en funcionamiento* podemos verificar la dirección IP del PLC.

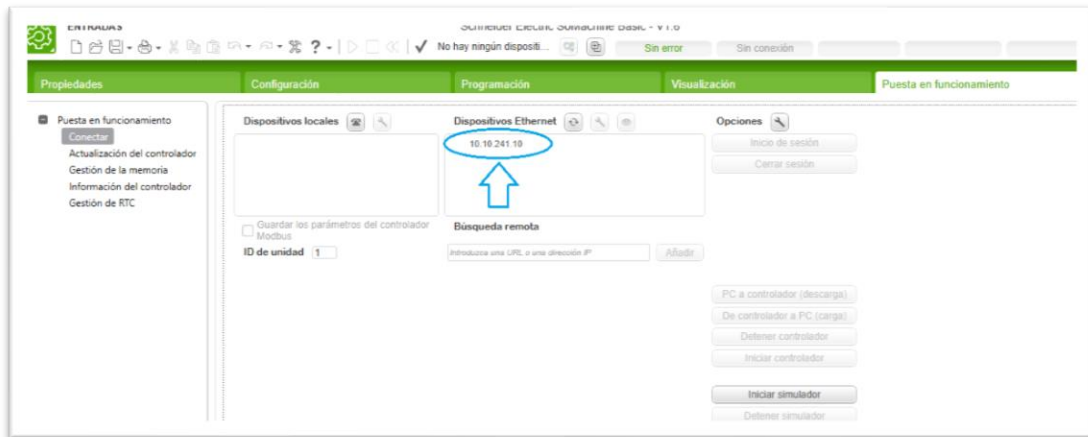


Ilustración 31: Conexión ethernet – Cambiar configuración del adaptador
Fuente: SoMachine Basic

Posteriormente ir a la siguiente ubicación: *Panel de Control / Redes e Internet / Centro de Redes y Recursos Compartidos* / y seleccionar la opción en la parte izquierda *Cambiar configuración del adaptador*.

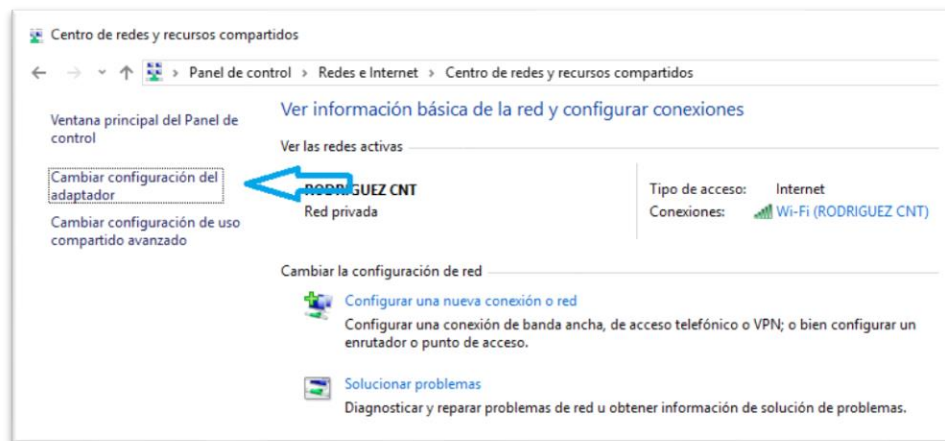


Ilustración 32: Conexión ethernet – Cambiar configuración del adaptador
Fuente: Los autores

Dar clic derecho sobre la red **Ethernet** y seleccionar **Propiedades**.

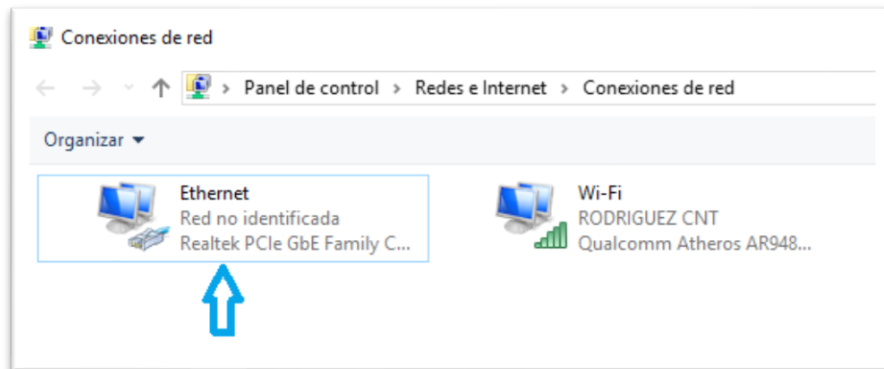


Ilustración 33: Conexión ethernet – Propiedades de la red Ethernet
Fuente: Los autores

Luego dar doble clic sobre la opción **Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4)**.

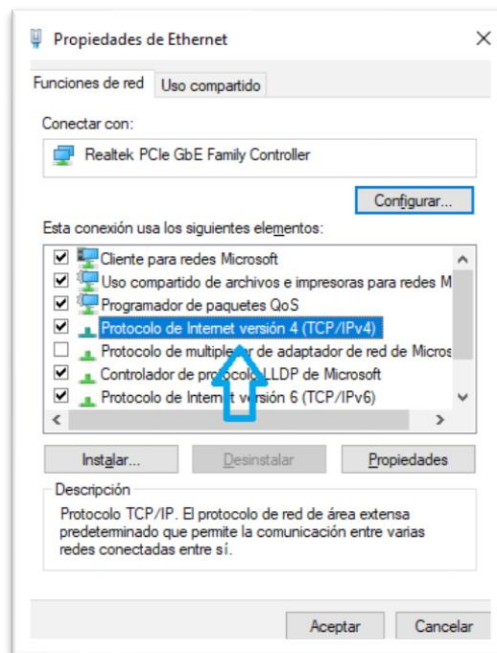


Ilustración 34: Conexión ethernet – Protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4)
Fuente: Los autores

Seleccionar la opción **Usar la siguiente dirección IP**, colocar la dirección IP del PLC modificando el último campo y colocar como mascara de subred 255.255.255.0.

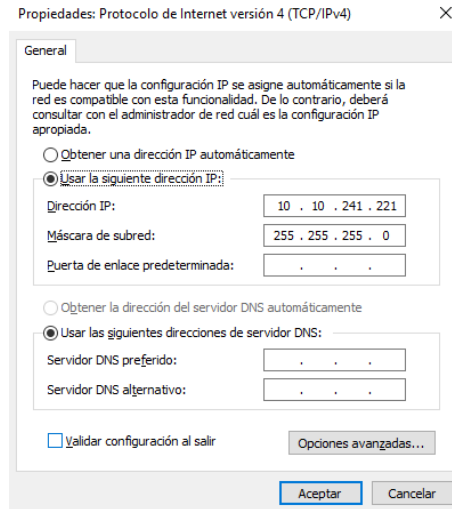


Ilustración 35: Conexión ethernet – Dirección IP y Máscara de subred
Fuente: Los autores

Dar clic en **Aceptar** en las 2 ventanas abiertas. Luego en la pestaña de configuración del programa SoMachine Basic, seleccionar la opción **ETH1** en la parte izquierda y colocar la dirección IP del PLC y la Máscara de Subred configurada previamente y clic en **Aplicar**.

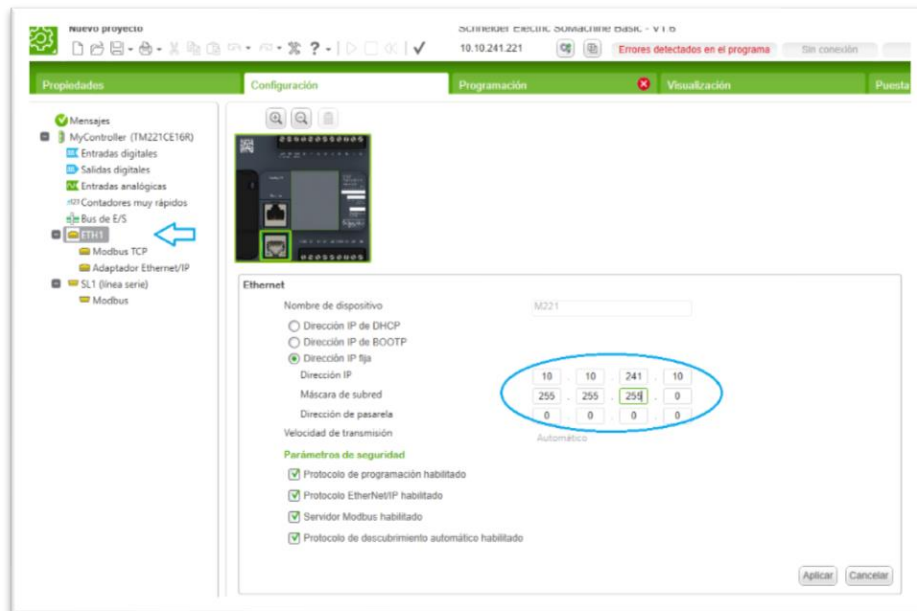
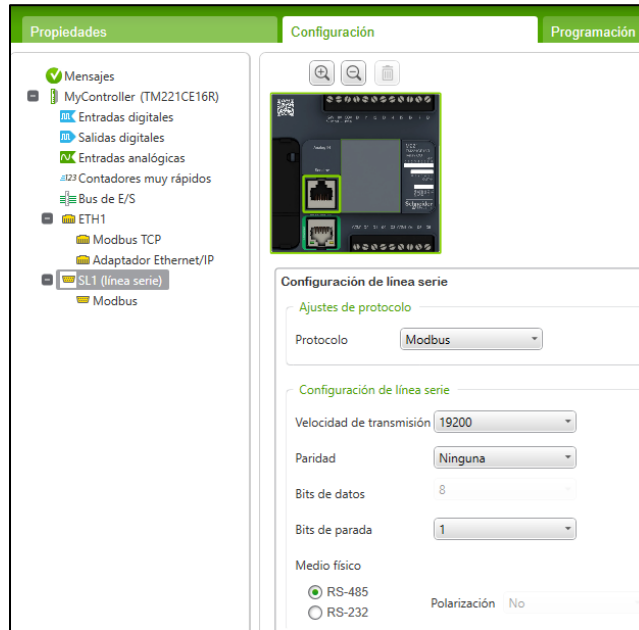


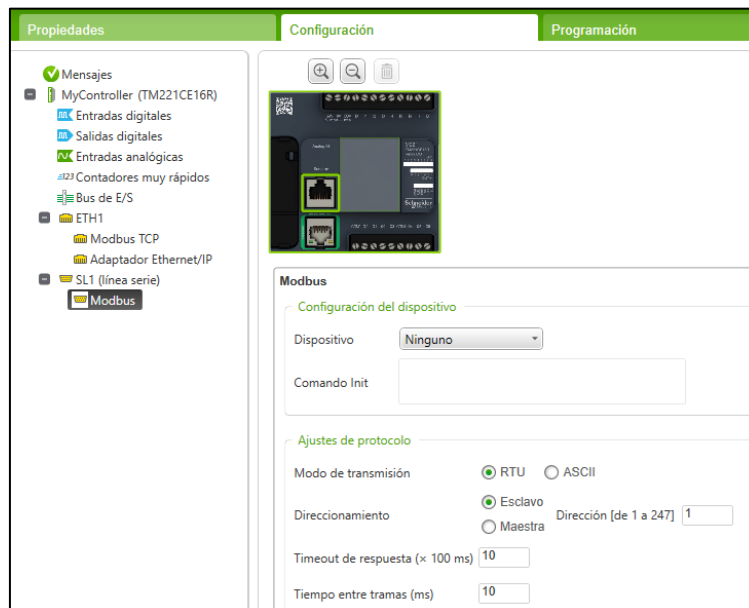
Ilustración 36: Conexión ethernet – Dirección IP y Máscara de subred SoMachine
Fuente: SoMachine Basic

3.2.2. CONEXIÓN SERIAL: PLC – MEDIDOR DE PARÁMETROS

Luego en la opción SL1 (línea serie) y Modbus, realizar la siguiente configuración.



*Ilustración 37: Configuración de conexión Serial
Fuente: SoMachine Basic*



*Ilustración 38: Configuración Modbus
Fuente: SoMachine Basic*

3.3. SOMACHINE BASIC: PROGRAMACIÓN

En la pestaña de **Programación**, en la sección de **Tareas** del lado izquierdo, añadir 4 POU (Program Organization Unit):

1. Digital Inputs
2. Digital Outputs
3. Analog Inputs
4. PM5110

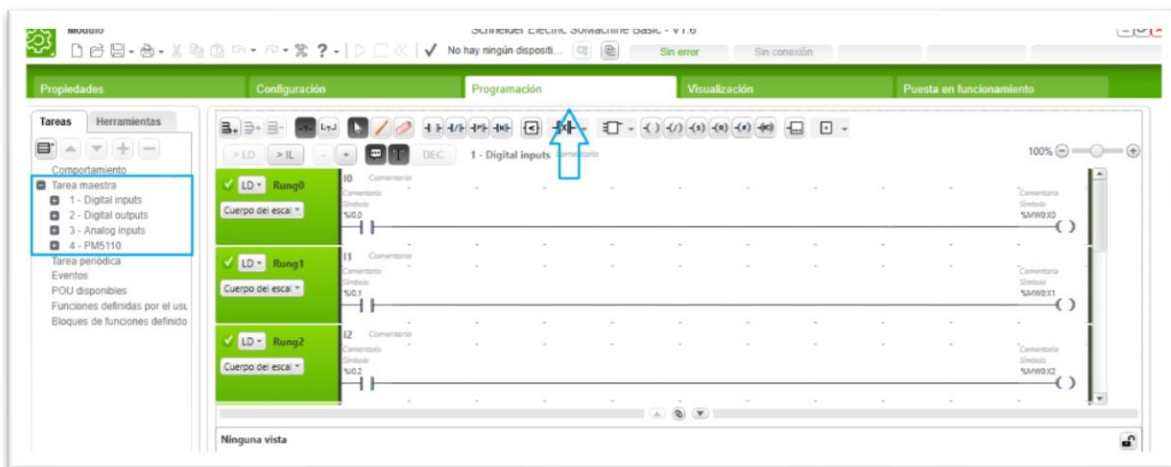


Ilustración 39: Programación - POU
Fuente: SoMachine Basic

3.3.1. PROGRAMACIÓN DE ENTRADAS DIGITALES

En el primer POU (digital inputs) agregar 9 escalones, desde I0 a I8. En cada uno agregar un contacto con los valores de las entradas (%I0.0 a %I0.8) y una bobina donde se almacenarán los valores en las palabras de memoria (%MW0:X0 a %MW0:X8).

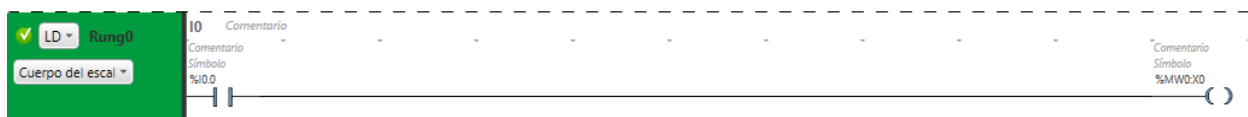


Ilustración 40: Programación – Entradas digitales
Fuente: SoMachine Basic

Entradas digitales	Palabras de memoria
%I0.0	%MW0:X0
%I0.1	%MW0:X1
%I0.2	%MW0:X2
%I0.3	%MW0:X3
%I0.4	%MW0:X4
%I0.5	%MW0:X5
%I0.6	%MW0:X6
%I0.7	%MW0:X7
%I0.8	%MW0:X8

Tabla 2: Programación – Entradas digitales
Fuente: Los autores

3.3.2. PROGRAMACIÓN DE SALIDAS DIGITALES

En el segundo POU (digital outputs) agregar 7 escalones, desde Q0 a Q6. En cada uno agregar un contacto con los valores de las palabras de memoria (%MW2:X0 a %MW2:X6) y una bobina donde se registrarán los valores en las salidas digitales (%Q0.0 a %Q0.6).

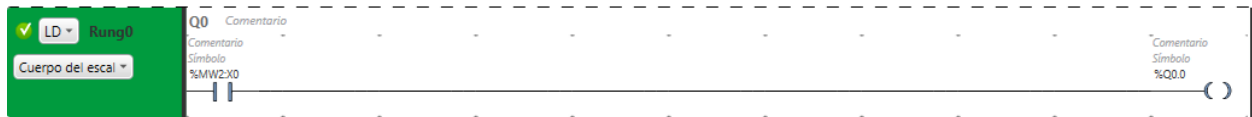


Ilustración 41: Programación – Salidas digitales
Fuente: SoMachine Basic

Palabras de memoria	Salidas digitales
%MW2:X0	%Q0.0
%MW2:X1	%Q0.1
%MW2:X2	%Q0.2
%MW2:X3	%Q0.3
%MW2:X4	%Q0.4
%MW2:X5	%Q0.5
%MW2:X6	%Q0.6

Tabla 3: Programación – Salidas digitales
Fuente: Los autores

3.3.3. PROGRAMACIÓN DE ENTRADAS ANALÓGICAS

En el tercer POU (analog inputs) agregar 2 escalones, desde AI0 a AI1. En cada uno agregar un bloque de operación que agregue los valores de las entradas analógicas (%IW0.0 y %IW0.1) a las palabras de memoria (%MW4 y %MW6).



*Ilustración 42: Programación – Entradas analógicas
Fuente: SoMachine Basic*

Entradas analógicas	Palabras de memoria
%IW0.0	%MW4
%IW0.1	%MW6

*Tabla 4: Programación – Entradas analógicas
Fuente: Los autores*

3.3.4. PROGRAMACIÓN PUERTO SERIAL (MEDIDOR DE PARÁMETROS)

En el cuarto POU (PM5110) se realizará la lectura de las variables del medidor de parámetros por medio del puerto serial, para este ejemplo utilizaremos la función %READ_VAR0 y el bit de sistema %S6 que generará un pulso para que ejecute la función con una frecuencia de 1 segundo. Esta función se configurará de la siguiente forma:

%READ_VAR0		
Link	1 - SL1	Selección del puerto serial del PLC
Id	1	Identificador de dispositivo. Previamente configurar PM5110 con el mismo Id
Timeout	100	Tiempo máximo de espera de recepción de una respuesta
ObjType	0 - Read Multiple Words - Modbus 0x03	Tipo de objeto que se va a leer (palabra)
FirstObj	2999	Primer objeto que se leerá de la lista de registro (restar 1 porque empieza en 1)
Quantity	112	Cantidad de objetos que se leerán de la lista de registro (desde 3000 hasta 3111)
IndexData	1000	Inicio del registro en palabra de memoria %MW1000

*Tabla 5: Programación – Puerto serial
Fuente: Schneider – Datasheet PLC TM221CE16R
Elaborado por: Los autores*

Para utilizar los diferentes parámetros que vamos a necesitar en este análisis, utilizaremos la Lista de registros del PM5110 como se muestra en la ilustración 41.

Category	Description	PM5110/1	Register	Units	Size (INT16)	Data Type	Access
1							
182	Meter Data (Basic)	Y	3000	---		---	---
183	1s Metering (50/60 Cycles)	Y	3000	---		---	---
184	Current	Y	3000	---		---	---
185	Current A	Y	3000	A	2	FLOAT32	R
186	Current B	Y	3002	A	2	FLOAT32	R
187	Current C	Y	3004	A	2	FLOAT32	R
188	Current N	Y	3006	A	2	FLOAT32	R
	Current G	Y	3008	A	2	FLOAT32	R
189	Current Avg	Y	3010	A	2	FLOAT32	R
190	Current Unbalance	Y	3012	---		---	---
191	Current Unbalance A	Y	3012	%	2	FLOAT32	R
192	Current Unbalance B	Y	3014	%	2	FLOAT32	R
193	Current Unbalance C	Y	3016	%	2	FLOAT32	R
194	Current Unbalance Worst	Y	3018	%	2	FLOAT32	R
195	Voltage	Y	3020	---		---	---
196	Voltage A-B	Y	3020	V	2	FLOAT32	R
197	Voltage B-C	Y	3022	V	2	FLOAT32	R
198	Voltage C-A	Y	3024	V	2	FLOAT32	R
199	Voltage L-L Avg	Y	3026	V	2	FLOAT32	R
200	Voltage A-N	Y	3028	V	2	FLOAT32	R
201	Voltage B-N	Y	3030	V	2	FLOAT32	R
202	Voltage C-N	Y	3032	V	2	FLOAT32	R
203			3034	V	2	FLOAT32	R

Ilustración 43: Programación – Lista de registros PM5110
Fuente: PM5110 Register List 2017

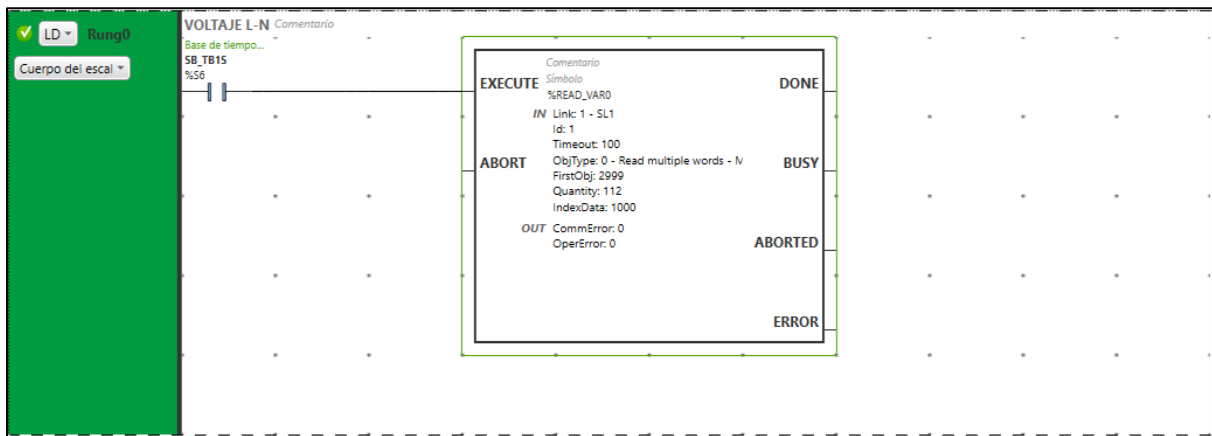


Ilustración 44: Programación – Puerto serial (medidor de parámetros)
Fuente: SoMachine Basic

3.4. SOMACHINE BASIC: PUESTA EN FUNCIONAMIENTO

Para la puesta en funcionamiento, luego de conectar el cable ethernet seleccionar la dirección IP del equipo. Posteriormente dar clic en **Iniciar Sesión**. Una vez establecida la conexión se debe cargar la programación en el PLC, por lo que daremos clic en **PC a**

controlador (descarga). Y por último para iniciar el programa hacemos clic en *Iniciar controlador*.

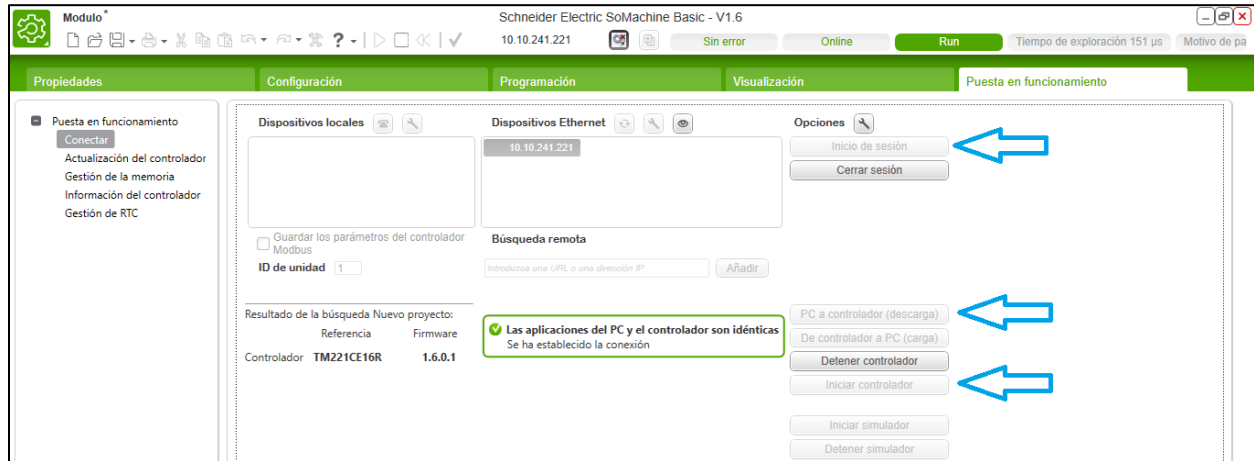


Ilustración 45: Programación – Puesta en funcionamiento
Fuente: SoMachine Basic

3.5. OPC SERVER: CONFIGURACIÓN

A continuación, se detallará paso a paso la configuración del Servidor OPC.

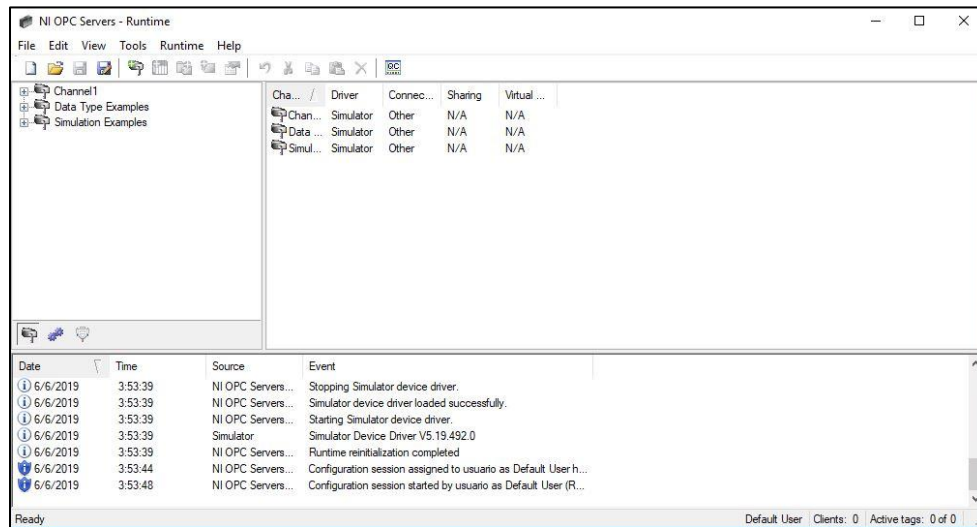


Ilustración 46: OPC Servers – Configuración
Fuente: OPC Servers Configuration

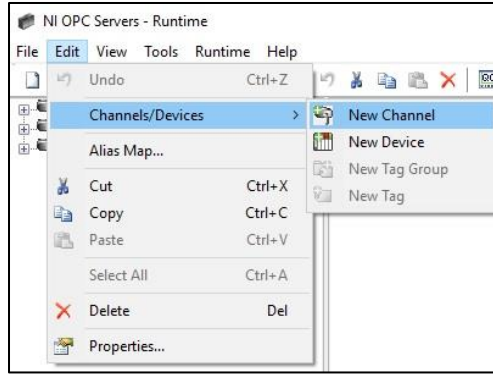


Ilustración 47: OPC Servers – New Channel
Fuente: OPC Servers Configuration

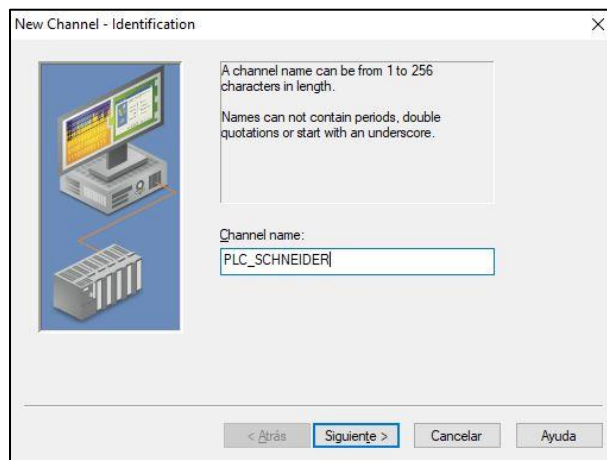


Ilustración 48: OPC Servers – New Channel - Identification
Fuente: OPC Servers Configuration

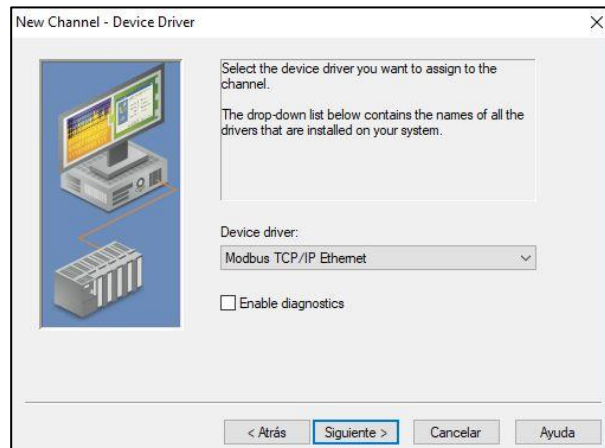


Ilustración 49: OPC Servers – New Channel – Device Driver
Fuente: OPC Servers Configuration

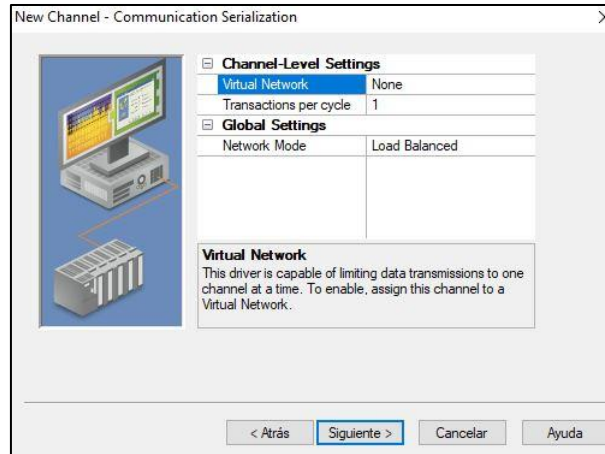


Ilustración 50: OPC Servers – New Channel – Communication Serialization
Fuente: OPC Servers Configuration

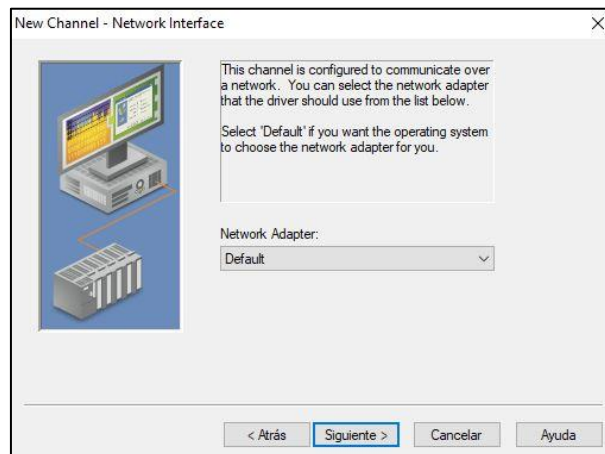


Ilustración 51: OPC Servers – New Channel – Network Interface
Fuente: OPC Servers Configuration

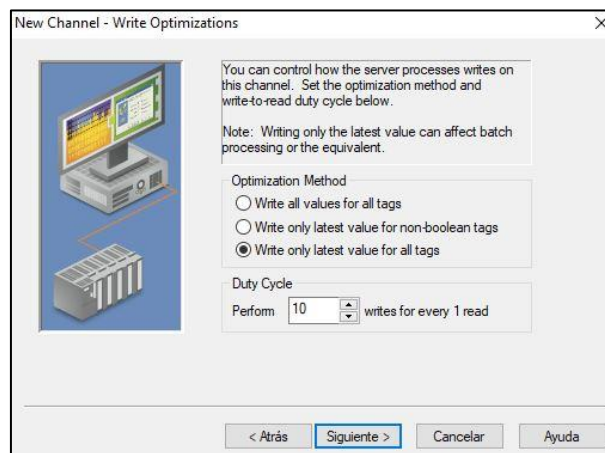


Ilustración 52: OPC Servers – New Channel – Write Optimization
Fuente: OPC Servers Configuration

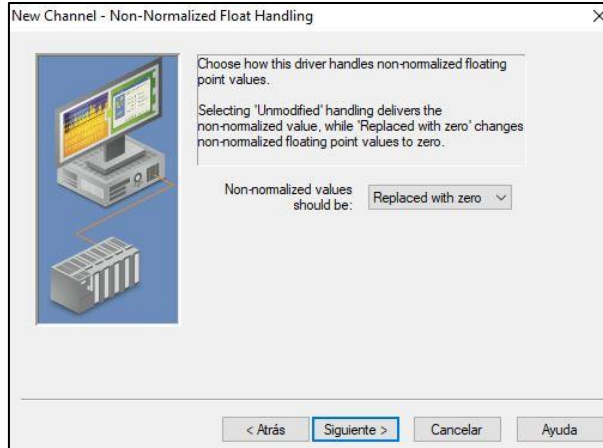


Ilustración 53: OPC Servers – New Channel – Non-Normalized Float Handling
Fuente: OPC Servers Configuration

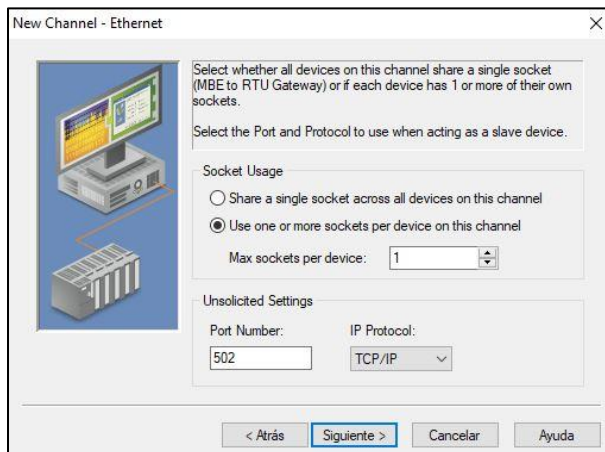


Ilustración 54: OPC Servers – New Channel – Ethernet
Fuente: OPC Servers Configuration

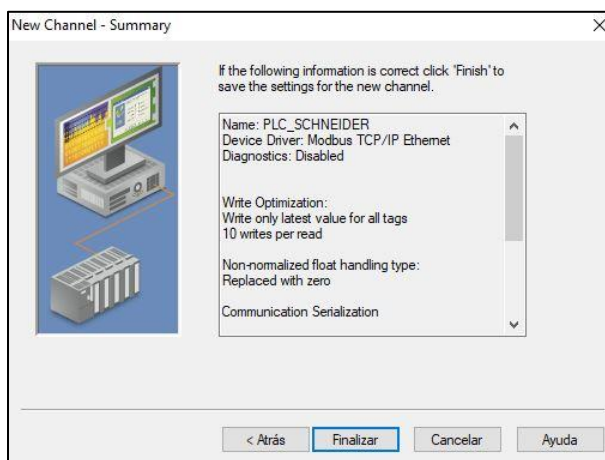


Ilustración 55: OPC Servers – New Channel – Summary
Fuente: OPC Servers Configuration

Luego, se procedió a la configuración del dispositivo a utilizar haciendo clic en *add a device*.

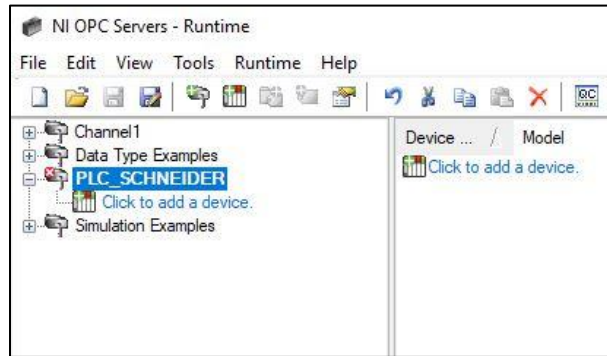


Ilustración 56: OPC Servers – New Device
Fuente: OPC Servers Configuration

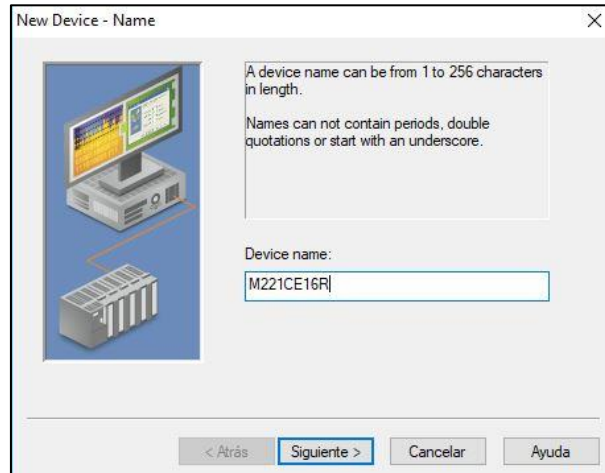


Ilustración 57: OPC Servers – New Device - Name
Fuente: OPC Servers Configuration

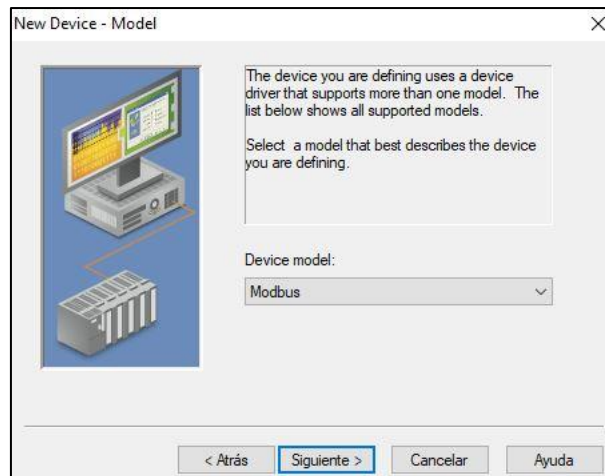


Ilustración 58: OPC Servers – New Device - Model
Fuente: OPC Servers Configuration

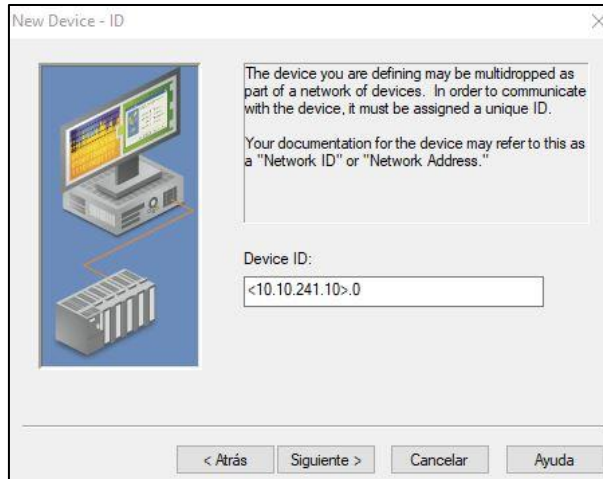


Ilustración 59: OPC Servers – New Device - ID
Fuente: OPC Servers Configuration

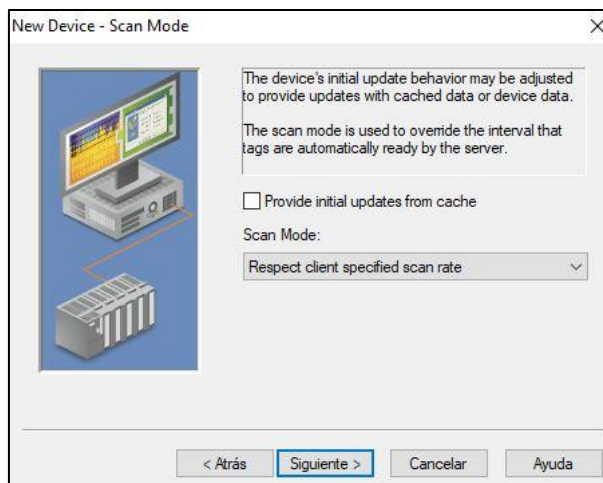


Ilustración 60: OPC Servers – New Device – Scan Mode
Fuente: OPC Servers Configuration

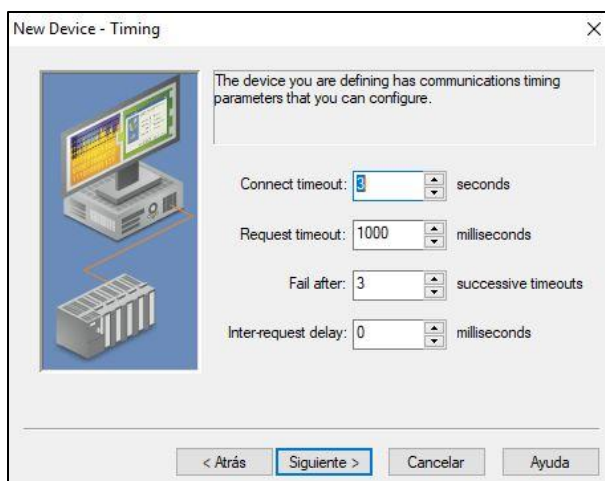


Ilustración 61: OPC Servers – New Device – Timing
Fuente: OPC Servers Configuration

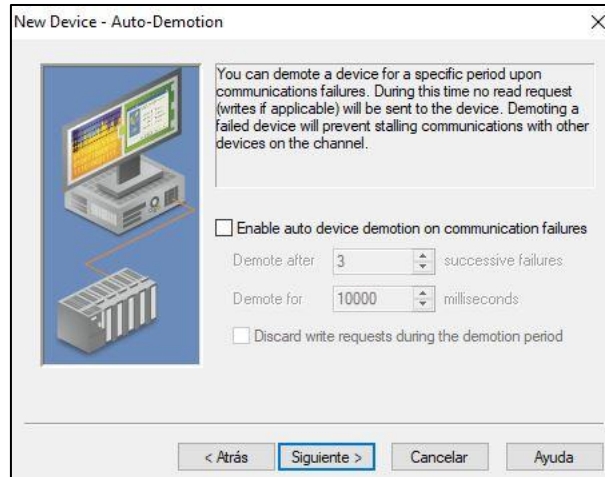


Ilustración 62: OPC Servers – New Device – Auto-Demotion
Fuente: OPC Servers Configuration

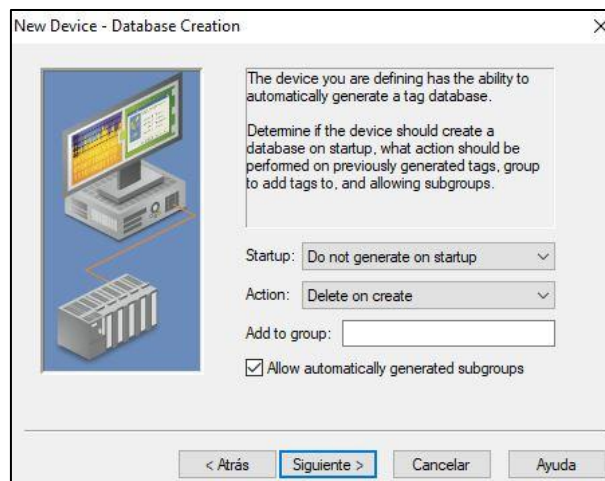


Ilustración 63: OPC Servers – New Device – Database Creation
Fuente: OPC Servers Configuration

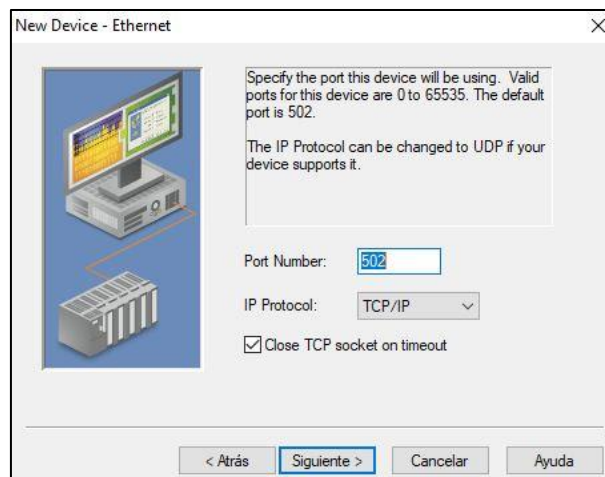


Ilustración 64: OPC Servers – New Device – Ethernet
Fuente: OPC Servers Configuration

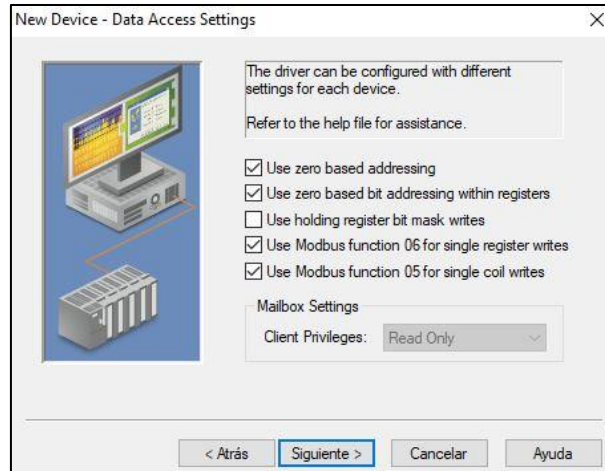


Ilustración 65: OPC Servers – New Device – Data Access Settings
Fuente: OPC Servers Configuration

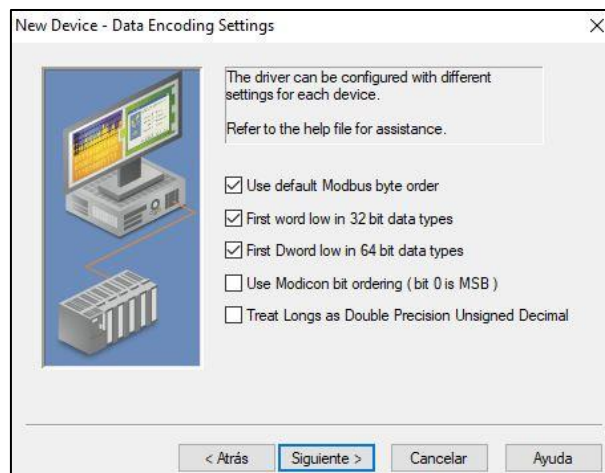


Ilustración 66: OPC Servers – New Device – Data Encoding Settings
Fuente: OPC Servers Configuration

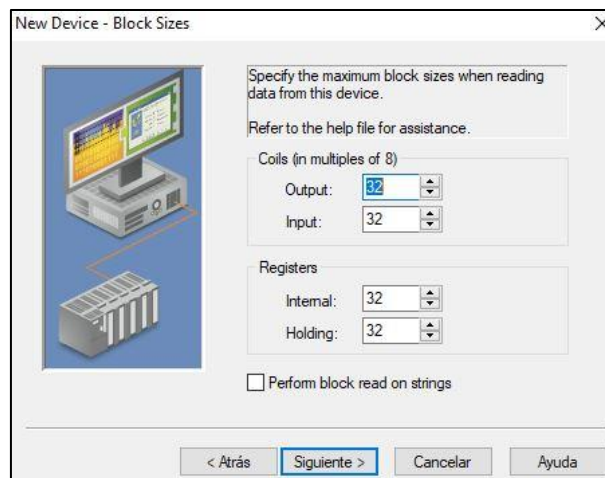


Ilustración 67: OPC Servers – New Device – Block Sizes
Fuente: OPC Servers Configuration

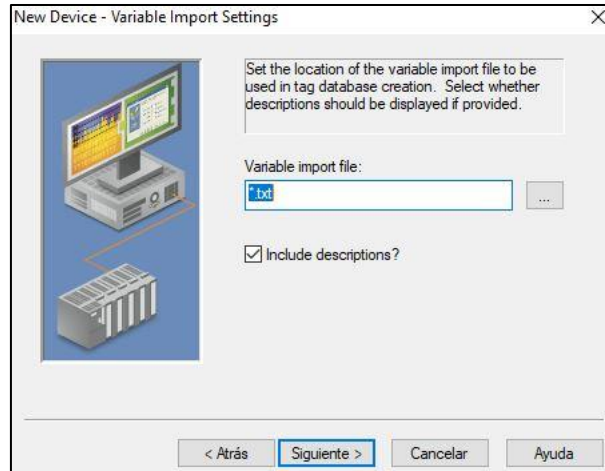


Ilustración 68: OPC Servers – New Device – Variable Import Settings
Fuente: OPC Servers Configuration

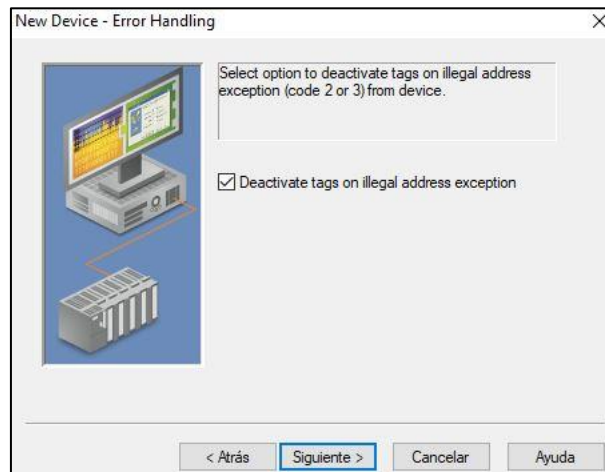


Ilustración 69: OPC Servers – New Device – Error Handling
Fuente: OPC Servers Configuration

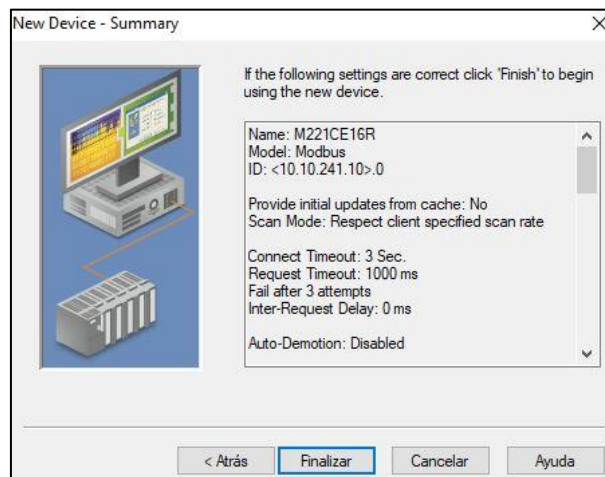


Ilustración 70: OPC Servers – New Device – Summary
Fuente: OPC Servers Configuration

Luego procederemos a crear las etiquetas para las variables de memoria haciendo clic derecho sobre el dispositivo. Estas etiquetas son para cada espacio de memoria del PLC donde se almacenan las variables que extrajimos. Para esto utilizaremos la dirección modbus que le corresponde, por ejemplo, el espacio de memoria %MW0 corresponde a la dirección 400001.

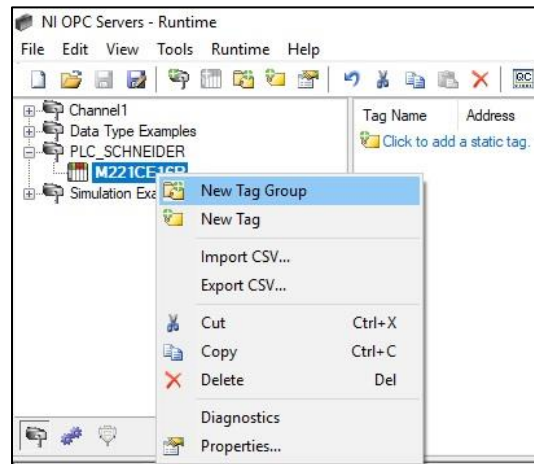


Ilustración 71: OPC Servers – New Tag Group
Fuente: OPC Servers Configuration

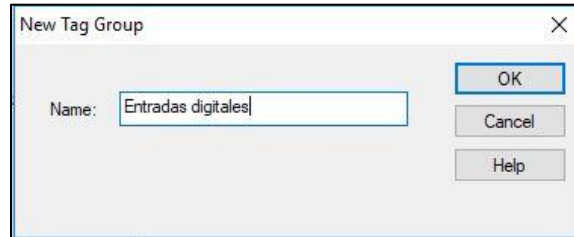


Ilustración 72: OPC Servers – Crear Tag Groups
Fuente: OPC Servers Configuration

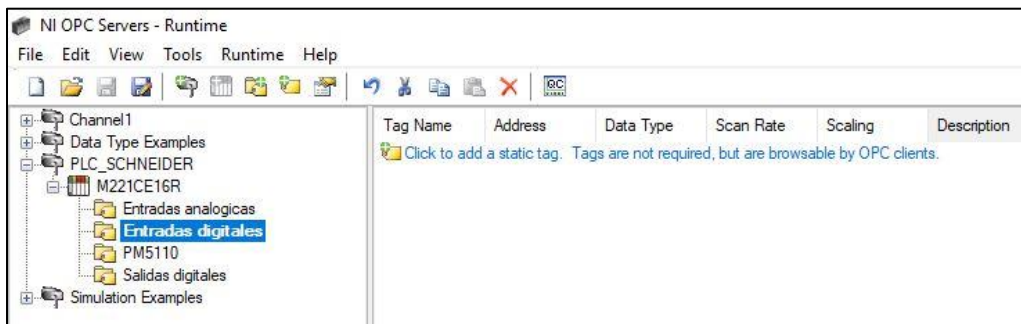


Ilustración 73: OPC Servers – Tag Groups
Fuente: OPC Servers Configuration

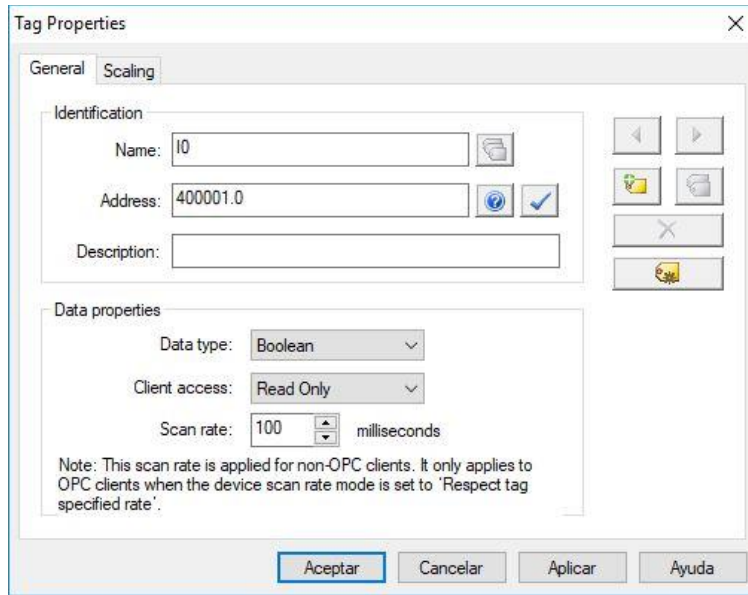


Ilustración 74: OPC Servers – Tag Properties
Fuente: OPC Servers Configuration

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
I0	400001.0	Boolean	100	None	
I1	400001.1	Boolean	100	None	
I2	400001.2	Boolean	100	None	
I3	400001.3	Boolean	100	None	
I4	400001.4	Boolean	100	None	
I5	400001.5	Boolean	100	None	
I6	400001.6	Boolean	100	None	
I7	400001.7	Boolean	100	None	
I8	400001.8	Boolean	100	None	

Ilustración 75: OPC Servers – Tags entradas digitales
Fuente: OPC Servers Configuration

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
Q0	400003.0	Boolean	100	None	
Q1	400003.1	Boolean	100	None	
Q2	400003.2	Boolean	100	None	
Q3	400003.3	Boolean	100	None	
Q4	400003.4	Boolean	100	None	
Q5	400003.5	Boolean	100	None	
Q6	400003.6	Boolean	100	None	

Ilustración 76: OPC Servers – Tags salidas digitales
Fuente: OPC Servers Configuration

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
AI0	400005	Word	100	None	
AI1	400007	Word	100	None	

Ilustración 77: OPC Servers – Tags entradas analógicas
Fuente: OPC Servers Configuration

Tag Name	Address	Data Type	Scan Rate	Scaling	Description
I A	401000	Float	100	None	
I B	401002	Float	100	None	
I C	401004	Float	100	None	
I N	401006	Float	100	None	
I G	401008	Float	100	None	
I Avg	401010	Float	100	None	
I Unb A	401012	Float	100	None	
I Unb B	401014	Float	100	None	
I Unb C	401016	Float	100	None	
I Unb Worst	401018	Float	100	None	
V A-B	401020	Float	100	None	
V B-C	401022	Float	100	None	
V C-A	401024	Float	100	None	
V L-L Avg	401026	Float	100	None	
V A-N	401028	Float	100	None	
V B-N	401030	Float	100	None	
V C-N	401032	Float	100	None	
V N-G	401034	Float	100	None	

Ilustración 78: OPC Servers – Tags medidor de parámetros
Fuente: OPC Servers Configuration

Posteriormente procederemos a abrir el **OPC Quick Client** donde podremos comprobar que existe la comunicación entre el software y el PLC.

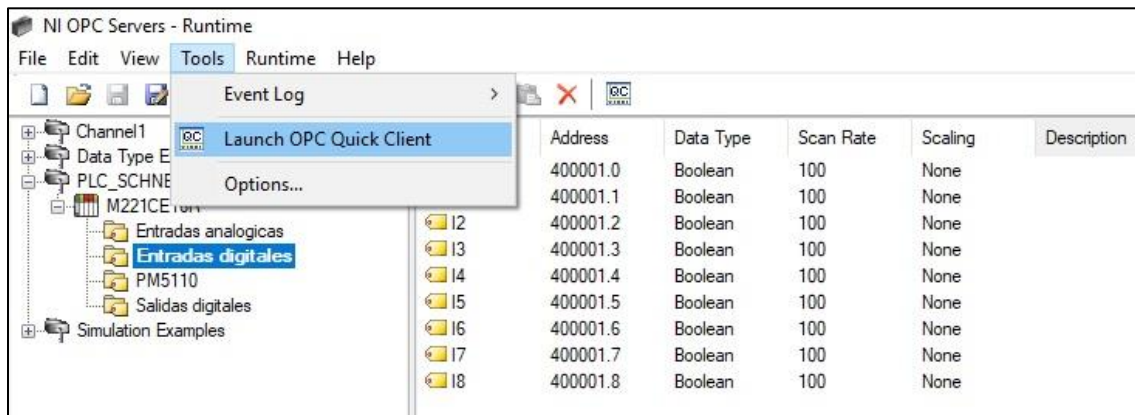


Ilustración 79: OPC Servers – Launch OPC Quick Client
Fuente: OPC Servers Configuration

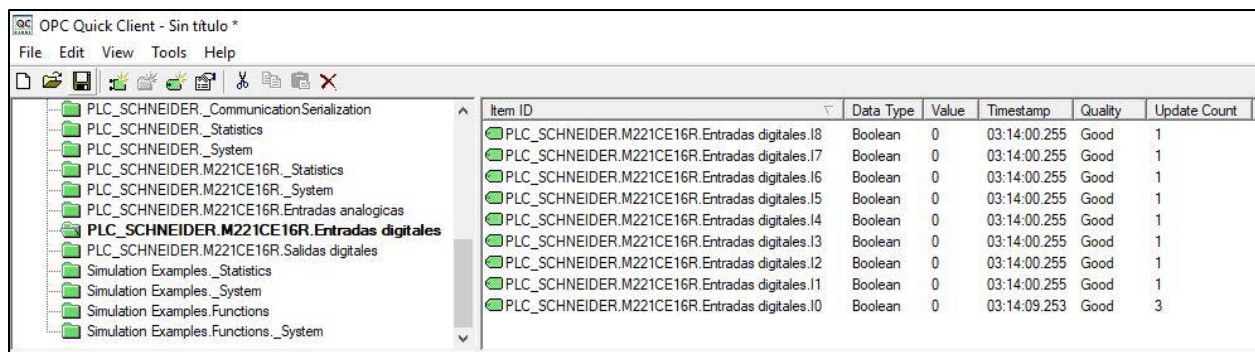


Ilustración 80: OPC Servers – OPC Quick Client
Fuente: OPC Servers Configuration

3.6. LABVIEW: PROGRAMACIÓN

Una vez realizada la configuración del OPC Server y ejecutar el OPC Quick Cliente, procederemos a hacer la programación en LabVIEW detallada a continuación.

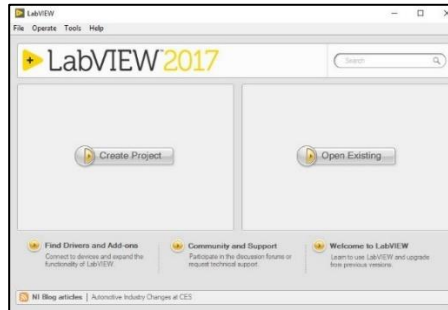


Ilustración 81: LabVIEW – Create Project
Fuente: LabVIEW



Ilustración 82: LabVIEW – Blank Project
Fuente: LabVIEW

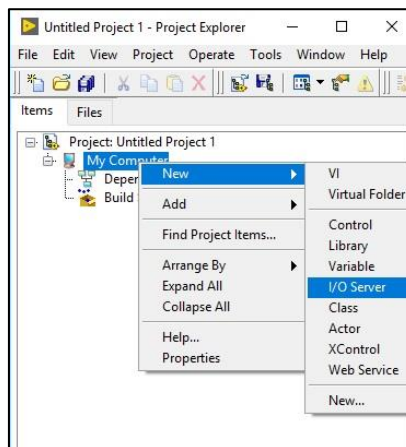


Ilustración 83: LabVIEW – I/O Server
Fuente: LabVIEW

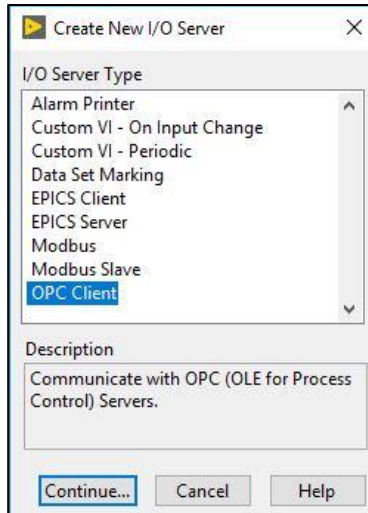


Ilustración 84: LabVIEW – OPC Client
Fuente: LabVIEW

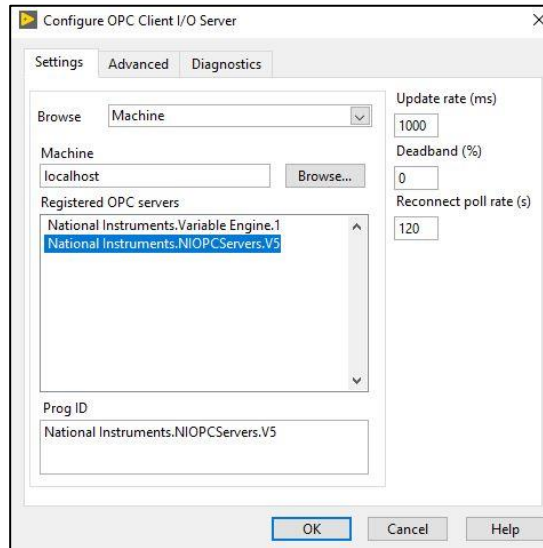


Ilustración 85: LabVIEW – National Instruments.NIOPCServers.V5
Fuente: LabVIEW

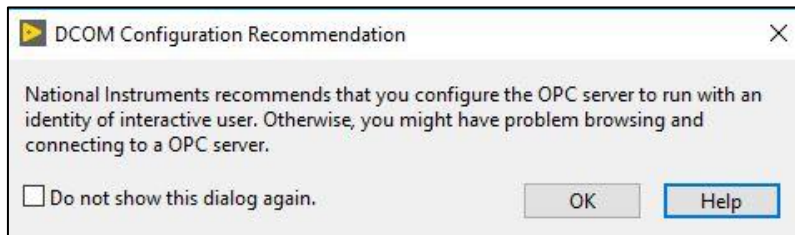


Ilustración 86: LabVIEW – DCOM Configuration Recommendation
Fuente: LabVIEW

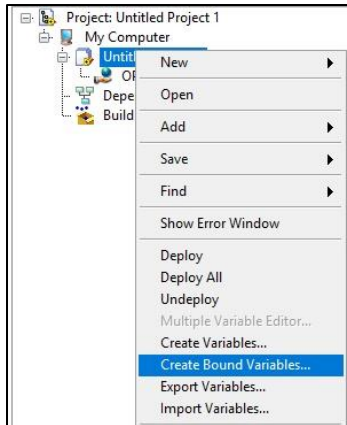


Ilustración 87: LabVIEW – Create Bound Variables
Fuente: LabVIEW

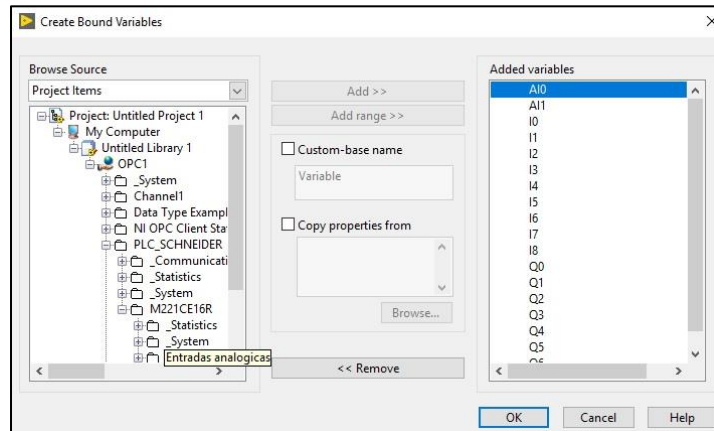


Ilustración 88: LabVIEW – Add variables
Fuente: LabVIEW

	Path	Name	Var Type	Data Type	Network-Published: Buffering	Network-Publishe Buffer Size
AI0	.../My Computer/Untitled Library 1/	AI0	Network-Publis...	UInt16	<input checked="" type="checkbox"/>	50
AI1	.../My Computer/Untitled Library 1/	AI1	Network-Publis...	UInt16	<input checked="" type="checkbox"/>	50
I0	.../My Computer/Untitled Library 1/	I0	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50
I1	.../My Computer/Untitled Library 1/	I1	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50
I2	.../My Computer/Untitled Library 1/	I2	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50
I3	.../My Computer/Untitled Library 1/	I3	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50
I4	.../My Computer/Untitled Library 1/	I4	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50
I5	.../My Computer/Untitled Library 1/	I5	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50
I6	.../My Computer/Untitled Library 1/	I6	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50
I7	.../My Computer/Untitled Library 1/	I7	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50
I8	.../My Computer/Untitled Library 1/	I8	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50
Q0	.../My Computer/Untitled Library 1/	Q0	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50
Q1	.../My Computer/Untitled Library 1/	Q1	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50
Q2	.../My Computer/Untitled Library 1/	Q2	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50
Q3	.../My Computer/Untitled Library 1/	Q3	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50
Q4	.../My Computer/Untitled Library 1/	Q4	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50
Q5	.../My Computer/Untitled Library 1/	Q5	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50
Q6	.../My Computer/Untitled Library 1/	Q6	Network-Publis...	Boolean	<input checked="" type="checkbox"/>	50

Ilustración 89: LabVIEW – Multiple Variable Editor
Fuente: LabVIEW

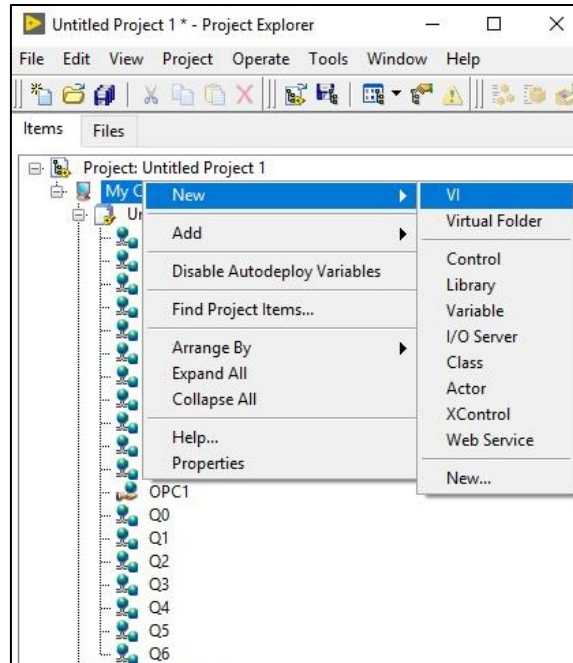


Ilustración 90: LabVIEW – New VI
Fuente: LabVIEW

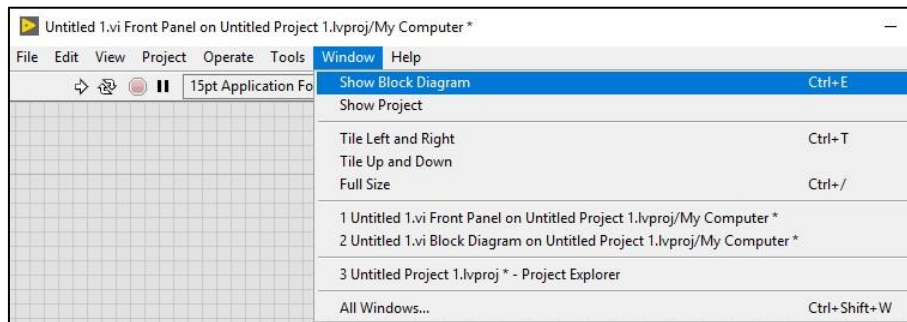


Ilustración 91: LabVIEW – Show Block Diagram
Fuente: LabVIEW

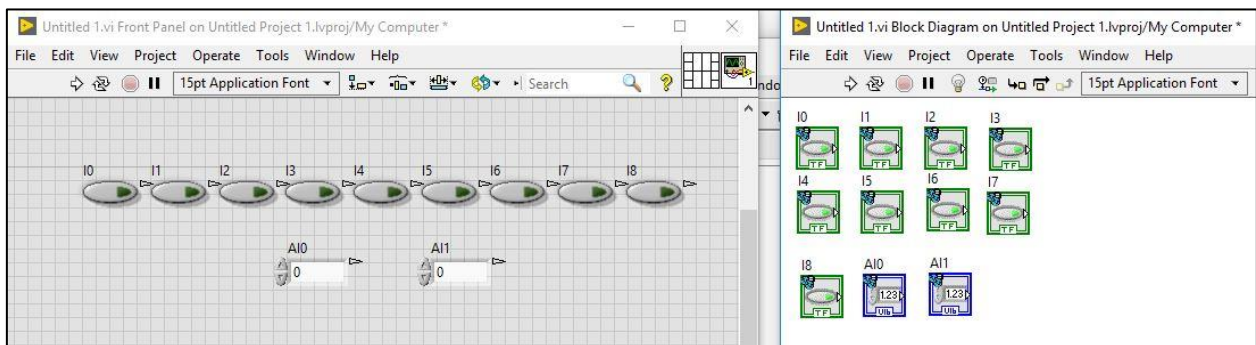


Ilustración 92: LabVIEW – Arrastrar variables de entrada a Front Panel
Fuente: LabVIEW

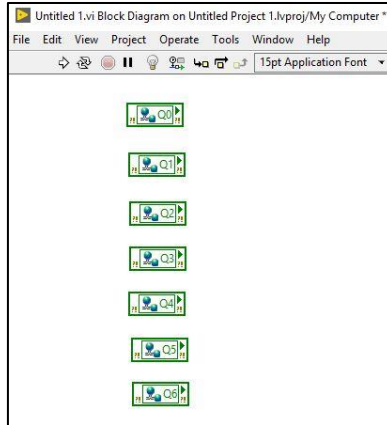


Ilustración 93: LabVIEW – Arrastrar variables de salida a Diagrama de Bloques
Fuente: LabVIEW

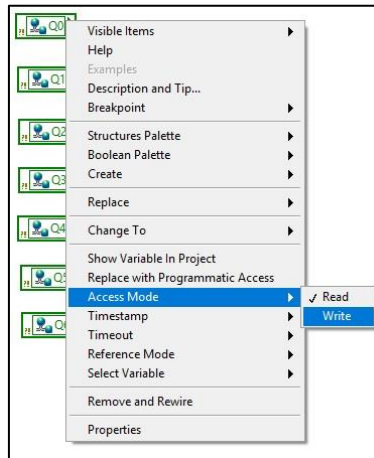


Ilustración 94: LabVIEW – Seleccionar Access Mode Write de cada variable de salida
Fuente: LabVIEW

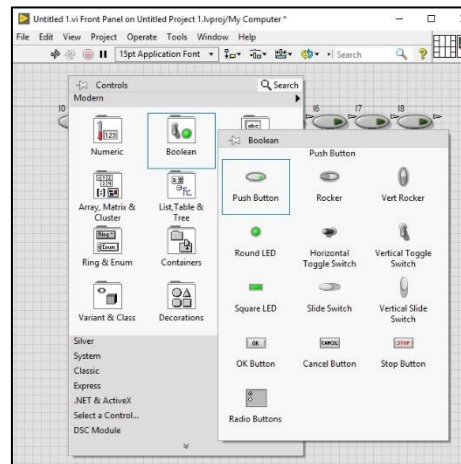


Ilustración 95: LabVIEW – Insertar push button en Panel Frontal por cada variable de salida
Fuente: LabVIEW

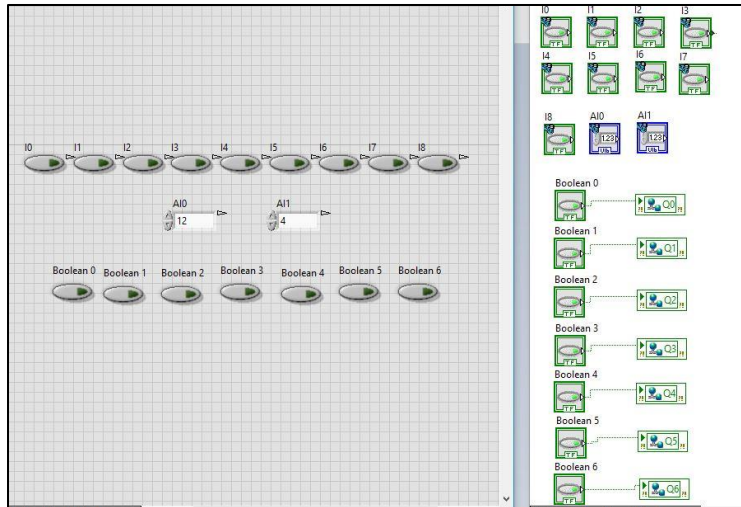


Ilustración 96: LabVIEW – Conectar elementos diagrama de bloques
Fuente: LabVIEW

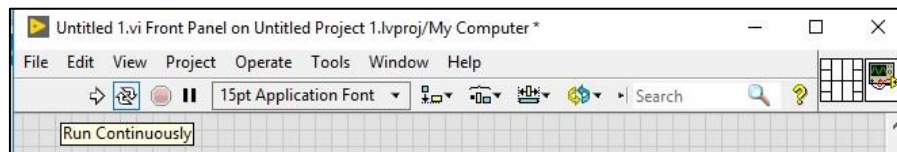


Ilustración 97: LabVIEW – Ejecutar Programa – Run Continuously
Fuente: LabVIEW

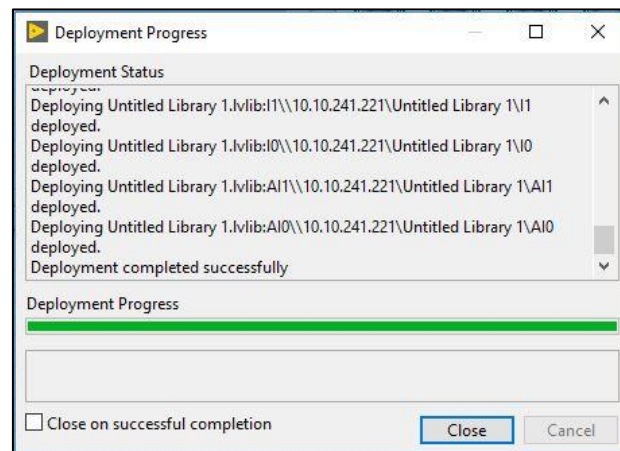


Ilustración 98: LabVIEW – Ejecutar Programa – Deployment Progress
Fuente: LabVIEW

Una vez realizado el último paso, estará completa la comunicación entre el módulo del PLC y el proyecto en LabVIEW la cual podremos verificar mediante sus entradas y salidas.

3.7. MEDIDOR DE PARÁMETROS: CONFIGURACIÓN



*Ilustración 99: Medidor de parámetros PM5100
Fuente: Schneider – User guide PM5100*

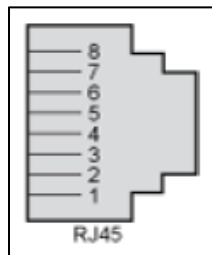
Para implementar el sistema de adquisición de datos se usarán los medidores de parámetros marca Schneider modelo PM5100, instalados en los tableros de los transformadores. Estos elementos cuentan con un puerto de comunicación RS-485 que permitirá conectarse con el puerto serial del PLC mediante un cable de red para obtener diferentes tipos de datos de los transformadores tales como voltajes, corrientes, potencias, etc. que posteriormente utilizaremos para realizar los análisis y simulaciones de las diferentes pruebas. Para esto primero realizaremos la siguiente configuración en el medidor de parámetros:

Menú Mantenimiento > Configuración > Contraseña (0000) OK > Comunicación

- Protocol: Modbus
- Address: 1
- Baud rate: 19200
- Parity: None

3.7.1. CONEXIÓN MODBUS: MEDIDOR DE PARAMETROS - PLC

Para realizar la conexión entre el PLC y el medidor de parámetros utilizaremos un cable de red con un terminal RJ45 para el puerto Serial del PLC y el puerto RS485 del otro extremo con la siguiente configuración en sus pines:



*Ilustración 100: Disposición de pines Puerto RJ45
Fuente: Schneider – Datasheet PLC TM221CE16R*

PUERTO SERIAL - CONEXIÓN SL1		
Nº PIN	RS485	OBSERVACIÓN
1	No conectado	
2	No conectado	
3	No conectado	
4	D1	
5	D0	
6	No conectado	
7	5 V CC	Entregados por el controlador. No conectar.
8	Común	

*Tabla 6: Conexión Puerto Serial – RS485
Fuente: Schneider – Datasheet PLC TM221CE16R
Elaborado por: Los autores*

CAPÍTULO IV

4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS

4.1. PRUEBA N°1: ANÁLISIS DE LA CONEXIÓN D-Y AL CONECTAR UNA CARGA RESISTIVA VARIABLE EN ESTRELLA.

Esta prueba consiste en analizar el comportamiento y los ángulos de desfase de los fasores de voltaje y corriente, además de las potencias activas, reactivas y aparentes de un sistema de transformadores trifásicos conectados en Delta – Estrella con una carga resistiva variable conectada en estrella.

4.1.1. DIAGRAMA

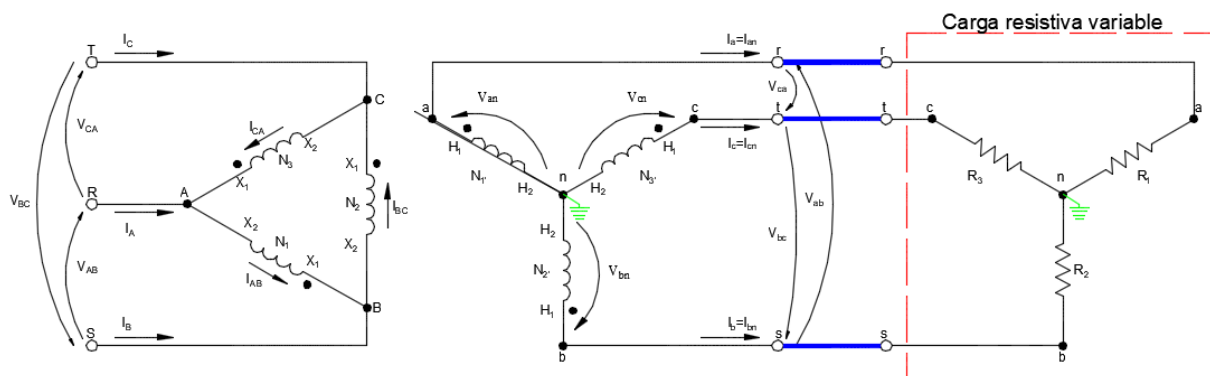


Ilustración 101: Prueba N°1 – Conexión D-y de transformadores trifásicos con carga resistiva variable
Fuente: (Chapman, 2000)
Elaborado por: Los autores

4.1.2. RECURSOS

Para la realización de esta prueba se utilizaron los siguientes recursos

- Tablero de pruebas de transformadores trifásicos
- Alimentación trifásica 120/240 Vac
- Cargas resistiva trifásica variable
- Cables de conexión

- Módulo de adquisición de datos (PLC)
- Laptop
- Multímetro

4.1.3. PROCEDIMIENTO

El procedimiento a seguir en esta prueba es la siguiente:

- Realizar la conexión Delta – Estrella en el tablero de pruebas de transformadores
- Se conectará al sistema una carga resistiva variable en estrella con un valor no menor a 80 ohm para evitar daño en los transformadores
- Conectar los cables de comunicación entre el medidor de parámetros, el PLC y la laptop
- Realizar la simulación en LabVIEW y posterior análisis de los datos y diagramas fasoriales adquiridos

4.1.4. VENTANA GRÁFICA: DIAGRAMAS FASORIALES VOLTAJE Y CORRIENTE

- Diagramas fasoriales de voltaje y corriente del lado primario del transformador trifásico con carga resistiva trifásica de 80 Ω , 90 Ω y 100 Ω .

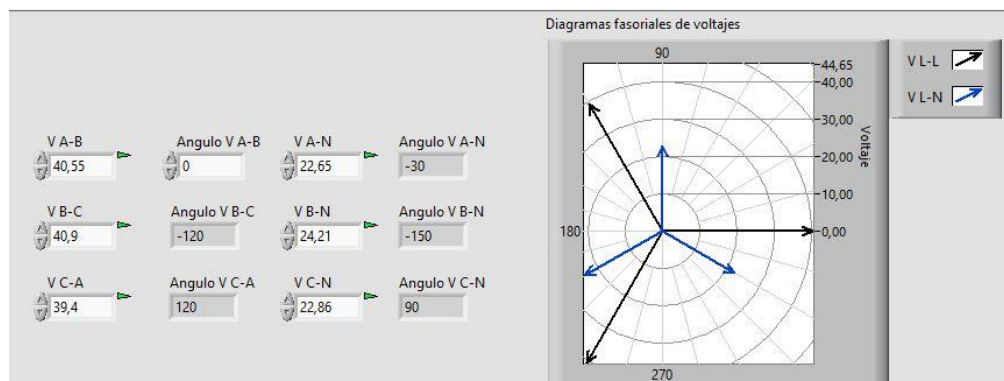


Ilustración 102: Prueba N°1 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga resistiva trifásica 80 Ω

Fuente: LabVIEW

Elaborado por: Los autores

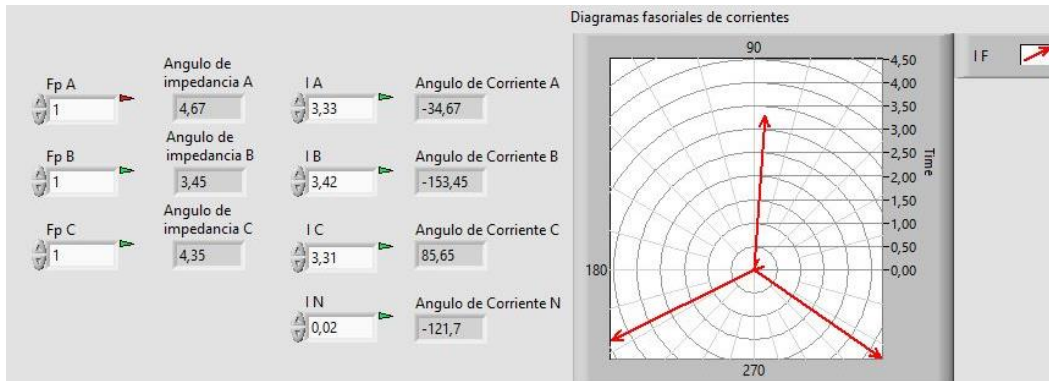


Ilustración 103: Prueba N°1 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga resistiva trifásica 80 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

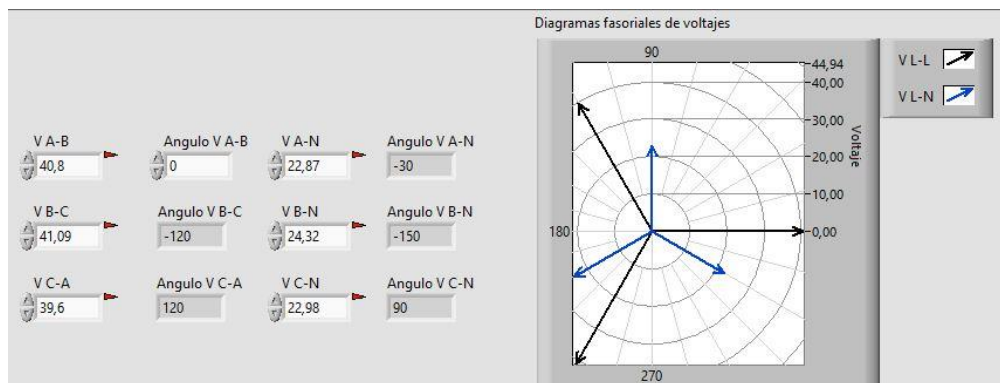


Ilustración 104: Prueba N°1 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga resistiva trifásica 90 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

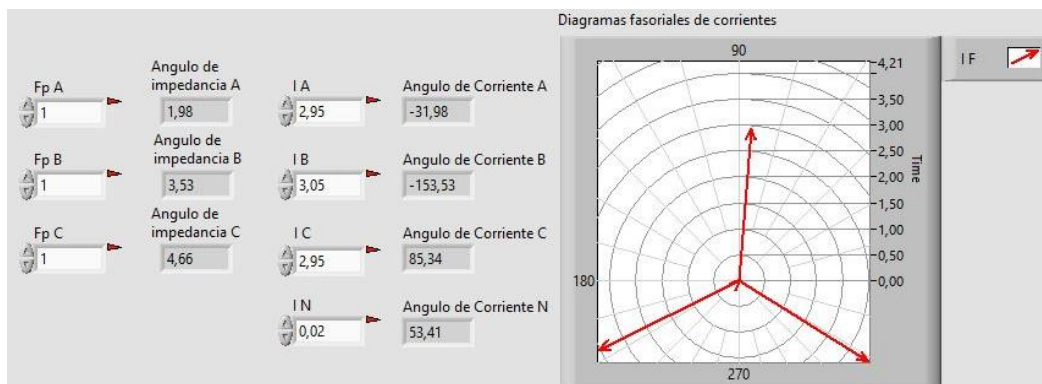


Ilustración 105: Prueba N°1 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga resistiva trifásica 90 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

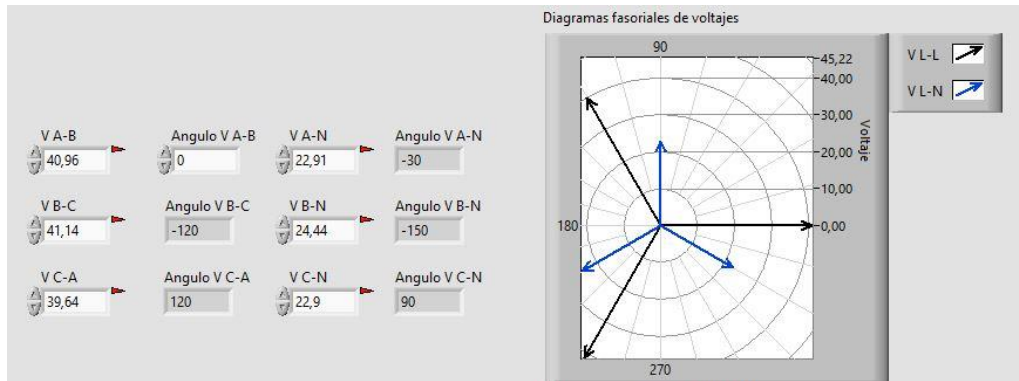


Ilustración 106: Prueba N°1 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga resistiva trifásica 100 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

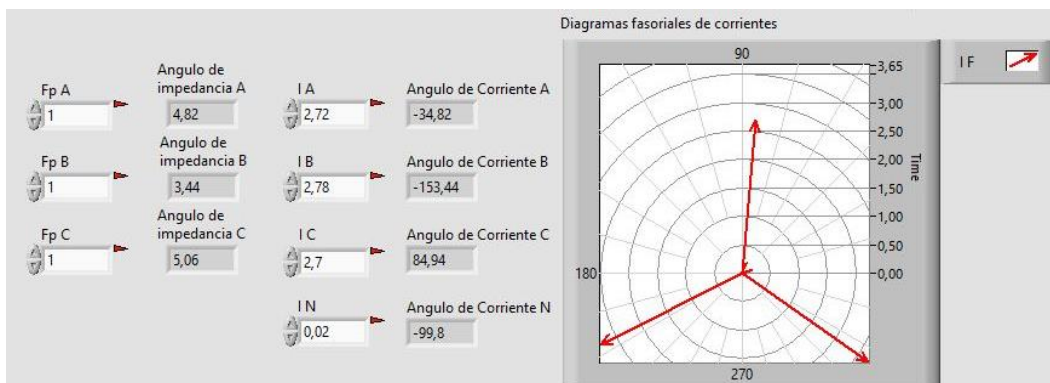


Ilustración 107: Prueba N°1 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga resistiva trifásica 100 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

- Diagramas fasoriales de voltaje y corriente del lado secundario del transformador trifásico con carga resistiva trifásica de 80 Ω, 90 Ω y 100 Ω.

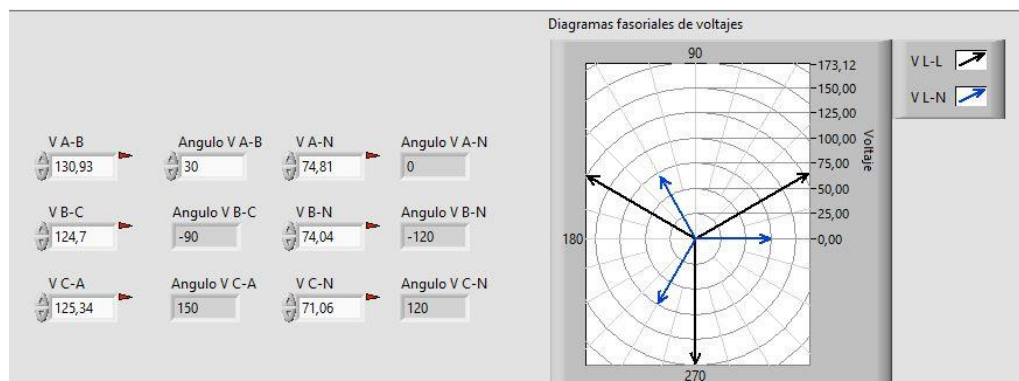


Ilustración 108: Prueba N°1 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga resistiva trifásica 80 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

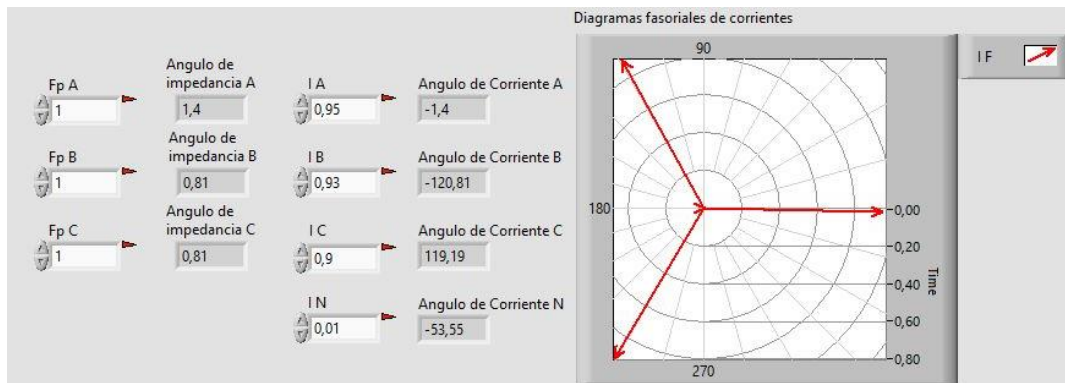


Ilustración 109: Prueba N°1 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga resistiva trifásica 80 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

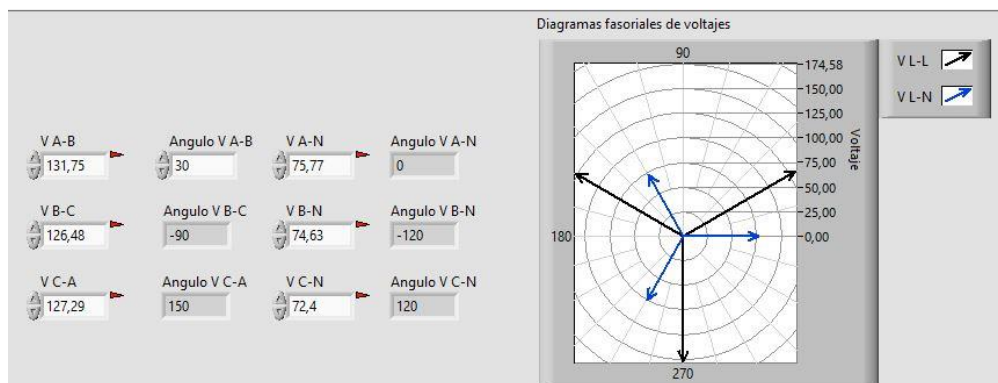


Ilustración 110: Prueba N°1 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga resistiva trifásica 90 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

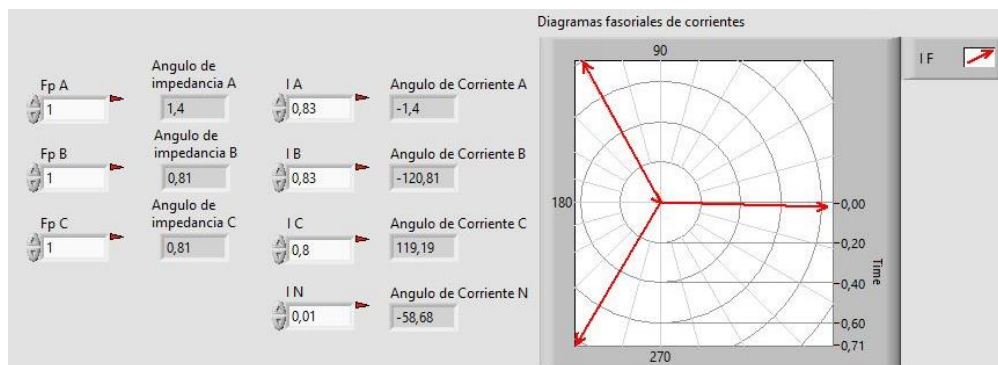


Ilustración 111: Prueba N°1 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga resistiva trifásica 90 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

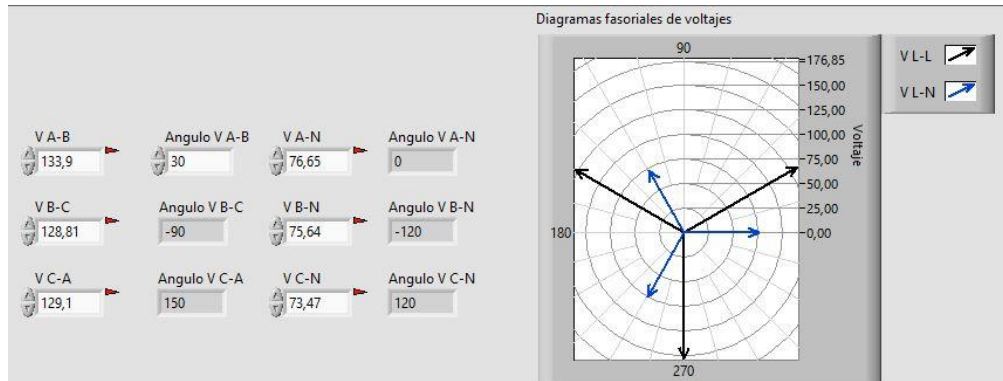


Ilustración 112: Prueba N°1 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga resistiva trifásica 100 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

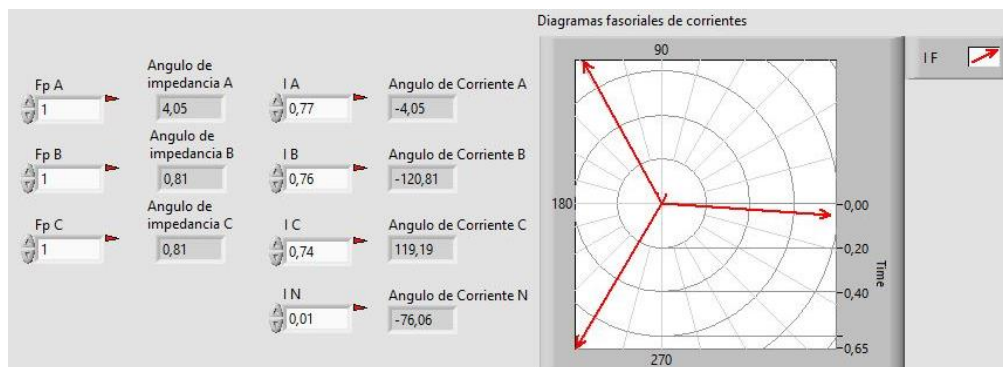


Ilustración 113: Prueba N°1 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga resistiva trifásica 100 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

4.1.5. VENTANA GRÁFICA: TRIÁNGULOS DE POTENCIA

- Triángulos de potencia de cada fase y total del lado primario del transformador trifásico con carga resistiva trifásica de 80 Ω, 90 Ω y 100 Ω.

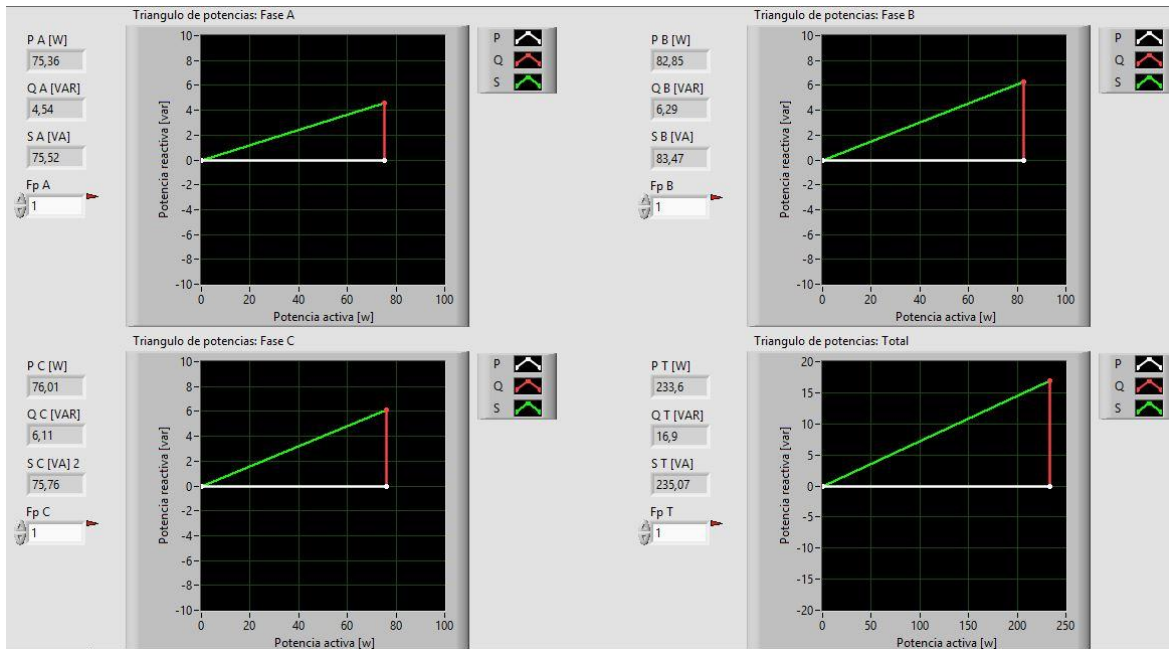


Ilustración 114: Prueba N°1 – Triángulos de potencia lado primario. Carga resistiva trifásica 80 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

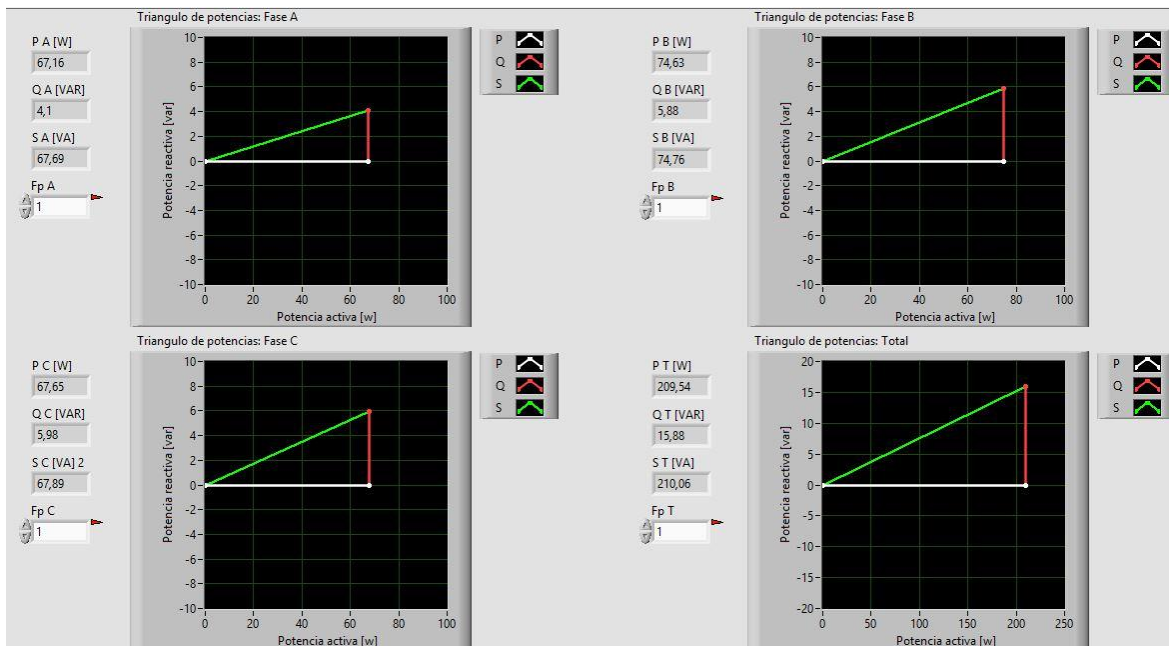


Ilustración 115: Prueba N°1 – Triángulos de potencia lado primario. Carga resistiva trifásica 90 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

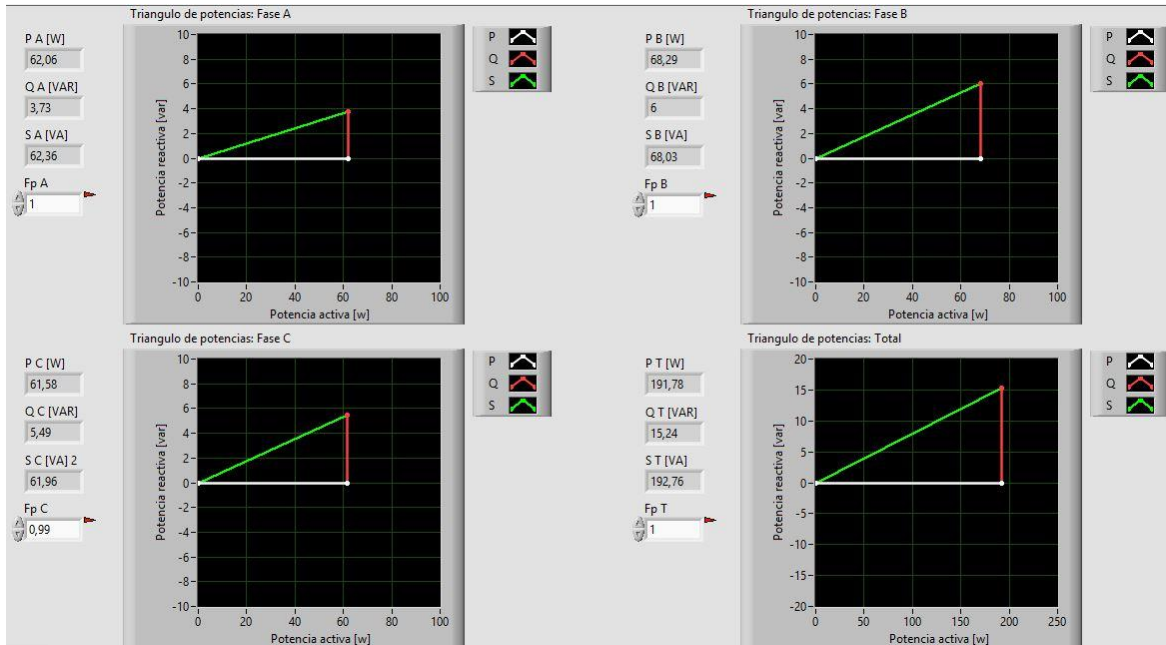


Ilustración 116: Prueba N°1 – Triángulos de potencia lado primario. Carga resistiva trifásica 100 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

- Triángulos de potencia de cada fase y total del lado secundario del transformador trifásico con carga resistiva trifásica de 80 Ω, 90 Ω y 100 Ω.

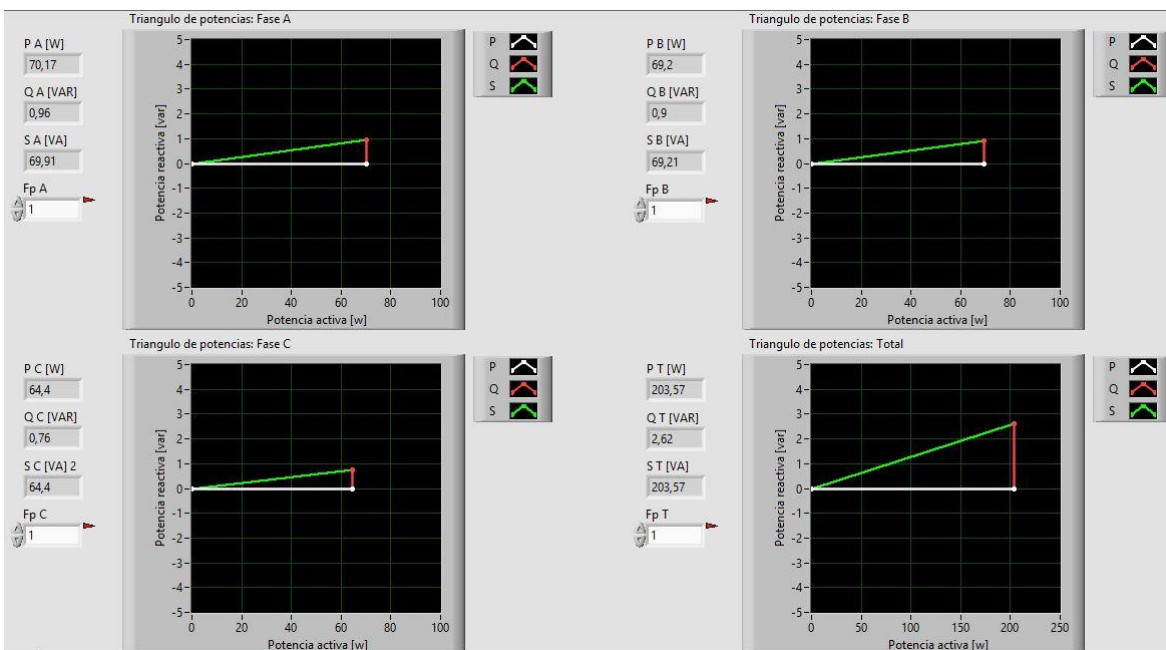


Ilustración 117: Prueba N°1 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga resistiva trifásica 80 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

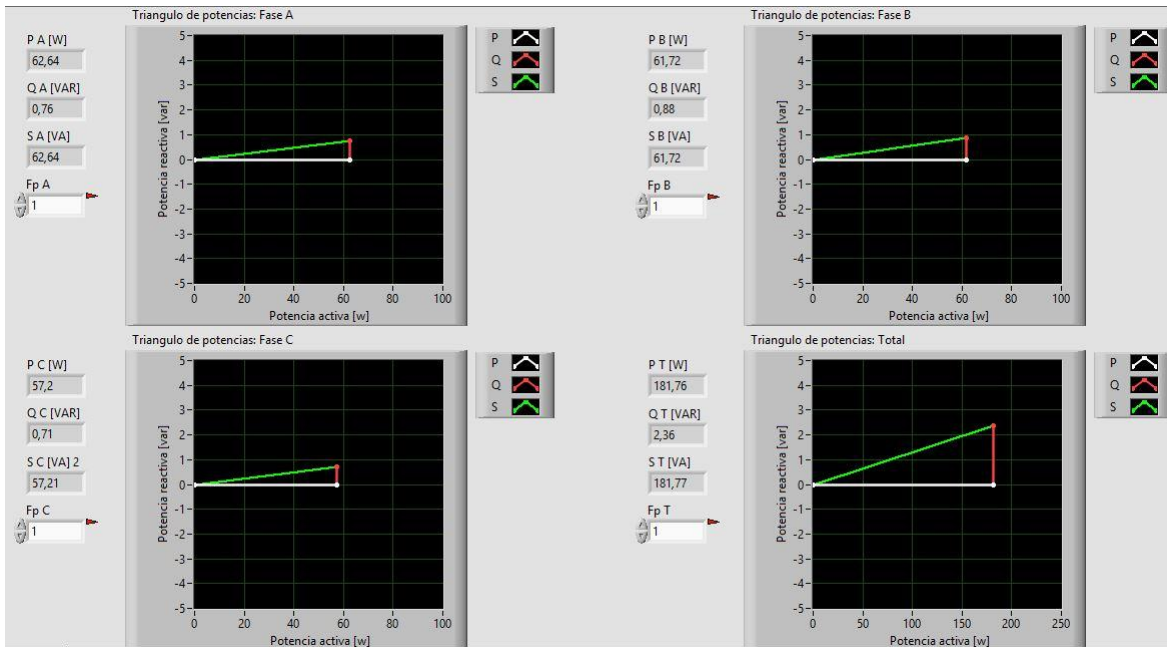


Ilustración 118: Prueba N°1 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga resistiva trifásica 90 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

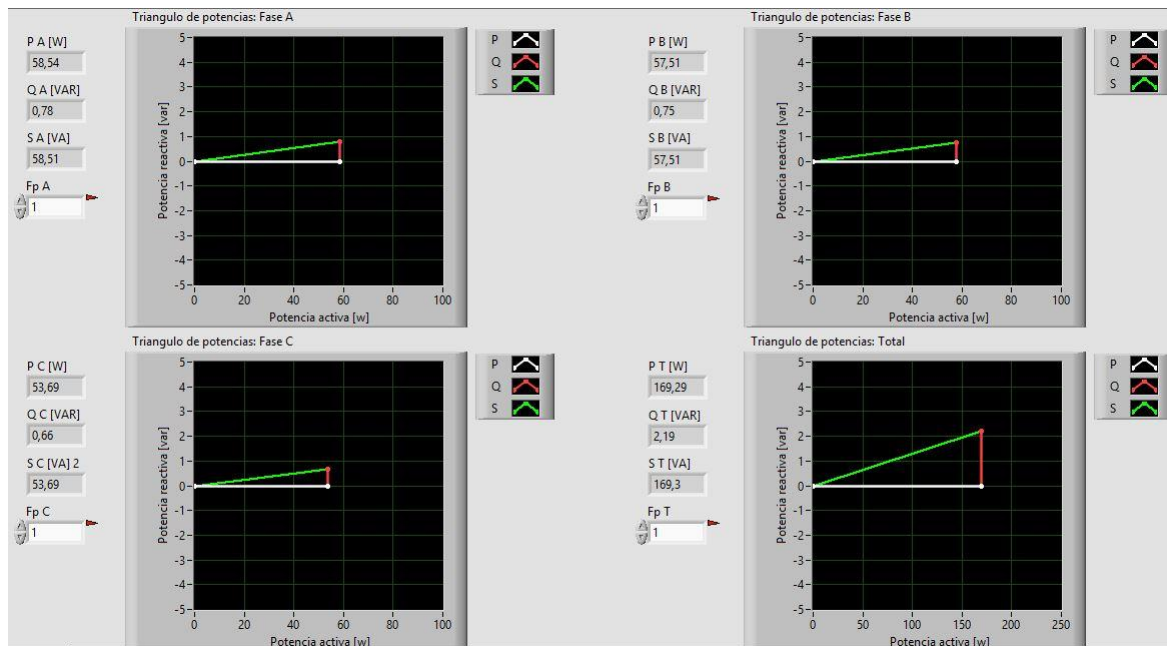


Ilustración 119: Prueba N°1 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga resistiva trifásica 100 Ω
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

4.1.6. CÁLCULOS TEÓRICOS

- Cálculos teóricos con carga resistiva trifásica de 80 Ω.

Cálculos teóricos prueba 1							
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga resistiva trifásica 80Ω							
Relación de transformación [a]:	1:2	elevador	Tipo de carga:		Resistiva		
Frecuencia [Hz]:	60		Velocidad angular [w]:		2 * π * f		
Potencia c/transformador:	1KVA		Conexión de la carga:		Estrella		
Cálculo de la carga							
Datos de la prueba	R	L	C	$X_L = j\omega L$	$X_C = -j\frac{1}{\omega C}$	$ Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$
Z1	80,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,00	0,00
Z2	80,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,00	0,00
Z3	80,00	0,00	0,00	0,00	0,00	80,00	0,00
Voltaje Lado primario (Conexión Delta)				Voltaje Lado secundario (Conexión Estrella)			
Voltaje primario L-L				Voltaje secundario L-L			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
Datos de la prueba	Voltaje R-S (V1-2)	40,00	0,00	$V_{S_{L-L}} = V_{S_{L-N}} * \sqrt{3} < +30^\circ$	Voltaje r-s (V1-2)	138,56	30,00
	Voltaje S-T (V2-3)	40,00	-120,00		Voltaje s-t (V2-3)	138,56	-90,00
	Voltaje T-R (V3-1)	40,00	120,00		Voltaje t-r (V3-1)	138,56	150,00
Voltaje primario L-N				Voltaje secundario L-N			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
$V_{p_{L-N}} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} < -30^\circ$	Voltaje R (V1)	23,09	-30,00	$V_{S_{L-N}} = V_{p_{L-L}} * a$	Voltaje r (V1)	80,00	0,00
	Voltaje S (V2)	23,09	-150,00		Voltaje s (V2)	80,00	-120,00
	Voltaje T (V3)	23,09	90,00		Voltaje t (V3)	80,00	120,00
Corriente Lado Primario (Conexión Delta)				Corriente Lado secundario (Conexión Estrella)			
Corriente primario L [A]				Corriente secundario L [A]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]
$I_{p_L} = I_{p_F} * \sqrt{3} < -30^\circ$	Corriente R (I1)	3,46	-30,00	$I_{S_L} = \frac{V_{S_{L-N}}}{Z}$	Corriente r (I1)	1,00	0,00
	Corriente S (I2)	3,46	-150,00		Corriente s (I2)	1,00	-120,00
	Corriente T (I3)	3,46	90,00		Corriente t (I3)	1,00	120,00
	Corriente N (IN)	0,00	0,00		Corriente n (In)		
Corriente primario F [A]				Corriente secundario F [A]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]				
$I_{p_F} = I_{S_L} * a$	Corriente R-S (I1-2)	2,00	0,00				
	Corriente S-T (I2-3)	2,00	-120,00				
	Corriente T-R (I3-1)	2,00	120,00				
Cálculo de potencias lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de potencias lado secundario (Conexión Estrella)			
Potencia activa [W]				Potencia activa [W]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]
$P = V_{p_{L-L}} * I_{p_F} * \cos(\phi_Z)$	Potencia activa P1	80,00	0,00	$P = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \cos(\phi_Z)$	Potencia activa P1	80,00	0,00
	Potencia activa P2	80,00	0,00		Potencia activa P2	80,00	0,00
	Potencia activa P3	80,00	0,00		Potencia activa P3	80,00	0,00
Potencia activa PT (P1+P2+P3)	240,00	0,00	Potencia activa PT (P1+P2+P3)	240,00	0,00		
Potencia Reactiva [VAR]				Potencia Reactiva [VAR]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]
$Q = V_{p_{L-L}} * I_{p_F} * \sin(\phi_Z)$	Potencia reactiva Q1	0,00	90,00	$Q = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \sin(\phi_Z)$	Potencia reactiva Q1	0,00	90,00
	Potencia reactiva Q2	0,00	90,00		Potencia reactiva Q2	0,00	90,00
	Potencia reactiva Q3	0,00	90,00		Potencia reactiva Q3	0,00	90,00
Potencia activa QT (Q1+Q2+Q3)	0,00	90,00	Potencia activa QT (Q1+Q2+Q3)	0,00	90,00		
Potencia aparente [VA]				Potencia aparente [VA]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φz]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φz]
$S = V_{p_{L-L}} * I_{p_F}$ $\phi_S = \phi_Z$	Potencia aparente S1	80,00	0,00	$S = V_{S_{L-L}} * I_{S_L}$ $\phi_S = \phi_Z$	Potencia aparente S1	80,00	0,00
	Potencia aparente S2	80,00	0,00		Potencia aparente S2	80,00	0,00
	Potencia aparente S3	80,00	0,00		Potencia aparente S3	80,00	0,00
$ST = \sqrt{PT^2 + QT^2}$ $\phi_S = \tan^{-1}\left(\frac{QT}{PT}\right)$	Potencia aparente ST	240,00	0,00	$ST = \sqrt{PT^2 + QT^2}$ $\phi_S = \tan^{-1}\left(\frac{QT}{PT}\right)$	Potencia aparente ST	240,00	0,00
Cálculo de Factor de potencia lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de Factor de potencia lado secundario (Conexión Estrella)			
Factor de Potencia				Factor de Potencia			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]		Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	
$Fp = \cos(\phi_S)$	Fp1	1,00		$Fp = \cos(\phi_S)$	Fp1	1,00	
	Fp2	1,00			Fp2	1,00	
	Fp3	1,00			Fp3	1,00	
	FpT	1,00			FpT	1,00	

Tabla 7: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva trifásica de 80Ω

Fuente: Los autores

- Cálculos teóricos con carga resistiva trifásica de 90 Ω.

Cálculos teóricos prueba 1							
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga resistiva trifásica 90Ω							
Relación de transformación [a]:	1:2	elevador	Tipo de carga:		Resistiva		
Frecuencia [Hz]:	60		Velocidad angular [w]:		2 * π * f		
Potencia c/transformador:	1KVA		Conexión de la carga:		Estrella		
Cálculo de la carga							
Datos de la prueba	R	L	C	$X_L = j\omega L$	$X_C = -j\frac{1}{\omega C}$	$ Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$
Z1	90,00	0,00	0,00	0,00	0,00	90,00	0,00
Z2	90,00	0,00	0,00	0,00	0,00	90,00	0,00
Z3	90,00	0,00	0,00	0,00	0,00	90,00	0,00
Voltaje Lado primario (Conexión Delta)				Voltaje Lado secundario (Conexión Estrella)			
Voltaje primario L-L				Voltaje secundario L-L			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
Datos de la prueba	Voltaje R-S (V1-2)	40,00	0,00	$V_{S_{L-L}} = V_{S_{L-N}} * \sqrt{3} < +30^\circ$	Voltaje r-s (V1-2)	138,56	30,00
	Voltaje S-T (V2-3)	40,00	-120,00		Voltaje s-t (V2-3)	138,56	-90,00
	Voltaje T-R (V3-1)	40,00	120,00		Voltaje t-r (V3-1)	138,56	150,00
Voltaje primario L-N				Voltaje secundario L-N			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
$V_{P_{L-N}} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} < -30^\circ$	Voltaje R (V1)	23,09	-30,00	$V_{S_{L-N}} = V_{P_{L-L}} * a$	Voltaje r (V1)	80,00	0,00
	Voltaje S (V2)	23,09	-150,00		Voltaje s (V2)	80,00	-120,00
	Voltaje T (V3)	23,09	90,00		Voltaje t (V3)	80,00	120,00
Corriente Lado Primario (Conexión Delta)				Corriente Lado secundario (Conexión Estrella)			
Corriente primario L [A]				Corriente secundario L [A]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]
$I_{P_L} = I_{P_F} * \sqrt{3} < -30^\circ$	Corriente R (I1)	3,08	-30,00	$I_{S_L} = \frac{V_{S_{L-N}}}{Z}$	Corriente r (I1)	0,89	0,00
	Corriente S (I2)	3,08	-150,00		Corriente s (I2)	0,89	-120,00
	Corriente T (I3)	3,08	90,00		Corriente t (I3)	0,89	120,00
	Corriente N (IN)	0,00	0,00		Corriente n (In)		
Corriente primario F [A]				Corriente secundario F [A]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]				
$I_{P_F} = I_{S_L} * a$	Corriente R-S (I1-2)	1,78	0,00				
	Corriente S-T (I2-3)	1,78	-120,00				
	Corriente T-R (I3-1)	1,78	120,00				
Cálculo de potencias lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de potencias lado secundario (Conexión Estrella)			
Potencia activa [W]				Potencia activa [W]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]
$P = V_{P_{L-L}} * I_{P_F} * \cos(\phi_z)$	Potencia activa P1	71,11	0,00	$P = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \cos(\phi_z)$	Potencia activa P1	71,11	0,00
	Potencia activa P2	71,11	0,00		Potencia activa P2	71,11	0,00
	Potencia activa P3	71,11	0,00		Potencia activa P3	71,11	0,00
Potencia activa PT (P1+P2+P3)	213,33	0,00	Potencia activa PT (P1+P2+P3)	213,33	0,00		
Potencia Reactiva [VAR]				Potencia Reactiva [VAR]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]
$Q = V_{P_{L-L}} * I_{P_F} * \sin(\phi_z)$	Potencia reactiva Q1	0,00	90,00	$Q = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \sin(\phi_z)$	Potencia reactiva Q1	0,00	90,00
	Potencia reactiva Q2	0,00	90,00		Potencia reactiva Q2	0,00	90,00
	Potencia reactiva Q3	0,00	90,00		Potencia reactiva Q3	0,00	90,00
Potencia reactiva QT (Q1+Q2+Q3)	0,00	90,00	Potencia reactiva QT (Q1+Q2+Q3)	0,00	90,00		
Potencia aparente [VA]				Potencia aparente [VA]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φz]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φz]
$S = V_{P_{L-L}} * I_{P_F}$ $\phi_s = \phi_z$	Potencia aparente S1	71,11	0,00	$S = V_{S_{L-L}} * I_{S_L}$ $\phi_s = \phi_z$	Potencia aparente S1	71,11	0,00
	Potencia aparente S2	71,11	0,00		Potencia aparente S2	71,11	0,00
	Potencia aparente S3	71,11	0,00		Potencia aparente S3	71,11	0,00
$ST = \sqrt{PT^2 + QT^2}$ $\phi_s = \tan^{-1}\left(\frac{QT}{PT}\right)$	Potencia aparente ST	213,33	0,00	$ST = \sqrt{PT^2 + QT^2}$ $\phi_s = \tan^{-1}\left(\frac{QT}{PT}\right)$	Potencia aparente ST	213,33	0,00
Cálculo de Factor de potencia lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de Factor de potencia lado secundario (Conexión Estrella)			
Factor de Potencia				Factor de Potencia			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]		Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	
$Fp = \cos(\phi_s)$	Fp1	1,00		$Fp = \cos(\phi_s)$	Fp1	1,00	
	Fp2	1,00			Fp2	1,00	
	Fp3	1,00			Fp3	1,00	
	FpT	1,00			FpT	1,00	

Tabla 8: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva trifásica de 90Ω

Fuente: Los autores

- Cálculos teóricos con carga resistiva trifásica de 100 Ω.

Cálculos teóricos prueba 1							
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga resistiva trifásica 100 Ω							
Relación de transformación [a]:	1:2	elevador		Tipo de carga:		Resistiva	
Frecuencia [Hz]:	60			Velocidad angular [w]:		$2 * \pi * f$	
Potencia c/transformador:	1KVA			Conexión de la carga:		Estrella	
Cálculo de la carga							
Datos de la prueba	R	L	C	$X_L = j\omega L$	$X_C = -j\frac{1}{\omega C}$	$ Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$
Z1	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
Z2	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
Z3	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00
Voltaje Lado primario (Conexión Delta)				Voltaje Lado secundario (Conexión Estrella)			
Voltaje primario L-L				Voltaje secundario L-L			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
Datos de la prueba	Voltaje R-S (V1-2)	40,00	0,00	$V_{S_{L-L}} = V_{S_{L-N}} * \sqrt{3} < +30^\circ$	Voltaje r-s (V1-2)	138,56	30,00
	Voltaje S-T (V2-3)	40,00	-120,00		Voltaje s-t (V2-3)	138,56	-90,00
	Voltaje T-R (V3-1)	40,00	120,00		Voltaje t-r (V3-1)	138,56	150,00
Voltaje primario L-N				Voltaje secundario L-N			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
$V_{p_{L-N}} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} < -30^\circ$	Voltaje R (V1)	23,09	-30,00	$V_{S_{L-N}} = V_{p_{L-L}} * a$	Voltaje r (V1)	80,00	0,00
	Voltaje S (V2)	23,09	-150,00		Voltaje s (V2)	80,00	-120,00
	Voltaje T (V3)	23,09	90,00		Voltaje t (V3)	80,00	120,00
Corriente Lado Primario (Conexión Delta)				Corriente Lado secundario (Conexión Estrella)			
Corriente primario L [A]				Corriente secundario L [A]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]
$I_{p_L} = I_{p_F} * \sqrt{3} < -30^\circ$	Corriente R (I1)	2,77	-30,00	$I_{S_L} = \frac{V_{S_{L-N}}}{Z}$	Corriente r (I1)	0,80	0,00
	Corriente S (I2)	2,77	-150,00		Corriente s (I2)	0,80	-120,00
	Corriente T (I3)	2,77	90,00		Corriente t (I3)	0,80	120,00
	Corriente N (IN)	0,00	0,00		Corriente n (In)		
Corriente primario F [A]				Corriente secundario F [A]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]				
$I_{p_F} = I_{S_L} * a$	Corriente R-S (I1-2)	1,60	0,00				
	Corriente S-T (I2-3)	1,60	-120,00				
	Corriente T-R (I3-1)	1,60	120,00				
Cálculo de potencias lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de potencias lado secundario (Conexión Estrella)			
Potencia activa [W]				Potencia activa [W]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]
$P = V_{p_{L-L}} * I_{p_F} * \cos(\phi_z)$	Potencia activa P1	64,00	0,00	$P = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \cos(\phi_z)$	Potencia activa P1	64,00	0,00
	Potencia activa P2	64,00	0,00		Potencia activa P2	64,00	0,00
	Potencia activa P3	64,00	0,00		Potencia activa P3	64,00	0,00
Potencia activa PT (P1+P2+P3)	192,00	0,00		Potencia activa PT (P1+P2+P3)	192,00	0,00	
Potencia Reactiva [VAR]				Potencia Reactiva [VAR]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]
$Q = V_{p_{L-L}} * I_{p_F} * \sin(\phi_z)$	Potencia reactiva Q1	0,00	90,00	$Q = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \sin(\phi_z)$	Potencia reactiva Q1	0,00	90,00
	Potencia reactiva Q2	0,00	90,00		Potencia reactiva Q2	0,00	90,00
	Potencia reactiva Q3	0,00	90,00		Potencia reactiva Q3	0,00	90,00
Potencia reactiva QT (Q1+Q2+Q3)	0,00	90,00		Potencia reactiva QT (Q1+Q2+Q3)	0,00	90,00	
Potencia aparente [VA]				Potencia aparente [VA]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φz]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φz]
$S = V_{p_{L-L}} * I_{p_F}$ $\phi_s = \phi_z$	Potencia aparente S1	64,00	0,00	$S = V_{S_{L-L}} * I_{S_L}$ $\phi_s = \phi_z$	Potencia aparente S1	64,00	0,00
	Potencia aparente S2	64,00	0,00		Potencia aparente S2	64,00	0,00
	Potencia aparente S3	64,00	0,00		Potencia aparente S3	64,00	0,00
$ST = \sqrt{PT^2 + QT^2}$ $\phi_s = \tan^{-1}\left(\frac{QT}{PT}\right)$	Potencia aparente ST	192,00	0,00	$ST = \sqrt{PT^2 + QT^2}$ $\phi_s = \tan^{-1}\left(\frac{QT}{PT}\right)$	Potencia aparente ST	192,00	0,00
Cálculo de Factor de potencia lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de Factor de potencia lado secundario (Conexión Estrella)			
Factor de Potencia				Factor de Potencia			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]		Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	
$Fp = \cos(\phi_s)$	Fp1	1,00		$Fp = \cos(\phi_s)$	Fp1	1,00	
	Fp2	1,00			Fp2	1,00	
	Fp3	1,00			Fp3	1,00	
	FpT	1,00			FpT	1,00	

Tabla 9: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva trifásica de 100Ω

Fuente: Los autores

4.1.7. CUADROS COMPARATIVOS

- Cuadro comparativo del sistema con carga resistiva trifásica de 80 Ω.

Cuadro comparativo prueba 1					
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga resistiva trifásica 80Ω					
	Parámetros	UNIDADES	Cálculos teóricos	Mediciones prácticas	% Error
LADO PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje R-S (V1-2)	V	40,00	40,55	1,38%
	Voltaje S-T (V2-3)	V	40,00	40,90	2,24%
	Voltaje T-R (V3-1)	V	40,00	39,40	1,50%
	Voltaje R (V1)	V	23,09	22,65	1,94%
	Voltaje S (V2)	V	23,09	24,21	4,83%
	Voltaje T (V3)	V	23,09	22,86	1,00%
	Corriente R (I1)	A	3,46	3,33	3,93%
	Corriente S (I2)	A	3,46	3,42	1,22%
	Corriente T (I3)	A	3,46	3,31	4,33%
	Corriente N (IN)	A	0,00	0,02	
	Potencia activa P1	W	80,00	75,36	5,81%
	Potencia activa P2	W	80,00	82,85	3,56%
	Potencia activa P3	W	80,00	76,01	4,99%
	Potencia activa PT	W	240,00	233,60	2,67%
	Potencia reactiva Q1	VAR	0,00	4,54	
	Potencia reactiva Q2	VAR	0,00	6,29	
	Potencia reactiva Q3	VAR	0,00	6,11	
	Potencia reactiva QT	VAR	0,00	16,90	
	Potencia aparente S1	VA	80,00	75,52	5,60%
	Potencia aparente S2	VA	80,00	83,47	4,34%
Potencia aparente S3	VA	80,00	75,76	5,30%	
Potencia aparente ST	VA	240,00	235,07	2,05%	
Factor de potencia Fp1	-	1,00	1,00	0,30%	
Factor de potencia Fp2	-	1,00	1,00	0,20%	
Factor de potencia Fp3	-	1,00	1,00	0,30%	
Factor de potencia FpT	-	1,00	1,00	0,40%	
LADO SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje r-s (V1-2)	V	138,56	130,93	5,51%
	Voltaje s-t (V2-3)	V	138,56	124,70	10,01%
	Voltaje t-r (V3-1)	V	138,56	125,34	9,54%
	Voltaje r (V1)	V	80,00	74,81	6,49%
	Voltaje s (V2)	V	80,00	74,04	7,45%
	Voltaje t (V3)	V	80,00	71,06	11,17%
	Corriente r (I1)	A	1,00	0,94	6,30%
	Corriente s (I2)	A	1,00	0,93	6,60%
	Corriente t (I3)	A	1,00	0,90	10,10%
	Corriente n (In)	A	0,00	0,01	
	Potencia activa P1	W	80,00	70,17	12,28%
	Potencia activa P2	W	80,00	69,20	13,50%
	Potencia activa P3	W	80,00	64,40	19,50%
	Potencia activa PT	W	240,00	203,57	15,18%
	Potencia reactiva Q1	VAR	0,00	0,96	
	Potencia reactiva Q2	VAR	0,00	0,90	
	Potencia reactiva Q3	VAR	0,00	0,76	
	Potencia reactiva QT	VAR	0,00	2,62	
	Potencia aparente S1	VA	80,00	69,91	12,61%
	Potencia aparente S2	VA	80,00	69,21	13,49%
Potencia aparente S3	VA	80,00	64,40	19,50%	
Potencia aparente ST	VA	240,00	203,57	15,18%	
Factor de potencia Fp1	-	1,00	1,00	0,20%	
Factor de potencia Fp2	-	1,00	1,00	0,10%	
Factor de potencia Fp3	-	1,00	1,00	0,10%	
Factor de potencia FpT	-	1,00	1,00	0,10%	

Tabla 10: Cuadro comparativo de transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva trifásica de 80Ω

Fuente: Los autores

- Cuadro comparativo del sistema con carga resistiva trifásica de 90 Ω.

Cuadro comparativo prueba 1					
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga resistiva trifásica 90Ω					
	Parámetros	UNIDADES	Cálculos teóricos	Mediciones prácticas	% Error
LADO PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje R-S (V1-2)	V	40,00	40,80	2,01%
	Voltaje S-T (V2-3)	V	40,00	41,09	2,73%
	Voltaje T-R (V3-1)	V	40,00	39,60	1,01%
	Voltaje R (V1)	V	23,09	22,87	0,99%
	Voltaje S (V2)	V	23,09	24,32	5,32%
	Voltaje T (V3)	V	23,09	22,98	0,48%
	Corriente R (I1)	A	3,08	2,95	4,10%
	Corriente S (I2)	A	3,08	3,05	0,82%
	Corriente T (I3)	A	3,08	2,95	4,26%
	Corriente N (IN)	A	0,00	0,02	
	Potencia activa P1	W	71,11	67,16	5,56%
	Potencia activa P2	W	71,11	74,63	4,95%
	Potencia activa P3	W	71,11	67,65	4,86%
	Potencia activa PT	W	213,33	209,54	1,78%
	Potencia reactiva Q1	VAR	0,00	4,10	
	Potencia reactiva Q2	VAR	0,00	5,88	
	Potencia reactiva Q3	VAR	0,00	5,98	
	Potencia reactiva QT	VAR	0,00	15,88	
	Potencia aparente S1	VA	71,11	67,70	4,80%
	Potencia aparente S2	VA	71,11	74,76	5,13%
Potencia aparente S3	VA	71,11	67,89	4,54%	
Potencia aparente ST	VA	213,33	210,06	1,53%	
Factor de potencia Fp1	-	1,00	1,00	0,40%	
Factor de potencia Fp2	-	1,00	1,00	0,20%	
Factor de potencia Fp3	-	1,00	1,00	0,40%	
Factor de potencia FpT	-	1,00	1,00	0,40%	
LADO SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje r-s (V1-2)	V	138,56	131,75	4,92%
	Voltaje s-t (V2-3)	V	138,56	126,48	8,72%
	Voltaje t-r (V3-1)	V	138,56	127,30	8,13%
	Voltaje r (V1)	V	80,00	75,77	5,28%
	Voltaje s (V2)	V	80,00	74,63	6,71%
	Voltaje t (V3)	V	80,00	72,40	9,50%
	Corriente r (I1)	A	0,89	0,83	6,40%
	Corriente s (I2)	A	0,89	0,83	7,19%
	Corriente t (I3)	A	0,89	0,80	10,11%
	Corriente n (In)	A	0,00	0,01	
	Potencia activa P1	W	71,11	62,64	11,92%
	Potencia activa P2	W	71,11	61,72	13,21%
	Potencia activa P3	W	71,11	57,20	19,56%
	Potencia activa PT	W	213,33	181,76	14,80%
	Potencia reactiva Q1	VAR	0,00	0,76	
	Potencia reactiva Q2	VAR	0,00	0,88	
	Potencia reactiva Q3	VAR	0,00	0,71	
	Potencia reactiva QT	VAR	0,00	2,36	
	Potencia aparente S1	VA	71,11	62,64	11,92%
	Potencia aparente S2	VA	71,11	61,72	13,20%
Potencia aparente S3	VA	71,11	57,21	19,55%	
Potencia aparente ST	VA	213,33	181,77	14,79%	
Factor de potencia Fp1	-	1,00	1,00	0,40%	
Factor de potencia Fp2	-	1,00	1,00	0,10%	
Factor de potencia Fp3	-	1,00	1,00	0,10%	
Factor de potencia FpT	-	1,00	1,00	0,10%	

Tabla 11: Cuadro comparativo de transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva trifásica de 90Ω
Fuente: Los autores

- Cuadro comparativo del sistema con carga resistiva trifásica de 100 Ω.

Cuadro comparativo prueba 1					
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga resistiva trifásica 100Ω					
Parámetros	UNIDADES	Cálculos teóricos	Mediciones prácticas	% Error	
LADO PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje R-S (V1-2)	V	40,00	40,96	2,40%
	Voltaje S-T (V2-3)	V	40,00	41,14	2,86%
	Voltaje T-R (V3-1)	V	40,00	39,64	0,90%
	Voltaje R (V1)	V	23,09	22,91	0,81%
	Voltaje S (V2)	V	23,09	24,44	5,81%
	Voltaje T (V3)	V	23,09	22,90	0,83%
	Corriente R (I1)	A	2,77	2,72	1,92%
	Corriente S (I2)	A	2,77	2,78	0,39%
	Corriente T (I3)	A	2,77	2,70	2,61%
	Corriente N (IN)	A	0,00	0,02	
	Potencia activa P1	W	64,00	62,06	3,03%
	Potencia activa P2	W	64,00	68,29	6,70%
	Potencia activa P3	W	64,00	61,58	3,78%
	Potencia activa PT	W	192,00	191,78	0,11%
	Potencia reactiva Q1	VAR	0,00	3,73	
	Potencia reactiva Q2	VAR	0,00	6,00	
	Potencia reactiva Q3	VAR	0,00	5,49	
	Potencia reactiva QT	VAR	0,00	15,24	
	Potencia aparente S1	VA	64,00	62,36	2,57%
	Potencia aparente S2	VA	64,00	68,03	6,29%
Potencia aparente S3	VA	64,00	61,96	3,19%	
Potencia aparente ST	VA	192,00	192,76	0,40%	
Factor de potencia Fp1	-	1,00	1,00	0,40%	
Factor de potencia Fp2	-	1,00	1,00	0,20%	
Factor de potencia Fp3	-	1,00	0,99	0,80%	
Factor de potencia FpT	-	1,00	1,00	0,10%	
LADO SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje r-s (V1-2)	V	138,56	133,90	3,37%
	Voltaje s-t (V2-3)	V	138,56	128,81	7,04%
	Voltaje t-r (V3-1)	V	138,56	129,10	6,83%
	Voltaje r (V1)	V	80,00	76,65	4,18%
	Voltaje s (V2)	V	80,00	75,64	5,46%
	Voltaje t (V3)	V	80,00	73,47	8,16%
	Corriente r (I1)	A	0,80	0,77	4,38%
	Corriente s (I2)	A	0,80	0,76	5,13%
	Corriente t (I3)	A	0,80	0,74	8,00%
	Corriente n (In)	A	0,00	0,01	
	Potencia activa P1	W	64,00	58,54	8,54%
	Potencia activa P2	W	64,00	57,51	10,15%
	Potencia activa P3	W	64,00	53,69	16,12%
	Potencia activa PT	W	192,00	169,29	11,83%
	Potencia reactiva Q1	VAR	0,00	0,78	
	Potencia reactiva Q2	VAR	0,00	0,75	
	Potencia reactiva Q3	VAR	0,00	0,66	
	Potencia reactiva QT	VAR	0,00	2,19	
	Potencia aparente S1	VA	64,00	58,51	8,59%
	Potencia aparente S2	VA	64,00	57,51	10,14%
Potencia aparente S3	VA	64,00	53,69	16,11%	
Potencia aparente ST	VA	192,00	169,30	11,82%	
Factor de potencia Fp1	-	1,00	1,00	0,20%	
Factor de potencia Fp2	-	1,00	1,00	0,10%	
Factor de potencia Fp3	-	1,00	1,00	0,10%	
Factor de potencia FpT	-	1,00	1,00	0,10%	

Tabla 12: Cuadro comparativo de transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva trifásica de 100Ω
Fuente: Los autores

4.1.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Voltajes del lado primario (delta): V_{L-N} atrasados 30° con respecto a los V_{L-L} .
- Corrientes del lado primario (delta): Corrientes de línea en fase con V_{L-N} debido a que la carga es mayormente resistiva. Su magnitud disminuye linealmente a medida que se aumenta la resistencia de la carga.
- Voltajes del lado secundario (estrella): V_{L-N} en fase con V_{L-L} del primario. V_{L-L} adelantados 30° con respecto a los V_{L-N} .
- Corrientes del lado secundario (estrella): Corrientes de línea en fase con V_{L-N} debido a que la carga es mayormente resistiva. Su magnitud disminuye linealmente a medida que se aumenta la resistencia de la carga.
- Triángulo de potencias lado primario: Potencia mayormente activa y F_p cercano a la unidad debido a que la carga es mayormente resistiva. Presencia de potencia reactiva debido a la inductancia de los transformadores. Potencias disminuyen a medida que la resistencia de la carga aumenta.
- Triángulo de potencias lado secundario: Potencia mayormente activa y F_p cercano a la unidad debido a que la carga es mayormente resistiva. Menor presencia de potencia reactiva debido a que la inductancia de los transformadores ya no forma parte de la carga. Potencias disminuyen a medida que la resistencia de la carga aumenta.

4.2. PRUEBA N°2: ANÁLISIS DE LA CONEXIÓN D-Y AL CONECTAR UNA CARGA INDUCTIVA-RESISTIVA TRIFÁSICA Y UNA CARGA RESISTIVA MONOFÁSICA.

Esta prueba consiste en analizar el comportamiento y los ángulos de desfase de los fasores de voltaje y corriente, además de las potencias activas, reactivas y aparentes de un sistema de transformadores trifásicos conectados en Delta – Estrella con una carga inductiva-resistiva trifásica conectada en estrella por medio de un motor y una carga resistiva monofásica por medio de un foco incandescente.

4.2.1. DIAGRAMA

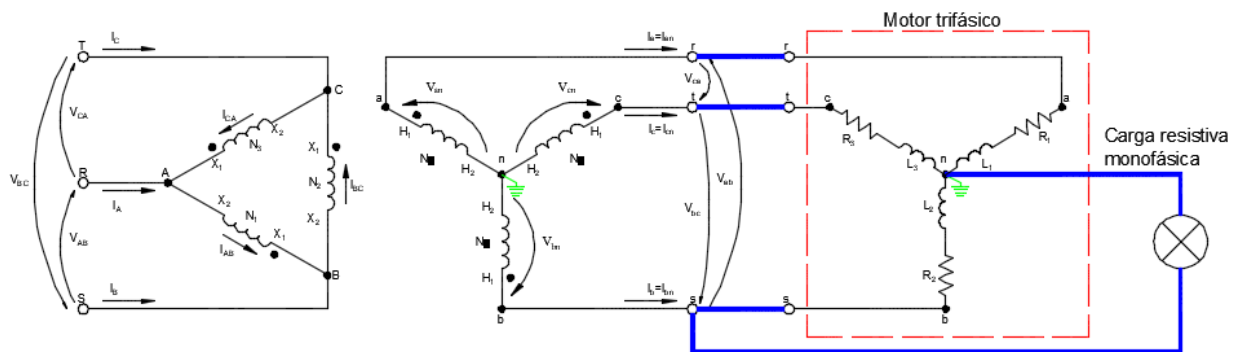


Ilustración 120: Prueba N°2 – Conexión D-y de transformadores trifásicos con carga inductiva-resistiva trifásica (motor) y carga resistiva monofásica (foco incandescente)

Fuente: (Chapman, 2000)

Elaborado por: Los autores

4.2.2. RECURSOS

Para la realización de esta prueba se utilizaron los siguientes recursos

- Tablero de pruebas de transformadores trifásicos
- Alimentación trifásica 120/240 Vac
- Carga inductiva-resistiva trifásica (motor trifásico)
- Carga resistiva monofásica (foco incandescente)

- Cables de conexión
- Módulo de adquisición de datos (PLC)
- Laptop
- Multímetro

4.2.3. PROCEDIMIENTO

El procedimiento a seguir en esta prueba es la siguiente:

- Realizar la conexión Delta – Estrella en el tablero de pruebas de transformadores
- Se conectará al sistema una carga inductiva-resistiva trifásica en estrella (motor trifásico) y una carga resistiva monofásica (foco incandescente)
- Conectar los cables de comunicación entre el medidor de parámetros, el PLC y la laptop
- Realizar la simulación en LabVIEW y posterior análisis de los datos y diagramas fasoriales adquiridos

4.2.4. VENTANA GRÁFICA: DIAGRAMAS FASORIALES VOLTAJE Y CORRIENTE

- Diagramas fasoriales de voltaje y corriente del lado primario del transformador trifásico con carga inductiva-resistiva trifásica por medio de un motor y una carga resistiva monofásica por medio de un foco incandescente conectado a una de las fases.

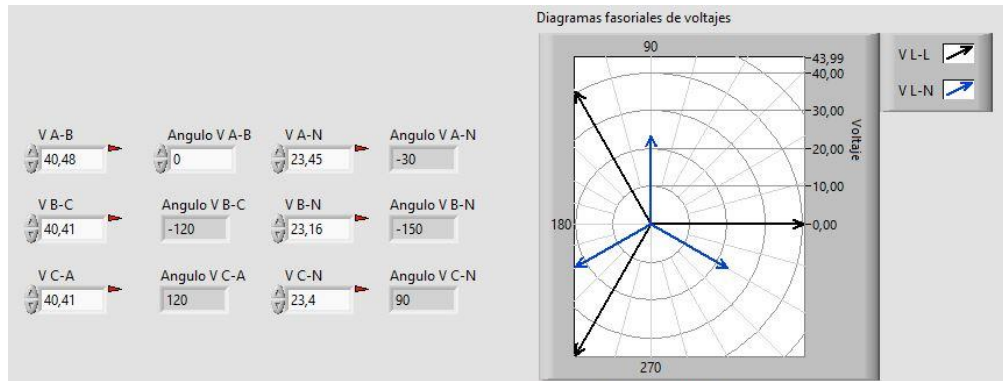


Ilustración 121: Prueba N°2 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga inductiva-resistiva trifásica (motor) y carga resistiva monofásica (foco incandescente)

Fuente: LabVIEW

Elaborado por: Los autores

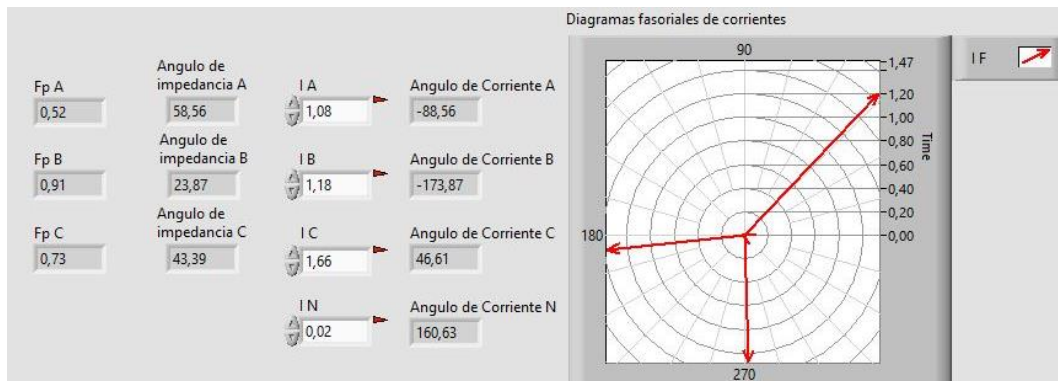


Ilustración 122: Prueba N°2 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) y carga resistiva monofásica (foco incandescente)

Fuente: LabVIEW

Elaborado por: Los autores

- Diagramas fasoriales de voltaje y corriente del lado secundario del transformador trifásico con carga inductiva-resistiva trifásica por medio de un motor y una carga resistiva monofásica por medio de un foco incandescente conectado a una de las fases.

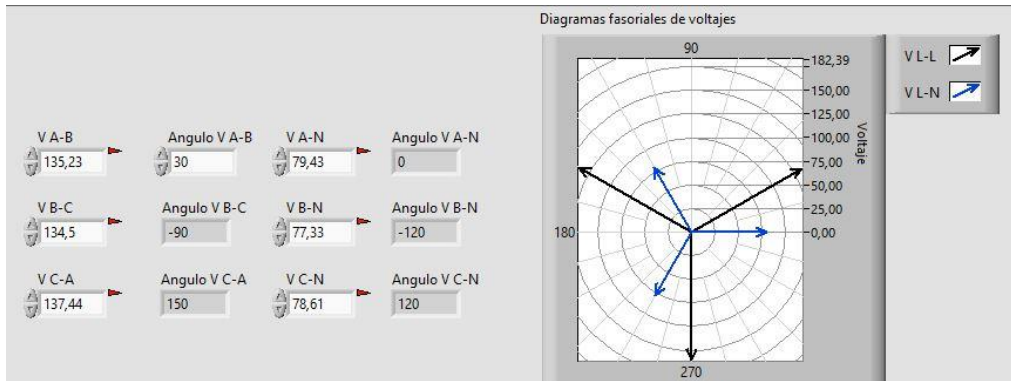


Ilustración 123: Prueba N°2 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) y carga resistiva monofásica (foco incandescente)

Fuente: LabVIEW

Elaborado por: Los autores

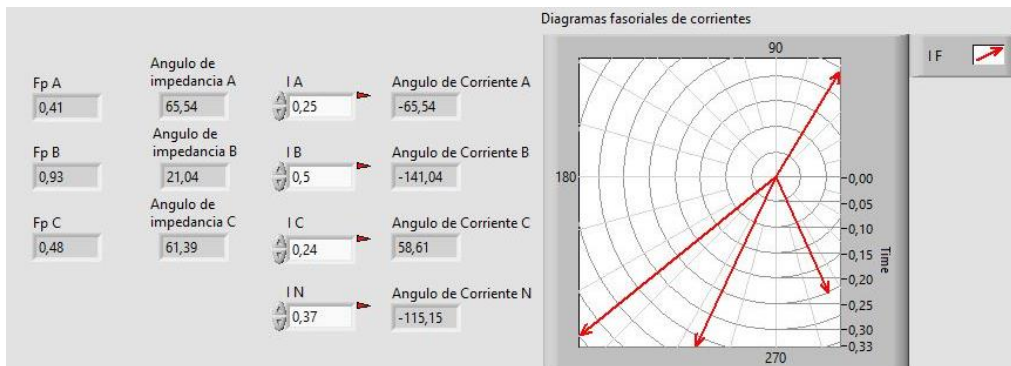


Ilustración 124: Prueba N°2 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) y carga resistiva monofásica (foco incandescente)

Fuente: LabVIEW

Elaborado por: Los autores

4.2.5. VENTANA GRÁFICA: TRIÁNGULOS DE POTENCIA

- Triángulos de potencia de cada fase y total del lado primario del transformador trifásico con carga inductiva-resistiva trifásica por medio de un motor y una carga resistiva monofásica por medio de un foco incandescente conectado a una de las fases.

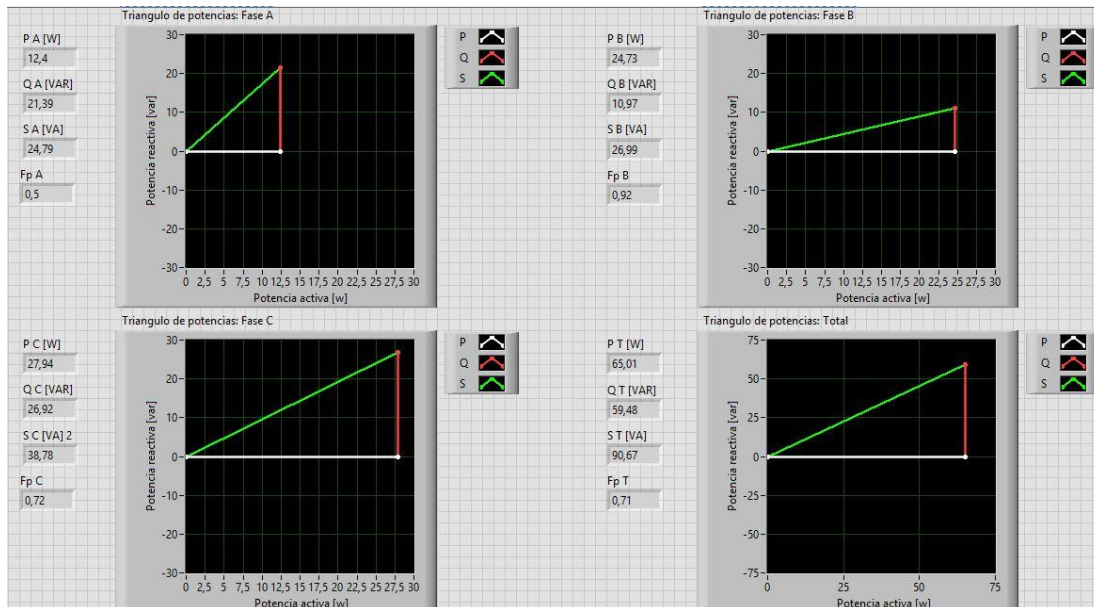


Ilustración 125: Prueba N°2 – Triángulos de potencia lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) y carga resistiva monofásica (foco incandescente)

Fuente: LabVIEW

Elaborado por: Los autores

- Triángulos de potencia de cada fase y total del lado secundario del transformador trifásico con carga inductiva-resistiva trifásica por medio de un motor y una carga resistiva monofásica por medio de un foco incandescente conectado a una de las fases.

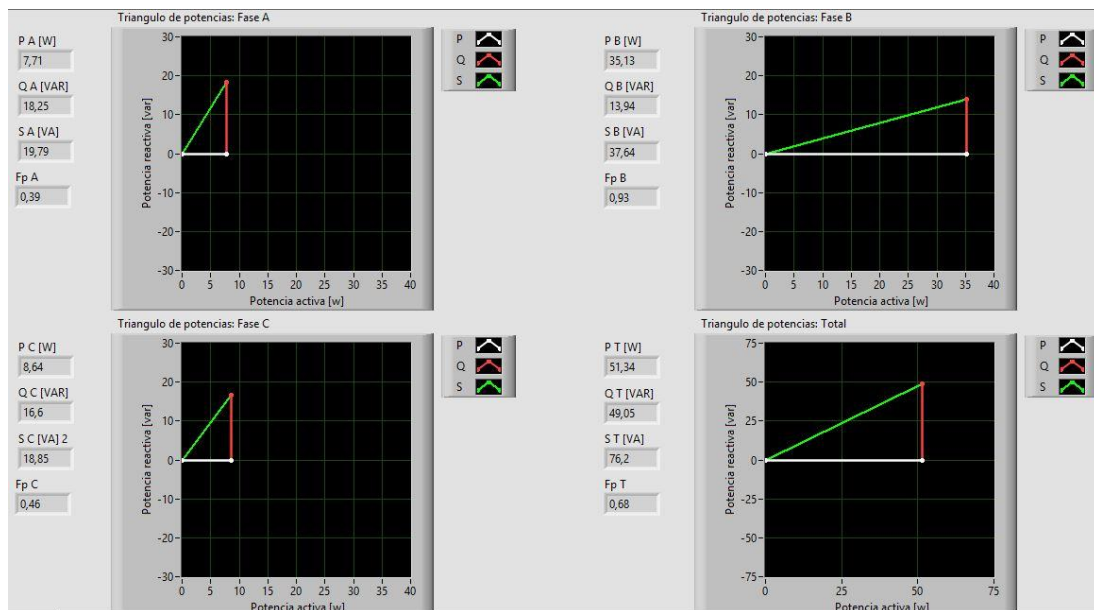


Ilustración 126: Prueba N°2 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) y carga resistiva monofásica (foco incandescente)

Fuente: LabVIEW

Elaborado por: Los autores

4.2.6. CÁLCULOS TEÓRICOS

- Cálculos teóricos con carga resistiva-inductiva trifásica (motor más foco).

Cálculos teóricos prueba 2								
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga resistiva-inductiva trifásica (motor más foco incandescente)								
Relación de transformación [a]:	1:2	elevador		Tipo de carga:	Resistiva			
Frecuencia [Hz]:	60			Velocidad angular [w]:	$2 * \pi * f$			
Potencia c/transformador:	1KVA			Conexión de la carga:	Estrella			
Cálculo de la carga								
Datos del motor trabajando a 80V	Fp	$\phi = \cos^{-1}(Fp)$	Impedancia Z	Datos del foco incandescente	Impedancia Z	Impedancia resultante de fase del motor con foco en paralelo	$\frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}$	
	0,37	68,28	350		260		149,18	
Datos de la prueba	R	L	C	$X_L = j\omega L$	$X_C = -j\frac{1}{\omega C}$	$ Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$	
Z1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	350,00	68,28	
Z2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	149,18	21,56	
Z3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	350,00	68,28	
Voltaje Lado primario (Conexión Delta)				Voltaje Lado secundario (Conexión Estrella)				
Voltaje primario L-L				Voltaje secundario L-L				
Datos de la prueba	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
		Voltaje R-S (V1-2)	40,00	0,00	$V_{S_{L-L}} = V_{S_{L-N}} * \sqrt{3} < +30^\circ$	Voltaje r-s (V1-2)	138,56	30,00
		Voltaje S-T (V2-3)	40,00	-120,00		Voltaje s-t (V2-3)	138,56	-90,00
		Voltaje T-R (V3-1)	40,00	120,00		Voltaje t-r (V3-1)	138,56	150,00
Voltaje primario L-N				Voltaje secundario L-N				
$V_{P_{L-N}} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} < -30^\circ$	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
		Voltaje R (V1)	23,09	-30,00	$V_{S_{L-N}} = V_{P_{L-L}} * a$	Voltaje r (V1)	80,00	0,00
		Voltaje S (V2)	23,09	-150,00		Voltaje s (V2)	80,00	-120,00
		Voltaje T (V3)	23,09	90,00		Voltaje t (V3)	80,00	120,00
Corriente Lado Primario (Conexión Delta)				Corriente Lado secundario (Conexión Estrella)				
Corriente primario L [A]				Corriente secundario L [A]				
$I_{P_L} = I_{P_F} * \sqrt{3} < -30^\circ$	Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]
		Corriente R (I1)	0,79	-98,28	$I_{S_L} = \frac{V_{S_{L-N}}}{Z}$	Corriente r (I1)	0,23	-68,28
		Corriente S (I2)	1,86	-171,56		Corriente s (I2)	0,54	-141,56
		Corriente T (I3)	0,79	21,72		Corriente t (I3)	0,23	51,72
		Corriente N (IN)	0,00	0,00		Corriente n (In)		
Corriente primario F [A]				Corriente secundario F [A]				
$I_{P_F} = I_{S_L} * a$	Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]				
		Corriente R-S (I1-2)	0,46	-68,28				
		Corriente S-T (I2-3)	1,07	-141,56				
		Corriente T-R (I3-1)	0,46	51,72				
Cálculo de potencias lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de potencias lado secundario (Conexión Estrella)				
Potencia activa [W]				Potencia activa [W]				
$P = V_{P_{L-L}} * I_{P_F} * \cos(\phi_z)$	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]
		Potencia activa P1	6,77	0,00	$P = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \cos(\phi_z)$	Potencia activa P1	6,77	0,00
		Potencia activa P2	39,90	0,00		Potencia activa P2	39,90	0,00
		Potencia activa P3	6,77	0,00		Potencia activa P3	6,77	0,00
	Potencia activa PT (P1+P2+P3)	53,43	0,00	Potencia activa PT (P1+P2+P3)		53,43	0,00	
Potencia Reactiva [VAR]				Potencia Reactiva [VAR]				
$Q = V_{P_{L-L}} * I_{P_F} * \sin(\phi_z)$	Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]
		Potencia reactiva Q1	16,99	90,00	$Q = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \sin(\phi_z)$	Potencia reactiva Q1	16,99	90,00
		Potencia reactiva Q2	15,77	90,00		Potencia reactiva Q2	15,77	90,00
		Potencia reactiva Q3	16,99	90,00		Potencia reactiva Q3	16,99	90,00
	Potencia reactiva QT (Q1+Q2+Q3)	49,74	90,00	Potencia reactiva QT (Q1+Q2+Q3)		49,74	90,00	
Potencia aparente [VA]				Potencia aparente [VA]				
$S = V_{P_{L-L}} * I_{P_F}$ $\phi_s = \phi_z$	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φz]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φz]
		Potencia aparente S1	18,29	68,28	$S = V_{S_{L-L}} * I_{S_L}$ $\phi_s = \phi_z$	Potencia aparente S1	18,29	68,28
		Potencia aparente S2	42,90	21,56		Potencia aparente S2	42,90	21,56
		Potencia aparente S3	18,29	68,28		Potencia aparente S3	18,29	68,28
	Potencia aparente ST	73,00	42,95	Potencia aparente ST		73,00	42,95	
Cálculo de Factor de potencia lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de Factor de potencia lado secundario (Conexión Estrella)				
Factor de Potencia				Factor de Potencia				
$Fp = \cos(\phi_s)$	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]		Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	
		Fp1	0,37		$Fp = \cos(\phi_s)$	Fp1	0,37	
		Fp2	0,93			Fp2	0,93	
		Fp3	0,37			Fp3	0,37	
		FpT	0,73			FpT	0,73	

Tabla 13: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva-inductiva trifásica

Fuente: Los autores

4.2.7. CUADROS COMPARATIVOS

- Cuadro comparativo del sistema con carga resistiva-inductiva trifásica (motor más foco).

Cuadro comparativo prueba 2					
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga resistiva-inductiva trifásica (motor más foco incandescente)					
	Parámetros	UNIDADES	Cálculos teóricos	Mediciones prácticas	% Error
LADO PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje R-S (V1-2)	V	40,00	40,48	1,20%
	Voltaje S-T (V2-3)	V	40,00	40,41	1,02%
	Voltaje T-R (V3-1)	V	40,00	40,41	1,02%
	Voltaje R (V1)	V	23,09	23,45	1,54%
	Voltaje S (V2)	V	23,09	23,16	0,29%
	Voltaje T (V3)	V	23,09	23,40	1,32%
	Corriente R (I1)	A	0,79	1,08	36,40%
	Corriente S (I2)	A	1,86	1,18	36,48%
	Corriente T (I3)	A	0,79	1,66	109,65%
	Corriente N (IN)	A	0,00	0,02	
	Potencia activa P1	W	6,77	12,40	83,28%
	Potencia activa P2	W	39,90	24,73	38,02%
	Potencia activa P3	W	6,77	27,94	312,96%
	Potencia activa PT	W	53,43	65,01	21,67%
	Potencia reactiva Q1	VAR	16,99	21,39	25,91%
	Potencia reactiva Q2	VAR	15,77	10,97	30,42%
	Potencia reactiva Q3	VAR	16,99	26,92	58,46%
	Potencia reactiva QT	VAR	49,74	59,48	19,58%
	Potencia aparente S1	VA	18,29	24,79	35,57%
	Potencia aparente S2	VA	42,90	26,99	37,09%
Potencia aparente S3	VA	18,29	38,78	112,08%	
Potencia aparente ST	VA	73,00	90,67	24,21%	
Factor de potencia Fp1	-	0,37	0,50	35,14%	
Factor de potencia Fp2	-	0,93	0,92	1,08%	
Factor de potencia Fp3	-	0,37	0,72	94,59%	
Factor de potencia FpT	-	0,73	0,71	3,00%	
LADO SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje r-s (V1-2)	V	138,56	135,23	2,41%
	Voltaje s-t (V2-3)	V	138,56	134,50	2,93%
	Voltaje t-r (V3-1)	V	138,56	137,44	0,81%
	Voltaje r (V1)	V	80,00	79,43	0,71%
	Voltaje s (V2)	V	80,00	77,33	3,34%
	Voltaje t (V3)	V	80,00	78,61	1,74%
	Corriente r (I1)	A	0,23	0,25	9,38%
	Corriente s (I2)	A	0,54	0,50	6,76%
	Corriente t (I3)	A	0,23	0,24	5,00%
	Corriente n (In)	A	0,00	0,37	
	Potencia activa P1	W	6,77	7,71	13,96%
	Potencia activa P2	W	39,90	35,13	11,95%
	Potencia activa P3	W	6,77	8,64	27,70%
	Potencia activa PT	W	53,43	51,34	3,91%
	Potencia reactiva Q1	VAR	16,99	18,25	7,43%
	Potencia reactiva Q2	VAR	15,77	13,94	11,58%
	Potencia reactiva Q3	VAR	16,99	16,60	2,28%
	Potencia reactiva QT	VAR	49,74	49,05	1,39%
	Potencia aparente S1	VA	18,29	19,79	8,23%
	Potencia aparente S2	VA	42,90	37,64	12,26%
Potencia aparente S3	VA	18,29	18,85	3,09%	
Potencia aparente ST	VA	73,00	76,20	4,38%	
Factor de potencia Fp1	-	0,37	0,39	5,41%	
Factor de potencia Fp2	-	0,93	0,93	0,00%	
Factor de potencia Fp3	-	0,37	0,46	24,32%	
Factor de potencia FpT	-	0,73	0,68	7,09%	

Tabla 14: Cuadro comparativo de transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva-inductiva trifásica

Fuente: Los autores

4.2.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Voltajes del lado primario (delta): V_{L-N} atrasados 30° con respecto a los V_{L-L} .
- Corrientes del lado primario (delta): Corrientes de línea en atraso con respecto a los V_{L-N} debido a que la carga es resistiva-inductiva. Mayor magnitud de corriente en una de las fases debido al desbalance provocado por la carga monofásica.
- Voltajes del lado secundario (estrella): V_{L-N} en fase con V_{L-L} del primario. V_{L-L} adelantados 30° con respecto a los V_{L-N} .
- Corrientes del lado secundario (estrella): Corrientes de línea en atraso con respecto a los V_{L-N} debido a que la carga es resistiva-inductiva. Mayor magnitud de corriente en una de las fases y presencia de corriente en el neutro debido al desbalance provocado por la carga monofásica.
- Triángulo de potencias lado primario: Presencia de potencia activa y reactiva y F_p en atraso debido a que la carga es resistiva-inductiva. Incremento de la potencia activa en una de las fases debido al desbalance provocado por la carga monofásica.
- Triángulo de potencias lado secundario: Presencia de potencia activa y reactiva y F_p en atraso debido a que la carga es resistiva-inductiva. Incremento de la potencia activa en una de las fases debido al desbalance provocado por la carga monofásica. Menor presencia de potencia reactiva debido a que la inductancia de los transformadores ya no forma parte de la carga.

4.3. PRUEBA N°3: ANÁLISIS DE LA CONEXIÓN D-Y AL CONECTAR UNA CARGA INDUCTIVA-RESISTIVA TRIFÁSICA, SIMULANDO LA PÉRDIDA DE UNA LÍNEA.

Esta prueba consiste en analizar el comportamiento y los ángulos de desfase de los fasores de voltaje y corriente, además de las potencias activas, reactivas y aparentes de un sistema de transformadores trifásicos conectados en Delta – Estrella con una carga inductiva-resistiva trifásica conectada en estrella por medio de un motor, al cual se simulará en el sistema la pérdida de una fase del lado del primario del transformador y posteriormente del lado secundario.

4.3.1. DIAGRAMA

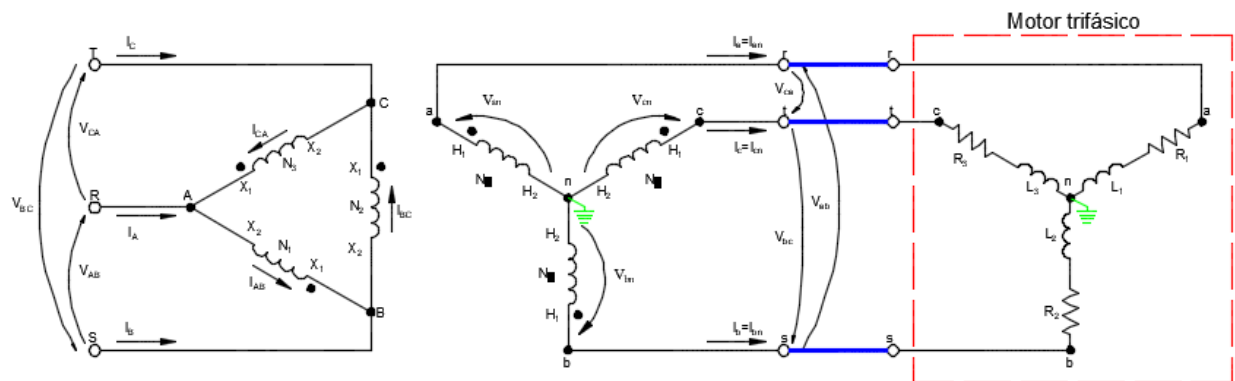


Ilustración 127: Prueba N°3 – Conexión D-y de transformadores trifásicos con carga inductiva trifásica (motor) y simulación de pérdidas de fase

Fuente: (Chapman, 2000)

Elaborado por: Los autores

4.3.2. RECURSOS

Para la realización de esta prueba se utilizaron los siguientes recursos

- Tablero de pruebas de transformadores trifásicos
- Alimentación trifásica 120/240 Vac

- Carga inductiva-resistiva trifásica (motor trifásico)
- Cables de conexión
- Módulo de adquisición de datos (PLC)
- Laptop
- Multímetro

4.3.3. PROCEDIMIENTO

El procedimiento a seguir en esta prueba es la siguiente:

- Realizar la conexión Delta – Estrella en el tablero de pruebas de transformadores
- Se conectará al sistema una carga inductiva-resistiva trifásica (motor trifásico)
- Conectar los cables de comunicación entre el medidor de parámetros, el PLC y la laptop
- Realizar la simulación en LabVIEW y posterior análisis de los datos y diagramas fasoriales adquiridos
- Simular la pérdida de una fase del lado primario del transformador y posteriormente del lado secundario, y realizar la respectiva simulación y análisis en cada caso.

4.3.4. VENTANA GRÁFICA: DIAGRAMAS FASORIALES VOLTAJE Y CORRIENTE

- Diagramas fasoriales de voltaje y corriente del lado primario del transformador trifásico con carga inductiva-resistiva trifásica por medio de un motor y posterior pérdida de una fase del lado primario y luego del lado secundario.

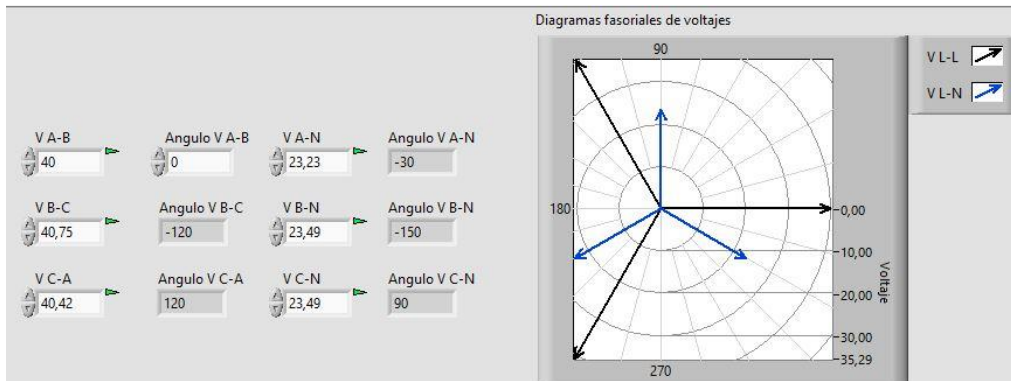


Ilustración 128: Prueba N°3 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga inductiva trifásica (motor)
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

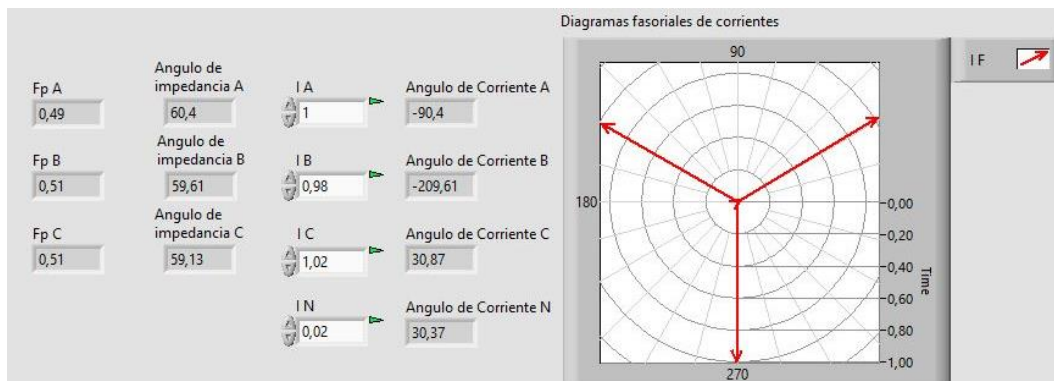


Ilustración 129: Prueba N°3 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga inductiva trifásica (motor)
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

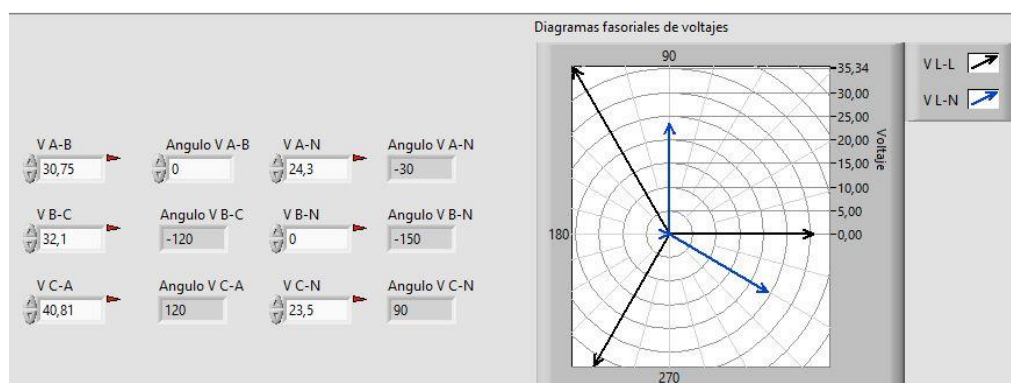


Ilustración 130: Prueba N°3 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado primario
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

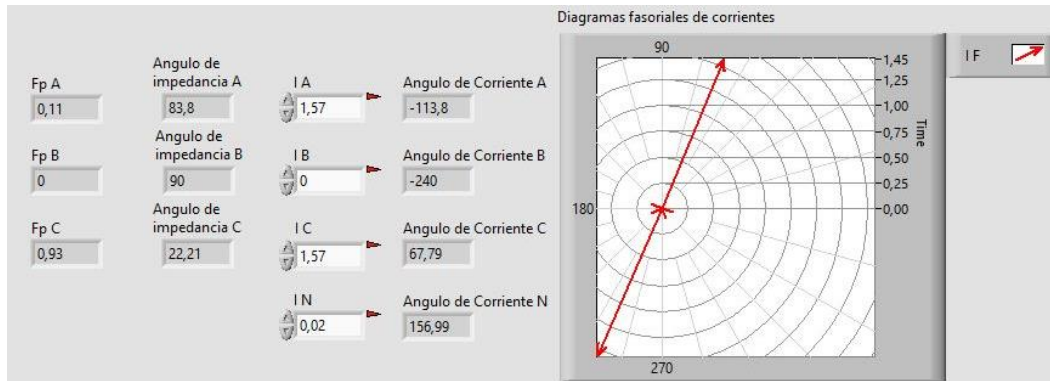


Ilustración 131: Prueba N°3 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado primario
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

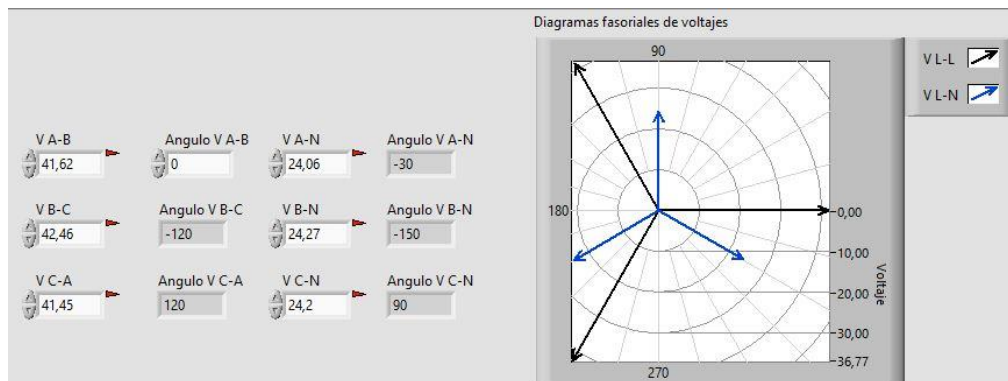


Ilustración 132: Prueba N°3 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado secundario
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

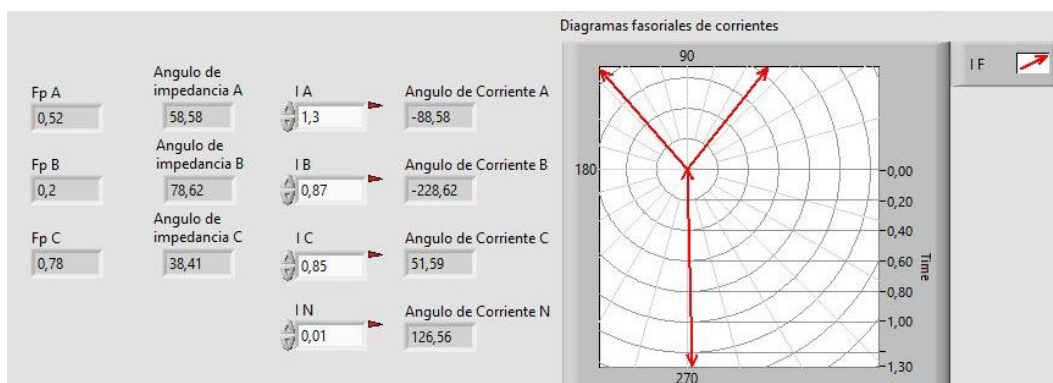


Ilustración 133: Prueba N°3 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado secundario
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

- Diagramas fasoriales de voltaje y corriente del lado secundario del transformador trifásico con carga inductiva-resistiva trifásica por medio de un motor y posterior pérdida de una fase del lado primario y luego del lado secundario.

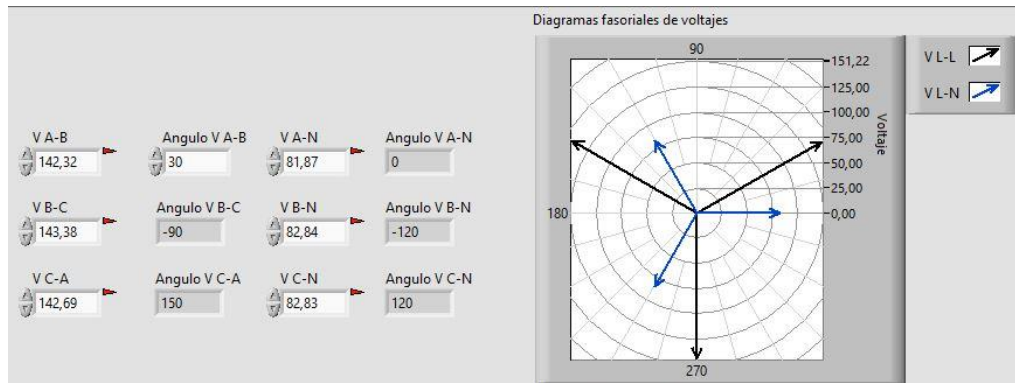


Ilustración 134: Prueba N°3 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor)
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

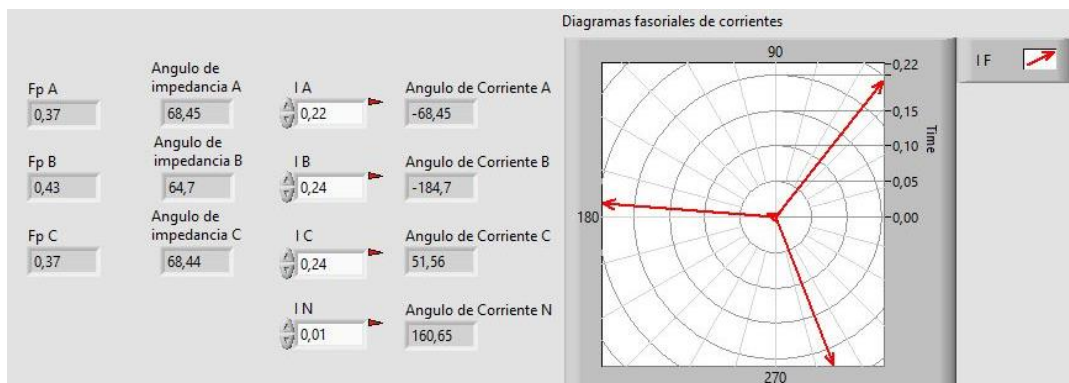


Ilustración 135: Prueba N°3 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor)
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

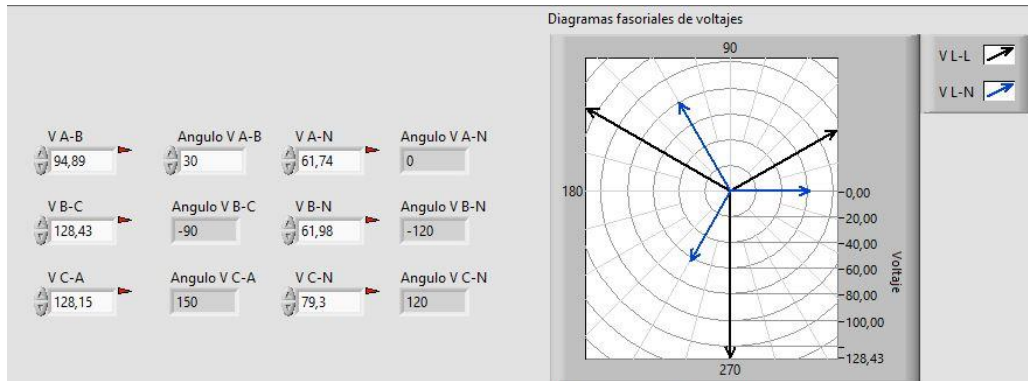


Ilustración 136: Prueba N°3 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado primario

Fuente: LabVIEW

Elaborado por: Los autores

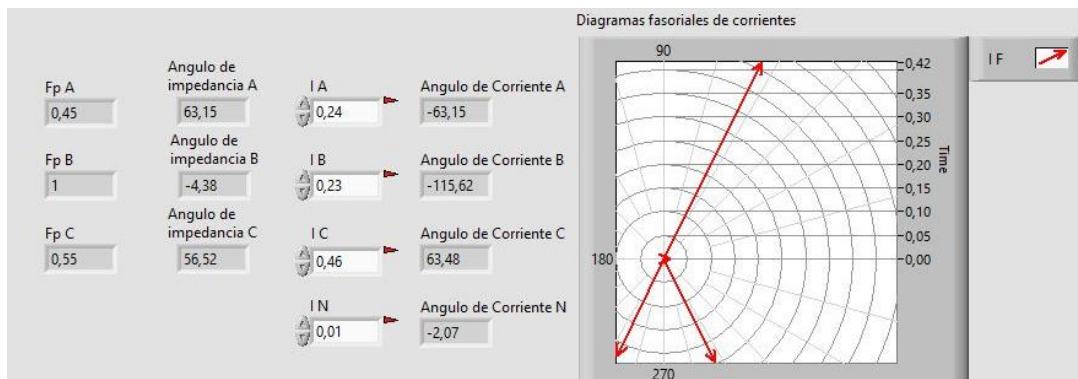


Ilustración 137: Prueba N°3 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado primario

Fuente: LabVIEW

Elaborado por: Los autores

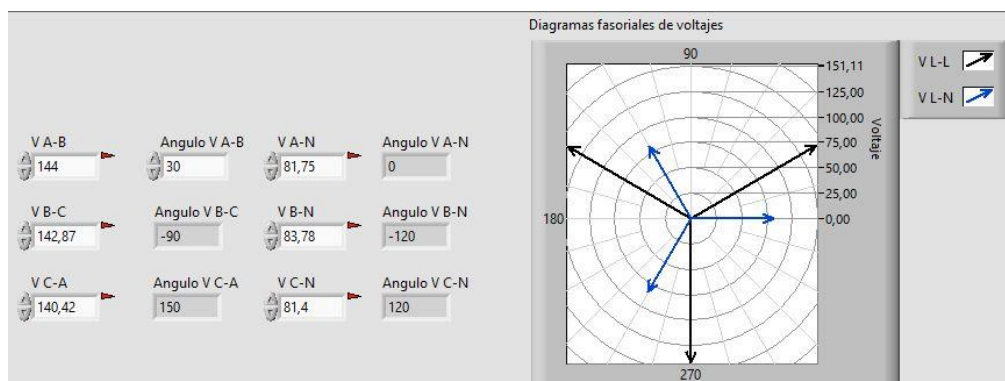


Ilustración 138: Prueba N°3 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado secundario

Fuente: LabVIEW

Elaborado por: Los autores

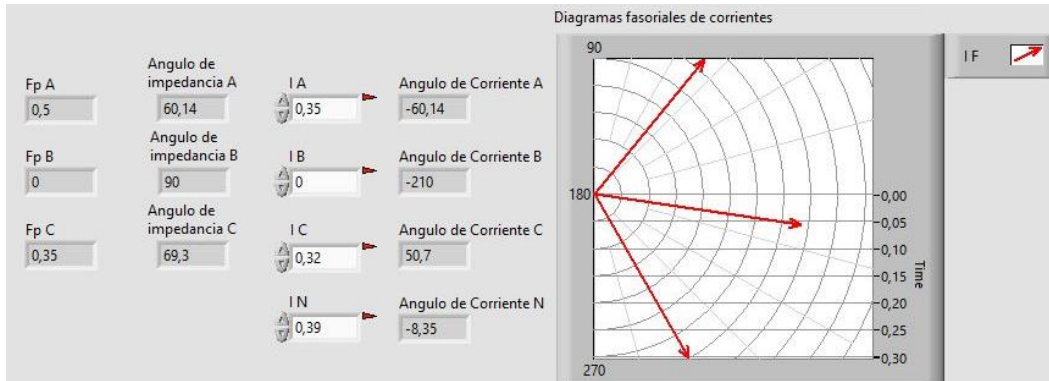


Ilustración 139: Prueba N°3 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado secundario
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

4.3.5. VENTANA GRÁFICA: TRIÁNGULOS DE POTENCIA

- Triángulos de potencia de cada fase y total del lado primario del transformador trifásico con carga inductiva-resistiva trifásica por medio de un motor y posterior pérdida de una fase del lado primario y luego del lado secundario.

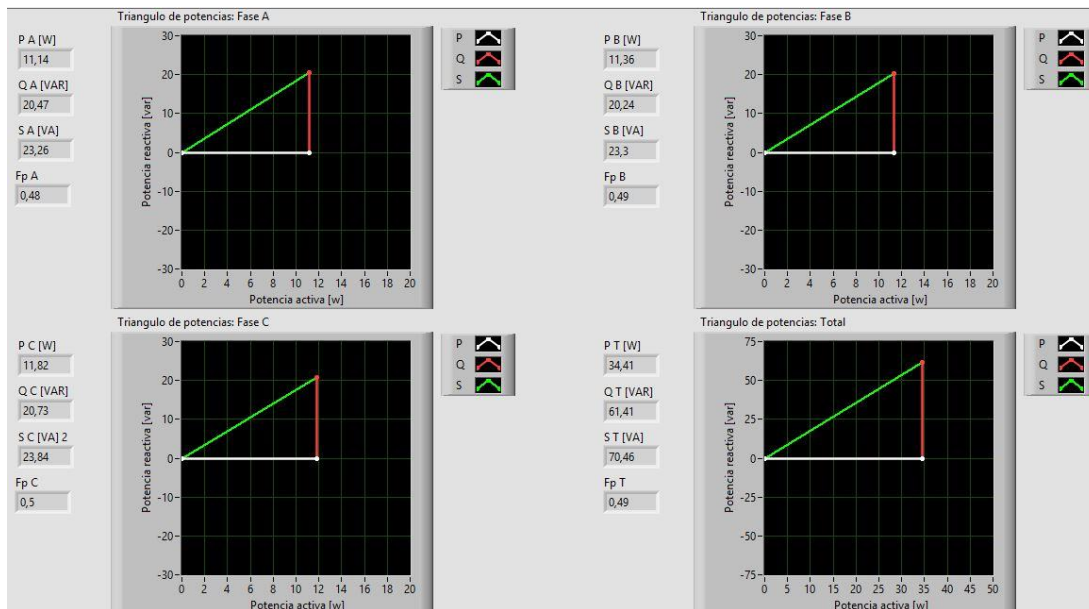


Ilustración 140: Prueba N°3 – Triángulos de potencia lado primario. Carga inductiva trifásica (motor)
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

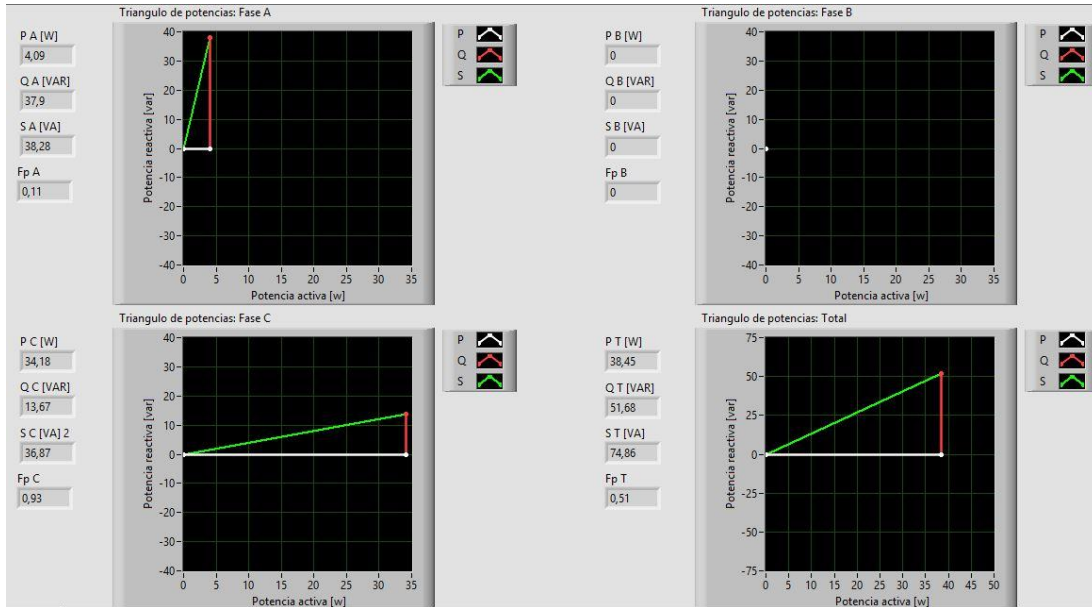


Ilustración 141: Prueba N°3 – Triángulos de potencia lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado primario
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

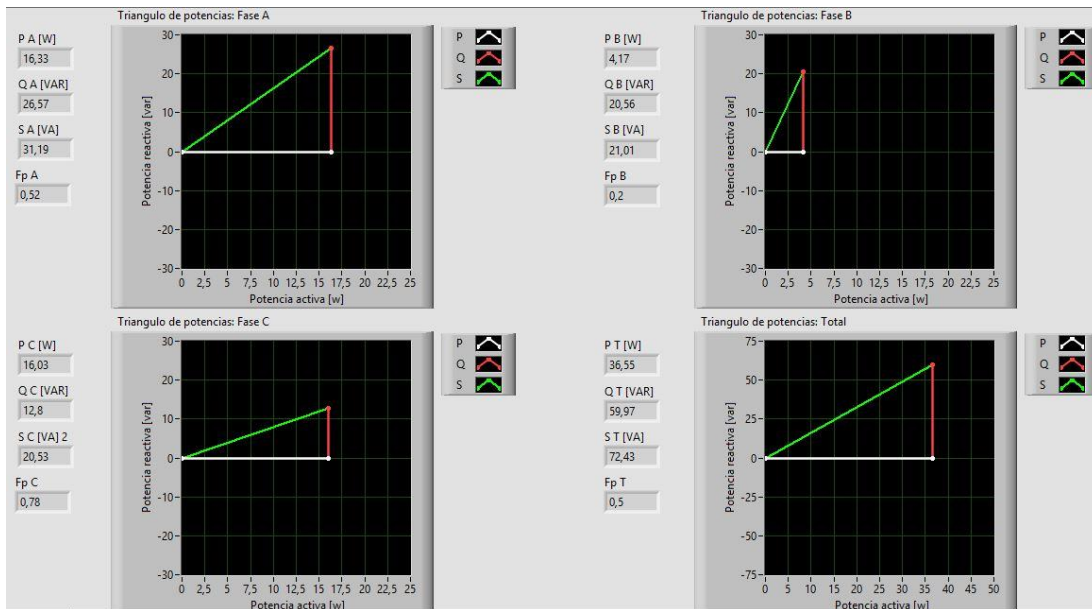


Ilustración 142: Prueba N°3 – Triángulos de potencia lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado secundario
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

- Triángulos de potencia de cada fase y total del lado secundario del transformador trifásico con carga inductiva-resistiva trifásica por medio de un motor y posterior pérdida de una fase del lado primario y luego del lado secundario.

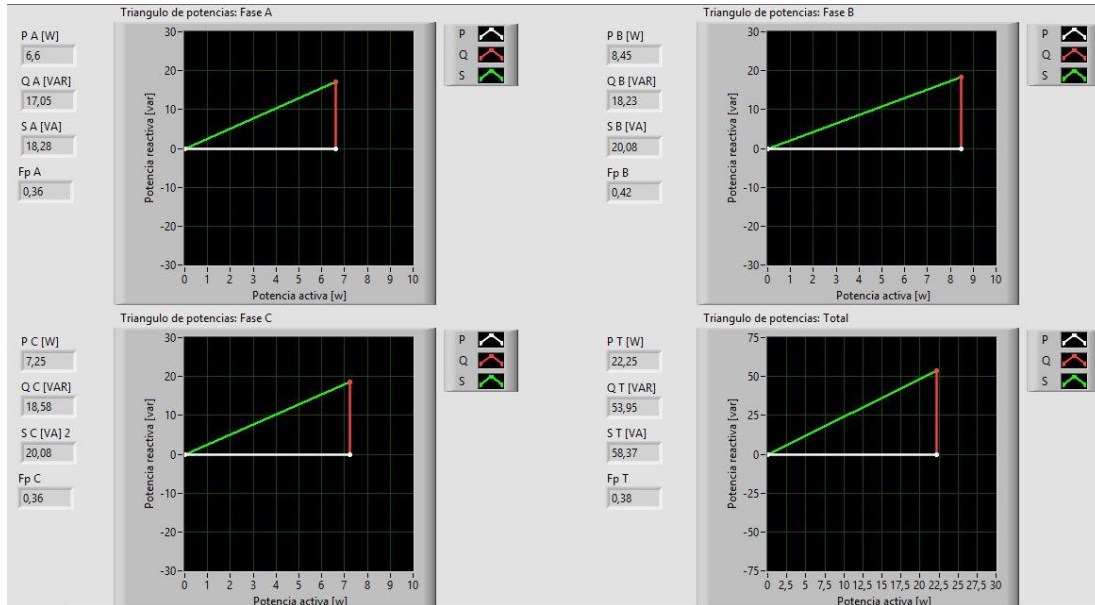


Ilustración 143: Prueba N°3 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor)
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

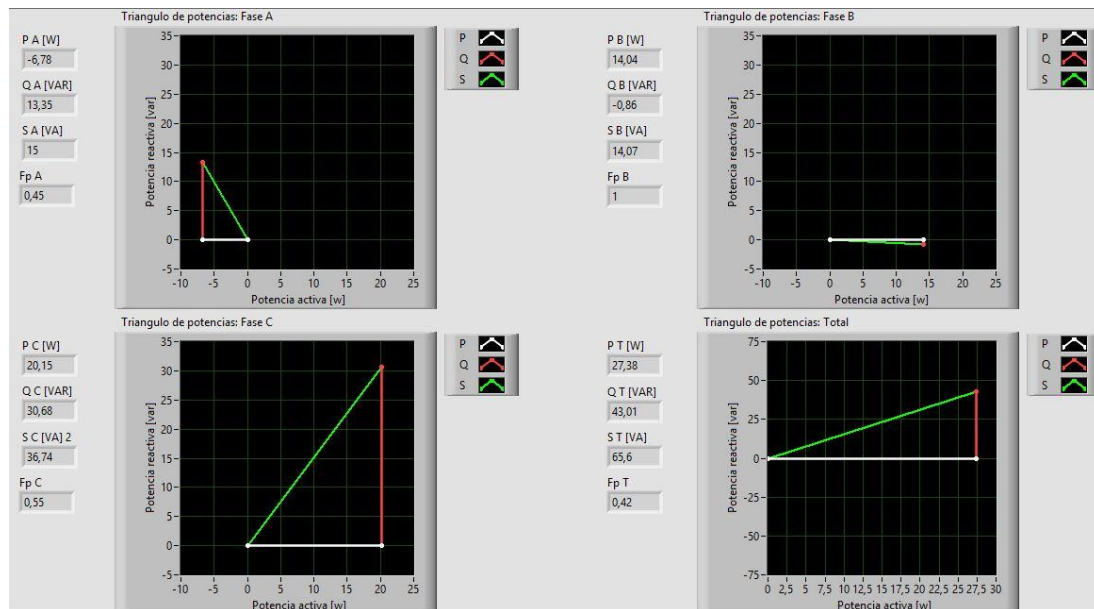


Ilustración 144: Prueba N°3 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado primario
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

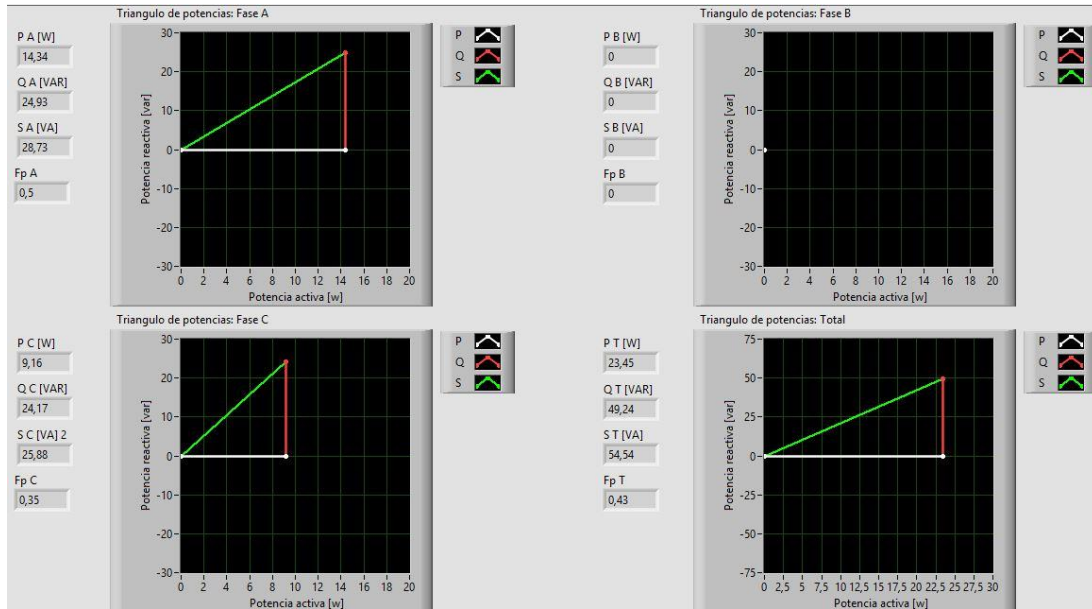


Ilustración 145: Prueba N°3 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) con pérdida de fase del lado secundario
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

4.3.6. CÁLCULOS TEÓRICOS

- Cálculos teóricos con carga resistiva-inductiva trifásica (motor).

Cálculos teóricos prueba 3							
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga resistiva-inductiva trifásica (motor)							
Relación de transformación [a]:	1:2	elevador		Tipo de carga:	Resistiva		
Frecuencia [Hz]:	60			Velocidad angular [w]:	$2 * \pi * f$		
Potencia c/transformador:	1KVA			Conexión de la carga:	Estrella		
Cálculo de la carga							
Datos del motor trabajando a 80V	Fp	$\phi = \cos^{-1}(Fp)$	Impedancia Z				
	0,37	68,28	350				
Datos de la prueba	R	L	C	$X_L = j\omega L$	$X_C = -j\frac{1}{\omega C}$	$ Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$
Z1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	350,00	68,28
Z2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	350,00	68,28
Z3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	350,00	68,28
Voltaje Lado primario (Conexión Delta)				Voltaje Lado secundario (Conexión Estrella)			
Voltaje primario L-L				Voltaje secundario L-L			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
Datos de la prueba	Voltaje R-S (V1-2)	40,00	0,00	$V_{S_{L-L}} = V_{S_{L-N}} * \sqrt{3} < +30^\circ$	Voltaje r-s (V1-2)	138,56	30,00
	Voltaje S-T (V2-3)	40,00	-120,00		Voltaje s-t (V2-3)	138,56	-90,00
	Voltaje T-R (V3-1)	40,00	120,00		Voltaje t-r (V3-1)	138,56	150,00
Voltaje primario L-N				Voltaje secundario L-N			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
$V_{p_{L-N}} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} < -30^\circ$	Voltaje R (V1)	23,09	-30,00	$V_{S_{L-N}} = V_{p_{L-L}} * a$	Voltaje r (V1)	80,00	0,00
	Voltaje S (V2)	23,09	-150,00		Voltaje s (V2)	80,00	-120,00
	Voltaje T (V3)	23,09	90,00		Voltaje t (V3)	80,00	120,00
Corriente Lado Primario (Conexión Delta)				Corriente Lado secundario (Conexión Estrella)			
Corriente primario L [A]				Corriente secundario L [A]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]
$I_{p_L} = I_{p_F} * \sqrt{3} < -30^\circ$	Corriente R (I1)	0,79	-98,28	$I_{S_L} = \frac{V_{S_{L-N}}}{Z}$	Corriente r (I1)	0,23	-68,28
	Corriente S (I2)	0,79	-218,28		Corriente s (I2)	0,23	-188,28
	Corriente T (I3)	0,79	21,72		Corriente t (I3)	0,23	51,72
	Corriente N (IN)	0,00	0,00		Corriente n (In)		
Corriente primario F [A]				Corriente secundario F [A]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]				
$I_{p_F} = I_{S_L} * a$	Corriente R-S (I1-2)	0,46	-68,28				
	Corriente S-T (I2-3)	0,46	-188,28				
	Corriente T-R (I3-1)	0,46	51,72				
Cálculo de potencias lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de potencias lado secundario (Conexión Estrella)			
Potencia activa [W]				Potencia activa [W]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]
$P = V_{p_{L-L}} * I_{p_F} * \cos(\phi_z)$	Potencia activa P1	6,77	0,00	$P = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \cos(\phi_z)$	Potencia activa P1	6,77	0,00
	Potencia activa P2	6,77	0,00		Potencia activa P2	6,77	0,00
	Potencia activa P3	6,77	0,00		Potencia activa P3	6,77	0,00
Potencia activa PT (P1+P2+P3)	20,30	0,00	Potencia activa PT (P1+P2+P3)	20,30	0,00		
Potencia Reactiva [VAR]				Potencia Reactiva [VAR]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]
$Q = V_{p_{L-L}} * I_{p_F} * \sin(\phi_z)$	Potencia reactiva Q1	16,99	90,00	$Q = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \sin(\phi_z)$	Potencia reactiva Q1	16,99	90,00
	Potencia reactiva Q2	16,99	90,00		Potencia reactiva Q2	16,99	90,00
	Potencia reactiva Q3	16,99	90,00		Potencia reactiva Q3	16,99	90,00
Potencia reactiva QT (Q1+Q2+Q3)	50,96	90,00	Potencia reactiva QT (Q1+Q2+Q3)	50,96	90,00		
Potencia aparente [VA]				Potencia aparente [VA]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φz]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φz]
$S = V_{p_{L-L}} * I_{p_F}$ $\phi_s = \phi_z$	Potencia aparente S1	18,29	68,28	$S = V_{S_{L-L}} * I_{S_L}$ $\phi_s = \phi_z$	Potencia aparente S1	18,29	68,28
	Potencia aparente S2	18,29	68,28		Potencia aparente S2	18,29	68,28
	Potencia aparente S3	18,29	68,28		Potencia aparente S3	18,29	68,28
$ST = \sqrt{PT^2 + QT^2}$ $\phi_s = \tan^{-1}\left(\frac{QT}{PT}\right)$	Potencia aparente ST	54,86	68,28	$ST = \sqrt{PT^2 + QT^2}$ $\phi_s = \tan^{-1}\left(\frac{QT}{PT}\right)$	Potencia aparente ST	54,86	68,28
Cálculo de Factor de potencia lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de Factor de potencia lado secundario (Conexión Estrella)			
Factor de Potencia				Factor de Potencia			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]		Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	
$Fp = \cos(\phi_s)$	Fp1	0,37		$Fp = \cos(\phi_s)$	Fp1	0,37	
	Fp2	0,37			Fp2	0,37	
	Fp3	0,37			Fp3	0,37	
	FpT	0,37			FpT	0,37	

Tabla 15: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva-inductiva trifásica (motor)

Fuente: Los autores

4.3.7. CUADROS COMPARATIVOS

- Cuadro comparativo del sistema con carga resistiva-inductiva trifásica (motor).

Cuadro comparativo prueba 3					
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga resistiva-inductiva trifásica (motor)					
	Parámetros	UNIDADES	Cálculos teóricos	Mediciones prácticas	% Error
LADO PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje R-S (V1-2)	V	40,00	40,00	0,00%
	Voltaje S-T (V2-3)	V	40,00	40,75	1,88%
	Voltaje T-R (V3-1)	V	40,00	40,42	1,05%
	Voltaje R (V1)	V	23,09	23,23	0,59%
	Voltaje S (V2)	V	23,09	23,49	1,71%
	Voltaje T (V3)	V	23,09	23,49	1,71%
	Corriente R (I1)	A	0,79	1,00	26,30%
	Corriente S (I2)	A	0,79	0,98	23,77%
	Corriente T (I3)	A	0,79	1,02	28,82%
	Corriente N (IN)	A	0,00	0,02	
	Potencia activa P1	W	6,77	11,14	64,65%
	Potencia activa P2	W	6,77	11,36	67,91%
	Potencia activa P3	W	6,77	11,82	74,70%
	Potencia activa PT	W	20,30	34,41	69,53%
	Potencia reactiva Q1	VAR	16,99	20,47	20,50%
	Potencia reactiva Q2	VAR	16,99	20,24	19,14%
	Potencia reactiva Q3	VAR	16,99	20,73	22,03%
	Potencia reactiva QT	VAR	50,96	61,41	20,50%
	Potencia aparente S1	VA	18,29	23,26	27,20%
	Potencia aparente S2	VA	18,29	23,30	27,42%
Potencia aparente S3	VA	18,29	23,84	30,38%	
Potencia aparente ST	VA	54,86	70,46	28,44%	
Factor de potencia Fp1	-	0,37	0,48	29,73%	
Factor de potencia Fp2	-	0,37	0,49	32,43%	
Factor de potencia Fp3	-	0,37	0,50	35,14%	
Factor de potencia FpT	-	0,37	0,49	32,43%	
LADO SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje r-s (V1-2)	V	138,56	142,32	2,71%
	Voltaje s-t (V2-3)	V	138,56	143,38	3,48%
	Voltaje t-r (V3-1)	V	138,56	142,69	2,98%
	Voltaje r (V1)	V	80,00	81,87	2,34%
	Voltaje s (V2)	V	80,00	82,84	3,55%
	Voltaje t (V3)	V	80,00	82,83	3,54%
	Corriente r (I1)	A	0,23	0,22	3,75%
	Corriente s (I2)	A	0,23	0,24	5,00%
	Corriente t (I3)	A	0,23	0,24	5,00%
	Corriente n (In)	A	0,00	0,01	
	Potencia activa P1	W	6,77	6,60	2,45%
	Potencia activa P2	W	6,77	8,45	24,89%
	Potencia activa P3	W	6,77	7,25	7,16%
	Potencia activa PT	W	20,30	22,25	9,62%
	Potencia reactiva Q1	VAR	16,99	17,05	0,36%
	Potencia reactiva Q2	VAR	16,99	18,23	7,31%
	Potencia reactiva Q3	VAR	16,99	18,58	9,37%
	Potencia reactiva QT	VAR	50,96	53,95	5,86%
	Potencia aparente S1	VA	18,29	18,28	0,03%
	Potencia aparente S2	VA	18,29	20,08	9,81%
Potencia aparente S3	VA	18,29	20,08	9,81%	
Potencia aparente ST	VA	54,86	58,37	6,40%	
Factor de potencia Fp1	-	0,37	0,36	2,70%	
Factor de potencia Fp2	-	0,37	0,42	13,51%	
Factor de potencia Fp3	-	0,37	0,36	2,70%	
Factor de potencia FpT	-	0,37	0,38	2,70%	

Tabla 16: Cuadro comparativo de transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva-inductiva trifásica

Fuente: Los autores

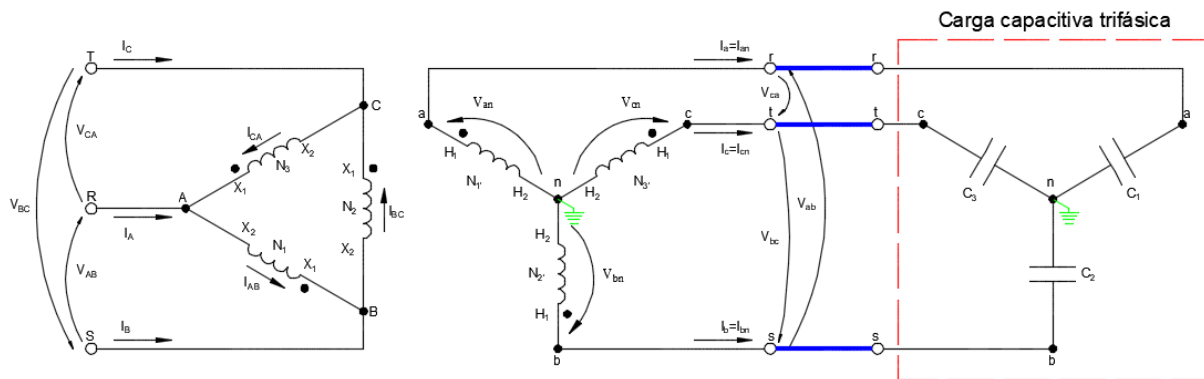
4.3.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Voltajes del lado primario (delta): V_{L-N} atrasados 30° con respecto a los V_{L-L} .
- Corrientes del lado primario (delta): Corrientes de línea en atraso con respecto a los V_{L-N} debido a que la carga es resistiva-inductiva.
- Voltajes del lado secundario (estrella): V_{L-N} en fase con V_{L-L} del primario. V_{L-L} adelantados 30° con respecto a los V_{L-N} .
- Corrientes del lado secundario (estrella): Corrientes de línea en atraso con respecto a los V_{L-N} debido a que la carga es resistiva-inductiva.
- Triángulo de potencias lado primario: Presencia de potencia activa y reactiva y F_p en atraso debido a que la carga es resistiva-inductiva.
- Triángulo de potencias lado secundario: Presencia de potencia activa y reactiva y F_p en atraso debido a que la carga es resistiva-inductiva. Menor presencia de potencia reactiva debido a que la inductancia de los transformadores ya no forma parte de la carga.

4.4. PRUEBA N°4: ANÁLISIS DE LA CONEXIÓN D-Y AL CONECTAR UNA CARGA CAPACITIVA TRIFÁSICA.

Esta prueba consiste en analizar el comportamiento y los ángulos de desfase de los fasores de voltaje y corriente, además de las potencias activas, reactivas y aparentes de un sistema de transformadores trifásicos conectados en Delta – Estrella con una carga capacitiva trifásica conectada en estrella.

4.4.1. DIAGRAMA



*Ilustración 146: Prueba N°4 – Conexión D-y de transformadores trifásicos con carga capacitiva trifásica
Fuente: (Chapman, 2000)
Elaborado por: Los autores*

4.4.2. RECURSOS

Para la realización de esta prueba se utilizaron los siguientes recursos

- Tablero de pruebas de transformadores trifásicos
- Alimentación trifásica 120/240 Vac
- Carga capacitiva trifásica
- Cables de conexión
- Módulo de adquisición de datos (PLC)
- Laptop

- Multímetro

4.4.3. PROCEDIMIENTO

El procedimiento a seguir en esta prueba es la siguiente:

- Realizar la conexión Delta – Estrella en el tablero de pruebas de transformadores
- Se conectará al sistema una carga capacitiva trifásica en estrella
- Conectar los cables de comunicación entre el medidor de parámetros, el PLC y la laptop
- Realizar la simulación en LabVIEW y posterior análisis de los datos y diagramas fasoriales adquiridos

4.4.4. VENTANA GRÁFICA: DIAGRAMAS FASORIALES VOLTAJE Y CORRIENTE

- Diagramas fasoriales de voltaje y corriente del lado primario del transformador trifásico con carga capacitiva trifásica.

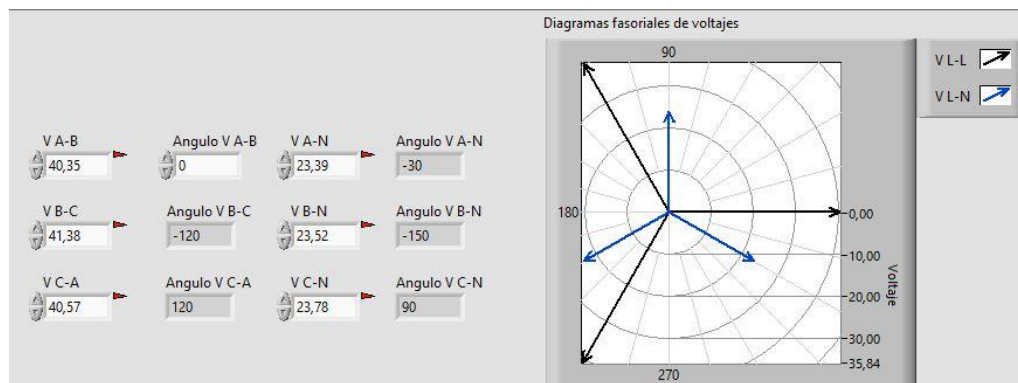


Ilustración 147: Prueba N°4 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga capacitiva trifásica

Fuente: LabVIEW

Elaborado por: Los autores

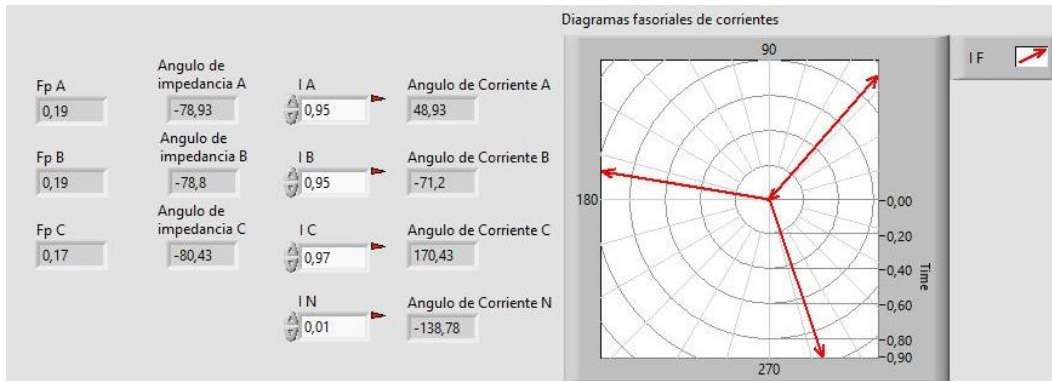


Ilustración 148: Prueba N°4 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga capacitiva trifásica
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

- Diagramas fasoriales de voltaje y corriente del lado secundario del transformador trifásico con carga capacitiva trifásica.

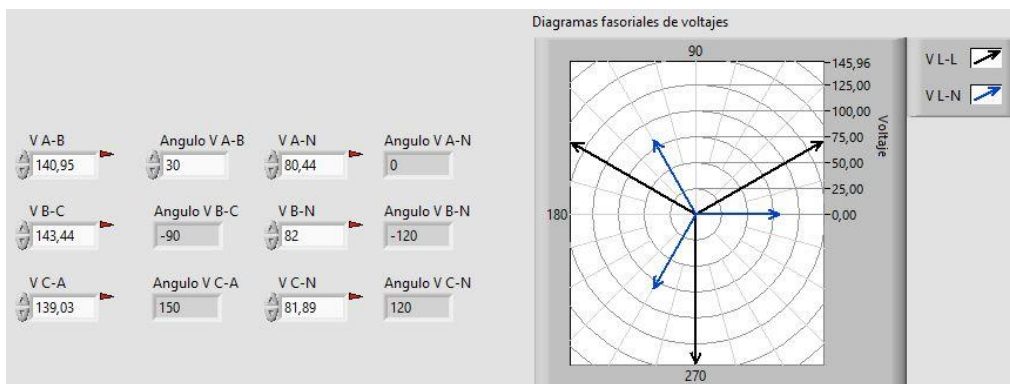


Ilustración 149: Prueba N°4 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga capacitiva trifásica
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

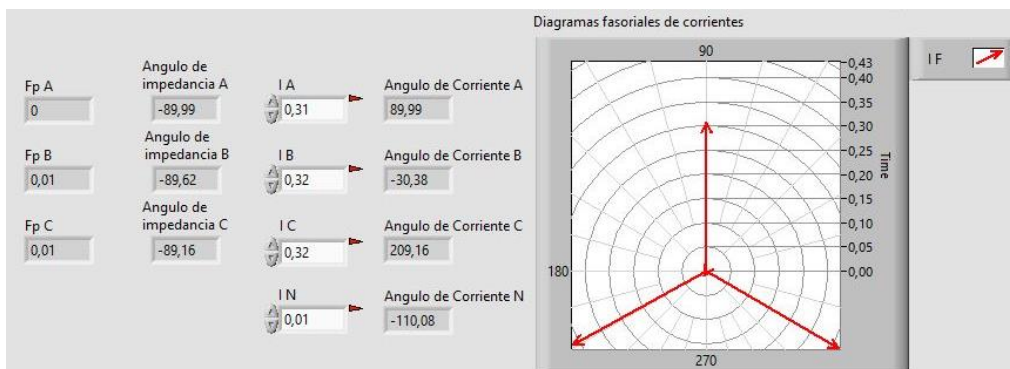


Ilustración 150: Prueba N°4 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga capacitiva trifásica
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

4.4.5. VENTANA GRÁFICA: TRIÁNGULOS DE POTENCIA

- Triángulos de potencia de cada fase y total del lado primario del transformador trifásico con carga capacitiva trifásica.

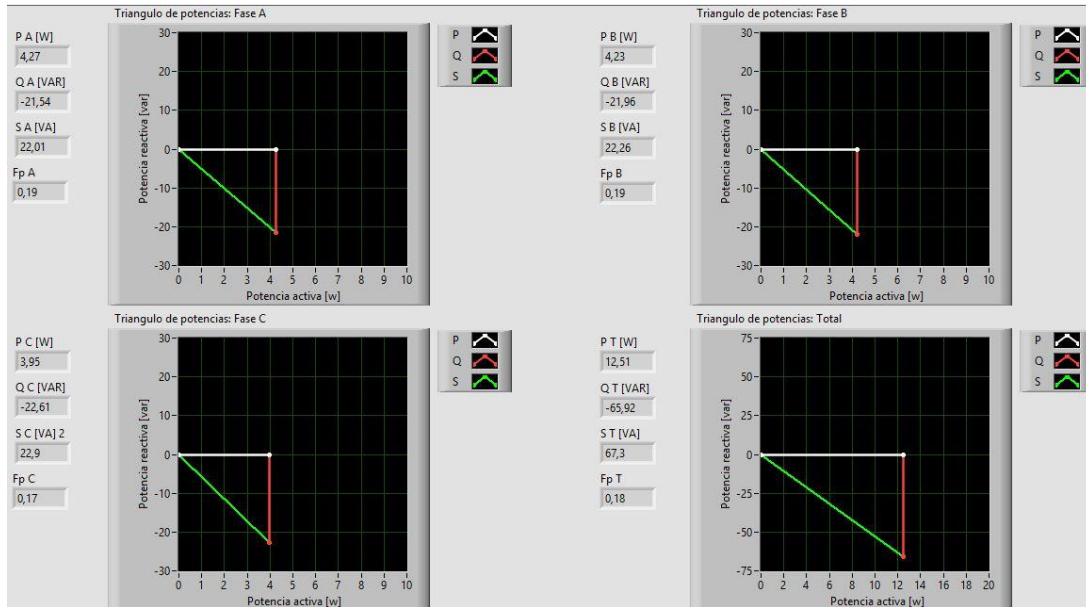
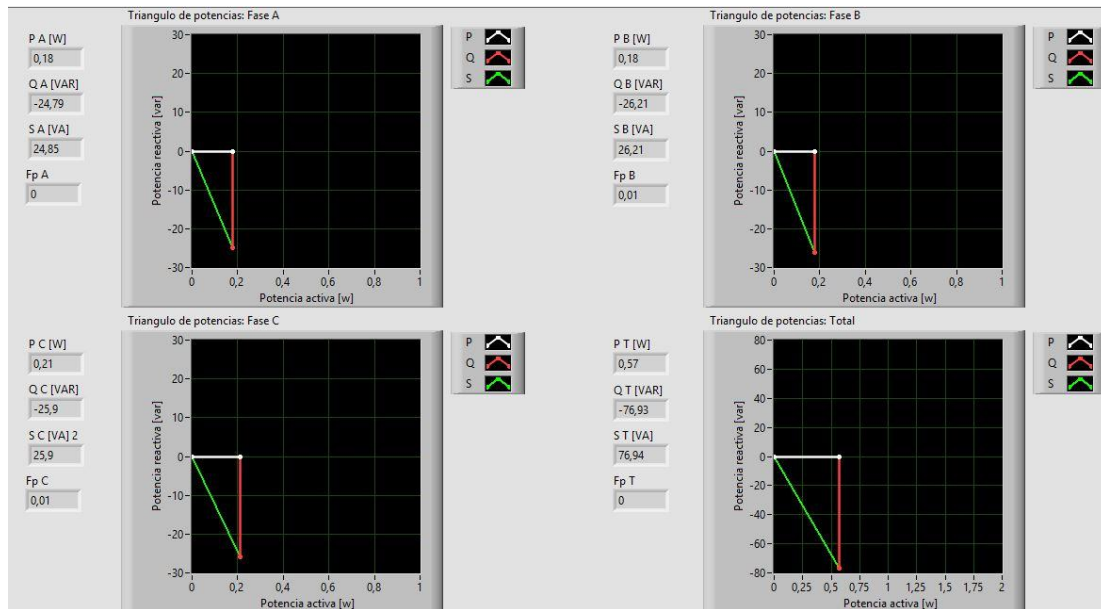


Ilustración 151: Prueba N°4 – Triángulos de potencia lado primario. Carga capacitiva trifásica

Fuente: LabVIEW

Elaborado por: Los autores

- Triángulos de potencia de cada fase y total del lado secundario del transformador trifásico con carga capacitiva trifásica.



***Ilustración 152: Prueba N°4 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga capacitiva trifásica
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores***

4.4.6. CÁLCULOS TEÓRICOS

- Cálculos teóricos con carga capacitiva trifásica.

Cálculos teóricos prueba 4							
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga capacitiva trifásica							
Relación de transformación [a]:	1:2	elevador	Tipo de carga:		Resistiva		
Frecuencia [Hz]:	60		Velocidad angular [w]:		2 * π * f		
Potencia c/transformador:	1KVA		Conexión de la carga:		Estrella		
Cálculo de la carga							
Datos de la prueba	R	L	C	$X_L = jwL$	$X_C = -j\frac{1}{wC}$	$ Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$
Z1	0,00	0,00	1,00E-05	0,00	-265,26	265,26	-90,00
Z2	0,00	0,00	1,00E-05	0,00	-265,26	265,26	-90,00
Z3	0,00	0,00	1,00E-05	0,00	-265,26	265,26	-90,00
Voltaje Lado primario (Conexión Delta)				Voltaje Lado secundario (Conexión Estrella)			
Voltaje primario L-L				Voltaje secundario L-L			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
Datos de la prueba	Voltaje R-S (V1-2)	40,00	0,00	$V_{S_{L-L}} = V_{S_{L-N}} * \sqrt{3} < +30^\circ$	Voltaje r-s (V1-2)	138,56	30,00
	Voltaje S-T (V2-3)	40,00	-120,00		Voltaje s-t (V2-3)	138,56	-90,00
	Voltaje T-R (V3-1)	40,00	120,00		Voltaje t-r (V3-1)	138,56	150,00
Voltaje primario L-N				Voltaje secundario L-N			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
$V_{P_{L-N}} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} < -30^\circ$	Voltaje R (V1)	23,09	-30,00	$V_{S_{L-N}} = V_{P_{L-L}} * a$	Voltaje r (V1)	80,00	0,00
	Voltaje S (V2)	23,09	-150,00		Voltaje s (V2)	80,00	-120,00
	Voltaje T (V3)	23,09	90,00		Voltaje t (V3)	80,00	120,00
Corriente Lado Primario (Conexión Delta)				Corriente Lado secundario (Conexión Estrella)			
Corriente primario L [A]				Corriente secundario L [A]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]
$I_{P_L} = I_{P_F} * \sqrt{3} < -30^\circ$	Corriente R (I1)	1,04	60,00	$I_{S_L} = \frac{V_{S_{L-N}}}{Z}$	Corriente r (I1)	0,30	90,00
	Corriente S (I2)	1,04	-60,00		Corriente s (I2)	0,30	-30,00
	Corriente T (I3)	1,04	180,00		Corriente t (I3)	0,30	210,00
	Corriente N (IN)	0,00	0,00		Corriente n (In)		
Corriente primario F [A]				Corriente secundario F [A]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]				
$I_{P_F} = I_{S_L} * a$	Corriente R-S (I1-2)	0,60	90,00				
	Corriente S-T (I2-3)	0,60	-30,00				
	Corriente T-R (I3-1)	0,60	210,00				
Cálculo de potencias lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de potencias lado secundario (Conexión Estrella)			
Potencia activa [W]				Potencia activa [W]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]
$P = V_{P_{L-L}} * I_{P_F} * \cos(\phi_Z)$	Potencia activa P1	0,00	0,00	$P = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \cos(\phi_Z)$	Potencia activa P1	0,00	0,00
	Potencia activa P2	0,00	0,00		Potencia activa P2	0,00	0,00
	Potencia activa P3	0,00	0,00		Potencia activa P3	0,00	0,00
Potencia activa PT (P1+P2+P3)	0,00	0,00	Potencia activa PT (P1+P2+P3)	0,00	0,00		
Potencia Reactiva [VAR]				Potencia Reactiva [VAR]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]
$Q = V_{P_{L-L}} * I_{P_F} * \sin(\phi_Z)$	Potencia reactiva Q1	-24,13	-90,00	$Q = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \sin(\phi_Z)$	Potencia reactiva Q1	-24,13	-90,00
	Potencia reactiva Q2	-24,13	-90,00		Potencia reactiva Q2	-24,13	-90,00
	Potencia reactiva Q3	-24,13	-90,00		Potencia reactiva Q3	-24,13	-90,00
Potencia reactiva QT (Q1+Q2+Q3)	-72,38	-90,00	Potencia reactiva QT (Q1+Q2+Q3)	-72,38	-90,00		
Potencia aparente [VA]				Potencia aparente [VA]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φz]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φz]
$S = V_{P_{L-L}} * I_{P_F}$ $\phi_S = \phi_Z$	Potencia aparente S1	24,13	-90,00	$S = V_{S_{L-L}} * I_{S_L}$ $\phi_S = \phi_Z$	Potencia aparente S1	24,13	-90,00
	Potencia aparente S2	24,13	-90,00		Potencia aparente S2	24,13	-90,00
	Potencia aparente S3	24,13	-90,00		Potencia aparente S3	24,13	-90,00
$ST = \sqrt{PT^2 + QT^2}$ $\phi_S = \tan^{-1}\left(\frac{QT}{PT}\right)$	Potencia aparente ST	72,38	-90,00	$ST = \sqrt{PT^2 + QT^2}$ $\phi_S = \tan^{-1}\left(\frac{QT}{PT}\right)$	Potencia aparente ST	72,38	-90,00
Cálculo de Factor de potencia lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de Factor de potencia lado secundario (Conexión Estrella)			
Factor de Potencia				Factor de Potencia			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]		Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	
$Fp = \cos(\phi_S)$	Fp1	0,00		$Fp = \cos(\phi_S)$	Fp1	0,00	
	Fp2	0,00			Fp2	0,00	
	Fp3	0,00			Fp3	0,00	
	FpT	0,00			FpT	0,00	

Tabla 17: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga capacitiva trifásica

Fuente: Los autores

4.4.7. CUADROS COMPARATIVOS

- Cuadro comparativo del sistema con carga capacitiva trifásica.

Cuadro comparativo prueba 4					
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga capacitiva trifásica					
	Parámetros	UNIDADES	Cálculos teóricos	Mediciones prácticas	% Error
LADO PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje R-S (V1-2)	V	40,00	40,35	0,87%
	Voltaje S-T (V2-3)	V	40,00	41,38	3,45%
	Voltaje T-R (V3-1)	V	40,00	40,57	1,43%
	Voltaje R (V1)	V	23,09	23,39	1,28%
	Voltaje S (V2)	V	23,09	23,52	1,84%
	Voltaje T (V3)	V	23,09	23,78	2,97%
	Corriente R (I1)	A	1,04	0,95	9,07%
	Corriente S (I2)	A	1,04	0,95	9,07%
	Corriente T (I3)	A	1,04	0,97	7,15%
	Corriente N (IN)	A	0,00	0,01	
	Potencia activa P1	W	0,00	4,27	
	Potencia activa P2	W	0,00	4,23	
	Potencia activa P3	W	0,00	3,95	
	Potencia activa PT	W	0,00	12,51	
	Potencia reactiva Q1	VAR	-24,13	-21,54	10,72%
	Potencia reactiva Q2	VAR	-24,13	-21,96	8,98%
	Potencia reactiva Q3	VAR	-24,13	-22,61	6,29%
	Potencia reactiva QT	VAR	-72,38	-65,92	8,93%
	Potencia aparente S1	VA	24,13	22,01	8,78%
	Potencia aparente S2	VA	24,13	22,26	7,74%
Potencia aparente S3	VA	24,13	22,90	5,09%	
Potencia aparente ST	VA	72,38	67,30	7,02%	
Factor de potencia Fp1	-	0,00	0,19		
Factor de potencia Fp2	-	0,00	0,19		
Factor de potencia Fp3	-	0,00	0,17		
Factor de potencia FpT	-	0,00	0,18		
LADO SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje r-s (V1-2)	V	138,56	140,95	1,72%
	Voltaje s-t (V2-3)	V	138,56	143,44	3,52%
	Voltaje t-r (V3-1)	V	138,56	139,03	0,34%
	Voltaje r (V1)	V	80,00	80,44	0,55%
	Voltaje s (V2)	V	80,00	82,00	2,50%
	Voltaje t (V3)	V	80,00	81,89	2,36%
	Corriente r (I1)	A	0,30	0,31	2,79%
	Corriente s (I2)	A	0,30	0,32	6,10%
	Corriente t (I3)	A	0,30	0,32	6,10%
	Corriente n (In)	A	0,00	0,01	
	Potencia activa P1	W	0,00	0,18	
	Potencia activa P2	W	0,00	0,18	
	Potencia activa P3	W	0,00	0,21	
	Potencia activa PT	W	0,00	0,57	
	Potencia reactiva Q1	VAR	-24,13	-24,79	2,75%
	Potencia reactiva Q2	VAR	-24,13	-26,21	8,63%
	Potencia reactiva Q3	VAR	-24,13	-25,90	7,35%
	Potencia reactiva QT	VAR	-72,38	-76,93	6,28%
	Potencia aparente S1	VA	24,13	24,85	2,99%
	Potencia aparente S2	VA	24,13	26,21	8,63%
Potencia aparente S3	VA	24,13	25,90	7,35%	
Potencia aparente ST	VA	72,38	76,94	6,30%	
Factor de potencia Fp1	-	0,00	0,00		
Factor de potencia Fp2	-	0,00	0,01		
Factor de potencia Fp3	-	0,00	0,01		
Factor de potencia FpT	-	0,00	0,00		

Tabla 18: Cuadro comparativo de transformadores trifásicos D-Y con carga capacitiva trifásica

Fuente: Los autores

4.4.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Voltajes del lado primario (delta): V_{L-N} atrasados 30° con respecto a los V_{L-L} .
- Corrientes del lado primario (delta): Corrientes de línea en adelanto con respecto a los V_{L-N} debido a que la carga es mayormente capacitiva.
- Voltajes del lado secundario (estrella): V_{L-N} en fase con V_{L-L} del primario. V_{L-L} adelantados 30° con respecto a los V_{L-N} .
- Corrientes del lado secundario (estrella): Corrientes de línea en adelanto con respecto a los V_{L-N} debido a que la carga es mayormente capacitiva.
- Triángulo de potencias lado primario: Presencia de potencia reactiva negativa y F_p en adelanto debido a que la carga es mayormente capacitiva. La presencia de potencia activa es debido a las pérdidas en los transformadores.
- Triángulo de potencias lado secundario: Presencia de potencia reactiva negativa y F_p en adelanto debido a que la carga es mayormente capacitiva. Mayor presencia de potencia reactiva negativa y menor potencia activa debido a que los transformadores ya no forman parte de la carga.

4.5. PRUEBA N°5: ANÁLISIS DE LA CONEXIÓN D-Y AL CONECTAR UNA CARGA TRIFÁSICA CONFORMADA POR CAPACITORES Y RESISTENCIAS EN SERIE CONECTADOS EN ENTRELLA.

Esta prueba consiste en analizar el comportamiento y los ángulos de desfase de los fasores de voltaje y corriente, además de las potencias activas, reactivas y aparentes de un sistema de transformadores trifásicos conectados en Delta – Estrella con una carga trifásica conformada por capacitores y resistencias en serie conectados en estrella.

4.5.1. DIAGRAMA

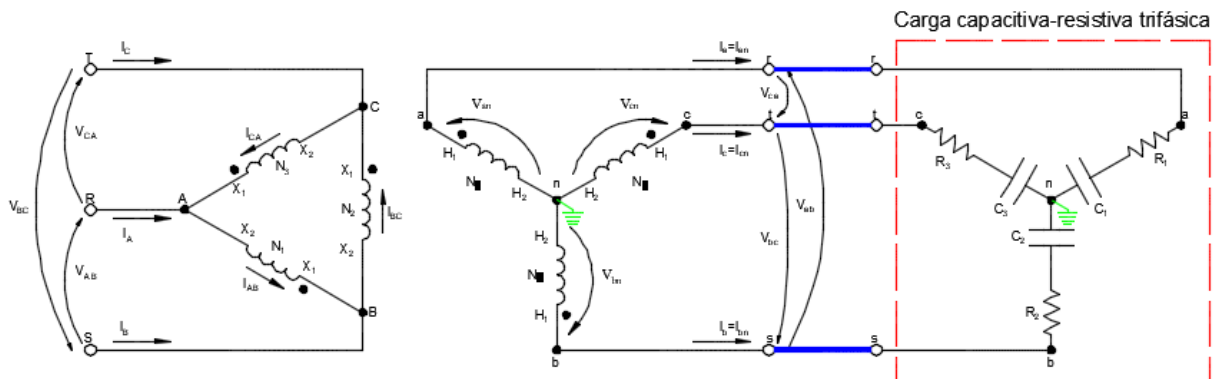


Ilustración 153: Prueba N°5 – Conexión D-y de transformadores trifásicos con carga trifásica conformada por capacitores y resistencias en serie conectados en estrella

Fuente: (Chapman, 2000)

Elaborado por: Los autores

4.5.2. RECURSOS

Para la realización de esta prueba se utilizaron los siguientes recursos

- Tablero de pruebas de transformadores trifásicos
- Alimentación trifásica 120/240 Vac
- Carga capacitiva trifásica
- Carga resistiva trifásica

- Cables de conexión
- Módulo de adquisición de datos (PLC)
- Laptop
- Multímetro

4.5.3. PROCEDIMIENTO

El procedimiento a seguir en esta prueba es la siguiente:

- Realizar la conexión Delta – Estrella en el tablero de pruebas de transformadores
- Se conectará al sistema una carga trifásica conformada por capacitores y resistencias en serie conectados en estrella
- Conectar los cables de comunicación entre el medidor de parámetros, el PLC y la laptop
- Realizar la simulación en LabVIEW y posterior análisis de los datos y diagramas fasoriales adquiridos
- Simular la pérdida de una fase del lado primario del transformador y posteriormente del lado secundario, y realizar la respectiva simulación y análisis en cada caso.

4.5.4. VENTANA GRÁFICA: DIAGRAMAS FASORIALES VOLTAJE Y CORRIENTE

- Diagramas fasoriales de voltaje y corriente del lado primario del transformador trifásico con carga resistiva-capacitiva trifásica.

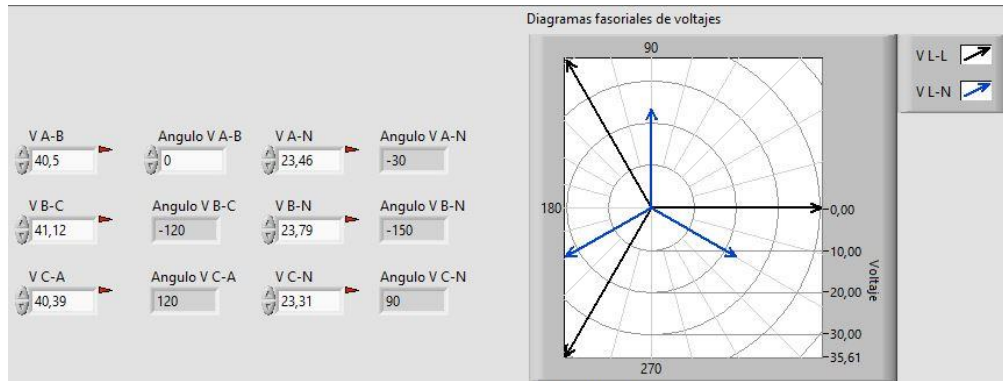


Ilustración 154: Prueba N°5 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga resistiva-capacitiva trifásica
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

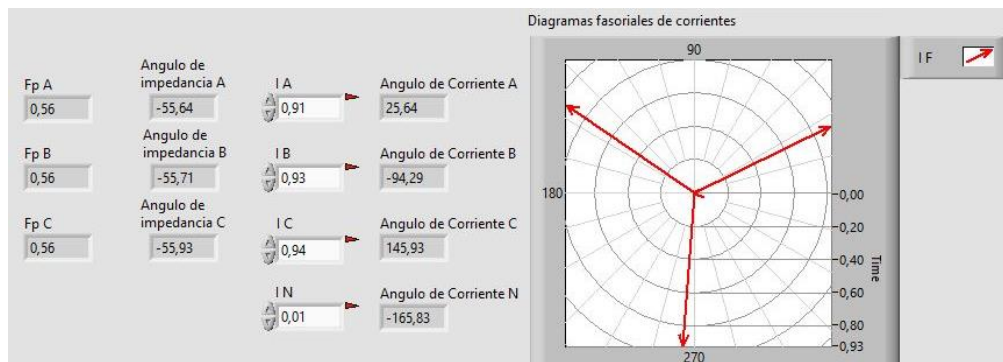


Ilustración 155: Prueba N°5 – Diagrama fasorial corriente lado primario. Carga resistiva-capacitiva trifásica
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

- Diagramas fasoriales de voltaje y corriente del lado secundario del transformador trifásico con carga resistiva-capacitiva trifásica.

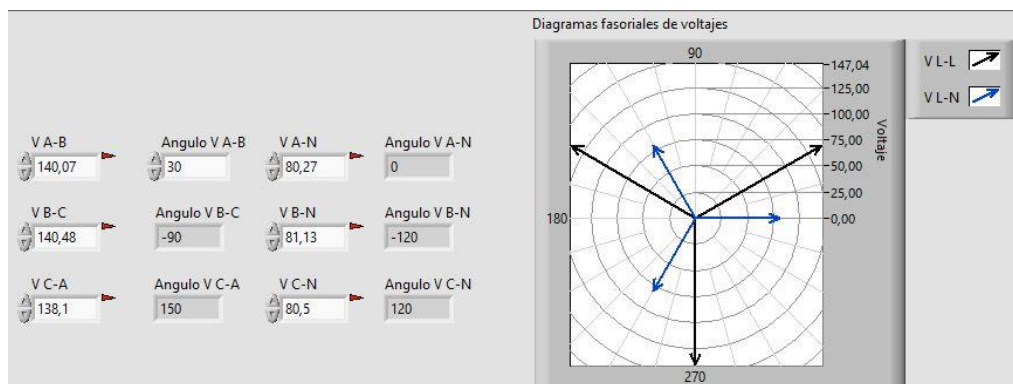


Ilustración 156: Prueba N°5 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga resistiva-capacitiva trifásica
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

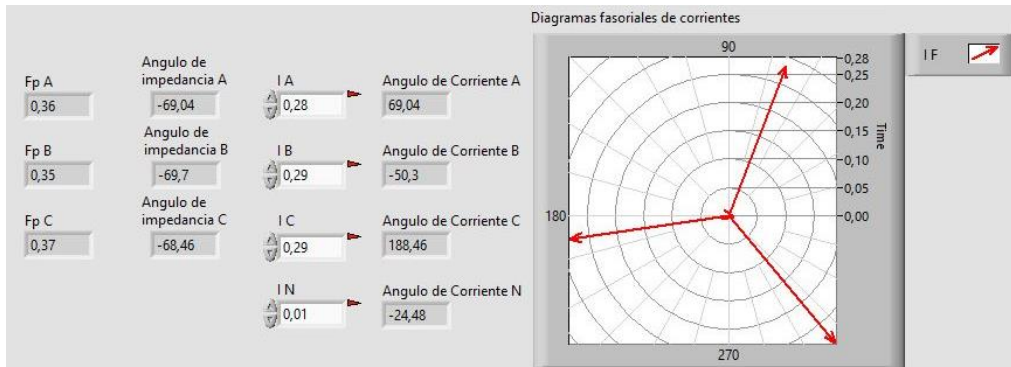


Ilustración 157: Prueba N°5 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga resistiva-capacitiva trifásica
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

4.5.5. VENTANA GRÁFICA: TRIÁNGULOS DE POTENCIA

- Triángulos de potencia de cada fase y total del lado primario del transformador trifásico con carga resistiva-capacitiva trifásica.

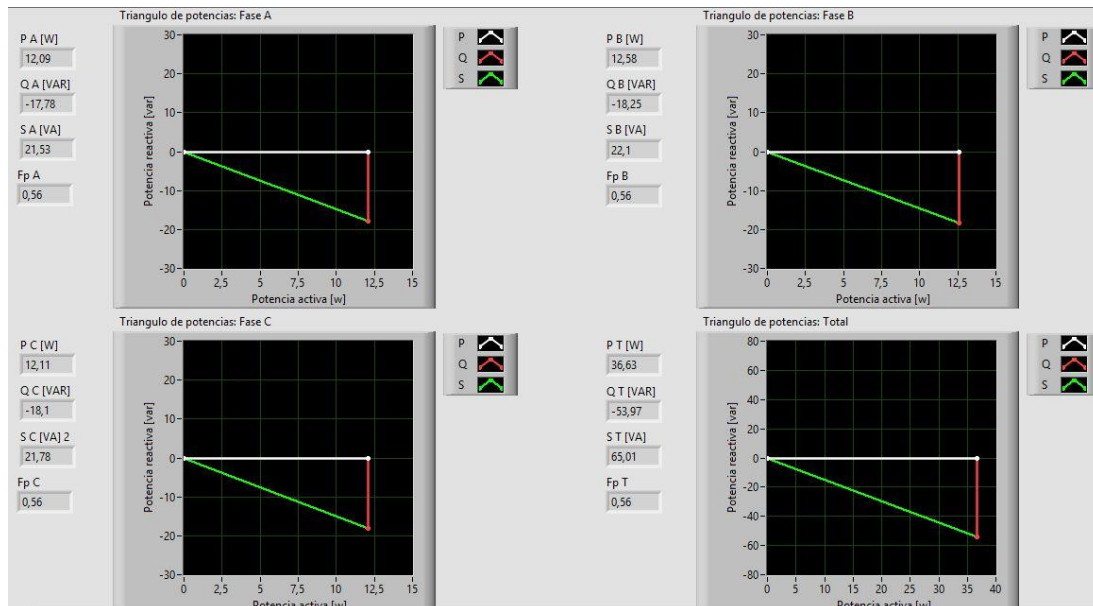


Ilustración 158: Prueba N°5 – Triángulos de potencia lado primario. Carga resistiva-capacitiva trifásica
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

- Triángulos de potencia de cada fase y total del lado secundario del transformador trifásico con carga resistiva-capacitiva trifásica.

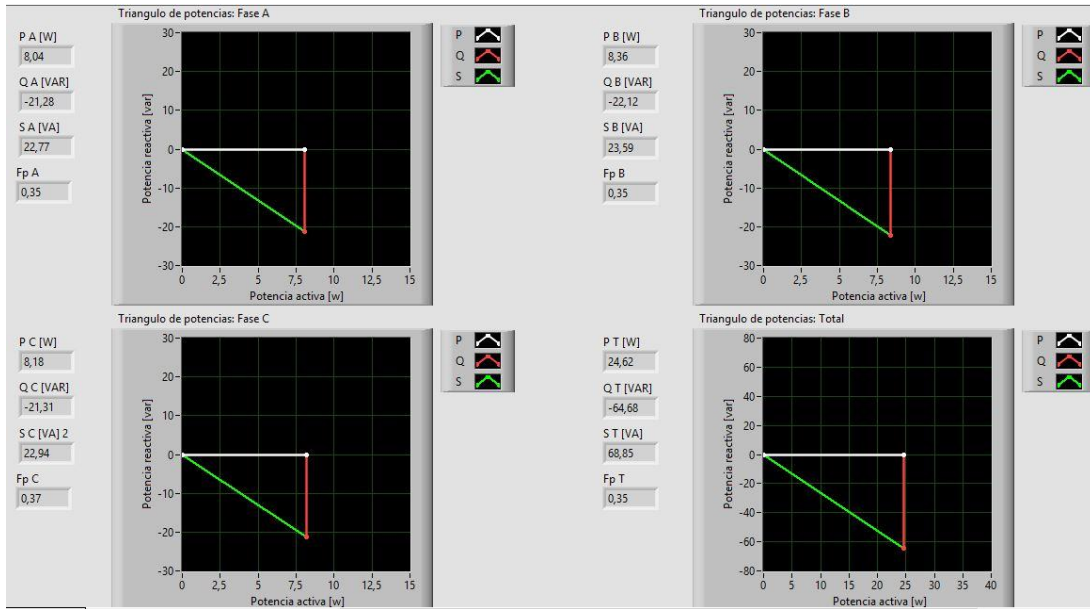


Ilustración 159: Prueba N°5 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga resistiva-capacitiva trifásica
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

4.5.6. CÁLCULOS TEÓRICOS

- Cálculos teóricos con carga resistiva-capacitiva trifásica.

Cálculos teóricos prueba 5							
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga resistiva-capacitiva trifásica							
Relación de transformación [a]:	1:2	elevador		Tipo de carga:	Resistiva		
Frecuencia [Hz]:	60			Velocidad angular [w]:	$2 * \pi * f$		
Potencia c/transformador:	1KVA			Conexión de la carga:	Estrella		
Cálculo de la carga							
Datos de la prueba	R	L	C	$X_L = jwL$	$X_C = -j \frac{1}{wC}$	$ Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right)$
Z1	100,00	0,00	1,00E-05	0,00	-265,26	283,48	-69,34
Z2	100,00	0,00	1,00E-05	0,00	-265,26	283,48	-69,34
Z3	100,00	0,00	1,00E-05	0,00	-265,26	283,48	-69,34
Voltaje Lado primario (Conexión Delta)				Voltaje Lado secundario (Conexión Estrella)			
Voltaje primario L-L				Voltaje secundario L-L			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
Datos de la prueba	Voltaje R-S (V1-2)	40,00	0,00	$V_{S_{L-L}} = V_{S_{L-N}} * \sqrt{3} < +30^\circ$	Voltaje r-s (V1-2)	138,56	30,00
	Voltaje S-T (V2-3)	40,00	-120,00		Voltaje s-t (V2-3)	138,56	-90,00
	Voltaje T-R (V3-1)	40,00	120,00		Voltaje t-r (V3-1)	138,56	150,00
Voltaje primario L-N				Voltaje secundario L-N			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
$V_{P_{L-N}} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} < -30^\circ$	Voltaje R (V1)	23,09	-30,00	$V_{S_{L-N}} = V_{P_{L-L}} * a$	Voltaje r (V1)	80,00	0,00
	Voltaje S (V2)	23,09	-150,00		Voltaje s (V2)	80,00	-120,00
	Voltaje T (V3)	23,09	90,00		Voltaje t (V3)	80,00	120,00
Corriente Lado Primario (Conexión Delta)				Corriente Lado secundario (Conexión Estrella)			
Corriente primario L [A]				Corriente secundario L [A]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]
$I_{P_L} = I_{P_F} * \sqrt{3} < -30^\circ$	Corriente R (I1)	0,98	39,34	$I_{S_L} = \frac{V_{S_{L-N}}}{Z}$	Corriente r (I1)	0,28	69,34
	Corriente S (I2)	0,98	-80,66		Corriente s (I2)	0,28	-50,66
	Corriente T (I3)	0,98	159,34		Corriente t (I3)	0,28	189,34
	Corriente N (IN)	0,00	0,00		Corriente n (In)		
Corriente primario F [A]				Corriente secundario F [A]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]				
$I_{P_F} = I_{S_L} * a$	Corriente R-S (I1-2)	0,56	69,34				
	Corriente S-T (I2-3)	0,56	-50,66				
	Corriente T-R (I3-1)	0,56	189,34				
Cálculo de potencias lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de potencias lado secundario (Conexión Estrella)			
Potencia activa [W]				Potencia activa [W]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]
$P = V_{P_{L-L}} * I_{P_F} * \cos(\phi_Z)$	Potencia activa P1	7,96	0,00	$P = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \cos(\phi_Z)$	Potencia activa P1	7,96	0,00
	Potencia activa P2	7,96	0,00		Potencia activa P2	7,96	0,00
	Potencia activa P3	7,96	0,00		Potencia activa P3	7,96	0,00
Potencia activa PT (P1+P2+P3)	23,89	0,00	Potencia activa PT (P1+P2+P3)	23,89	0,00		
Potencia Reactiva [VAR]				Potencia Reactiva [VAR]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]
$Q = V_{P_{L-L}} * I_{P_F} * \sin(\phi_Z)$	Potencia reactiva Q1	-21,13	-90,00	$Q = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \sin(\phi_Z)$	Potencia reactiva Q1	-21,13	-90,00
	Potencia reactiva Q2	-21,13	-90,00		Potencia reactiva Q2	-21,13	-90,00
	Potencia reactiva Q3	-21,13	-90,00		Potencia reactiva Q3	-21,13	-90,00
Potencia reactiva QT (Q1+Q2+Q3)	-63,38	-90,00	Potencia reactiva QT (Q1+Q2+Q3)	-63,38	-90,00		
Potencia aparente [VA]				Potencia aparente [VA]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]
$S = V_{P_{L-L}} * I_{P_F}$ $\phi_S = \phi_Z$	Potencia aparente S1	22,58	-69,34	$S = V_{S_{L-L}} * I_{S_L}$ $\phi_S = \phi_Z$	Potencia aparente S1	22,58	-69,34
	Potencia aparente S2	22,58	-69,34		Potencia aparente S2	22,58	-69,34
	Potencia aparente S3	22,58	-69,34		Potencia aparente S3	22,58	-69,34
$ST = \sqrt{PT^2 + QT^2}$ $\phi_S = \tan^{-1} \left(\frac{QT}{PT} \right)$	Potencia aparente ST	67,73	-69,34	$ST = \sqrt{PT^2 + QT^2}$ $\phi_S = \tan^{-1} \left(\frac{QT}{PT} \right)$	Potencia aparente ST	67,73	-69,34
Cálculo de Factor de potencia lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de Factor de potencia lado secundario (Conexión Estrella)			
Factor de Potencia				Factor de Potencia			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]		Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	
$Fp = \cos(\phi_S)$	Fp1	0,35		$Fp = \cos(\phi_S)$	Fp1	0,35	
	Fp2	0,35			Fp2	0,35	
	Fp3	0,35			Fp3	0,35	
	FpT	0,35			FpT	0,35	

Tabla 19: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva-capacitiva trifásica

Fuente: Los autores

4.5.7. CUADROS COMPARATIVOS

- Cuadro comparativo del sistema con carga resistiva-capacitiva trifásica.

Cuadro comparativo prueba 5					
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga resistiva-capacitiva trifásica					
	Parámetros	UNIDADES	Cálculos teóricos	Mediciones prácticas	% Error
LADO PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje R-S (V1-2)	V	40,00	40,50	1,25%
	Voltaje S-T (V2-3)	V	40,00	41,12	2,80%
	Voltaje T-R (V3-1)	V	40,00	40,39	0,98%
	Voltaje R (V1)	V	23,09	23,46	1,58%
	Voltaje S (V2)	V	23,09	23,79	3,01%
	Voltaje T (V3)	V	23,09	23,31	0,94%
	Corriente R (I1)	A	0,98	0,91	6,91%
	Corriente S (I2)	A	0,98	0,93	4,87%
	Corriente T (I3)	A	0,98	0,94	3,84%
	Corriente N (IN)	A	0,00	0,01	
	Potencia activa P1	W	7,96	12,09	51,81%
	Potencia activa P2	W	7,96	12,58	57,96%
	Potencia activa P3	W	7,96	12,11	52,06%
	Potencia activa PT	W	23,89	36,63	53,32%
	Potencia reactiva Q1	VAR	-21,13	-17,78	15,83%
	Potencia reactiva Q2	VAR	-21,13	-18,25	13,61%
	Potencia reactiva Q3	VAR	-21,13	-18,10	14,32%
	Potencia reactiva QT	VAR	-63,38	-53,97	14,84%
	Potencia aparente S1	VA	22,58	21,53	4,63%
	Potencia aparente S2	VA	22,58	22,10	2,11%
Potencia aparente S3	VA	22,58	21,78	3,53%	
Potencia aparente ST	VA	67,73	65,01	4,01%	
Factor de potencia Fp1	-	0,35	0,56	58,75%	
Factor de potencia Fp2	-	0,35	0,56	58,75%	
Factor de potencia Fp3	-	0,35	0,56	58,75%	
Factor de potencia FpT	-	0,35	0,56	58,75%	
LADO SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje r-s (V1-2)	V	138,56	140,07	1,09%
	Voltaje s-t (V2-3)	V	138,56	140,48	1,38%
	Voltaje t-r (V3-1)	V	138,56	138,10	0,33%
	Voltaje r (V1)	V	80,00	80,27	0,34%
	Voltaje s (V2)	V	80,00	81,13	1,41%
	Voltaje t (V3)	V	80,00	80,50	0,63%
	Corriente r (I1)	A	0,28	0,28	0,78%
	Corriente s (I2)	A	0,28	0,29	2,76%
	Corriente t (I3)	A	0,28	0,29	2,76%
	Corriente n (In)	A	0,00	0,01	
	Potencia activa P1	W	7,96	8,04	0,95%
	Potencia activa P2	W	7,96	8,36	4,97%
	Potencia activa P3	W	7,96	8,18	2,71%
	Potencia activa PT	W	23,89	24,62	3,05%
	Potencia reactiva Q1	VAR	-21,13	-21,28	0,73%
	Potencia reactiva Q2	VAR	-21,13	-22,12	4,71%
	Potencia reactiva Q3	VAR	-21,13	-21,31	0,88%
	Potencia reactiva QT	VAR	-63,38	-64,68	2,06%
	Potencia aparente S1	VA	22,58	22,77	0,86%
	Potencia aparente S2	VA	22,58	23,59	4,49%
Potencia aparente S3	VA	22,58	22,94	1,61%	
Potencia aparente ST	VA	67,73	68,85	1,65%	
Factor de potencia Fp1	-	0,35	0,35	0,78%	
Factor de potencia Fp2	-	0,35	0,35	0,78%	
Factor de potencia Fp3	-	0,35	0,37	4,89%	
Factor de potencia FpT	-	0,35	0,35	0,78%	

Tabla 20: Cuadro comparativo de transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva-capacitiva trifásica

Fuente: Los autores

4.5.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Voltajes del lado primario (delta): V_{L-N} atrasados 30° con respecto a los V_{L-L} .
- Corrientes del lado primario (delta): Corrientes de línea en adelanto con respecto a los V_{L-N} debido a que la carga es resistiva-capacitiva.
- Voltajes del lado secundario (estrella): V_{L-N} en fase con V_{L-L} del primario. V_{L-L} adelantados 30° con respecto a los V_{L-N} .
- Corrientes del lado secundario (estrella): Corrientes de línea en adelanto con respecto a los V_{L-N} debido a que la carga es resistiva-capacitiva.
- Triángulo de potencias lado primario: Presencia de potencia reactiva negativa y F_p en adelanto debido a que la carga es resistiva-capacitiva. La presencia de potencia activa es debido a las pérdidas en los transformadores.
- Triángulo de potencias lado secundario: Presencia de potencia reactiva negativa y F_p en adelanto debido a que la carga es mayormente capacitiva. Mayor presencia de potencia reactiva negativa y menor potencia activa debido a que los transformadores ya no forman parte de la carga.

4.6. PRUEBA N°6: ANÁLISIS DE LA CONEXIÓN D-Y AL CONECTAR UNA CARGA INDUCTIVA-RESISTIVA TRIFÁSICA EN ESTRELLA Y EN PARALELO UNA CARGA CAPACITIVA TRIFÁSICA EN ESTRELLA.

Esta prueba consiste en analizar el comportamiento y los ángulos de desfase de los fasores de voltaje y corriente, además de las potencias activas, reactivas y aparentes de un sistema de transformadores trifásicos conectados en Delta – Estrella con una carga inductiva resistiva trifásica por medio de un motor trifásico conectado en estrella al que se le conectara en paralelo una carga capacitiva trifásica conectada en estrella.

4.6.1. DIAGRAMA

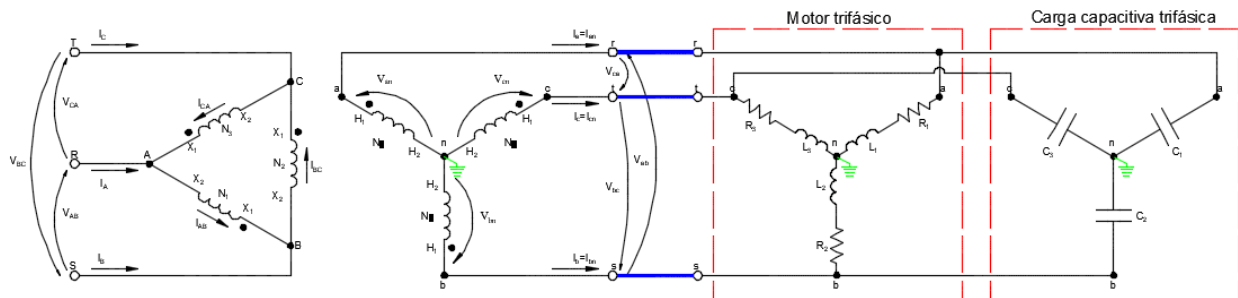


Ilustración 160: Prueba N°6 – Conexión D-y de transformadores trifásicos con carga inductiva-resistiva trifásica y en paralelo una carga capacitiva trifásica

Fuente: (Chapman, 2000)

Elaborado por: Los autores

4.6.2. RECURSOS

Para la realización de esta prueba se utilizaron los siguientes recursos

- Tablero de pruebas de transformadores trifásicos
- Alimentación trifásica 120/240 Vac
- Carga inductiva-resistiva trifásica
- Carga capacitiva trifásica
- Cables de conexión

- Módulo de adquisición de datos (PLC)
- Laptop
- Multímetro

4.6.3. PROCEDIMIENTO

El procedimiento a seguir en esta prueba es la siguiente:

- Realizar la conexión Delta – Estrella en el tablero de pruebas de transformadores
- Se conectará al sistema una carga inductiva-resistiva trifásica en estrella por medio de un motor trifásico al que se le conectará en paralelo una carga capacitiva trifásica en estrella
- Conectar los cables de comunicación entre el medidor de parámetros, el PLC y la laptop
- Realizar la simulación en LabVIEW y posterior análisis de los datos y diagramas fasoriales adquiridos
- Simular la pérdida de una fase del lado primario del transformador y posteriormente del lado secundario, y realizar la respectiva simulación y análisis en cada caso.

4.6.4. VENTANA GRÁFICA: DIAGRAMAS FASORIALES VOLTAJE Y CORRIENTE

- Diagramas fasoriales de voltaje y corriente del lado primario del transformador trifásico con carga inductiva-resistiva trifásica por medio de un motor y conectado en paralelo una carga capacitiva trifásica en estrella.

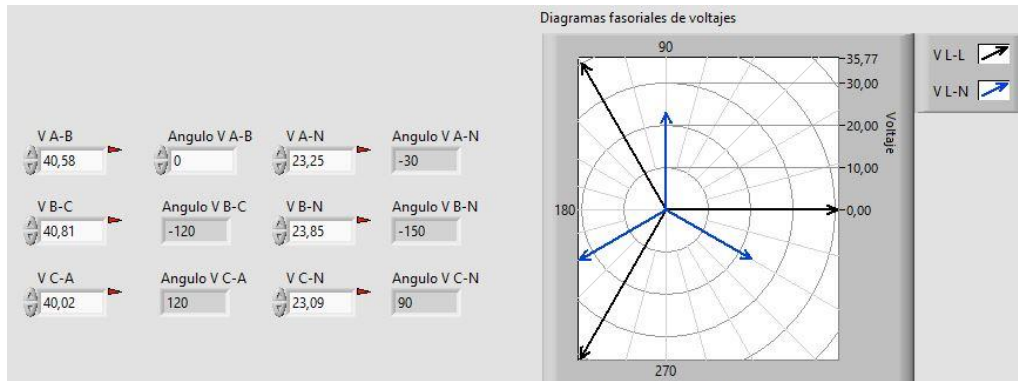


Ilustración 161: Prueba N°6 – Diagrama fasorial voltajes lado primario. Carga inductiva-resistiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica

Fuente: LabVIEW

Elaborado por: Los autores

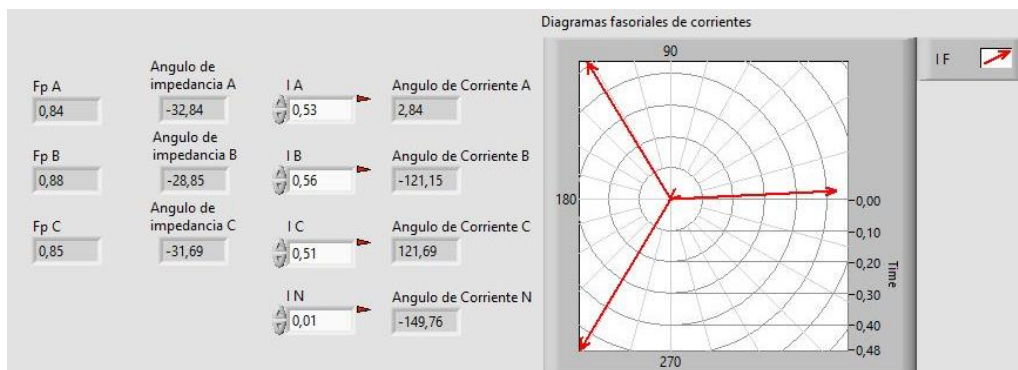


Ilustración 162: Prueba N°6 – Diagrama fasorial corrientes lado primario. Carga inductiva-resistiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica

Fuente: LabVIEW

Elaborado por: Los autores

- Diagramas fasoriales de voltaje y corriente del lado secundario del transformador trifásico con carga inductiva-resistiva trifásica por medio de un motor y conectado en paralelo una carga capacitiva trifásica en estrella.

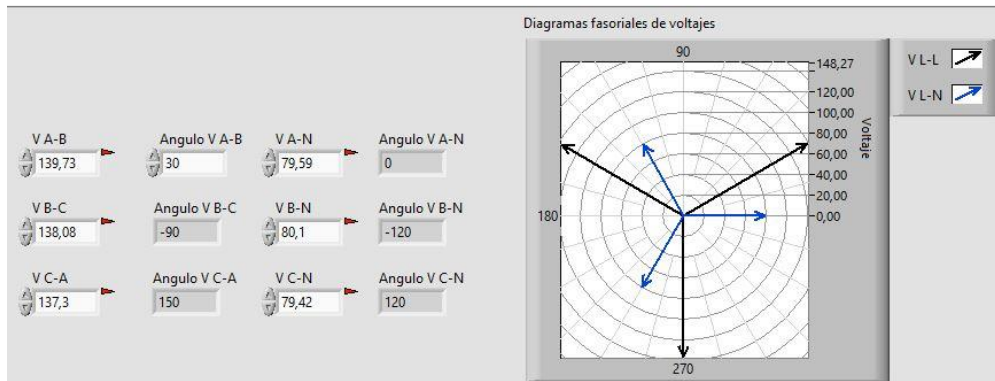


Ilustración 163: Prueba N°6 – Diagrama fasorial voltajes lado secundario. Carga inductiva-resistiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

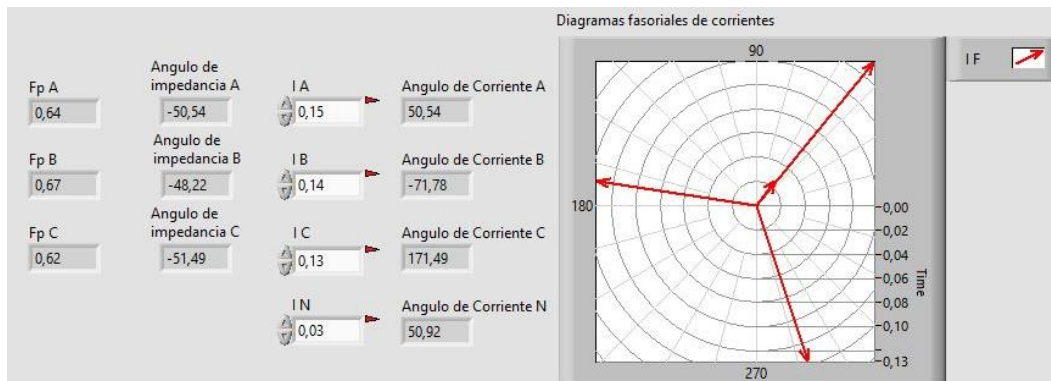


Ilustración 164: Prueba N°6 – Diagrama fasorial corrientes lado secundario. Carga inductiva-resistiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

4.6.5. VENTANA GRÁFICA: TRIÁNGULOS DE POTENCIA

- Triángulos de potencia de cada fase y total del lado primario del transformador trifásico con carga inductiva-resistiva trifásica por medio de un motor y conectado en paralelo una carga capacitiva trifásica en estrella.

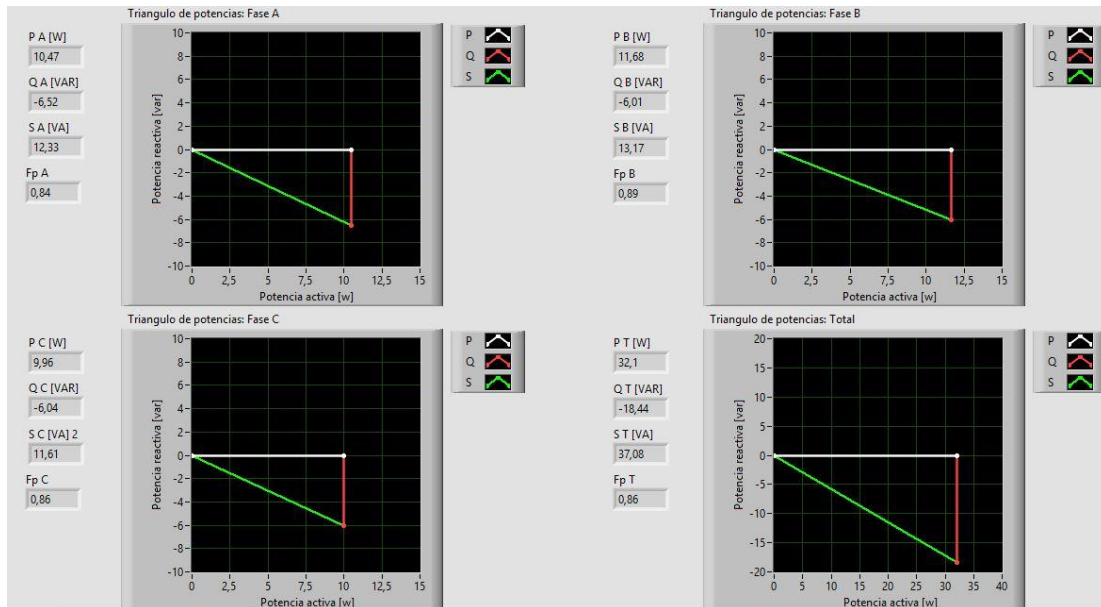


Ilustración 165: Prueba N°6 – Triángulos de potencia lado primario. Carga inductiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

- Triángulos de potencia de cada fase y total del lado secundario del transformador trifásico con carga inductiva-resistiva trifásica por medio de un motor y conectado en paralelo una carga capacitiva trifásica en estrella.

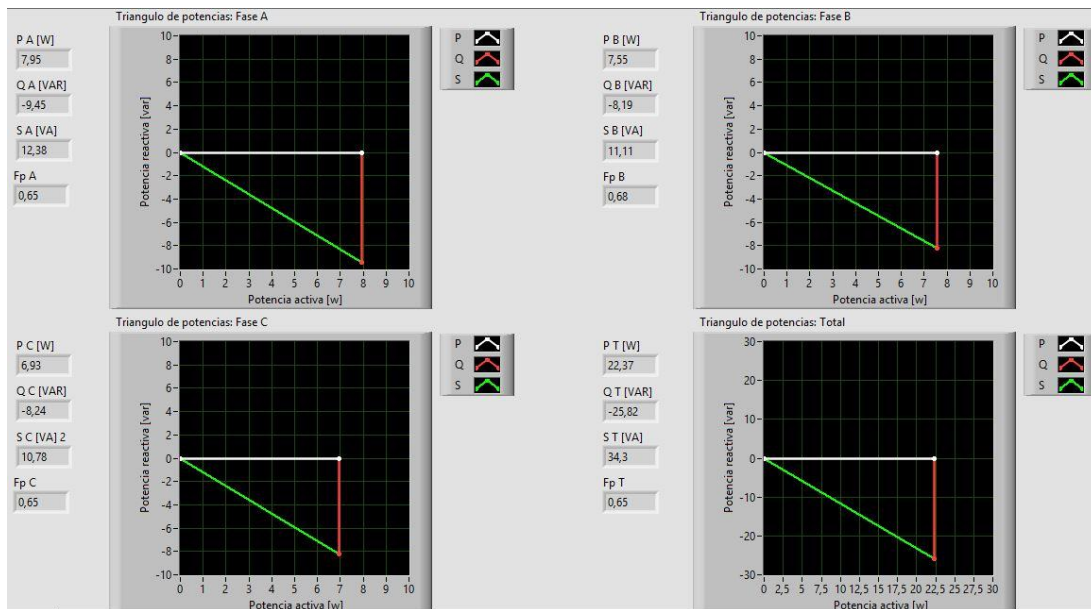


Ilustración 166: Prueba N°6 – Triángulos de potencia lado secundario. Carga inductiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica
Fuente: LabVIEW
Elaborado por: Los autores

4.6.6. CÁLCULOS TEÓRICOS

- Cálculos teóricos con carga resistiva-inductiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica.

Cálculos teóricos prueba 6							
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga resistiva-inductiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica							
Relación de transformación [a]:	1:2	elevador	Tipo de carga:	Resistiva			
Frecuencia [Hz]:	60		Velocidad angular [w]:	$2 * \pi * f$			
Potencia c/transformador:	1KVA		Conexión de la carga:	Estrella			
Cálculo de la carga							
Datos del motor trabajando a 80V y carga capacitiva en paralelo	Fp	$\phi = \cos^{-1}(Fp)$	Impedancia Z				
	0,64	-50,21	500				
Datos de la prueba	R	L	C	$X_L = j\omega L$	$X_C = -j\frac{1}{\omega C}$	$ Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$
Z1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	500,00	-50,21
Z2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	500,00	-50,21
Z3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	500,00	-50,21
Voltaje Lado primario (Conexión Delta)				Voltaje Lado secundario (Conexión Estrella)			
Voltaje primario L-L				Voltaje secundario L-L			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
Datos de la prueba	Voltaje R-S (V1-2)	40,00	0,00	$V_{S_{L-L}} = V_{S_{L-N}} * \sqrt{3} < +30^\circ$	Voltaje r-s (V1-2)	138,56	30,00
	Voltaje S-T (V2-3)	40,00	-120,00		Voltaje s-t (V2-3)	138,56	-90,00
	Voltaje T-R (V3-1)	40,00	120,00		Voltaje t-r (V3-1)	138,56	150,00
Voltaje primario L-N				Voltaje secundario L-N			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [v]	Ángulo [φ]
$V_{p_{L-N}} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} < -30^\circ$	Voltaje R (V1)	23,09	-30,00	$V_{S_{L-N}} = V_{p_{L-L}} * a$	Voltaje r (V1)	80,00	0,00
	Voltaje S (V2)	23,09	-150,00		Voltaje s (V2)	80,00	-120,00
	Voltaje T (V3)	23,09	90,00		Voltaje t (V3)	80,00	120,00
Corriente Lado Primario (Conexión Delta)				Corriente Lado secundario (Conexión Estrella)			
Corriente primario L [A]				Corriente secundario L [A]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]
$I_{p_L} = I_{p_F} * \sqrt{3} < -30^\circ$	Corriente R (I1)	0,55	20,21	$I_{S_L} = \frac{V_{S_{L-N}}}{Z}$	Corriente r (I1)	0,16	50,21
	Corriente S (I2)	0,55	-99,79		Corriente s (I2)	0,16	-69,79
	Corriente T (I3)	0,55	140,21		Corriente t (I3)	0,16	170,21
	Corriente N (IN)	0,00	0,00		Corriente n (In)		
Corriente primario F [A]				Corriente secundario F [A]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [A]	Ángulo [φ]				
$I_{p_F} = I_{S_L} * a$	Corriente R-S (I1-2)	0,32	50,21				
	Corriente S-T (I2-3)	0,32	-69,79				
	Corriente T-R (I3-1)	0,32	170,21				
Cálculo de potencias lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de potencias lado secundario (Conexión Estrella)			
Potencia activa [W]				Potencia activa [W]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φ]
$P = V_{p_{L-L}} * I_{p_F} * \cos(\phi_z)$	Potencia activa P1	8,19	0,00	$P = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \cos(\phi_z)$	Potencia activa P1	8,19	0,00
	Potencia activa P2	8,19	0,00		Potencia activa P2	8,19	0,00
	Potencia activa P3	8,19	0,00		Potencia activa P3	8,19	0,00
Potencia activa PT (P1+P2+P3)	24,58	0,00	Potencia activa PT (P1+P2+P3)	24,58	0,00		
Potencia Reactiva [VAR]				Potencia Reactiva [VAR]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [var]	Ángulo [φ]
$Q = V_{p_{L-L}} * I_{p_F} * \sin(\phi_z)$	Potencia reactiva Q1	-9,84	90,00	$Q = V_{S_{L-N}} * I_{S_L} * \sin(\phi_z)$	Potencia reactiva Q1	-9,84	90,00
	Potencia reactiva Q2	-9,84	90,00		Potencia reactiva Q2	-9,84	90,00
	Potencia reactiva Q3	-9,84	-90,00		Potencia reactiva Q3	-9,84	-90,00
Potencia reactiva QT (Q1+Q2+Q3)	-29,51	-90,00	Potencia reactiva QT (Q1+Q2+Q3)	-29,51	-90,00		
Potencia aparente [VA]				Potencia aparente [VA]			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φz]	Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	Ángulo [φz]
$S = V_{p_{L-L}} * I_{p_F}$ $\phi_s = \phi_z$	Potencia aparente S1	12,80	-50,21	$S = V_{S_{L-L}} * I_{S_L}$ $\phi_s = \phi_z$	Potencia aparente S1	12,80	-50,21
	Potencia aparente S2	12,80	-50,21		Potencia aparente S2	12,80	-50,21
	Potencia aparente S3	12,80	-50,21		Potencia aparente S3	12,80	-50,21
$ST = \sqrt{PT^2 + QT^2}$ $\phi_s = \tan^{-1}\left(\frac{QT}{PT}\right)$	Potencia aparente ST	38,40	-50,21	$ST = \sqrt{PT^2 + QT^2}$ $\phi_s = \tan^{-1}\left(\frac{QT}{PT}\right)$	Potencia aparente ST	38,40	-50,21
Cálculo de Factor de potencia lado primario (Conexión Delta)				Cálculo de Factor de potencia lado secundario (Conexión Estrella)			
Factor de Potencia				Factor de Potencia			
Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]		Fórmula	Parámetros	Magnitud [w]	
$Fp = \cos(\phi_z)$	Fp1	0,64		$Fp = \cos(\phi_z)$	Fp1	0,64	
	Fp2	0,64			Fp2	0,64	
	Fp3	0,64			Fp3	0,64	
	FpT	0,64			FpT	0,64	

Tabla 21: Cálculos teóricos transformadores trifásicos D-Y con carga resistiva-inductiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica

Fuente: Los autores

4.6.7. CUADROS COMPARATIVOS

- Cuadro comparativo del sistema con carga resistiva-inductiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica.

Cuadro comparativo prueba 6					
Transformador Trifásico conexión Delta-Estrella con carga resistiva-inductiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica					
Parámetros	UNIDADES	Cálculos teóricos	Mediciones prácticas	% Error	
LADO PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje R-S (V1-2)	V	40,00	40,58	1,45%
	Voltaje S-T (V2-3)	V	40,00	40,81	2,03%
	Voltaje T-R (V3-1)	V	40,00	40,02	0,05%
	Voltaje R (V1)	V	23,09	23,25	0,68%
	Voltaje S (V2)	V	23,09	23,85	3,27%
	Voltaje T (V3)	V	23,09	23,09	0,02%
	Corriente R (I1)	A	0,55	0,53	4,38%
	Corriente S (I2)	A	0,55	0,56	1,04%
	Corriente T (I3)	A	0,55	0,51	7,98%
	Corriente N (IN)	A	0,00	0,01	
	Potencia activa P1	W	8,19	10,47	27,81%
	Potencia activa P2	W	8,19	11,68	42,58%
	Potencia activa P3	W	8,19	9,96	21,58%
	Potencia activa PT	W	24,58	32,10	30,62%
	Potencia reactiva Q1	VAR	-9,84	-6,52	-33,71%
	Potencia reactiva Q2	VAR	-9,84	-6,01	-38,89%
	Potencia reactiva Q3	VAR	-9,84	-6,04	-38,59%
	Potencia reactiva QT	VAR	-29,51	-18,44	-37,50%
	Potencia aparente S1	VA	12,80	12,33	3,67%
	Potencia aparente S2	VA	12,80	13,17	2,89%
	Potencia aparente S3	VA	12,80	11,61	9,30%
	Potencia aparente ST	VA	38,40	37,08	3,44%
	Factor de potencia Fp1	-	0,64	0,84	31,25%
	Factor de potencia Fp2	-	0,64	0,89	39,06%
Factor de potencia Fp3	-	0,64	0,86	34,38%	
Factor de potencia FpT	-	0,64	0,86	34,38%	
LADO SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR	Voltaje r-s (V1-2)	V	138,56	139,73	0,84%
	Voltaje s-t (V2-3)	V	138,56	138,08	0,35%
	Voltaje t-r (V3-1)	V	138,56	137,30	0,91%
	Voltaje r (V1)	V	80,00	79,59	0,51%
	Voltaje s (V2)	V	80,00	80,10	0,12%
	Voltaje t (V3)	V	80,00	79,42	0,72%
	Corriente r (I1)	A	0,16	0,15	6,25%
	Corriente s (I2)	A	0,16	0,14	12,50%
	Corriente t (I3)	A	0,16	0,13	18,75%
	Corriente n (In)	A	0,00	0,03	
	Potencia activa P1	W	8,19	7,95	2,95%
	Potencia activa P2	W	8,19	7,55	7,84%
	Potencia activa P3	W	8,19	6,93	15,41%
	Potencia activa PT	W	24,58	22,37	8,98%
	Potencia reactiva Q1	VAR	-9,84	-9,45	-3,92%
	Potencia reactiva Q2	VAR	-9,84	-8,19	-16,73%
	Potencia reactiva Q3	VAR	-9,84	-8,24	-16,22%
	Potencia reactiva QT	VAR	-29,51	-25,82	-12,49%
	Potencia aparente S1	VA	12,80	12,38	3,28%
	Potencia aparente S2	VA	12,80	11,11	13,20%
	Potencia aparente S3	VA	12,80	10,78	15,78%
	Potencia aparente ST	VA	38,40	34,30	10,68%
	Factor de potencia Fp1	-	0,64	0,65	1,56%
	Factor de potencia Fp2	-	0,64	0,68	6,25%
Factor de potencia Fp3	-	0,64	0,65	1,56%	
Factor de potencia FpT	-	0,64	0,65	1,56%	

Tabla 22: Cuadro comparativo de transformadores trifasicos D-Y con carga resistiva-inductiva trifásica (motor) y en paralelo carga capacitiva trifásica

Fuente: Los autores

4.6.8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Voltajes del lado primario (delta): V_{L-N} atrasados 30° con respecto a los V_{L-L} .
- Corrientes del lado primario (delta): Corrientes de línea en adelanto con respecto a los V_{L-N} debido a que la carga resultante es resistiva-capacitiva.
- Voltajes del lado secundario (estrella): V_{L-N} en fase con V_{L-L} del primario. V_{L-L} adelantados 30° con respecto a los V_{L-N} .
- Corrientes del lado secundario (estrella): Corrientes de línea en adelanto con respecto a los V_{L-N} debido a que la carga resultante es resistiva-capacitiva.
- Triángulo de potencias lado primario: Presencia de potencia reactiva negativa y F_p en adelanto debido a que la carga resultante es resistiva-capacitiva. La presencia de potencia activa es debido a las pérdidas en los transformadores. La potencia reactiva de los capacitores adelanta la corriente lo que reduce el ángulo de la impedancia y mejora el F_p acercándolo a la unidad.
- Triángulo de potencias lado secundario: Presencia de potencia reactiva negativa y F_p en adelanto debido a que la carga es mayormente capacitiva. Mayor presencia de potencia reactiva negativa y menor potencia activa debido a que los transformadores ya no forman parte de la carga. La potencia reactiva de los capacitores adelanta la corriente lo que reduce el ángulo de la impedancia y mejora el F_p acercándolo a la unidad.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES

- Mediante este proyecto se consiguió adquirir y analizar los diferentes datos que se pueden obtener de un banco de transformadores conectados en Delta – Estrella, y además se simuló su funcionamiento, comportamiento y los fenómenos que se producen mediante una aplicación software.
- La construcción del módulo del PLC nos permitió realizar la adquisición de datos del banco de transformadores trifásicos conectados en Delta – Estrella.
- Por medio de diferentes pruebas, se consiguió analizar el funcionamiento de un sistema de transformadores trifásicos conectados en Delta – Estrella con diferentes tipos de cargas y se comparó versus los cálculos teóricos.
- El banco de transformadores trifásicos nos permitió experimentar el comportamiento de esta conexión en periodo estable y ante fallas de pérdidas de fase.
- Mediante el software LabVIEW, se desarrolló una aplicación que mostró los parámetros y simuló el funcionamiento del banco de transformadores mediante los datos adquiridos.

CAPÍTULO VI

6. RECOMENDACIONES

- Todas las medidas de seguridad necesarias deben ser tomadas para precautelar la seguridad tanto de las personas que realicen estas pruebas, como también de los equipos a utilizar.
- Antes de conectar cualquier tipo de carga verificar mediante cálculos teóricos que la corriente no vaya a exceder la capacidad de los elementos, ya que estos podrían sufrir daños.
- Verificar la polaridad de los transformadores, si son aditivos o sustractivos, para poder realizar las conexiones necesarias adecuadamente. El no tomar en cuenta este punto podría provocar un corto-circuito entre las fases.
- Aterrizar el neutro del lado secundario del transformador, ya que si se conectan cargas desbalanceadas los voltajes sufrirían variaciones indeseadas.
- Para poder realizar estas pruebas se utilizó fusibles de 4 Amperios en los medidores de parámetros y los diferentes bornes del tablero.

CAPÍTULO VII

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aboytes García, F. (1990). *Análisis de sistemas de potencia*. Monterrey.
- Bruzón Hernández, J. M., Hernández Areu, O., & Ramos Guardarrama, J. (2018). Reducción de pérdidas en el núcleo del transformador al reconfigurar la zona de entrehierros. *Ingeniería Energética*, 21-30.
- Chapman, S. J. (2000). *Maquinas eléctricas* (Tercera ed.). Santa Fe de Bogotá: McGraw-Hill.
- Crespo Sánchez, G. (2015). Análisis de gases disueltos para monitoreo y diagnóstico de transformadores de fuerza en servicio. *Ingeniería Energética*, 180-189.
- Del Vecchio, R. M., Poulin, B., Feghali, P. T., Shad, D. M., & Ahuja, R. (2010). *Transformer design principles*. Florida: CRC Press.
- García Gómez, D. F., Navas, D. F., & Rivas, E. (2016). Enfoque técnico-económico para el dimensionamiento de transformadores de distribución. *Ingeniería y Desarrollo*, 267-285.
- Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1996). *Análisis de sistemas de potencia*. Mexico D.F.: McGraw-Hill.
- Guru, B. S., & Hiziroglu, H. R. (2003). *Máquinas eléctricas y transformadores* (Tercera ed.). México D.F.: Oxford University Press México.
- Harper, E. (2004). *El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos* (Primera ed.). México D.F.: Limusa Noriega Editores.
- Harper, G. E. (1989). *El ABC de las máquinas eléctricas 1. Transformadores* (Primera ed.). México D.F.: Limusa Noriega Editores.

- Hayt, W. H., Kemmerly, J. E., & Durbin, S. M. (2007). *Análisis de circuitos en ingeniería* (Septima ed.). Mexico D.F.: McGraw-Hill.
- Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. (2014). Sistema de adquisición de datos para determinar el grupo de conexión en el transformador trifásico DL1080. *Tecnura*, 65-77.
- Kosow, I. L. (1993). *Máquinas eléctricas y transformadores* (Segunda ed.). México D.F.: Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Kothari, D. P., & Nagrath, I. J. (2010). *Electric machines*. New Delhi: McGraw-Hill.
- Larsen, R. W. (2011). *LabVIEW for Engineers*. New Jersey: Pearson.
- Liberatori, M. C. (2018). *Redes de Datos y sus Protocolos*. Mar del Plata, Argentina: EUDEM.
- Mago, M. G., Vallés Defendine, L., Olaya Flores, J. J., & Subero, D. (2014). Determinación de la confiabilidad o tiempo promedio entre fallas (TPEF) en transformadores de distribución. *Ingeniería UC*, 33-37.
- Mago, M. G., Vallés, L., Olaya, J. J., & Escudero, N. (2016). Métodos no convencionales para el diagnóstico de fallas en transformadores de distribución. *Ingeniería UC*, 49-57.
- Manzano Orrego, J. J. (2010). *Máquinas eléctricas*. Madrid: Paraninfo.
- Mayuza López, J. S., Mariscal Lozano, I., & Quinteros Salazar, E. A. (2015). Sistema para el monitoreo remoto de la temperatura en transformadores de distribución. *Scientia Et Technica*, 315-322.
- Mora, J. F. (2003). *Máquinas eléctricas* (Quinta ed.). Madrid: McGraw-Hill.
- Muñoz-Galeano, N., López-Lezama, J. M., & Villada-Duque, F. (2017). Metodología para la determinación del desplazamiento angular en transformadores trifásicos. *Tecno Lógicas*, 41-53.

- Ramos Guardarrama, J., Hernández Areu, O. N., & Bruzón Hernández, J. M. (2016). Ensayos de pérdidas en vacío y con carga en transformadores mediante la adquisición de datos. *Ingeniería Energética*, 73-80.
- Ras, E. (1994). *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. Barcelona: Marcombo.
- Robbins, A. H., & Miller, W. C. (2007). *Análisis de circuitos. Teoría y practica*. Mexico, D.F.: Cengage Learning.
- Sen, P. C. (2014). *Principles of electric machines and power electronics*. Ontario: Wiley.
- Sierra-Gil, E., Basulto-Espinoza, A., & Planos-Reyes, J. M. (2016). Estimación temprana de la pérdida de vida útil de transformadores de distribución. *Energética*, 1-9.
- Stevenson, W. D. (1985). *Análisis de sistemas electricos de potencia*. México D.F.: McGraw-Hill.
- T., E. E.-M. (s.f.). *Circuitos magnéticos y transformadores*. Buenos Aires: Reverté.
- Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia* (Sexta ed.). México D.F.: Pearson education.

ANEXOS

ANEXO 1: LISTA DE REGISTROS PM5110

Category			Description	PM5110/11	Register	Units	Size (INT16)	Data Type	Access
Meter Data (Basic)				Y	3000	---		---	---
	1s Metering (50/60 Cycles)			Y	3000	---		---	---
		Current		Y	3000	---		---	---
			Current A	Y	3000	A	2	FLOAT32	R
			Current B	Y	3002	A	2	FLOAT32	R
			Current C	Y	3004	A	2	FLOAT32	R
			Current N	Y	3006	A	2	FLOAT32	R
			Current G	Y	3008	A	2	FLOAT32	R
			Current Avg	Y	3010	A	2	FLOAT32	R
		Current Unbalance		Y	3012	---		---	---
			Current Unbalance A	Y	3012	%	2	FLOAT32	R
			Current Unbalance B	Y	3014	%	2	FLOAT32	R
			Current Unbalance C	Y	3016	%	2	FLOAT32	R
			Current Unbalance Worst	Y	3018	%	2	FLOAT32	R
		Voltage		Y	3020	---		---	---
			Voltage A-B	Y	3020	V	2	FLOAT32	R
			Voltage B-C	Y	3022	V	2	FLOAT32	R
			Voltage C-A	Y	3024	V	2	FLOAT32	R
			Voltage L-L Avg	Y	3026	V	2	FLOAT32	R
			Voltage A-N	Y	3028	V	2	FLOAT32	R
			Voltage B-N	Y	3030	V	2	FLOAT32	R
			Voltage C-N	Y	3032	V	2	FLOAT32	R
					3034	V	2	FLOAT32	R
			Voltage N-G						
			Voltage L-N Avg	Y	3036	V	2	FLOAT32	R
		Voltage Unbalance		Y	3038	---		---	---
			Voltage Unbalance A-B	Y	3038	%	2	FLOAT32	R
			Voltage Unbalance B-C	Y	3040	%	2	FLOAT32	R
			Voltage Unbalance C-A	Y	3042	%	2	FLOAT32	R
			Voltage Unbalance L-L Worst	Y	3044	%	2	FLOAT32	R
			Voltage Unbalance A-N	Y	3046	%	2	FLOAT32	R
			Voltage Unbalance B-N	Y	3048	%	2	FLOAT32	R
			Voltage Unbalance C-N	Y	3050	%	2	FLOAT32	R
			Voltage Unbalance L-N Worst	Y	3052	%	2	FLOAT32	R
		Power		Y	3054	---		---	---
			Active Power A	Y	3054	kW	2	FLOAT32	R
			Active Power B	Y	3056	kW	2	FLOAT32	R
			Active Power C	Y	3058	kW	2	FLOAT32	R
			Active Power Total	Y	3060	kW	2	FLOAT32	R
			Reactive Power A	Y	3062	kVAR	2	FLOAT32	R
			Reactive Power B	Y	3064	kVAR	2	FLOAT32	R
			Reactive Power C	Y	3066	kVAR	2	FLOAT32	R
			Reactive Power Total	Y	3068	kVAR	2	FLOAT32	R
			Apparent Power A	Y	3070	kVA	2	FLOAT32	R
			Apparent Power B	Y	3072	kVA	2	FLOAT32	R
			Apparent Power C	Y	3074	kVA	2	FLOAT32	R
			Apparent Power Total	Y	3076	kVA	2	FLOAT32	R
		Power Factor		Y	3078	---		---	---
			Power Factor A	Y	3078	---	2	4Q FP PF	R
			Power Factor B	Y	3080	---	2	4Q FP PF	R
			Power Factor C	Y	3082	---	2	4Q FP PF	R
			Power Factor Total	Y	3084	---	2	4Q FP PF	R
			Displacement Power Factor A	Y	3086	---	2	4Q FP PF	R
			Displacement Power Factor B	Y	3088	---	2	4Q FP PF	R
			Displacement Power Factor C	Y	3090	---	2	4Q FP PF	R
			Displacement Power Factor Total	Y	3092	---	2	4Q FP PF	R
	Frequency	Frequency		Y	3110	Hz	2	FLOAT32	R