



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIEROS EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO.**

TEMA:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MÓDULOS MONOFÁSICOS DE
TRANSFORMACIÓN DIDÁCTICOS QUE PERMITAN ANALIZAR LA
UTILIDAD Y APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES GRUPOS DE CONEXIÓN
TRIFÁSICA PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS EN LA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO EN LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.”**

AUTORES: REVELO ERAZO GABRIELA MARCEL

YUCATO CHECA JAIME DAVID

DIRECTOR: ING. PÉREZ HERNÁN

IBARRA – ECUADOR

2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE dentro del proyecto Repositorio Digital determina la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA	100332437-1
APELLIDOS Y	REVELO ERAZO GABRIELA MARCEL
DIRECCIÓN:	CALLE 21 DE NOVIEMBRE Y JORGE UBIDIA (09-89)
E-MAIL:	gabysvalentina@hotmail.com
TELÉFONO FIJO	(062)530-235
TELÉFONO	0992079552
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MÓDULOS MONOFÁSICOS DE TRANSFORMACIÓN DIDÁCTICOS QUE PERMITAN ANALIZAR LA UTILIDAD Y APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES GRUPOS DE CONEXIÓN TRIFÁSICA PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS EN LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO EN LA UNIVERSIDAD” TÉCNICA DEL NORTE.
AUTOR:	REVELO ERAZO GABRIELA MARCEL
FECHA:	MARZO DEL 2017
PROGRAMA:	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE	INGENIERO EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO.
DIRECTOR:	ING. PÉREZ HERNÁN

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información


DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA	100344101-9
APELLIDOS Y	YUCATO CHECA JAIME DAVID
DIRECCIÓN:	IBARRA, PARROQUIA EL SAGRARIO, BARRIO PILANQUI
E-MAIL:	bisbal_yucato1515@hotmail.com
TELÉFONO MÓVIL:	0969943149
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MÓDULOS MONOFÁSICOS DE TRANSFORMACIÓN DIDÁCTICOS QUE PERMITAN ANALIZAR LA UTILIDAD Y APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES GRUPOS DE CONEXIÓN TRIFÁSICA PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS EN LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO EN LA UNIVERSIDAD” TÉCNICA DEL NORTE.
AUTOR:	YUCATO CHECA JAIME DAVID
FECHA:	MARZO DEL 2017
PROGRAMA:	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE	INGENIERO EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO.
DIRECTOR:	ING. PÉREZ HERNÁN

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Nosotros, Revelo Erazo Gabriela Marcel, con cédula de identidad N100332437-1 y Yucato Checa Jaime David con cédula de identidad No 100344101-9 en calidad de autores y titulares de los derechos Patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en forma digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior, Artículo 144.

3. CONSTANCIA

Los autores manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en la defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.



Firma

Nombre: Revelo Erazo Gabriela

Cédula: 100332437-1

Ibarra, Marzo del 2017



Firma

Nombre: Yucato Checa Jaime

Cédula: 100344101-9

Ibarra, Marzo del 2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

**CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Nosotros, Revelo Erazo Gabriela Marcel, con cédula de identidad No100332437-1 Yucato Checa Jaime David con cédula de identidad No 100344101-9, manifestamos nuestra voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los Derechos Patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4,5 y 6 en calidad de autor de la obra o trabajo de grado denominado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MÓDULOS MONOFÁSICOS DE TRANSFORMACIÓN DIDÁCTICOS QUE PERMITAN ANALIZAR LA UTILIDAD Y APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES GRUPOS DE CONEXIÓN TRIFÁSICA PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS EN LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.”** “que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIEROS EN **MANTENIMIENTO ELÉCTRICO**, en la UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

Firma

Nombre: Revelo Erazo Gabriela

Cédula: 100332437-1

Ibarra, Marzo del 2017

Firma

Nombre: Yucato Checa Jaime

Cédula: 100344101-9

Ibarra, Marzo del 2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN

Yo Hernán Pérez, en calidad de Tutor de los señores estudiantes, **Revelo Erazo Gabriela Marcel, Yucato Checa Jaime David**, certifico que han cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MÓDULOS MONOFÁSICOS DE TRANSFORMACIÓN DIDÁCTICOS QUE PERMITAN ANALIZAR LA UTILIDAD Y APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES GRUPOS DE CONEXIÓN TRIFÁSICA PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS EN LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE”**. Para la obtención del título de Ingenieros en Mantenimiento Eléctrico; aprobando la impresión y empastado.

Ing. Hernán Pérez

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DECLARACIÓN

Nosotros, **REVELO ERAZO GABRIELA MARCEL, YUCATO CHECA JAIME DAVID**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado, ni calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

.....
Firma

Nombre: Revelo Erazo Gabriela

Cédula: 100332437-1

Ibarra, Marzo del 2017

.....
Firma

Nombre: Yucato Checa Jaime

Cédula: 100344101-9

Ibarra, Marzo del 2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a Dios y a mis padres. A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento.

A todos mi familiares y de manera especial a mis hermanos que han fomentado en mí el deseo de superación y de triunfo en la vida, depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ello que soy lo que soy ahora. A mi hija VALENTINA quien ha sido el pilar fundamental para seguir luchando día a día sin decaer ni un solo momento, a todos ustedes un gran Dios le pague.

Los amo con mi vida.

Gabriela Marcel Revelo Erazo



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

El presente trabajo fue cumplido en honor al Creador, gracias a Él por proveer la fuerza para cumplir con cada uno de mis metas. Gracias a Dios y a mi esposa e hija, Vanesa Paucar y Brithany Yucato que han sido el motor principal en mi vida. Mi madre, y mis suegros: María Checa, Joselo Paucar y Fabiola Romero, porque ellos son el soporte de cada decisión tomada, ellos han formado en mí los mejores valores morales en todo momento, un inmenso gracias porque a pesar de complicaciones y restricciones sus bendiciones han sido mucho más grandes. A mis hermanos Fernando y Jesús Yucato por compartir conmigo los momentos más significativos de su vida que al mismo tiempo han sido los míos. Igualmente dedico este trabajo a mi sobrina Lizbeth, que es mi estimulación e iluminación para ser mejor cada día.

Jaime David Yucato Checa



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTO

Agradezco a dios por haberme otorgado una familia maravillosa quienes han creído en mí siempre dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio enseñándome a valorar todo lo que tengo.

En primer lugar a Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad hasta ahora; en segundo lugar a cada uno de los que son parte de mi familia a mi padre Guillermo Revelo, a mi madre Carmen Erazo, a mis hermanos Carla, Franklin y Jhosue, de manera especial a Carla por extenderme su mano en momentos difíciles quien ha sido mi segunda madre mi hermana y sobre todo mi amiga incondicional y a todos mis familiares; por siempre haberme dado su fuerza y apoyo, ayudándome y llevándome hasta donde estoy ahora. Por último a mi compañero de tesis porque en esta armonía grupal lo hemos logrado y a mi director de tesis quién nos ayudó en todo momento, Ing. Hernán Pérez.

Gabriela Marcel Revelo Erazo



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTO

A Dios, el ser importante y creador de todas las cosas.

A mi esposa e hija: Vanesa Paucar, Brithany Yucato

A mi madre y suegros: María Checa, Joselo Paucar y Fabiola Romero

A mis hermanos: Fernando Yucato y Jesús Yucato

A la Universidad Técnica del Norte por permitirme progresar profesionalmente.

Agradezco a cada uno de los docentes, e ingenieros; dignos representantes de profesionalismo y dedicación, participantes en mi formación.

Un infinito agradecimiento al Ing. Hernán Pérez director de mi trabajo de grado.

Jaime David Yucato Checa

RESUMEN

El presente proyecto está dirigido a la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico (CIMANELE), especialmente para el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, en el que se han implementado tres módulos didácticos para el análisis de grupos de conexión trifásicos, pruebas de vacío y de corto circuito, polaridad y regulación de voltaje, para lo cual el proyecto incorpora cinco capítulos descritos a continuación: En el Capítulo 1 se planteó, formuló y delimitó el problema de investigación para determinar las necesidades de la carrera y de los estudiantes con respecto a capacitación técnica profesional. En el Capítulo 2 se detalla el marco teórico, en donde se registra toda la información necesaria para el adiestramiento de los estudiantes, tal como el transformador, su funcionamiento, tipos de transformadores, prueba de vacío, prueba de corto circuito, y los diferentes grupos de conexión. En el Capítulo 3 se describe sobre el manejo de información tecnológica para integrar los conocimientos propios y ajenos con el objetivo de exteriorizar nuevos conocimientos que posteriormente se aplicaran y también se manifestará la investigación documental para la recopilación de información múltiple con el fin de obtener criterios propios en la toma de decisiones. El Capítulo 4 describe el diseño y construcción de los tres módulos monofásicos de transformación didácticos que permitan analizar la utilidad y aplicación de los diferentes grupos de conexión trifásica. Para finalizar en el Capítulo 5 se menciona conclusiones y recomendaciones derivadas del presente proyecto.

SUMMARY

The present project is aimed to Electrical Maintenance Engineering career (CIMANELE), especially for the laboratory of electrical machines, three teaching modules have been implemented for the analysis of the three-phase transformers connection groups, vacuum tests and Short circuit, polarity and voltage regulation. So, this project has five chapters: Chapter 1 proposed, formulated and delimited the research problem to determine career and students' needs regarding to professional technical training. Chapter 2 has the theoretical framework, where there is all the necessary information to train students, such as transformer, their operation, types of transformers, vacuum test, short circuit test, and the different groups of connection. Chapter 3 describes how technological information was managed own and other peoples' knowledge with the objective to externalizing new knowledge, that would be applied later and also documentary research to collect multiple information, in order to obtain own criteria to make decisions. Chapter 4 describes the design and construction of the three single-phase modules of didactic transformation, they allow to analyze the use and application of the different three-phase connection groups. Finally, chapter 5 mentions the recommendations, which were obtained from this project, based on the authors' conclusions, as well as, they are based on bibliographical sources, lincography, annexes and photographs.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN.....	II
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	V
CERTIFICACIÓN.....	VI
DECLARACIÓN.....	VII
DEDICATORIA.....	VIII
DEDICATORIA.....	IX
AGRADECIMIENTO.....	X
AGRADECIMIENTO.....	XI
RESUMEN.....	XII
SUMMARY	XIII
ÍNDICE DE CONTENIDO	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XXIII
ÍNDICE DE ECUACIONES	XXV
CAPÍTULO I.....	1
1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.4 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.4.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL:	2
1.4.2 DELIMITACIÓN TEMPORAL:	3
1.5 OBJETIVOS:.....	3
1.5.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3

1.6 JUSTIFICACIÓN.....	3
CAPITULO II.....	5
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 MÓDULOS DIDÁCTICOS.....	5
2.2 GENERALIDADES DEL TRANSFORMADOR	5
2.2.1 DEFINICIÓN	5
2.2.2 FUNCIONAMIENTO.	6
2.2.3 TIPOS DE TRANSFORMADOR POR EL NÚCLEO.....	7
2.3 MODELADO TEÓRICO DE LOS TRANSFORMADORES.....	9
2.3.1 TRANSFORMADOR IDEAL.....	9
2.4 TEORÍA DE LA OPERACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES REALES.....	11
2.5 EL CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR	16
2.5.1CIRCUITOS EQUIVALENTES APROXIMADOS DE UN TRANSFORMADOR	17
2.6 REGULACIÓN DE VOLTAJE EN UN TRANSFORMADOR (CAMBIE DE POSICIÓN)	19
2.7 SISTEMAS DE MEDIDA POR UNIDAD.....	19
2.7 PRUEBAS DE LOS TRANSFORMADORES	22
2.7.1 PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO.....	22
2.7.2 PRUEBA DE CORTOCIRCUITO	24
2.8 POLARIDADES DE LOS TRANSFORMADORES	30
2.9 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	32
2.9.1 CONEXIONES DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.....	34
2.9.1.1 CONEXIÓN ESTRELLA-ESTRELLA.	35
2.9.1.2 CONEXIÓN ESTRELLA-DELTA.....	36
2.9.1.3 CONEXIÓN DELTA-ESTRELLA	37
2.9.1.4 CONEXIÓN DELTA-DELTA.....	38
2.10 GRUPO DE CONEXIONES TRIFÁSICAS	39

2.11 CONSIDERACIONES QUE SE DEBEN TOMAR PARA LAS CONEXIONES TRIFÁSICAS	45
2.12 GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	53
CAPÍTULO III.....	54
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	54
3.1 TIPOS DE INVESTIGACIÓN	54
3.1.1. INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL O BIBLIOGRÁFICA	54
3.1.2. INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA	54
3.2 MÉTODOS.....	54
3.2.1 MÉTODO INDUCTIVO.....	54
3.2.2 MÉTODO DEDUCTIVO	55
3.2.3 MÉTODO ANALÍTICO	55
3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.....	55
3.3.1. CRITERIOS DE EXPERTOS	55
3.3.2 INSTRUMENTOS	55
CAPÍTULO IV	56
4. PROPUESTA TECNOLÓGICA.....	56
4.1 TEMA.....	56
4.2 JUSTIFICACIÓN.....	56
4.3 OBJETIVO GENERAL	56
4.4 DESARROLLO DE LA PROPUESTA	57
4.5 DETALLE DEL DISEÑO	57
4.5.1 DISEÑO DE LOS MÓDULOS DIDÁCTICOS	58
4.5.2 ELEMENTOS PARA CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO	62
4.6 CONSTRUCCIÓN DEL TABLERO	63
4.6.1 CONSTRUCCIÓN DE LOS GABINETES.....	63
4.7 PRUEBAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS	67

4.7.1 PRUEBA DE POLARIDAD.....	67
4.7.2 PRUEBA DE CORTOCIRCUITO	68
4.7.3 PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO.....	71
4.8 CONEXIONES TRIFÁSICAS	75
4.8.1 PRUEBA CONEXIÓN Y-Y	75
4.8.2 PRUEBA CONEXIÓN Y- DELTA	78
4.8.3 PRUEBA DE CONEXIÓN DELTA-DELTA	80
4.8.4 PRUEBA DE CONEXIÓN DELTA-Y	82
4.9 DESIGNACIÓN DE LAS CONEXIONES.....	84
4.10 CONEXIONES EN DESFASE EN 0.....	85
4.10.1 CONEXIÓN DD_0	85
4.10.2 CONEXIÓN YY_0	87
4.10.3 CONEXIÓN DZ_0	89
4.12 CONEXIÓN EN DESFASE 5	91
4.12.1 CONEXIÓN EN DY_5	91
4.12.2 CONEXIÓN YD_5	93
4.12.3 CONEXIÓN YZ_5	95
4.13 CONEXIÓN DE DESFASE EN 6	97
4.13.1 CONEXIÓN DD_6	97
4.13.2 CONEXIÓN YY_6	99
4.13.3 CONEXIÓN DZ_6	101
4.14 CONEXIÓN DE DESFASE EN 11	103
4.14.1 CONEXIÓN DY_{11}	103
4.14.2 CONEXIÓN YD_{11}	105
4.14.3 CONEXIONES YZ_{11}	107
CAPÍTULO V	109
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	109

5.1 CONCLUSIONES	109
5.2 RECOMENDACIONES	110
5.3. BIBLIOGRAFÍA Y LINGÜÍSTICA.....	111
ANEXOS.....	113
ANEXO 1. CONSTRUCCIÓN DE LOS MÓDULOS.....	113
ANEXO 2. ELABORACIÓN DE PRUEBAS AL MÓDULO DIDÁCTICO.....	116
ANEXO 3. REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS	118
ANEXO 4. PRACTICAS.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: Teoría de operación de los transformadores monofásicos reales, Chapman (2012).	5
FIGURA 2: Circuito magnético común de dos bobinas, http://quintans.webs.uvigo.es	7
FIGURA 3: Transformador monofásico de columnas, (Rodríguez, 2012)	8
FIGURA 4: Transformador monofásico de columnas, Transformadores “Universidad de Cantabria”	8
FIGURA 5: Transformador ideal, Chapman (2012).....	9
FIGURA 6: a) Sistema eléctrico con transformador b) Sistema referenciado al primario del transformador. “Elaboración propia”	11
FIGURA 7: Flujos mutuo y de dispersión, Pruebas para el cálculo del circuito equivalente y de la eficiencia en transformadores de distribución, (Rodríguez, 2012)...	12
FIGURA 8: Curva o lazo de histéresis trazado por el flujo en un núcleo cuando se aplica la corriente $i(t)$, (Chapman, 2012).	12
FIGURA 9: Corriente de magnetización causada por el flujo en el núcleo del transformador, (Chapman, 2012).....	14
FIGURA 10: Corriente de pérdidas en el núcleo de un transformador. (Chapman, 2012).	15
FIGURA 11: Corriente de excitación total en un transformador. (Chapman, 2012).....	15
FIGURA 12: a) Modelo de un transformador referido a su lado primario b) Modelo de un transformador a su lado secundario, (Chapman, 2012).	18
FIGURA 13: Modelados aproximados de transformador a) Referido al lado primario b) Referido al lado secundario, (Chapman, 2012).....	18
FIGURA 14: Circuito equivalente, (Chapman, 2012).	20
FIGURA 15: Conexión para la prueba de circuito abierto del transformador, (Chapman, 2012).	23
FIGURA 16: Conexión para la prueba de cortocircuito del transformador, (Chapman, 2012).	25
FIGURA 17: Circuito equivalente simplificado resultante, (Chapman, 2012).	29

FIGURA 18: El circuito equivalente por unidad del ejemplo, , (Chapman, 2012).	30
FIGURA 19: Conexión para determinar la polaridad de los transformadores a) Polaridad sustractiva b) polaridad aditiva, Avelino (2001).	31
FIGURA 20: Banco de transformador compuesto por tres transformadores independientes, Chapman,(2012).	33
FIGURA 21: Transformador trifásico construido sobre un núcleo de tres columnas, Chapman,(2012).	33
FIGURA 22: Tipos de transformadores trifásicos por el núcleo común, www.nichese.com	33
FIGURA 23: Conexión de transformadores trifásicos en estrella-estrella, Chapman (2012).	35
FIGURA 24: Conexión de transformadores trifásicos estrella-delta	36
FIGURA 25: Conexión de transformadores trifásicos, Chapman (2012).	37
FIGURA 26: Conexión de transformadores trifásicos, Chapman (2012).	38
FIGURA 27: Conexión Dy_5 . "Elaboración propia"	39
FIGURA 28: Conexión Yz_{11} . "Elaboración	40
FIGURA 29: Equivalencia entre cifras de horas, Lemozy (2015)	41
FIGURA 30: Grupo de conexiones de 0 y 5 de desfase. www.nichese.com	42
FIGURA 31: Grupo de conexiones de 6 y 11 de desfase. www.nichese.com	43
FIGURA 32: Diagrama fasorial de diversas potencias y funciones del operador a. "Elaboración Propia".	44
FIGURA 33: Conexión Dd_0 . "Elaboración Propia"	45
FIGURA 34: Conexión Dd_0 . "Elaboración	46
FIGURA 35: Conexión Dd_2	46
FIGURA 36: Conexión Dd_2	47
FIGURA 37: Conexión Yz_5 . "Elaboración Propia".	48
FIGURA 38: Conexión Dz_0 . "Elaboración Propia".	48
FIGURA 39: conexión Yy_0 . "Elaboración Propia".	48
FIGURA 40: Conexión Dd_6 . "Elaboración Propia".	49

FIGURA 41: Conexión Yd_5 . "Elaboración Propia"	50
FIGURA 42: Conexión Dy_{11} . "Elaboración Propia"	50
FIGURA 43: Conexión Yz_{11} . "Elaboración Propia"	51
FIGURA 44: Conexión Dz_6 . "Elaboración Propia"	52
FIGURA 45: Transformador para lámparas halógenas, www.leroymerlin.esimgr	57
FIGURA 46: Vista frontal del módulo, "Elaboración propia"	58
FIGURA 47: Módulos didácticos parte exterior, "Elaboración propia"	59
FIGURA 48 : Módulos didácticos parte interior, "Elaboración propia"	60
FIGURA 49: Conexión interna del módulo didáctico, "Elaboración propia"	61
FIGURA 50: Medidas gabinete, "Elaboración Propia"	63
FIGURA 51: Diseño para los huecos del tablero, "Elaboración propia"	63
FIGURA 52: Huecos y colocación de Jack banas en el tablero, "Elaboración propia" ...	64
FIGURA 53: Cableado del módulo, "Elaboración propia"	64
FIGURA 54: Montaje de los transformadores, "Elaboración propia"	64
FIGURA 55: Ensamblaje de los módulos didácticos, "Elaboración propia"	65
FIGURA 56: Pruebas de funcionamiento en módulos didácticos, "Elaboración propia"	65
FIGURA 57: Módulos didácticos terminados, "Elaboración propia"	66
FIGURA 58: a) Polaridad Aditiva b) Polaridad Sustractiva	67
FIGURA 59: Elaboración de pruebas de cortocircuito, "Elaboración propia"	68
FIGURA 60: Circuito equivalente, "Elaboración propia"	73
FIGURA 61: Circuito equivalente simplificado "Elaboración propia"	73
FIGURA 62: Circuito equivalente por unidad. "Elaboración propia"	74
FIGURA 63: Conexión Y-Y	76
FIGURA 64: Conexión Y- delta	78
FIGURA 65: Conexión Delta- Delta	80
FIGURA 66: Conexión delta-Y	83
FIGURA 67: Conexión Dd_0	85

FIGURA 68: Conexión Dd_0	86
FIGURA 69: Conexión Yy_0	87
FIGURA 70: Conexión Yy_0	88
FIGURA 71: Conexión Dz_0	89
FIGURA 72: Conexión Dz_0	90
FIGURA 73: Conexión Dy_5	91
FIGURA 74: Conexión $En Dy_5$	92
FIGURA 75: Conexión Yd_5	93
FIGURA 76: Conexión Yd_5	94
FIGURA 77: Conexión Yz_5	95
FIGURA 78: Conexión Yz_5	96
FIGURA 79: Conexión Dd_6	97
FIGURA 80: Conexión Dd_6	98
FIGURA 81: Conexión Yy_6	99
FIGURA 82: Conexión Yy_6	100
FIGURA 83: Conexión Dz_6	101
FIGURA 84: Conexión Dz_6	102
FIGURA 85: Conexión Dy_{11}	103
FIGURA 86: Conexión Dy_{11}	104
FIGURA 87: Conexión Yd_{11}	105
FIGURA 88: Conexión Yd_{11}	106
FIGURA 89: Conexión Yz_{11}	107
FIGURA 90: Conexión Yz_{11}	108

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: Características de los transformadores ideales	9
TABLA 2: Relación de las impedancias de circuito primario y de carga en un transformador ideal.....	10
TABLA 3: Datos de pruebas	26
TABLA 4: Ventajas y desventajas del transformador de 3 fases sobre los grupos monofásicos	34
TABLA 5: Relación de transformación Y-Y.....	35
TABLA 6: Relación de transformación Y-D	36
TABLA 7: Relación de transformación D-Y	37
TABLA 8: Relación de transformación D-D	38
TABLA 9: Cifras de horas posibles, Lemozy (2015).....	41
TABLA 10: Grupo de conexión, Lemozy (2015).....	41
TABLA 11: Características de placa del transformador	58
TABLA 12: Elementos del módulo didáctico.....	62
TABLA 13: Prueba de Polaridad.	67
TABLA 14: Valores obtenidos en la prueba de cortocircuito.....	69
TABLA 15: Valores obtenido en la prueba de circuito abierto	71
TABLA 16: Combinaciones de conexiones posibles.....	75
TABLA 17: Voltajes en el primario obtenidos en la prueba Y-Y.....	76
TABLA 18: Voltajes en el secundario obtenidos en la prueba Y-Y	76
TABLA 19: Datos obtenidos con el analizador FLUKE 435.	77
TABLA 20: cálculos y comprobaciones (conexión Y-Y).....	77
TABLA 21: Voltajes en el primario obtenidos en la prueba Y-delta	79
TABLA 22: Voltajes en el secundario obtenidos en la prueba Y-delta.....	79
TABLA 23: Datos obtenidos con el analizador FLUKE 435.	79
TABLA 24: Cálculos y comprobaciones (conexión Y-D).....	79

TABLA 25: Voltajes en el primario obtenidos en la prueba delta-delta	81
TABLA 26: Voltajes en el secundario obtenidos en la prueba delta-delta.....	81
TABLA 27: Datos obtenidos con el analizador FLUKE 435.....	81
TABLA 28: Cálculos y comprobaciones (conexión D-D)	82
TABLA 29: Voltaje del primario obtenidos en la prueba delta - Y	83
TABLA 30: Voltajes en el secundario obtenidos en la prueba delta - Y	83
TABLA 31: Datos obtenidos con el analizador FLUKE 435.....	83
TABLA 32: Cálculos y comprobaciones (conexión D-Y).....	84
TABLA 33: Designación de conexiones	84
TABLA 34: Conexión Dd_0 (Primario)	85
TABLA 35: Conexión Dd_0 (Secundario)	86
TABLA 36: Conexión Yy_0 (Primario).....	87
TABLA 37: Conexión Dz_0 (Primario)	89
TABLA 38: Conexión Dy_5 (Primario).....	91
TABLA 39: Conexión Yd_5 (Primario)	93
TABLA 40: Conexiones Yz_5 (primario)	95
TABLA 41: Conexión Dd_6 (Primario)	97
TABLA 42: Conexión Yy_6	99
TABLA 43: Conexión Dz_6 (Primario).....	101
TABLA 44: Conexiones Dy_{11}	103
TABLA 45: Conexiones Yd_{11} (Primario).....	105
TABLA 46: Conexiones Yz_{11} (Primario).....	107

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1: Componentes de voltaje en devanado primario y secundario	13
ECUACIÓN 2: Relación de transformación con voltajes totales y causados por el flujo mutuo	13
ECUACIÓN 3: Componentes de corrientes de excitación	14
ECUACIÓN 4: Relación de corrientes y número de espiras en el transformador.....	16
ECUACIÓN 6: Ecuación de regulación de voltaje.....	19
ECUACIÓN 7: Ecuación de regulación de voltaje.....	19
ECUACIÓN 5: Fórmula para cantidad por unidad	20
ECUACIÓN 8: Cálculo de la magnitud de la admitancia de excitación.	24
ECUACIÓN 9: Cálculo para el factor de potencia ángulo de desfase entre corriente y voltaje	24
ECUACIÓN 10: Admitancia total expresada en fasor y sumatoria de sus componentes	24
FIGURA 16: Conexión para la prueba de cortocircuito del transformador, (Chapman, 2012).	25
ECUACIÓN 11: Cálculo del módulo de la impedancia en la prueba de cortocircuito	25
ECUACIÓN 12: Calculo del ángulo de la impedancia en la prueba de cortocircuito	25
ECUACIÓN 13: Impedancia total en forma de fasor y por sumatoria de sus diferentes componentes	26
ECUACIÓN 14: El factor de potencia durante la prueba de circuito abierto	27
ECUACIÓN 15: La admitancia de excitación	27
ECUACIÓN 16: El factor de potencia durante la prueba de cortocircuito	28
ECUACIÓN 17: La impedancia en serie	28

CAPÍTULO I

1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El primer dispositivo que puede ser considerado como un transformador es el patentado por Otto Bláthy, Miksa Déri y Károly Zipernowsky en 1885 y que fue denominado modelo ZDB, iniciales de sus apellidos. Este dispositivo estuvo basado, tanto en su estructura como en su principio de funcionamiento, en el anillo de Faraday.

Los experimentos de Faraday iniciaron en 1831, es decir medio siglo antes de la invención del transformador. Si nos preguntamos a que se debe este retraso en su aparición la respuesta es relativamente sencilla: en los comienzos de la electricidad, esta se producía en su forma continua y en ese caso el transformador no resultaba necesario.

No fue hasta más adelante como cuando empezaron a aparecer los problemas relativos al transporte de la electricidad y a las pérdidas energéticas que se producían en forma de calor, cuando el transformador se presenta como un dispositivo sumamente útil. El transformador eléctrico fue la respuesta con que la tecnología de entonces resolvió el problema, lo cual permitió que continuara el impetuoso desarrollo de lo que hoy se conoce como progreso.

El transformador es un dispositivo que basándose en el fenómeno de la inducción electromagnética. Está constituido por dos bobinas de material conductor devanadas sobre un núcleo cerrado de material ferromagnético, pero aisladas entre si eléctricamente. La única conexión entre las bobinas la constituye el flujo magnético común que establece en el núcleo. El núcleo generalmente es fabricado de un material ferromagnético que facilita la circulación del campo magnético. Es aquí, en donde se centra este proyecto que trata de fortalecer el entrenamiento con respecto al uso del transformador.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro de la Universidad Técnica del Norte, ubicada en la Av. 17 de Julio 5-21 Ciudadela Universitaria Imbabura, Ibarra. Ecuador, en la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico es necesario la implementación de módulos didácticos para reforzar el conocimiento impartido en clases, en cuanto al desarrollo de destrezas y habilidades para realizar conexiones de transformadores trifásicos como equipamiento del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, adquisición de señales y parámetros eléctricos que permita al docente una mejor explicación de estos temas.

Por otro lado la mejora de industrias operan sus equipos y máquinas eléctricas sin un conocimiento profundo de tipo de cargas conectadas en sus instalaciones mismas que pueden producir efectos de distorsión que afectan las señales eléctricas con la consiguiente contaminación de redes de distribución, por lo que es necesario analizar con qué tipo de transformador se debe contar como medio de alimentación que en forma complementaria ayude a mejorar la calidad de servicio eléctrico y evite la contaminación a terceros.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo diseñar y construir unidades monofásicas de transformación que permitan analizar la utilidad y aplicación de los diferentes grupos de conexión trifásica en el laboratorio de máquinas eléctricas de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico?

1.4 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.4.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL:

El diseño y construcción de unidades monofásicas de transformación como módulos didácticos que permitan realizar conexiones trifásicas y adquisición de señales, parámetros eléctricos y su desfase de ángulo, se lo realizará para mejorar el equipamiento del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico.

1.4.2 DELIMITACIÓN TEMPORAL:

El diseño y construcción se realizará en el Laboratorio de la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas que es parte de la Universidad Técnica del Norte, ubicada en la avenida Carchi y 17 de julio del Sector el Olivo cantón Ibarra de la provincia de Imbabura.

1.5 OBJETIVOS:

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir módulos monofásicos de transformación didácticos que permitan analizar la utilidad y aplicación de los diferentes grupos de conexión trifásica para el laboratorio de máquinas eléctricas en la carrera de Ingeniería en Mantenimiento.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar y analizar el funcionamiento de los transformadores así como también sus características y su grupo de conexiones trifásicas.
- Diseñar y construir módulos didácticos monofásicos de transformación.
- Realizar prácticas con uso y manejo del módulo, con información detallada.
- Desarrollar los diferentes grupos de conexiones trifásicas.

1.6 JUSTIFICACIÓN

El trabajo de grado realizado consta de la implementación de módulos didácticos para complementar el aprendizaje práctico de los estudiantes de la Carrera de Ingeniería de Mantenimiento Eléctrico respecto a polaridad de los transformadores, pruebas de cortocircuito y circuito abierto, circuito equivalente, regulación de voltaje, grupos de conexión y desfase de ángulo en transformadores trifásicos.

Por consiguiente se desarrollaron módulos didácticos con transformadores monofásicos para que en base a estos se puedan obtener conexiones más complejas como la de transformadores trifásicos y pruebas de laboratorio elementales pero de gran interés para adquirir mayor conocimiento en los que respecta a maquinas eléctricas estáticas y analizar su comportamiento en el sistema eléctrico

Este proyecto permitirá mejorar la formación del estudiante tanto en teoría como en práctica en lo que respecta a los transformadores dentro del capítulo de las máquinas estáticas.

CAPITULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 MÓDULOS DIDÁCTICOS

Castro y García (2011) Manifiestan:

“En el proceso de enseñanza y aprendizaje la selección del material didáctico es de suma importancia; éste motiva al alumno y permite que enfoque su atención y así pueda fijar y retener los conocimientos. Un proceso de enseñanza activo requiere por parte del docente un conocimiento claro y preciso sobre la importancia, uso y confección de diversos materiales que contribuyen a un mejor aprendizaje en los alumnos.” (p.4)

Recalde (2012) Afirma: “La didáctica es una disciplina y un campo de conocimiento que se construye, desde la teoría y la práctica, en ambientes organizados de relación y comunicación intencionadas, donde se desarrollan procesos de enseñanza y aprendizaje para la formación del alumnado”(p. 2).

Los módulos didácticos son una implementación para los laboratorios de máquinas eléctricas en la carrera de ingeniería en mantenimiento eléctrico, para despejar inquietudes de los estudiantes de dicha carrera.

2.2 GENERALIDADES DEL TRANSFORMADOR

2.2.1 DEFINICIÓN

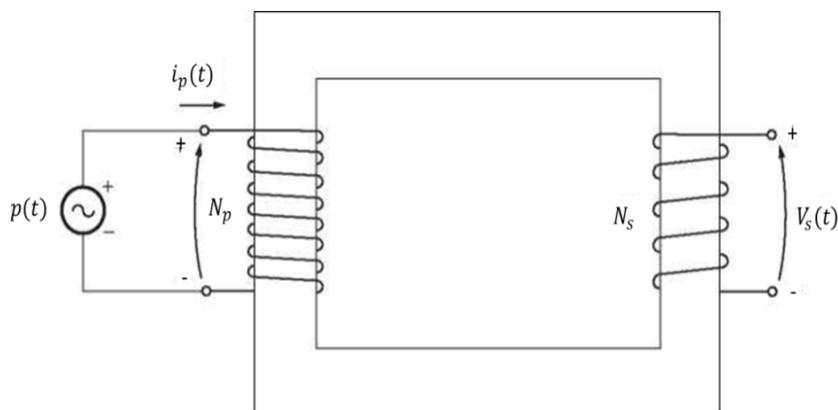


FIGURA 1: Teoría de operación de los transformadores monofásicos reales, Chapman (2012).

Chapman (2012) Afirma: “Un transformador es un dispositivo que cambia la potencia eléctrica alterna con un nivel de voltaje a potencia eléctrica alterna con otro nivel de voltaje mediante la acción de un campo magnético”. (p.49).

Rodríguez (2012) Dice que:

“Los transformadores son máquinas estáticas con dos devanados de corriente alterna enrollados sobre un núcleo magnético.”

El devanado por donde entra energía al transformador se denomina primario y el devanado por donde sale la energía hacia las cargas que son alimentadas por el transformador se denomina secundaria. (p.1).

A partir de los dos conceptos anteriores se determina que el transformador es un aparato eléctrico cuya misión es transmitir una potencia de una tensión determinada a otra tensión también alterna.

2.2.2 FUNCIONAMIENTO.

Un transformador opera con el principio de inducción electromagnética, dos bobinas son ensambladas inductivamente, el flujo magnético pasa por una de ellas. También por la otra en forma parcial o en su totalidad dando como resultado que las dos bobinas tengan un circuito magnético común.

Al conectar una fuente de corriente alterna a una bobina denominada primaria, la corriente y el flujo resultante cambia de forma constante y automática en magnitud y dirección causando que cambie el flujo que ata las bobinas acopladas, induciéndose un voltaje en la segunda bobina llamada secundaria.

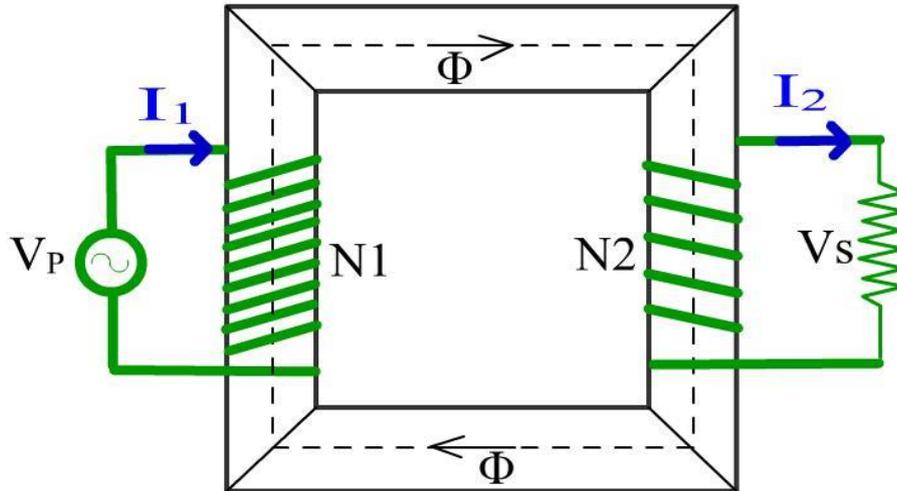


FIGURA 2: Circuito magnético común de dos bobinas, <http://quintans.webs.uvigo.es>

En la anterior representación gráfica se muestra el circuito magnético en un transformador. El núcleo compuesto por material ferromagnético indica el camino para la distribución de flujo entre bobinas; aquí se presenta una clasificación.

2.2.3 TIPOS DE TRANSFORMADOR POR EL NÚCLEO.

- Transformador monofásico de columnas.

En este transformador el núcleo magnético tiene forma rectangular y consta de dos columnas (donde se arrollan los devanados) y dos yugos o culatas, todos de igual sección.

Aunque para facilitar el análisis teórico del transformador se suele dibujar cada devanado arrollado sobre una columna individualmente, la realidad es que primero se realiza el bobinado de menor tensión repartido entre las dos columnas y después el de mayor tensión sobre el anterior de la misma manera, mitad en una columna y mitad en la otra. De esta manera se reducen pérdidas. (Rodríguez Miguel Ángel, 2012).

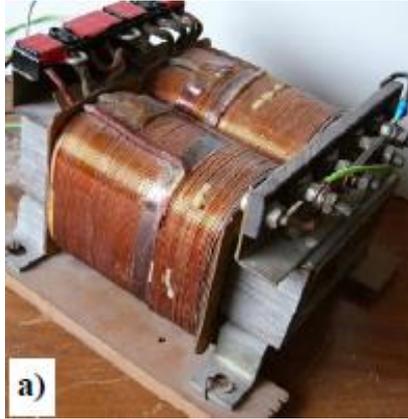


FIGURA 3: Transformador monofásico de columnas, (Rodríguez, 2012)

- Transformador monofásico acorazado.

Tiene un núcleo magnético de tres columnas, siendo la central del doble de sección en comparación con las laterales. Los dos devanados se bobinan sobre la columna central, unos sobre el otro y con una capa aislante intermedia. Al estar los devanados rodeados al hierro del núcleo magnético, se consigue en los transformadores acorazados que los flujos de dispersión sean menores que en los de columnas. (Rodríguez Miguel Ángel, 2012).

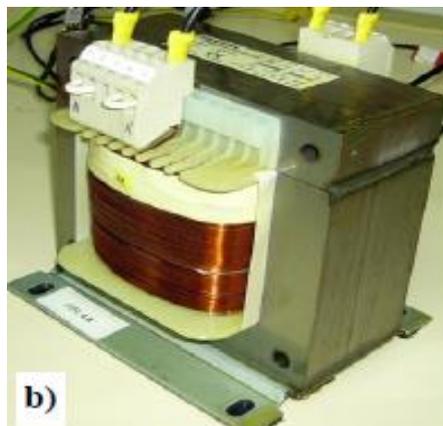


FIGURA 4: Transformador monofásico de columnas, Transformadores “Universidad de Cantabria”

Considerando estos 2 tipos de transformadores que existen en el mercado, se seleccionó el de tipo acorazado en seco, en ventual de ventajas relevantes como fácil manipulación, costo, alimentación eléctrica conveniente y espacio físico compacto reducido.

2.3 MODELADO TEÓRICO DE LOS TRANSFORMADORES.

Para la comprensión del comportamiento de los transformadores en la vida real es necesario realizar modelados teóricos que contengan la interpretación matemática suficiente para la descripción de los diferentes efectos físicos influyentes en estos equipos.

2.3.1 TRANSFORMADOR IDEAL.

Chapman (2012) Afirma:

“Un transformador ideal es un dispositivo sin pérdidas que tienen un devanado de entrada y un devanado de salida y entre la corriente de entrada y la salida, el N_p vueltas del alambre en el lado primario como en su lado secundario, la relación entre el voltaje $V_p(t)$ aplicado al lado primario y el voltaje $V_s(t)$ producido en el secundario, lo cual se describe en la siguiente figura” (p.51).

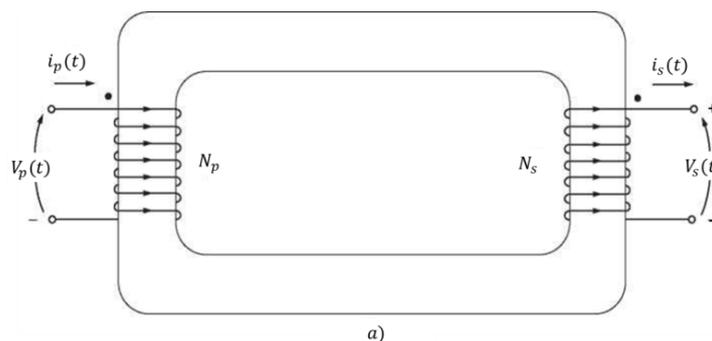


FIGURA 5: Transformador ideal, Chapman (2012).

TABLA 1: Características de los transformadores ideales

Las bobinas primaria y secundaria no tienen resistencia óhmica.	$R = 0$
Todo el flujo magnético se encuentra en el núcleo de láminas de acero o el núcleo no tiene pérdidas por corrientes parásitas ni histéresis.	$P_{Fe} = 0$
El núcleo no tiene reluctancia o la permeabilidad relativa del núcleo es infinita.	$\mu_{Fe} = \infty$
Capacidades parasitas nulas.	$C = 0$

El ángulo de la fase del voltaje primario es el mismo que el ángulo del secundario y la fase del ángulo de la corriente en el primario es la misma que la fase del ángulo de la corriente en el secundario.

La relación de espiras del transformador ideal afecta las magnitudes de los voltajes y corrientes, pero no sus ángulos.

TABLA 2. Relación de las impedancias de circuito primario y de carga en un transformador ideal

Impedancia aparente del circuito primario del transformador	$Z'_L = \frac{V_p}{I_p}$
Es posible hacer coincidir la magnitud de la impedancia de la carga con la impedancia de la fuente seleccionando la relación de vueltas apropiada.	$Z'_L = a^2 Z_L$ ZL= Impedancia de carga

Chapman (2012) señala:

“La forma más fácil de analizar los voltajes y las corrientes del circuito es reemplazar la porción del circuito en un lado del transformador por un circuito equivalente con las mismas características terminales.”

Una vez que se ha sustituido el circuito equivalente en uno de los lados, se pueden encontrar los voltajes y las corrientes del circuito nuevo (sin el transformador).

En la porción del circuito que no se reemplazó, las soluciones que se obtengan serán los valores correctos de voltaje y corriente del circuito original. Luego, la relación de las vueltas del transformador se puede utilizar para determinar los voltajes y corrientes del otro lado del transformador.

El proceso de reemplazar un lado del transformador por su equivalente al otro lado del nivel de voltaje se conoce como *referir* el primer lado del transformador al segundo. (p.54).

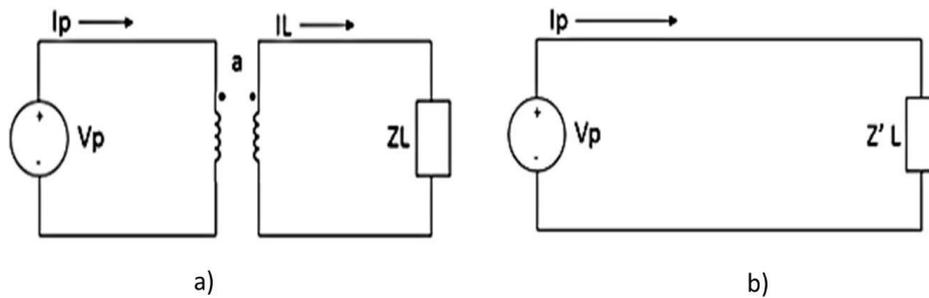


FIGURA 6: a) Sistema eléctrico con transformador b) Sistema referenciado al primario del transformador. "Elaboración propia"

2.4 TEORÍA DE LA OPERACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES REALES.

En los transformadores reales no se cumplen las premisas que definían a los ideales, pero se les aproximan mucho, especialmente en las unidades de gran potencia, si bien las diferencias son pequeñas, en la mayoría de los casos, deben ser tenidas en cuenta. (Lemozy, 2008).

- Pérdidas en el cobre.

Causadas por el calentamiento resistivo del cobre en las bobinas. Son proporcionales al cuadrado de la corriente. ($I^2 \cdot R$).

- Pérdidas por corrientes parásitas.

También llamadas corrientes de Foucault son provocadas por el calentamiento resistivo en el núcleo. Se producen cuando un conductor atraviesa un campo magnético variable, o viceversa.

El movimiento relativo causa la circulación de electrones, o corriente inducida dentro del conductor. Estas corrientes circulares crean electroimanes con campos magnéticos que se oponen al efecto del campo magnético aplicado, dicho esto, a mayor la conductividad del conductor, o a mayor la velocidad relativa de movimiento, mayores serán las corrientes parasitas y los campos opositores generados.

- Flujos dispersos.

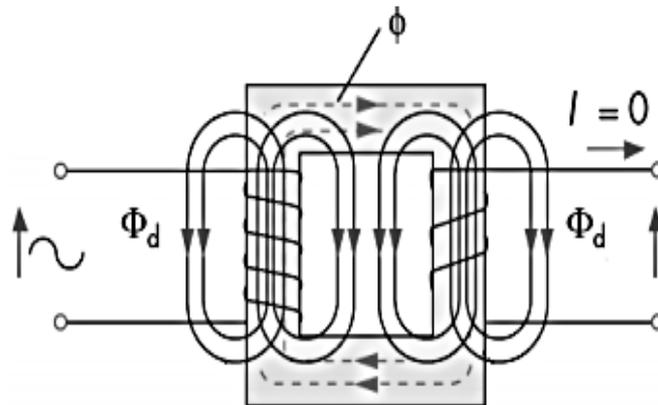


FIGURA 7: Flujos mutuo y de dispersión, Pruebas para el cálculo del circuito equivalente y de la eficiencia en transformadores de distribución, (Rodríguez, 2012).

Los devanados tienen, respectivamente, unas resistencias R_1 y R_2 que generan unos flujos de dispersión Φ_d , además de un flujo común Φ . El flujo Φ_d en el primario es la parte del flujo que no abraza al secundario y el flujo Φ_d en el secundario es la parte del flujo creado en el secundario que no es abrazada por el devanado primario. (Rodríguez, 2012).

- Perdidas por Histéresis

Al aplicar una corriente alterna en una bobina enrollada sobre un núcleo ferromagnético se produce un efecto de magnetización variable.

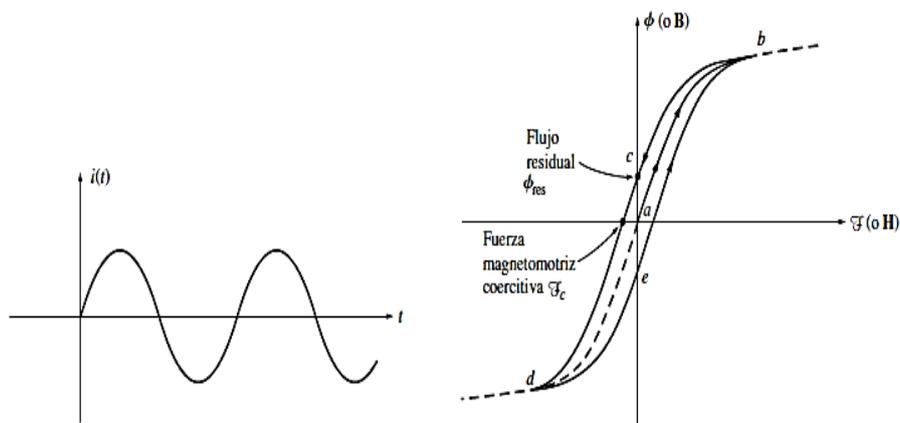


FIGURA 8: Curva o lazo de histéresis trazado por el flujo en un núcleo cuando se aplica la corriente $i(t)$, (Chapman, 2012).

Dentro del metal hay unas pequeñas regiones llamadas dominios, en las que todos los átomos se alinean con sus campos magnéticos apuntando en una misma dirección, de modo que el dominio actúa dentro del material como un pequeño imán permanente, para cambiar la posición de estos dominios se requiere pérdidas de energía en los transformadores estas son las pérdidas por histéresis en el núcleo del hierro y corresponden a la energía que se necesita para reorientar los dominios durante cada ciclo de corriente alterna aplicada al núcleo.

Se puede demostrar que el área comprendida dentro de la curva de histéresis, la cual se forma al aplicar corriente alterna, es directamente proporcional a la energía perdida en un ciclo dado de corriente alterna.

Cuanto menores sean las variaciones de la fuerza magnetomotriz aplicada al núcleo, el área de la curva será menor y serán más pequeñas las pérdidas resultantes. (Chapman, 2012).

Tomando en cuenta los efectos reales de las imperfecciones de los transformadores se considera las siguientes características para el modelado.

- Los voltajes totales, tanto en el primero como en el segundo devanado es igual a la suma del voltaje causado por el flujo mutuo y los flujos dispersos en cada bobinado.

$$V_p(t) = e_p(t) + e_{DP}$$

$$V_s(t) = e_s(t) + e_{DS}$$

ECUACIÓN 1: Componentes de voltaje en devanado primario y secundario

Por otro lado aplicando la ley de Faraday y relacionando las fórmulas del voltaje causado por el flujo mutuo se describe la relación de transformación.

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

ECUACIÓN 2: Relación de transformación con voltajes totales y causados por el flujo mutuo

- Cuando se conecta una fuente de potencia de c.a. a un transformador, la corriente fluye en su circuito primario, *incluso si el circuito secundario está abierto*. Esta corriente de excitación es la que se requiere para producir flujo en un núcleo ferromagnético real consta de dos componentes, la corrientes de magnetización (i_m) y la corriente de compensación por pérdidas de histéresis y corrientes parasitas (i_{h+e}). (Chapman, 2012).

$$i_{ex} = i_m + i_{h+e}$$

ECUACIÓN 3: Componentes de corrientes de excitación

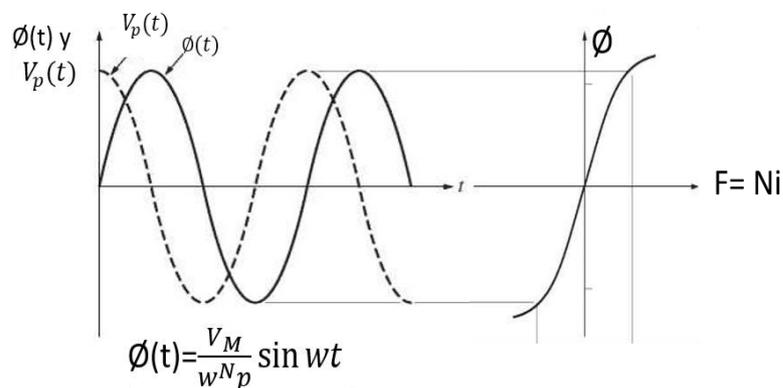


FIGURA 9: Corriente de magnetización causada por el flujo en el núcleo del transformador, (Chapman, 2012).

La corriente de magnetización cuenta con las siguientes características

- La corriente de magnetización en el transformador no es sinusoidal. Los componentes de las frecuencias más altas se deben a la saturación magnética en el núcleo del transformador.
- Una vez que el flujo pico alcanza el punto de saturación en el núcleo, un pequeño incremento en el flujo pico requiere un gran aumento en la corriente de magnetización pico.
- El componente fundamental de la corriente de magnetización atrasa 90° el voltaje aplicado al núcleo.

d) Los componentes de las frecuencias más altas en la corriente de magnetización pueden ser bastante grandes en comparación con el componente fundamental. En general, cuanto más fuerte sea el proceso de saturación en el núcleo, mayores serán los componentes armónicos.

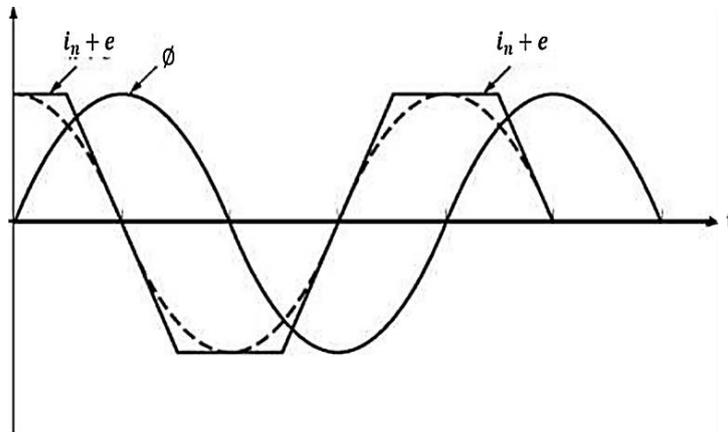


FIGURA 10: Corriente de pérdidas en el núcleo de un transformador. (Chapman, 2012).

Las características más importantes de las corrientes parasitas por pérdidas en el núcleo son:

1. La corriente de pérdidas en el núcleo es no lineal debido a los efectos no lineales de la histéresis.
2. El componente fundamental de la corriente de pérdidas en el núcleo está en fase con el voltaje aplicado al núcleo.

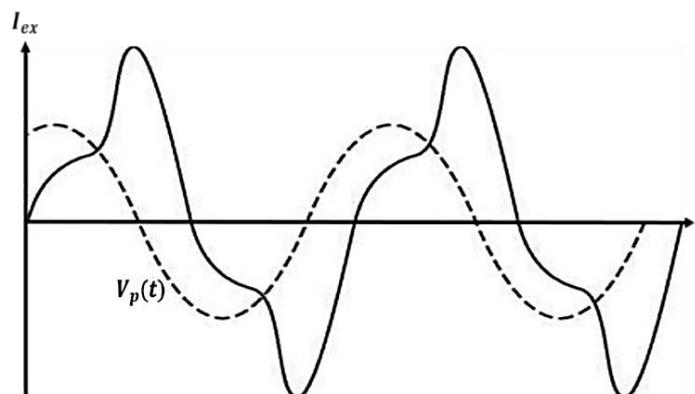


FIGURA 11: Corriente de excitación total en un transformador. (Chapman, 2012).

- Relación de corriente en un transformador y la convención de puntos

Cabe mencionar gráficamente los puntos que dibujando ayudan a determinar la polaridad de los voltajes y las corrientes en el núcleo sin tener que examinar físicamente los devanados.

El significado físico de la convención de puntos es que una corriente que fluye hacia el extremo de un devanado marcado con un punto produce una fuerza magnetomotriz positiva **F**, mientras que una corriente que fluye hacia el extremo de un devanado no marcado con un punto produce una fuerza magnetomotriz negativa.

Por lo tanto, dos corrientes que fluyen hacia los extremos marcados con un punto de sus respectivos devanados producen fuerzas magnetomotrices que se suman.

Si una corriente fluye hacia el extremo de un devanado marcado con un punto y otra fluye hacia afuera de un extremo marcado con un punto, entonces las fuerzas magnetomotrices se cancelan entre sí. De este principio se parte para la relación de vueltas y las corrientes. (Chapman, 2012).

$$\frac{i_p}{i_s} \approx \frac{N_s}{N_p} = \frac{1}{a}$$

ECUACIÓN 4: Relación de corrientes y número de espiras en el transformador

2.5 EL CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR

Avelino (2001) Afirma:

“El circuito equivalente de un transformador puede ser considerado, convenientemente, suponiendo que este es equivalente a un transformador ideal, por lo tanto es un transformador que no tiene pérdidas ni flujo de dispersión y un núcleo ferromagnético de permeabilidad infinita, no requiriendo de corriente de magnetización, y entonces nos permite representar para las imperfecciones del transformador actual por medio de un circuito adicional o impedancias insertadas entre la fuente y el devanado primario y entre el secundario y la carga.

P y S representa los devanados primarios y secundarios de un transformador ideal. R_1 y R_2 Son resistencias iguales para las resistencias del devanado primario y secundario del transformador real. Similarmente, las reactancias inductivas X_1 y X_2 representan las reactancias de los devanados debido al flujo de dispersión del transformador real". (p.35).

Los aspectos principales que se debe de tener en cuenta para construir un circuito equivalente son: las perdidas en el cobre, estas pérdidas ocurren debido al calentamiento resistivo tanto en el devanado primario como en el devanado secundario, también hay que tomar en cuenta las perdidas por corrientes parasitas las cuales son aprovechadas por el núcleo del transformador.

2.5.1 CIRCUITOS EQUIVALENTES APROXIMADOS DE UN TRANSFORMADOR

Chapman, (2012) Declara que:

Los modelos de transformadores que se han mostrado hasta ahora son más complejos de lo que se requiere en la práctica de la ingeniería para obtener buenos resultados. Una de las quejas principales sobre ellos es que la rama de excitación del modelo añade otro nodo al circuito que se analiza, lo que hace que la solución de este sea más compleja de lo necesario.

La rama de excitación tiene una corriente muy pequeña comparada con la corriente de carga de los transformadores. De hecho, la corriente de excitación es solo aproximadamente de 2 a 3% de la corriente de carga total de los típicos transformadores de potencia.

Por esta causa, se puede producir un circuito equivalente simplificado que funciona casi tan bien como el modelo original. Simplemente se mueve al frente del transformador la rama de excitación y las impedancias primarias y secundarias se dejan conectadas en serie. Se añaden estas impedancias dando como resultado el circuito equivalente aproximado que se muestra en la figura 13.(p.66).

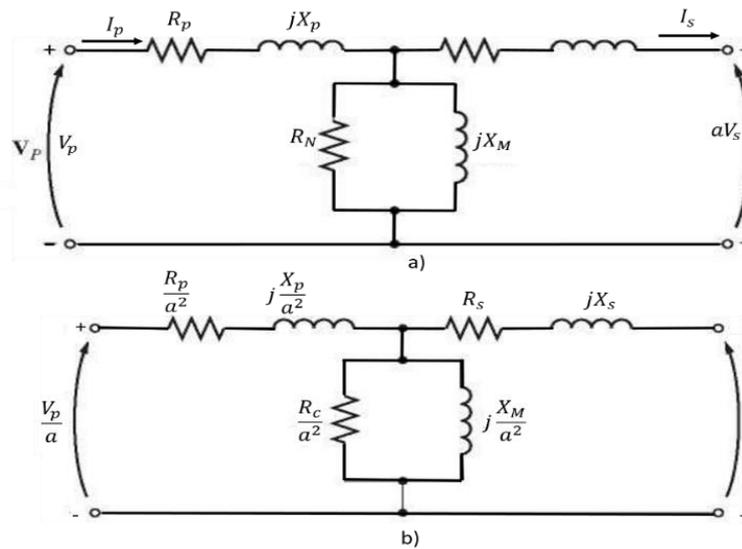


FIGURA 12: a) Modelo de un transformador referido a su lado primario b) Modelo de un transformador a su lado secundario, (Chapman, 2012).

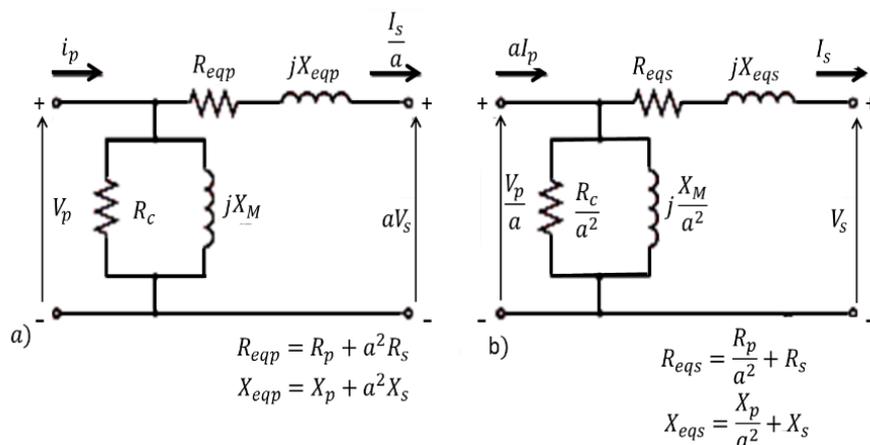


FIGURA 13: Modelados aproximados de transformador a) Referido al lado primario b) Referido al lado secundario, (Chapman, 2012).

Para la modelación de un transformador real se debe incluir la parte de excitación en el circuito ideal pero el análisis puede aumentar en su dificultad por lo que se cambia de posición a la rama de excitación ya que la corriente de esta parte del circuito es mínima en comparación con la corriente de carga total de los transformadores.

2.6 REGULACIÓN DE VOLTAJE EN UN TRANSFORMADOR (CAMBIE DE POSICIÓN)

Debido a que un transformador real tiene dentro de él impedancias en serie, el voltaje de salida de un transformador varía con la carga incluso cuando el voltaje de entrada permanece constante. Para comparar convenientemente los transformadores en este aspecto, se acostumbra a definir una cantidad llamada regulación de voltaje (RV). La regulación de voltaje a plena carga es una cantidad que compara el voltaje de salida de un transformador sin carga (vacío) con el voltaje de salida a plena carga. (Chapman, 2012, p.100).

$$RV = \frac{V_{s,nl}V_{s,fl}}{V_{s,fl}} * 100\%$$

$$RV = \frac{V_{p,pu}V_{s,fl,pu}}{V_{s,fl,pu}} * 100\%$$

ECUACIÓN 5: Ecuación de regulación de voltaje

RV= regulación de voltaje

$V_{s,nl}$ = voltaje en el secundario del transformador (sin carga)

$V_{s,fl}$ = voltaje en el secundario del transformador (plena carga)

Debido a que en vacío $V_{s,nl} = \frac{V_p}{a}$ la regulación de voltaje también se puede expresar como:

$$RV = \frac{V_{p/a} - V_{s,fl}}{V_{s,fl}} * 100\%$$

ECUACIÓN 6: Ecuación de regulación de voltaje

2.7 SISTEMAS DE MEDIDA POR UNIDAD

El valor numérico de los parámetros eléctricos (tensiones, potencias, impedancias, corrientes) para un análisis de un Sistema Eléctrico de Potencia, está generalmente expresado en un valor relativo, ya sea en por ciento [%] o en por unidad [pu].

Esto resulta como consecuencia de referenciar los valores absolutos de dichos parámetros (dados en kV, MW, Ω, kA) a sus correspondientes valores bases.

Si se especifica por ejemplo una tensión base de 132 KV, entonces una tensión medida de 135,6 KV en una estación transformadora, puede quedar expresada como: $135,6 \text{ KV}/132 \text{ KV} = 1,027 \text{ pu} \equiv 102,7 \%$

Esta forma relativa de expresar los valores numéricos presenta ventajas como la simplificación del circuito equivalente de un transformador, desapareciendo la relación de transformación en la representación del mismo.

Las impedancias, tensiones, corrientes, expresadas en [pu] no cambian cuando se refieren a un lado del Transformador o al otro. (Gonzales, 2015).

En el sistema por unidad no se mide los voltajes, corrientes, potencias, impedancias y otras cantidades eléctricas en las unidades tradicionales del SI (volts, amperes, watts, ohms, etc.) en cambio, se mide cada cantidad eléctrica como una fracción decimal de un nivel base. Cualquier cantidad se puede expresar en una base por unidad con la siguiente ecuación. (Chapman, 2012, p.94).

$$\text{Cantidad por unidad} = \frac{\text{Valor Real}}{\text{Valor Base de la cantidad}}$$

ECUACIÓN 7: Fórmula para cantidad por unidad

- Ejemplo

Un transformador de distribución de 2 kVA y 8000/400 V tienen las siguientes resistencias y reactancias.

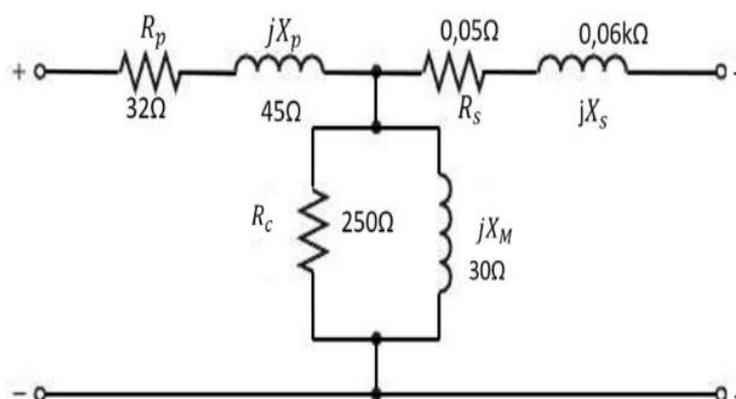


FIGURA 14: Circuito equivalente, (Chapman, 2012).

Las impedancias de las ramas de excitación se dan en el lado de alto voltaje del transformador.

a) Encuentre el circuito equivalente de este transformador referido al lado de alto voltaje.

$$a = \frac{8000}{480} = 16.167$$

$$R_{eqp} = 32 + (16.167)^2 * (0.05) = 45.89$$

$$X_{eqp} = 45 + (16.167)^2 * (0.06) = 61.667j$$

b) Encuentre el circuito equivalente en $[pu]$

$$Z_{b1} = \frac{8000^2}{20000} = 3200 \Omega$$

$$Z_{SE} = \frac{45.89 + 61.66j}{3200} = 0.014 + 0.019j pu$$

$$R_{Npu} = 78.125 [pu]$$

$$X_{Mpu} = 9.375 [pu]$$

c) Encuentre el circuito equivalente del transformador referido al lado del bajo voltaje.

$$R_{eqs} = \frac{32}{(16.167)^2} + 0.05 = 0.01652 \quad R_{NS} = 8.99.99\Omega$$

$$X_{eqs} = \frac{45}{(16.167)^2} + 0.06 = 0.0222 \quad X_{MO} = 108\Omega$$

d) Encuentre el circuito equivalente en $[pu]$

$$Z_{b2} = \frac{(480)^2}{(20000)} = 11.52$$

$$Z_{SEpu} = \frac{0.01652 + 0.0222j}{11.52} = 0.0143 + 0.019j$$

$$X_{M,pu} = 9.375\Omega$$

$$R_{M,pu} = 78.125\Omega$$

e) Suponga que este transformador suministra una carga nominal de 480V y un factor de potencia 0.8 en retraso.

¿Cuál es el voltaje de entrada de este transformador?

$$V_{p/q} = V_s + R_{eqs} I_s + X_{eqs} + I_s$$

$$I_s = \frac{2000 VA}{480 X} = 41.667A$$

$$\ell = \text{Arc cos}(0.8) = 36.87^\circ \rightarrow I_s = 41.667A - 36.87^\circ$$

$$V_{spc} = 480 V \text{ (En Retraso)}$$

$$V_p/a = 480 + 0.1652 (41.667 /- 36.87) + (0.222 /90^\circ) (41.667 /- 36.87)$$

$$V_p/a = 480 + (5.506 - 4.13 j) + (5.55 + 7.4) = 491 \text{ } 0.381^\circ$$

$$R_{eg} = \frac{\frac{V_p}{a} - V_{spc}}{V_{spc}} = \frac{941 - 480}{486} \times 102 = 2.3\%$$

Con el circuito equivalente referido al primario

$$V_p = aV_s + R_{eqp} I_p + jX_{eq} \cdot I_p$$

$$V_p = 8000 + 45.89 (2.5 /-36.87) + 61.667 j (2.5/-36.67^\circ)$$

$$V_p = 8000 + (91.78 - 68.84 j) + (92.5 + 123.33 j)$$

$$V_p = 8184 /0.381^\circ$$

$$R_{eg} = \frac{V_p - aV_s}{aV_s} = \frac{8184 - 8000}{8000} = 2.3\%$$

Con el sistema en p_μ

$$V_p = V_s + R_{eqp\mu} I_p + jX_{eqp\mu} I_p$$

$$V_p = 1 /0^\circ + 0.014 (1 /-36.87) + 0.019 j (1 /-36.87)$$

$$V_p = 1.0226 /0.381^\circ$$

$$R_{eq} = \frac{1.0226 - 1}{1} = 2.26\% \cong 2.3\%$$

2.7 PRUEBAS DE LOS TRANSFORMADORES

Permiten la determinación de los valores de los componentes en el modelo de los transformadores.

2.7.1 PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

En la prueba de circuito abierto se deja abierto el circuito del devanado secundario del transformador y su devanado primario se conecta a una línea de voltaje pleno.

Las pérdidas en vacío son las que se producen en la parte del núcleo del transformador, debido a la histéresis y las corrientes parasitas, que es función de la magnitud, frecuencia y la forma de onda de la tensión aplicada.

Estas pérdidas varían con la temperatura y son particularmente sensibles a variaciones en la forma de onda.

Para este ensayo se desprecian las pérdidas dieléctricas, debido a la impedancia de dispersión, por ser mucho menor que las de la rama de excitación, y la pérdida en el devanado debido a la corriente de excitación, o sea, se considera insignificante la caída de tensión en R_p y X_p

La corriente de excitación, se define como la necesaria para mantener un flujo magnético capaz de inducir una diferencia de potencial en el devanado asociado. Esta prueba también permite verificar que las pérdidas en el núcleo cumplan con los valores garantizados por el fabricante del transformador, así como para probar la existencia de una falla en la estructura del núcleo. (Rodríguez, 2008).

En las condiciones descritas toda la corriente de entrada debe fluir a través de la rama de excitación hacia el transformador. Los elementos en serie R_p y X_p son demasiado pequeños en comparación con R_n y X_m como para causar una caída significativa de voltaje, por lo que esencialmente todo el voltaje de entrada cae a través de la rama de excitación. (Chapman, 2012, p.68

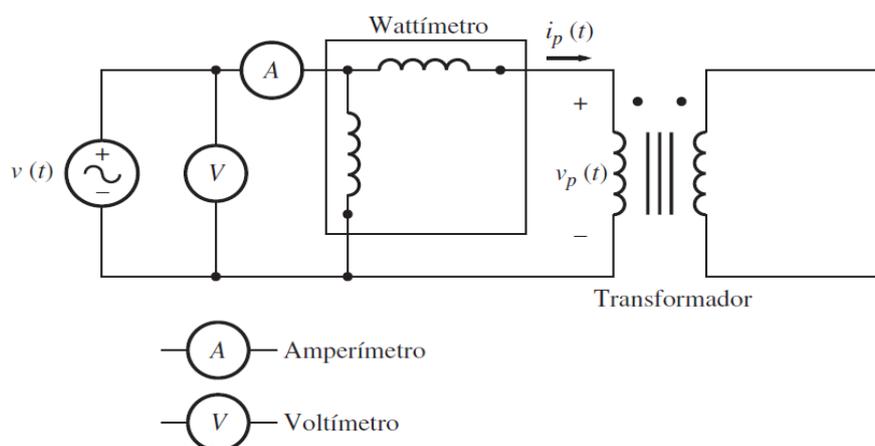


FIGURA 15: Conexión para la prueba de circuito abierto del transformador, (Chapman, 2012).

Los valores de R_n y X_m se obtienen a partir de la admitancia de excitación en módulo y en ángulo.

$$|Y_E| = \frac{I_{CAb}}{V_{CAb}}$$

ECUACIÓN 8: Cálculo de la magnitud de la admitancia de excitación.

$$FP = \cos \phi = \frac{P_{CAb}}{V_{CAb} I_{CAb}}$$

ECUACIÓN 9: Cálculo para el factor de potencia ángulo de desfase entre corriente y voltaje

$$Y_E = \frac{I_{CAb}}{V_{CAb}} \angle -\cos^{-1} FP = G_N - jB_M = \frac{1}{R_N} - j \frac{1}{X_M}$$

ECUACIÓN 10: Admitancia total expresada en fasor y sumatoria de sus componentes

Los componentes admitancia G_N y susceptancia B_M sirven para determinar los valores de resistencia e inductancia R_N y X_M respectivamente.

2.7.2 PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

Rodríguez (2008) señala: La otra parte de las pérdidas de potencia se producen en los conductores de los bobinados primario y secundario, debido a las llamadas pérdida que se dan en el cobre, sumadas a las provocadas por los flujos de dispersión en los devanados, en las uniones del núcleo, en las paredes del tanque, etc.

Cuando un transformador opera en condiciones nominales, la corriente de excitación es pequeña (entre un 2% y un 4% de corriente nominal).

Si uno de los bobinados se pone en cortocircuito, se requiere solo un pequeño voltaje (del 2% al 12% del voltaje nominal) para obtener las corrientes nominales en los bobinados, debido a que dichas corrientes son limitadas por las impedancias de dispersión.

Entonces, bajo estas condiciones, la corriente de magnetización, la densidad de flujo en el núcleo y sus consecuentes pérdidas, son aún más pequeñas que sus valores bajo condiciones nominales y por lo tanto despreciables en este ensayo. (p. 18).

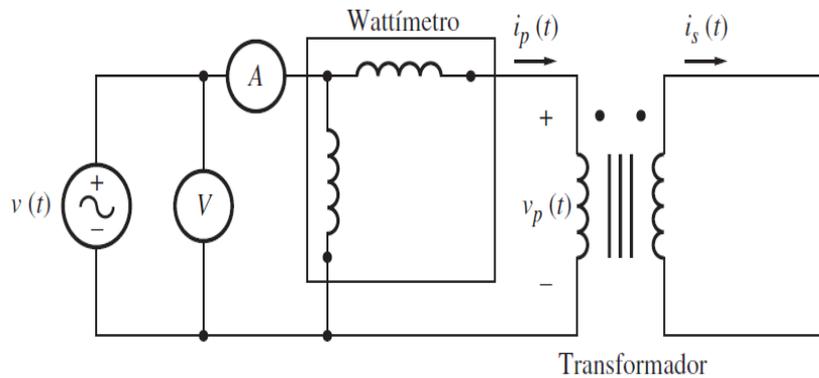


FIGURA 16: Conexión para la prueba de cortocircuito del transformador, (Chapman, 2012).

Rodríguez (2008) indica que: Esta prueba se efectúa colocando el devanado secundario en cortocircuito y alimentando el primario con una tensión regulable, partiendo desde cero y aumentando hasta alcanzar la corriente nominal en el mismo.

En este punto se toman las medidas de tensión, corriente y potencia consumidas en el devanado primario. La impedancia del transformador se define como la tensión requerida para hacer circular la corriente nominal a través de un devanado, mientras el otro se encuentra en cortocircuito. (p.19)

$$|Z_{SE}| = \frac{V_{CC}}{I_{CC}}$$

ECUACIÓN 11: Cálculo del módulo de la impedancia en la prueba de cortocircuito

$$\phi = \cos^{-1} \frac{P_{CC}}{V_{CC} I_{CC}}$$

ECUACIÓN 12: Calculo del ángulo de la impedancia en la prueba de cortocircuito

$$Z_{SE} = \frac{V_{CC} \angle 0^\circ}{I_{CC} \angle -\phi} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \angle \phi = R_{eq} + jX_{eq}$$

ECUACIÓN 13: Impedancia total en forma de fasor y por sumatoria de sus diferentes componentes

Debido a que el voltaje de entrada es tan bajo durante la prueba de cortocircuito, la corriente que fluye por la rama de excitación es despreciable. Si se ignora la corriente de excitación, entonces toda la caída de voltaje en el transformador se puede atribuir a los elementos en serie en el circuito.

La impedancia total referida puede ser calculada como se terminó de explicar pero no hay manera fácil de dividir sus componentes en serie primario y secundario. (Chapman, 2012, p.69).

Ejemplo:

Se requiere determinar las impedancias del circuito equivalente de un transformador de 20 kVA, 8 000/240V, 60 Hz. La prueba de circuito abierto se realizó en la prueba del circuito secundario del transformador (para reducir el voltaje máximo que se tenía que medir), y la prueba de cortocircuito se realizó en el lado primario del transformador (para reducir la máxima corriente que se tenía que medir). Se tomaron los siguientes datos:

TABLA 3: Datos de pruebas

Prueba de circuito abierto (en el secundario).	Prueba de cortocircuito (en el primario).
$V_{CAb} = 240 \text{ V}$	$V_{CC} = 489 \text{ V}$
$I_{CAb} = 7.133 \text{ A}$	$I_{CC} = 2.5 \text{ A}$
$P_{CAb} = 400 \text{ W}$	$P_{CC} = 240 \text{ W}$

Encuentre la impedancia del circuito equivalente referido al lado primario.

Solución:

La razón de vueltas de este transformador es $a = 8\ 000/240 = 33.3333$. El factor de potencia durante la prueba de *circuito abierto* es:

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{CAb}}{V_{CAb} \times I_{CAb}}$$

ECUACIÓN 14: El factor de potencia durante la prueba de circuito abierto

$$FP = \cos \theta = \frac{400W}{(240V)(7,133A)}$$

$$FP = 0,234 \text{ en retraso}$$

La admitancia de excitación está dada por

$$Y_E = \frac{I_{CAb}}{V_{CAb}} \angle -\cos^{-1} FP$$

ECUACIÓN 15: La admitancia de excitación

$$Y_E = \frac{7,133A}{240V} \angle -\cos^{-1} 0,234$$

$$Y_E = 0,0297 \angle -76,5^\circ \text{ S}$$

$$Y_E = 0,00693 - j0,002888 = \frac{1}{R_N} - j \frac{1}{X_M}$$

Por lo tanto, los valores de la rama de excitación referidos al lado de bajo voltaje (secundario) son:

$$R_N = \frac{1}{0,00693} = 144\Omega$$

$$X_M = \frac{1}{0,02888} = 34,63\Omega$$

El factor de potencia durante la prueba de cortocircuito es:

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{CC}}{V_{CC}I_{CC}}$$

ECUACIÓN 16: El factor de potencia durante la prueba de cortocircuito

$$FP = \cos \theta = \frac{240W}{(489V)(2.5A)}$$

$$FP = 0,196 \text{ en retraso.}$$

La impedancia en serie está dado por:

$$Z_{SE} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \angle \cos^{-1} FP$$

ECUACIÓN 17: La impedancia en serie

$$Z_{SE} = \frac{489V}{2,5A} \angle 78,7^\circ$$

$$Z_{SE} = 195,6 \angle 78,7^\circ = 38,4 + j192\Omega$$

Por lo tanto la resistencia y la reactancia equivalente referido al lado de alto voltaje (primaria) es:

$$R_{eq}=38,4\Omega$$

$$X_{eq}=192\Omega$$

El circuito equivalente simplificado resultante que se refiere al lado de alto voltaje (primario) se puede determinar convirtiendo los valores de la rama de excitación al lado de alto voltaje.

$$R_{N,P} = a^2 R_{N,S} = 33,333^2 \times 144 = 159k\Omega$$

$$X_{M,P} = a^2 X_{M,S} = 33,333^2 \times 34,63 = 38,4k\Omega$$

El circuito equivalente simplificado resultante se muestra en la figura:

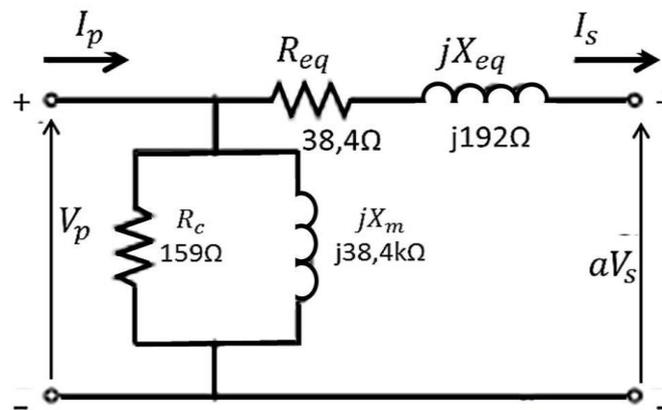


FIGURA 17: Circuito equivalente simplificado resultante, (Chapman, 2012).

Los valores del transformador del ejemplo son 20 kVA, 8 000/240 V. El circuito equivalente aproximado (figura 2-21) desarrollado en el ejemplo se refirió al lado de alto voltaje del transformador; para convertirlo a por unidad se debe encontrar la impedancia base del circuito primario. En este:

$$V_{base\ 1} = 8000V$$

$$S_{base\ 1} = 20\ 000VA$$

$$Z_{base\ 1} = \frac{V_{base}^2}{S_{base\ 1}} = \frac{8000^2}{20000VA} = 3200\Omega$$

Por lo tanto:

$$Z_{SE,pu} = \frac{38,4 + j192\Omega}{3200\Omega} = 0,012 + j0,06 pu$$

$$R_{N,pu} = \frac{159k\Omega}{3200\Omega} = 49,7 pu$$

$$Z_{M,pu} = \frac{38,4k\Omega}{3200\Omega} = 12 pu$$

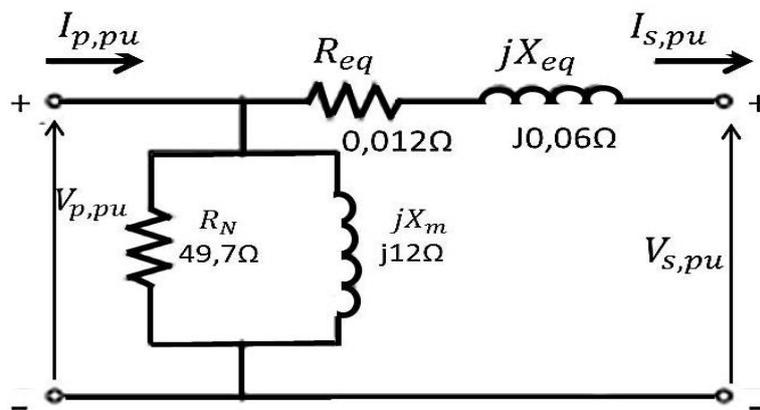


FIGURA 18: El circuito equivalente por unidad del ejemplo, (Chapman, 2012).

2.8 POLARIDADES DE LOS TRANSFORMADORES

Avelino (2001)

Un terminal H_1 del arrollamiento de alta tensión y un terminal X_1 del arrollamiento de baja tensión, se dice que tiene la misma polaridad si la corriente que entra al transformador por H_1 esta aproximadamente en fase con la corriente que sale del transformador por X_1 .

Es necesario emplear la palabra aproximadamente a causa de la existencia de la corriente de excitación I_0 que circula solo por el arrollamiento primario. El procedimiento para una prueba de polaridad consiste en conectar las dos terminales aledañas, de alta y baja tensión, intercalar un voltímetro V entre los dos terminales restantes y aplicar una tensión alterna V_1 , de valor conveniente, generalmente el nominal, al arrollamiento de alta tensión.

Si la indicación del voltímetro es $V = V_1 - V_2$, se indica que la polaridad es sustractiva. Pero si $V = V_1 + V_2$, se indica que la polaridad es aditiva, según se muestra en la figura.(p.45)

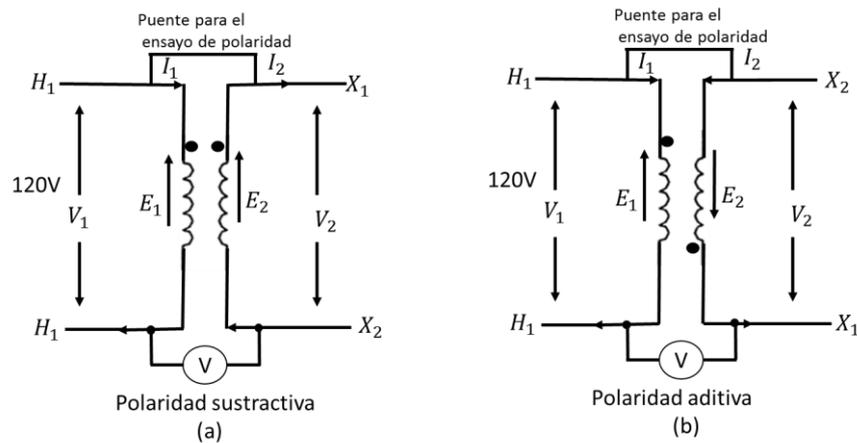


FIGURA 19: Conexión para determinar la polaridad de los transformadores a) Polaridad sustractiva b) polaridad aditiva, Avelino (2001).

La polaridad de un transformador es simplemente cuestión de disposición de los terminales, y pueden cambiarse permutando los conductores de alta o de baja tensión. Las señales para indicar la polaridad son útiles cuando se conectan transformadores en bancos trifásicos.

Como regla general, para determinar la polaridad de un transformador siga los pasos siguientes:

- I. Seleccionar cualquier arrollamiento de alta tensión y usarlo como bobina de referencia.
- II. Unir mediante una conexión un terminal de la bobina de referencia con un terminal de cualquier otro arrollamiento de polaridad desconocida.
- III. Designar al otro terminal de la bobina de referencia con un punto de polaridad (positiva).
- IV. Conectar un voltímetro (c.a.) entre el terminal marcado con un punto de la bobina de referencia y el otro terminal de la bobina de polaridad desconocida.

- V. Aplicar la tensión nominal a la bobina de referencia.
- VI. Anotar los valores de la tensión en bornes de la bobina de referencia V_1 y el de la tensión de ensayo entre bobinas V .
- VII. Si la tensión de ensayo V es superior a V_1 , la polaridad es aditiva y debe marcarse un punto en la bobina ensayada como se muestra en la figura 7.
- VIII. Si la tensión de ensayo V es menor que V_1 , la polaridad es sustractiva y debe marcarse un punto en la bobina ensayada como se muestra en la figura 7.
- IX. Etiquetar el terminal marcado con punto de la bobina de referencia con la denominación H_1 y el terminal marcado con punto de la bobina ensayada con X_1 (o cualquier designación adecuada de números impares).

2.9 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Cathey (2002) Declara:

Las compañías generadoras de energía eléctrica generan y transmiten potencias en forma trifásica. Dentro de las redes de distribución algunas cargas son trifásicas, mientras el resto son cargas monofásicas con conexiones distribuidas entre las fases para formar una carga trifásica casi balanceada.

La necesidad de transformadores trifásicos para acoplar diferentes niveles de tensión dentro de las divisiones del sistema desde la generación hasta la distribución es aparente. (p.179).

Chapman (2012) Comenta:

Los transformadores para los circuitos trifásicos se pueden fabricar de dos maneras. Una de ellas consiste simplemente en tomar tres transformadores monofásicos y conectarlos en un banco trifásico. Otra alternativa es construir transformadores trifásicos con tres grupos de devanados enrollados en un núcleo común. (p.90).

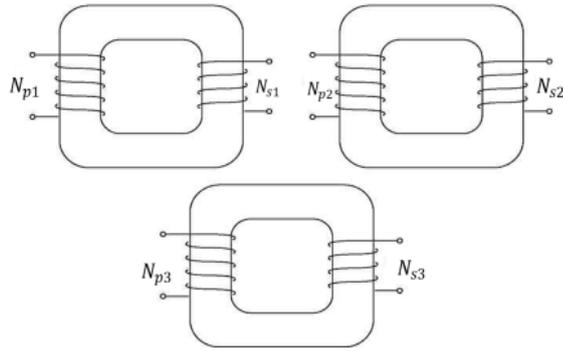


FIGURA 20: Banco de transformador compuesto por tres transformadores independientes, Chapman,(2012).

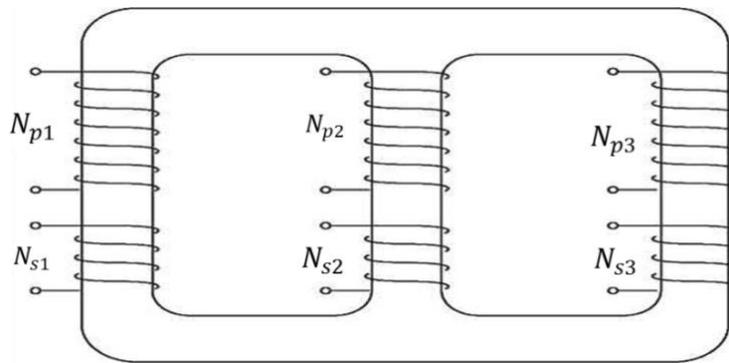


FIGURA 21: Transformador trifásico construido sobre un núcleo de tres columnas, Chapman,(2012).

La clasificación, por construcción, de los transformadores trifásicos, que tienen un núcleo en común es igual a la de los monofásicos; es decir son de columnas o tipo acorazados.

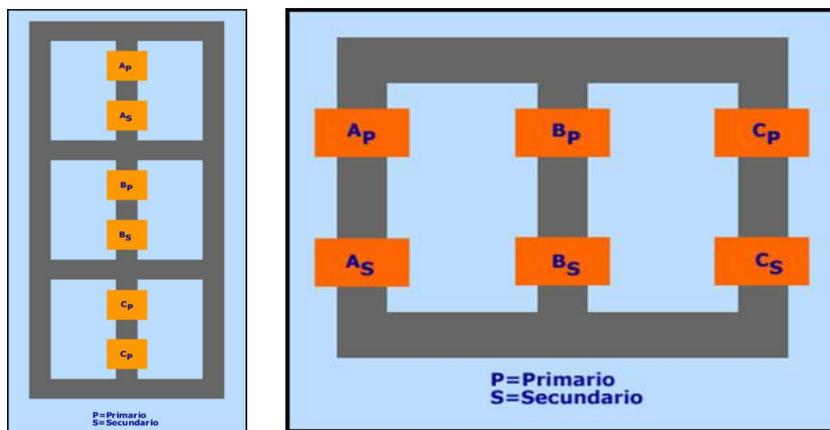


FIGURA 22: Tipos de transformadores trifásicos por el núcleo común, www.nichese.com

TABLA 4: Ventajas y desventajas del transformador de 3 fases sobre los grupos monofásicos

Ventajas y desventajas del transformador de núcleo 3φ sobre los grupos monofásicos	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Ocupan menos espacio.• Son más livianos.• Son más baratos.• 4. Hay solo una unidad que conectar y proteger.	<ul style="list-style-type: none">• Mayor peso unitario.• Cualquier falla inutiliza toda la transformación 3φ lo que obliga a tener una unidad o potencia de reserva mayor

Claramente al contar con un conjunto mayor de terminales en los transformadores trifásicos la conexión de estos se puede clasificar en varios tipos.

2.9.1 CONEXIONES DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Chapman (2012) Declara que:

Un transformador trifásico consta de tres transformadores, ya sea separados o combinados sobre un solo núcleo. Los primarios y secundarios de cualquier transformador trifásico se pueden conectar independientemente en ye (Y) o en delta (D). Esto nos da un total de cuatro conexiones posibles en el banco de un transformador trifásico: (p.91).

1. (Y-Y).
2. (Y-D).
3. (D-Y).
4. (D-D).

2.9.1.1 CONEXIÓN ESTRELLA-ESTRELLA.

Rojas (2015) Indica: “Empleada cuando se desee disponer de neutro en baja y cuando no se prevean grandes corrientes de desequilibrio (fase neutro). Útil para transformadores con potencias pequeñas o moderadas a tensiones elevadas. (p.7).

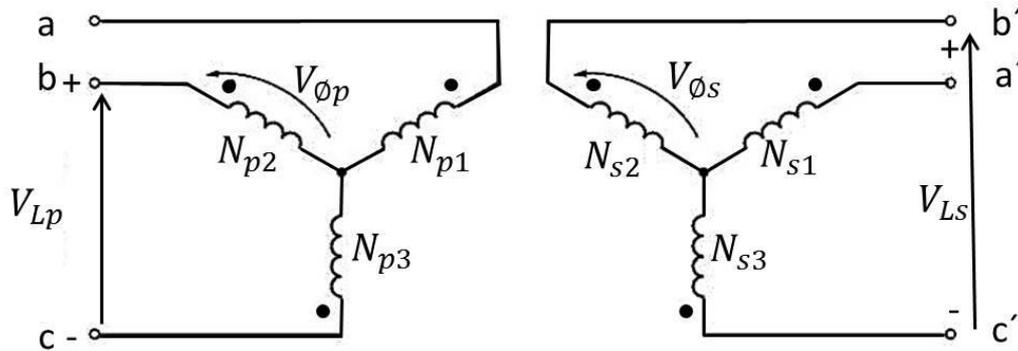


FIGURA 23: Conexión de transformadores trifásicos en estrella-estrella, Chapman (2012).

TABLA 5: Relación de transformación Y-Y

Voltaje de línea del primario	$V_{LP} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3}}$
Voltaje de línea del secundario	$V_{LS} = \sqrt{3} * V_{\phi S}$
Relación	$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3} * V_{\phi P}}{\sqrt{3} * V_{\phi S}} = a$

Dónde:

V_{LP} = voltaje de línea del primario

$V_{\phi P}$ = voltaje de fase del primario

V_{LS} = voltaje de línea del secundario

$V_{\phi S}$ = voltaje de fase del secundario

a = Relación de transformación

2.9.1.2 CONEXIÓN ESTRELLA-DELTA

Adecuado como transformador reductor (cuando no se requiere puesta a tierra en el secundario). No genera armónicas de tensión. Se recomienda mayormente para tensiones secundarias relativamente bajas que motivan corrientes elevadas. (Rojas, 2015).

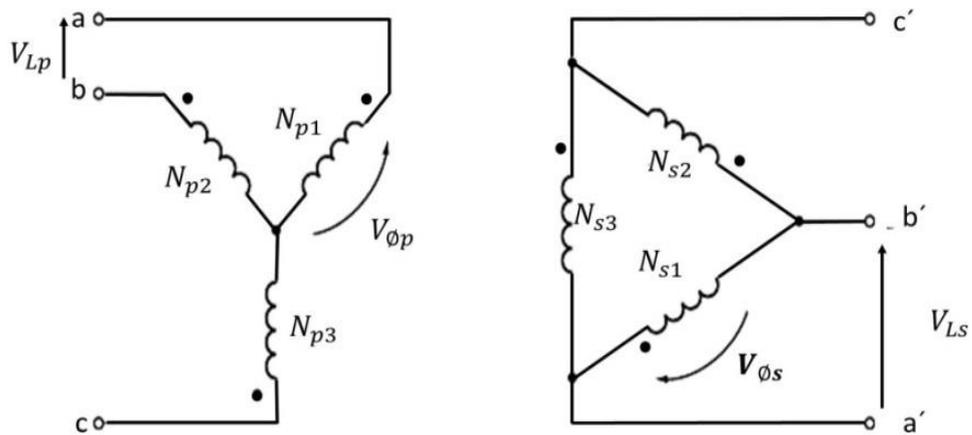


FIGURA 24: Conexión de transformadores trifásicos estrella-delta

TABLA 6: Relación de transformación Y-D

Conexión y-d	
Voltaje de línea del primario	$V_{LP} = \sqrt{3} * V_{\phi P}$
Voltaje de línea del secundario	$V_{LS} = V_{\phi S}$
Relación	$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3} * V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = \sqrt{3} * a$

Dónde:

V_{LP} = voltaje de línea del primario

$V_{\phi P}$ = voltaje de fase del primario

V_{LS} = voltaje de línea del secundario

$V_{\phi S}$ = voltaje de fase del secundario

a = Relación de transformación

2.9.1.3 CONEXIÓN DELTA-ESTRELLA

Rojas (2015) Revela que: “Empleado como transformador elevador. No es generador de terceras armónicas de tensión. No motiva flujos por el aire en caso de cargas desequilibradas (c.c.) ni traslados de neutros (sobretensiones). Admite cargas desequilibradas y posibilidad de sacar neutro en baja tensión” (p.7).

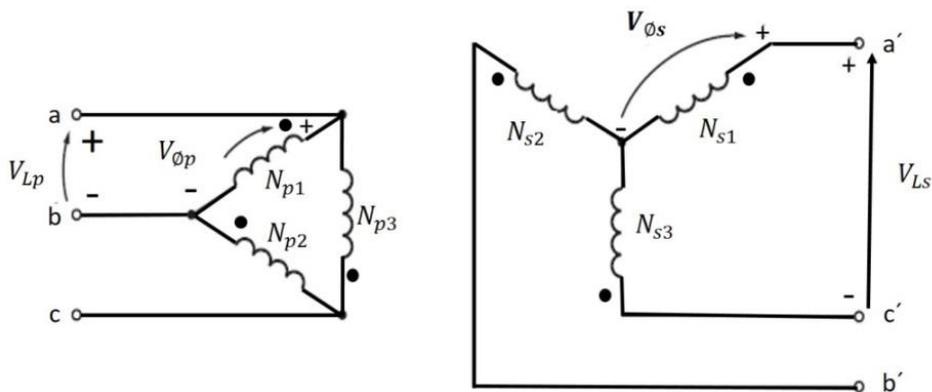


FIGURA 25: Conexión de transformadores trifásicos, Chapman (2012).

TABLA 7: Relación de transformación D-Y

Conexión D-Y	
voltaje de línea del primario	$V_{LP} = V_{\phi P}$
voltaje de línea del secundario	$V_{LS} = \sqrt{3} * V_{\phi S}$
Relación	$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3} * V_{\phi S}}$ $\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$

Dónde:

V_{LP} = voltaje de línea del primario

$V_{\phi P}$ = voltaje de fase del primario

V_{LS} = voltaje de línea del secundario

$V_{\phi S}$ = voltaje de fase del secundario

a = Relación de transformación

2.9.1.4 CONEXIÓN DELTA-DELTA

Peña y Suarez (2013) manifiestan que:

Este tipo de conexiones se utiliza mucho en autotransformadores, cuando se quiere recuperar la caída de tensión por longitud de los alimentadores, debido a cierta distancia del circuito alimentador se tiene una caída en el voltaje de suministro por lo que es necesario transformar esa energía para recuperar de alguna manera esas pérdidas para lo cual se utilizan estos transformadores con conexión delta-delta. (p.4)

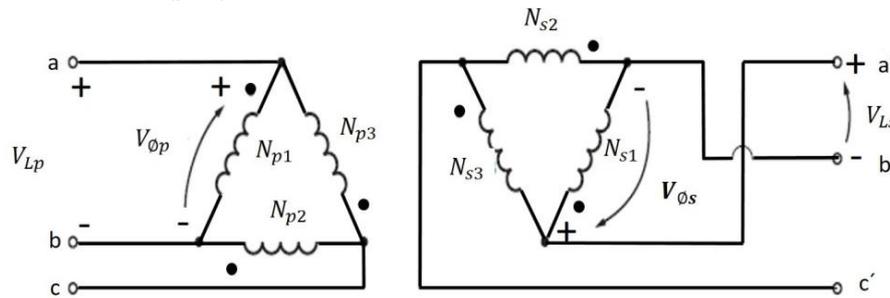


FIGURA 26: Conexión de transformadores trifásicos, Chapman (2012).

TABLA 8: Relación de transformación D-D

Conexión D-D	
voltaje de línea del primario	$V_{LP} = V_{\phi P}$
voltaje de línea del secundario	$V_{LS} = V_{\phi S}$
Relación	$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a$

Dónde:

V_{LP} = voltaje de línea del primario

$V_{\phi P}$ = voltaje de fase del primario

V_{LS} = voltaje de línea del secundario

$V_{\phi S}$ = voltaje de fase del secundario

a = Relación de transformación

2.10 GRUPO DE CONEXIONES TRIFÁSICAS

Lemozy 2015 Afirma:

A fin de satisfacer las necesidades de cada caso, en cada lado de los transformadores trifásicos se puede emplear la conexión más conveniente.

Las conexiones de los transformadores deben estar claramente indicadas en las chapas de características y se las identifica por medio de las letras.

El ángulo de desfase se mide en el sentido de las agujas del reloj y entre dos tensiones de línea homónimas (con los mismos subíndices) y desde la de mayor tensión hacia la de menor tensión. (p. 11)

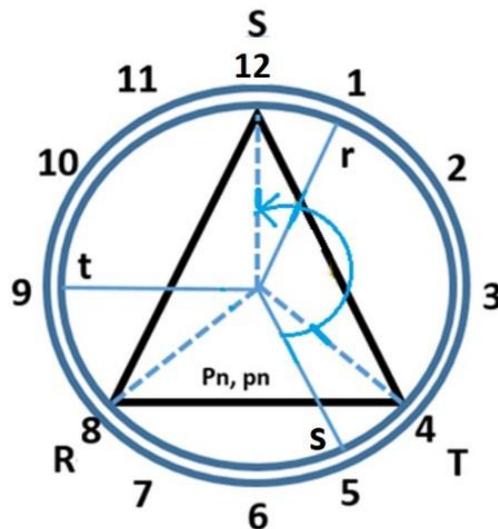


FIGURA 27: Conexión Dy_5 . "Elaboración propia"

- Ejemplo

Dy_5

D: configuración en el primario

y: Configuración en el secundario

5: El número representa el ángulo de desfase

El grupo de conexiones indica la clase de conexión de las fases de dos devanados de un transformador y también el desplazamiento angular de tensión entre el primario y el secundario por un número clave.

En los transformadores trifásicos diferenciamos las siguientes clases de conexiones:

- a) Conexión triángulo (D-d)
- b) Conexión estrella (Y-y)
- c) Conexión zig-zag (Z-z)

Usualmente el lado primario corresponde a la tensión alta o entrada y en el secundario a la tensión baja o salida.

Las letras mayúsculas se usan para el lado primario, las minúsculas se utilizan en el lado secundario.

El número clave indica el múltiplo de 30° retardo angular de los vectores secundarios con respecto a los vectores primarios. El desplazamiento angular puede figurar entre 0° y 360° .

La representación gráfica del cuadro de fasores se hace en base en una esfera horaria

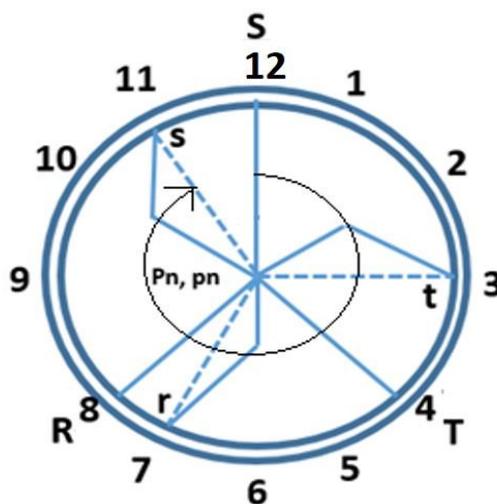


FIGURA 28: Conexión Yz₁₁. "Elaboración

Desfasamiento angular entre VPn, vpn

$$11 \cdot 30^\circ = 330^\circ$$

Lemozy 2015 Dice que:

Por ese motivo el desfase se indica por medio de un número, Por la semejanza del diagrama anterior con la agujas de un reloj, se acostumbra a expresar el ángulo de desfase por medio de un número denominado “*cifra de hora*”, que resulta de dividir el desfase por 30. Como se verá más adelante, no es posible obtener cualquier cifra de hora con cualquier combinación de conexiones. Los casos posibles son: (p.12).

TABLA 9: Cifras de horas posibles, Lemozy (2015)

Cifra de hora Par	Cifra de hora Impar
Yy	Yd
Dd	Dy
Dz	Yz

Lemozy 2015 Dice que: “El transformador queda con cifra de hora 4. O sea que desde el punto de vista de las conexiones internas, solamente hay 4 cuatro cifras de hora distintas, que son las indicadas en la figura” (p.14).

0	4	8
1	5	9
2	6	10
3	7	11

FIGURA 29: Equivalencia entre cifras de horas, Lemozy (2015)

Las conexiones que dan lugar a la misma cifra de hora se dicen pertenecer al mismo grupo de conexión

TABLA 10: Grupo de conexión, Lemozy (2015)

Grupo	Conexiones		
Hora 0	Yy ₀	Dd ₀	Dz ₀
Hora 6	Yy ₆	Dd ₆	Dz ₆
Hora 5	Yd ₅	Dy ₅	Yz ₅
Hora 11	Yd ₁₁	Dy ₁₁	Dz ₁₁

Índice de desfase	Símbolo de acoplamiento	Diagrama fasorial		Esquema de conexión	Relación de transformación
		Alta tensión	Baja tensión		
0 (0°)	Dd ₀				$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy ₀				$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz ₀				$\frac{2}{3} \frac{N_1}{N_2}$
5 (150°)	Dy ₅				$\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$
	Yd ₅				$\sqrt{3} \frac{N_1}{N_2}$
	Yz ₅				$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$

FIGURA 30: Grupo de conexiones de 0 y 5 de desfase. www.nichese.com

Índice de desfase	Símbolo de acoplamiento	Diagrama fasorial		Esquema de conexión	Relación de transformación
		Alta tensión	Baja tensión		
6 (180°)	Dd ₆				$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy ₆				$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz ₆				$\frac{2}{3} \frac{N_1}{N_2}$
11 (330°) (-30°)	Dy ₁₁				$\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$
	Yd ₁₁				$\sqrt{3} \frac{N_1}{N_2}$
	Yz ₁₁				$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$

FIGURA 31: Grupo de conexiones de 6 y 11 de desfase. www.nichese.com

Comúnmente, la letra “a” se usa para designar el operador que origina una rotación de 120° en la dirección contraria a la de las manecillas del reloj. Tal operador es un número complejo de magnitud unitaria con un ángulo de 120°, y se define por:

$$a = 1\angle 120^\circ = -0.5 + j0.866$$

Si se aplican dos veces sucesivas el operador a un fasor, el fasor rotará 240°, tres aplicaciones sucesivas, rotará el fasor 360°.

$$a^2 = 1\angle 240^\circ = -0.5 - j0.866$$

$$a^3 = 1\angle 360^\circ = 1\angle 0^\circ = 1$$

Es evidente que $1 + a + a^2 = 0$

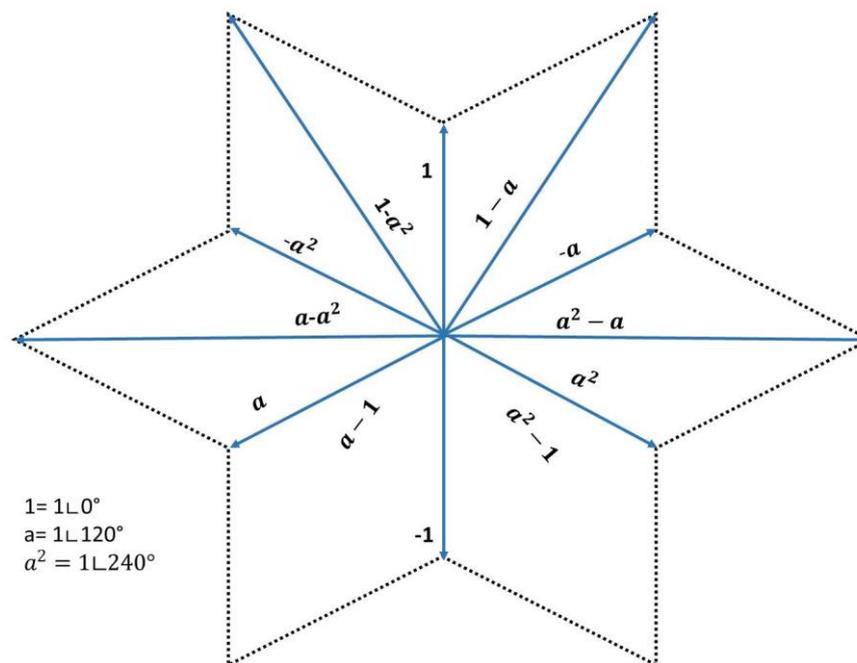


FIGURA 32: Diagrama fasorial de diversas potencias y funciones del operador *a*. “Elaboración Propia”.

2.11 CONSIDERACIONES QUE SE DEBEN TOMAR PARA LAS CONEXIONES TRIFÁSICAS

Orientación de los devanados

Para las conexiones Yy; Yd;Dd;Dy

- Para conexiones en el primario ya sea en D (delta) o Y(ye) siempre los bushig se conecta las polaridades positivas correspondientes.
- Cuando el ángulo interno entre las fases \bar{R} y \bar{r} (el menor ángulo entre las dos fases) es menor de 90° ; se cortocircuita las polaridades negativas de las bobinas secundarias y se toma las polaridades positivas para construir la **ye** del secundario y se toman las polaridades positivas en caso que el secundario esté conectado en *delta*.
- Para toda conexión Delta, ya sea en el secundario o en el primario, cuando el desfase es igual a los números 1, 2, 7, 8; el sentido de conexión de los voltajes compuestos es anti horario, para las demás debe tomarse el sentido de giro horario.

Ejemplo 1:

CONEXIÓN Dd₀

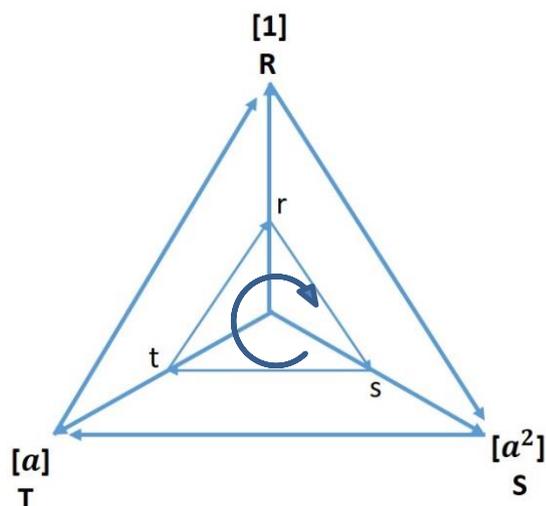


FIGURA 33: Conexión Dd₀. "Elaboración Propia".

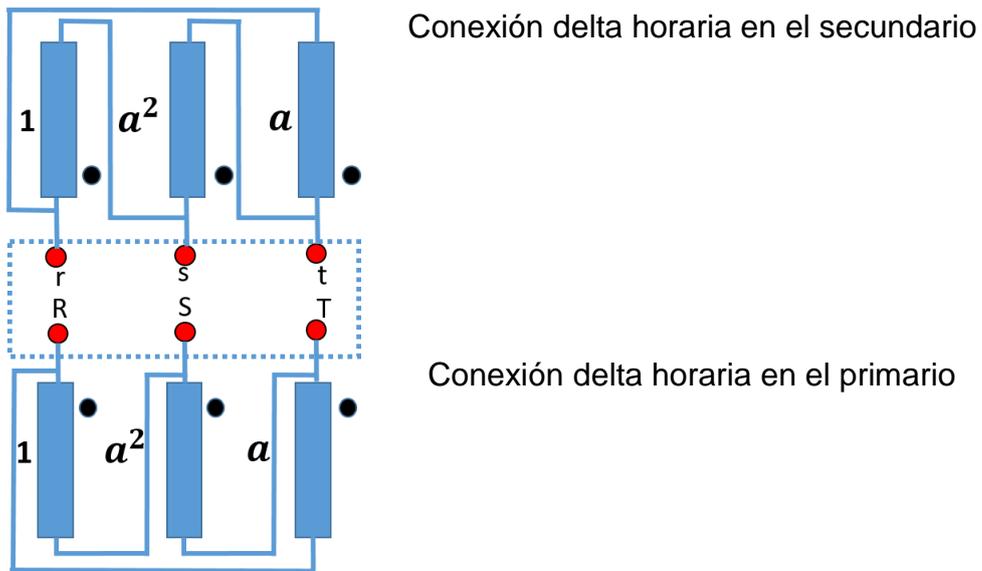


FIGURA 34: Conexión Dd₀. "Elaboración"

Ejemplo 2:

Conexión Dd₂

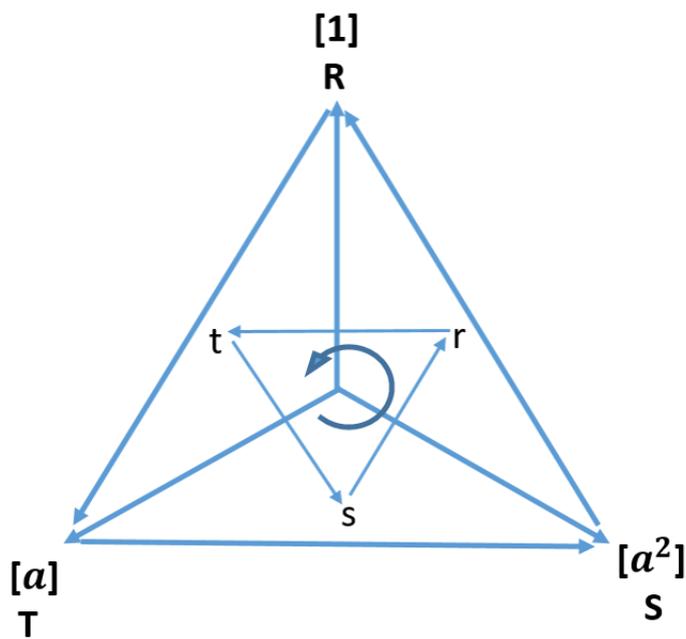


FIGURA 35: Conexión Dd₂

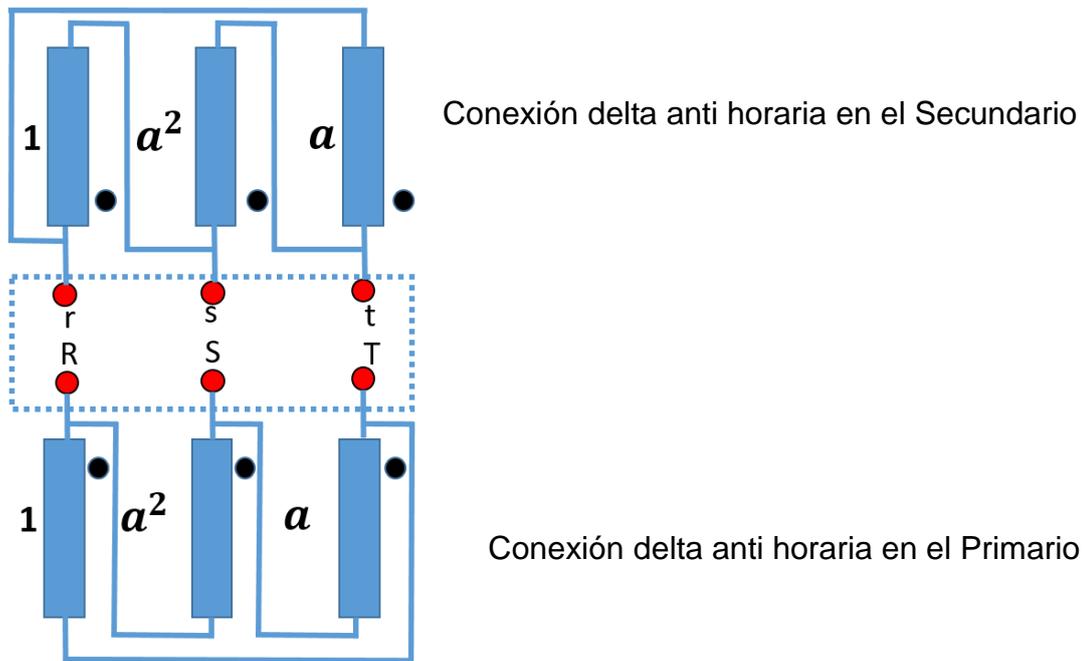


FIGURA 36: Conexión Dd₂

Si el ángulo entre \bar{R} y \bar{r} se encuentran entre $[0,90^\circ [$; se debe tomar, del triángulo que forma la suma vectorial de \bar{r} la orientación $(1 - a)$

Si el ángulo entre \bar{R} y \bar{r} se encuentran entre $[90^\circ,180^\circ [$; se debe tomar, del triángulo que forma la suma vectorial de \bar{r} la orientación $(a^2 - 1)$

Si el ángulo entre \bar{R} y \bar{r} se encuentran entre $[180^\circ,270^\circ [$; se debe tomar, del triángulo que forma la suma vectorial de \bar{r} la orientación $(a - 1)$

Si el ángulo entre \bar{R} y \bar{r} se encuentran entre $[270^\circ,360^\circ [$; se debe tomar, del triángulo que forma la suma vectorial de \bar{r} la orientación $(1 - a^2)$

Cuando el ángulo interno entre las fases \bar{R} y \bar{r} (menor ángulo entre las dos fases) es menor que 90 grados se cortocircuita las polaridades positivas de los devanados secundarios finales; y se toman los voltajes compuestos que son correspondientes al vector \bar{r} , resultante de la figura 35.

Cuando el ángulo interno entre las fases \bar{R} y \bar{r} (menor ángulo entre las dos fases) es mayor que 90 grados se cortocircuita las polaridades negativas de los devanados secundarios iniciales; y se toman los voltajes compuestos que son correspondientes al vector \bar{r} , resultante en la siguiente figura:

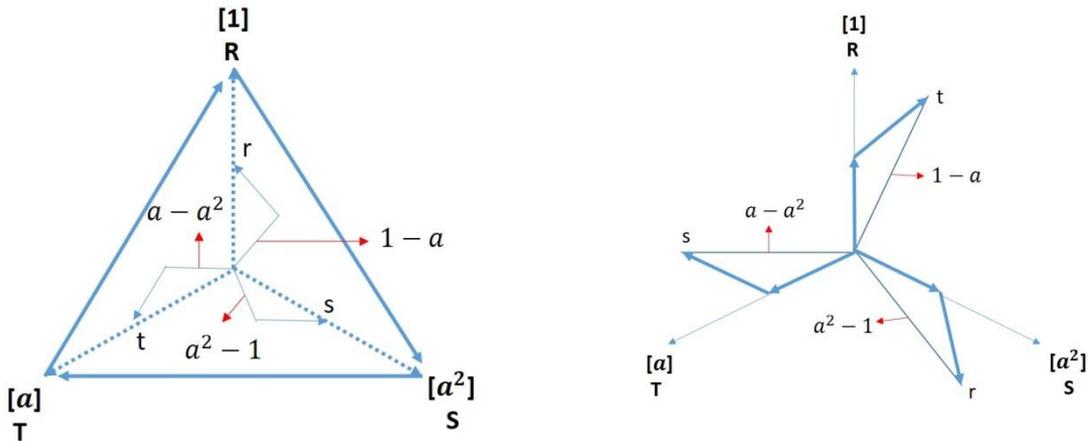


FIGURA 38: Conexión Dz₀. “Elaboración Propia”. **FIGURA 37:** Conexión Yz₅. “Elaboración Propia”.

- Ejemplos de tipos de conexión

Conexión Yy₀

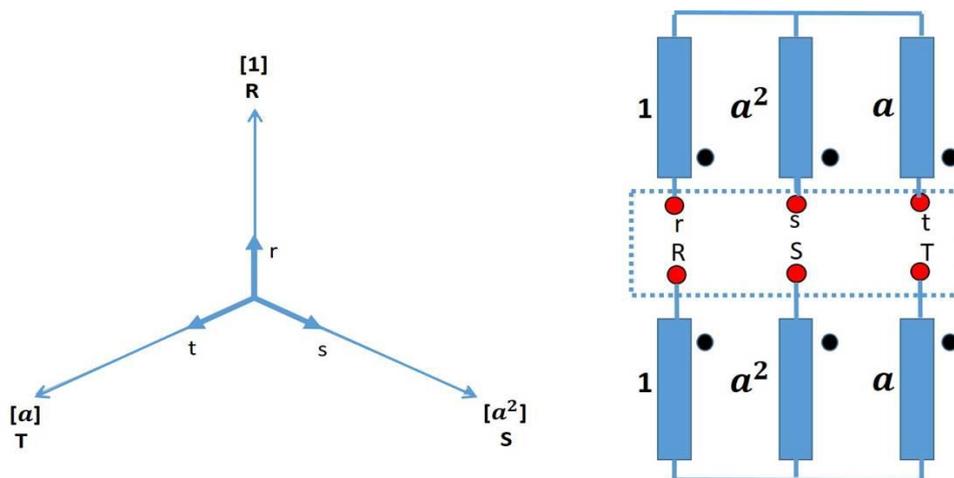


FIGURA 37: conexión Yy₀. “Elaboración Propia”.

Esta conexión no se emplea cuando se necesita un neutro, por ejemplo en los sistemas de distribución de baja tensión, o en los sistemas de alta tensión, ya que con la misma tensión de fase se obtiene una tensión de línea que es $\sqrt{3}$ veces mayor, para este tipo de conexión cortocircuitamos los negativos tanto del primario como del secundario para probar que su ángulo de desfase es 0°

Conexión Dd₆

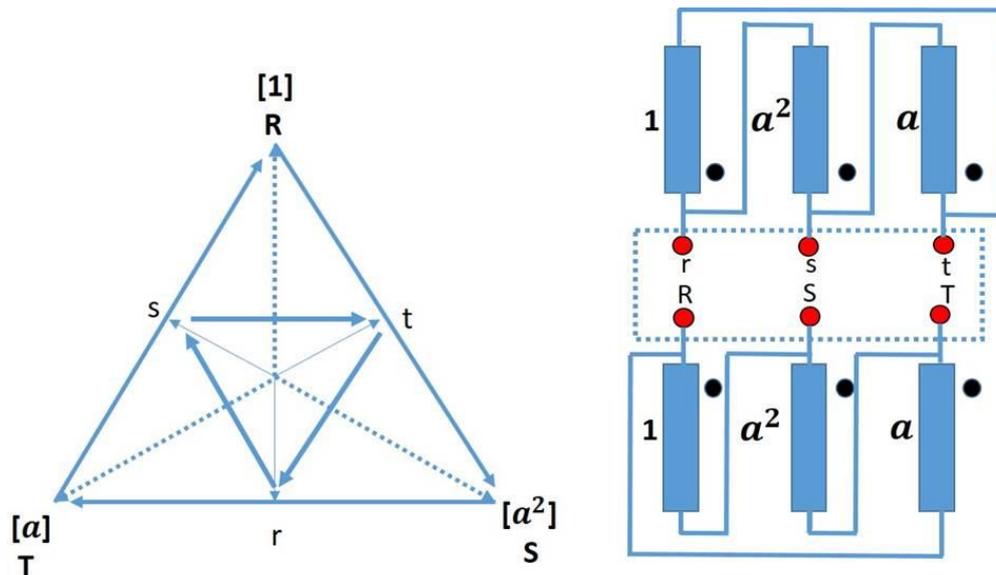


FIGURA 38: Conexión Dd₆. "Elaboración Propia".

Esta conexión se emplea cuando no se necesita neutro o una tensión de línea muy elevada. Favorece el comportamiento del transformador frente a cargas asimétricas y armónicas.

Por cuanto el ángulo de desfase entre \bar{R} y \bar{r} es mayor a 90° , para esta conexión una vez construido el delta se tomarán los voltajes negativos correspondientes, para la construcción del delta se deben tomar las orientaciones que indican los voltajes en este caso como se indica en el primario se deben hacer las conexiones de acuerdo a la siguiente orientación $(1-a)$, (a^2-1) , $(a - a^2)$ como se indica en el gráfico

Conexión Yd₅

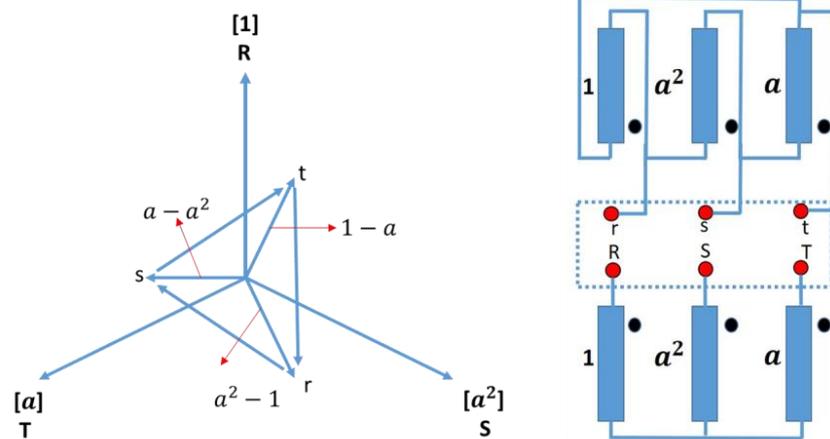


FIGURA 39: Conexión Yd₅. "Elaboración Propia".

Este tipo de conexión ya no tiene problemas de armónicos debido a que la corriente circulante se genera en el secundario, estos armónicos al estar en el triángulo secundario no se desequilibra con cargas desequilibradas, ya que en el triángulo disminuye cualquier desequilibrio parcialmente, en este tipo de conexión cortocircuitamos los negativos del lado primario y procedemos a conectar el lado secundario de forma que r negativo conecto a s positivo, s negativo a t positivo, y de t negativo regreso a r positivo.

Conexión Dy₁₁

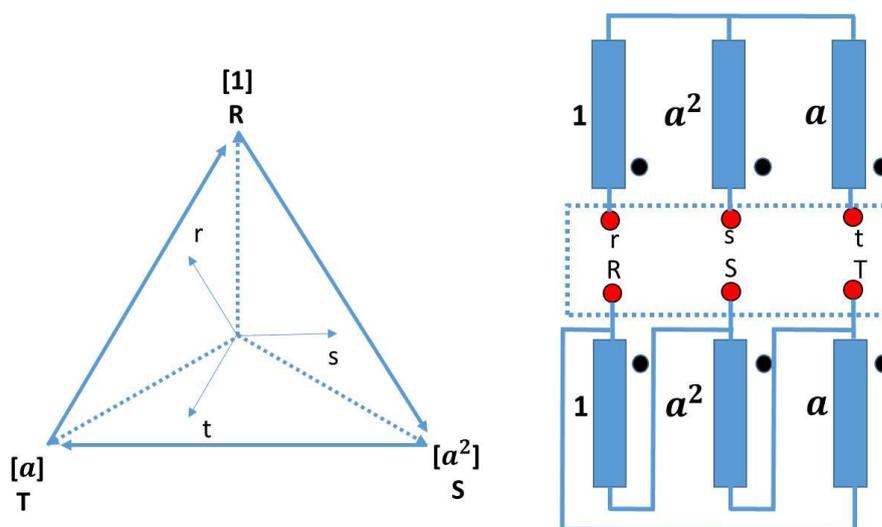


FIGURA 40: Conexión Dy₁₁. "Elaboración Propia".

Este tipo de conexión son más comunes en transformadores de distribución, esta conexión permite acoplar cargas tanto trifásicas como monofásicas, ya que al conectar cargas monofásicas se producen desequilibrios los cuales son compensados con el primario, esta conexión se utiliza como transformador elevador, en este tipo de conexión nos permite probar un ángulo de 330° o de menos -30° para lo cual se toma R negativo y conecto a S positivo, S negativo a T positivo, y de T negativo regreso a R positivo, esto es en el lado primario y para finalizar corto circuitamos los negativos del lado secundario.

Conexión Yz_{11}

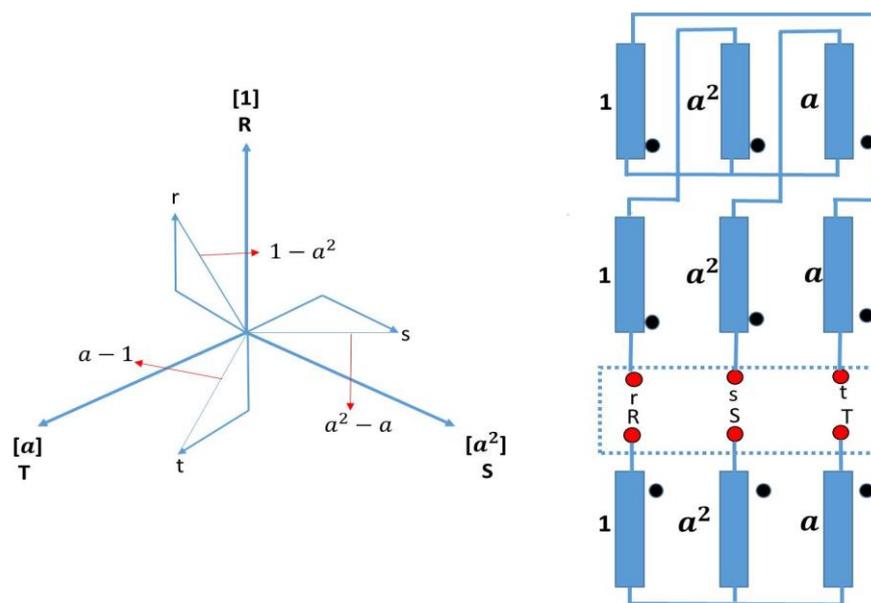


FIGURA 41: Conexión Yz_{11} . "Elaboración Propia".

Para este tipo de conexión cortocircuitamos los negativos del primario, cortocircuitamos los positivos del devanado secundario del devanado secundario final y procedemos a conectar el devanado secundario inicial r negativo a s negativo, de s negativo a t negativo a r negativo, esto en cuanto a los devanados secundarios inicial y final.

Conexión Dz6

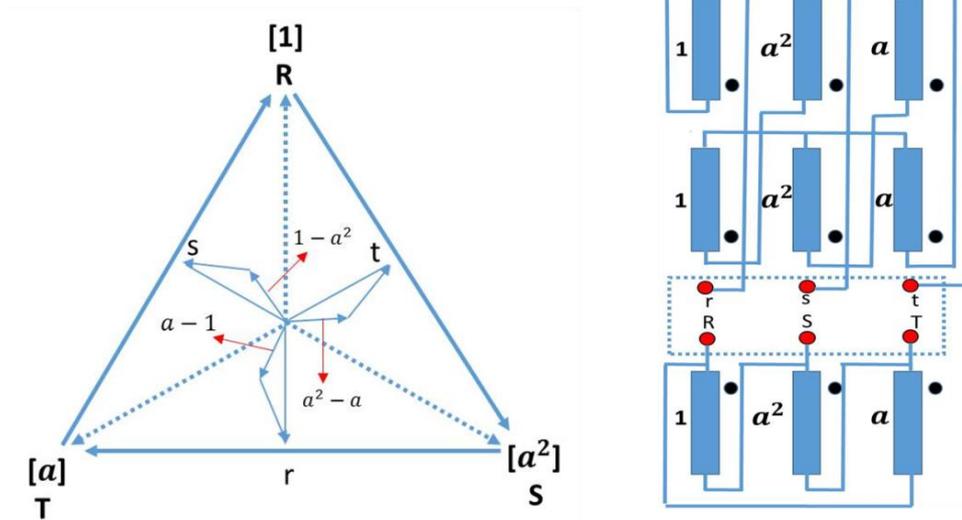


FIGURA 42: Conexión Dz6. "Elaboración Propia".

El ángulo de desfase para esta conexión es de 180° lo cual se comprueba con la siguiente conexión, se toma R negativo y conecto a S positivo, S negativo a T positivo, y de T negativo regreso a R positivo, esto es en el lado primario, cortocircuitamos los negativos del devanado secundario inicial y conectamos los devanados negativos del secundario final hacia r , s , t , del devanado secundario inicial, y finalmente unimos los devanados positivos secundarios tanto del inicial como del final.

2.12 GLOSARIO DE TÉRMINOS

Devanado. Componente de un circuito eléctrico formado por un arrollamiento de un hilo conductor aislado.

Yugos o culatas. (En transformadores) Parte metálica cuyo fin es el de ajustar al bloque constitutivo del transformador.

Permeabilidad magnética. Característica de los materiales para dejar pasar un campo magnético a través de estos.

Entrehierro. Zona donde el núcleo o camino del flujo sufre un salto o discontinuidad que se traduce en una zona con baja permeabilidad.

Dominios. Son agrupaciones de imanes permanentes elementales, pueden aparecer en materiales en los que se dé un ordenamiento magnético a medio alcance.

Dipolos. Conjunto de polos magnético o eléctricos de signos opuestos y cercanos entre sí.

Saturación magnética. Efecto que se caracteriza como el estado alcanzado cuando cualquier incremento posterior en un campo de magnetización H no provoca un aumento en la magnetización del material.

Armónicos. Son frecuencias múltiplos de una frecuencia fundamental que se presentan como perturbaciones en la forma de onda principal, su amplitud va decreciendo conforme va aumentado el múltiplo.

Dieléctrico. Cuerpo o sustancia que es mal conductor del calor y la electricidad.

Alimentadores. Fuente eléctrica que proporciona toda la energía a un sistema.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 TIPOS DE INVESTIGACIÓN

En la construcción del presente proyecto, se maneja una exploración documental o bibliográfica, la exploración tecnológica y la investigación práctica. Por tal razón, los métodos, técnicas e instrumentos que nos proporciona la metodología de la investigación científica será de vital importancia y trascendencia en el desarrollo del presente trabajo.

3.1.1. INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL O BIBLIOGRÁFICA

Este método de investigación se fundamenta en la compilación de información de múltiples principios como son: libros, revistas científicas, páginas de web, catálogos, manuales; mediante los cuales se logró ideas más claras, y concretos sobre los diferentes temas de la investigación en especial del transformador como tema principal.

3.1.2. INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA

La investigación tecnológica se aplica con la meta de conseguir equipos y materiales aceptables con el objetivo de descubrir nuevos conocimientos que posteriormente se aplicaran para crear o agrandar un proceso industrial, producto o maquinaria. Estos requerimientos son importantes como característicos del módulo didáctico.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 MÉTODO INDUCTIVO

Este método permitirá analizar científicamente una serie de hechos y acontecimientos de carácter particular en lo referente a electricidad, para llegar a generalidades que sirvan como un aporte a la investigación; permitirá básicamente, en el marco teórico,

Fundamentar la propuesta sobre la base de una serie de aspectos como la creación de un módulo didáctico que nos permita realizar los diferentes grupos de conexión.

3.2.2 MÉTODO DEDUCTIVO

Este método nos ayudará a partir de modelos, teorías y hechos generales para llegar a particularizarlos o especificarlos en los aspectos, propuestas, estrategias y elementos particulares constitutivos de esta investigación.

3.2.3 MÉTODO ANALÍTICO

Este método será de mucha importancia en esta investigación, ya que permitirá, que una serie de informaciones y datos de investigación documentales y de campo captada, sea sintetizada en forma de redacción; de igual manera la información captada (bibliográfica y de campo), será analizada para entenderla y describirla, utilizando juicios de valor y exposición personal.

3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

Existen varios tipos de técnicas e instrumentos de investigación, pero en especial para este tipo de proyecto se va a usar los criterios de expertos.

3.3.1. CRITERIOS DE EXPERTOS

La implementación del proyecto se llevó a cabo con el apoyo, consulta a expertos o especialistas que se delimitan en la obtención de características específicas para la construcción de los módulos monofásicos de transformación didácticos que permitan analizar la utilidad y aplicación de los diferentes grupos de conexión trifásica.

3.3.2 INSTRUMENTOS

Para alcanzar las técnicas anteriormente mencionadas será necesario una serie de instrumentos de investigación que permitan captar la información, siendo los que más se utilizará: cuestionarios, citas bibliográficas, registro de datos.

CAPÍTULO IV

4. PROPUESTA TECNOLÓGICA

4.1 TEMA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MÓDULOS MONOFÁSICOS DE TRANSFORMACIÓN DIDÁCTICOS QUE PERMITAN ANALIZAR LA UTILIDAD Y APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES GRUPOS DE CONEXIÓN TRIFÁSICA PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS EN LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.”

4.2 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación representa la necesidad de implementar nuevos módulos didácticos sencillos pero de gran utilidad en el laboratorio de máquinas eléctricas de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico con lo que respecta al cálculo del circuito equivalente, polaridad, regulación y conexiones de diferentes grupos de conexión trifásica.

La formación profesional continua debe permitir realizar prácticas dinámicas con los equipos sencillos y didácticos cuya aplicación industrial es eminente. La elaboración de estos módulos ofrecerá el complemento práctico al conocimiento teórico.

4.3 OBJETIVO GENERAL

Implementación de módulos de transformación monofásicos que permitan el análisis teórico práctico de parámetros eléctricos y conexión de transformadores trifásicos en base a los monofásicos para el laboratorio de máquinas eléctricas en la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico de la Universidad Técnica del Norte.

4.4 DESARROLLO DE LA PROPUESTA

En este capítulo se explica la construcción de los módulos didácticos: los materiales que se utilizaron, el diseño de los módulos, así como también la modelación del circuito equivalente, pruebas de circuito abierto, pruebas de corto circuito, regulación de voltaje y el grupo de conexiones trifásicas.

4.5 DETALLE DEL DISEÑO

• Selección del transformador

El tipo de transformador a seleccionar debe contar con características idóneas para las aplicaciones de los módulos en el laboratorio de máquinas eléctricas, estos pueden ser seleccionados de acuerdo a las funciones para las que se los requieran. Entre algunas de las características generales de los módulos están:

- Fácil manipulación
- Alimentación eléctrica conveniente
- Espacio físico compacto

De acuerdo a las características vistas se ha seleccionado el transformador monofásico marca LAYRTON 120V-12V con los siguientes parámetros.



FIGURA 43: Transformador para lámparas halógenas, www.leroymerlin.esimgr

TABLA 11: Características de placa del transformador

Voltaje en el Primario	120V
Voltaje en el Secundario	12V
Potencia Aparente	250 VA
Frecuencia	50-60 Hz
Corriente (Primario)	3.15 A

El transformador monofásico que se selecciono es de tipo acorazado en seco, que describe a sus dos bobinas enrolladas alrededor de un núcleo.

4.5.1 DISEÑO DE LOS MÓDULOS DIDÁCTICOS

Los módulos cuentan con un diseño basado en criterios técnicos de ingeniería en los cuales se toma en cuenta la protección de los diferentes dispositivos y la seguridad de las personas; sin aminorar la eficiencia.

- **Parte externa**

Es el perfil frontal de los módulos didácticos, con la que el personal podrá operar al equipo en las diferentes prácticas a realizar; por tal razón es necesaria la respectiva señalización e identificación en cada una de sus partes.

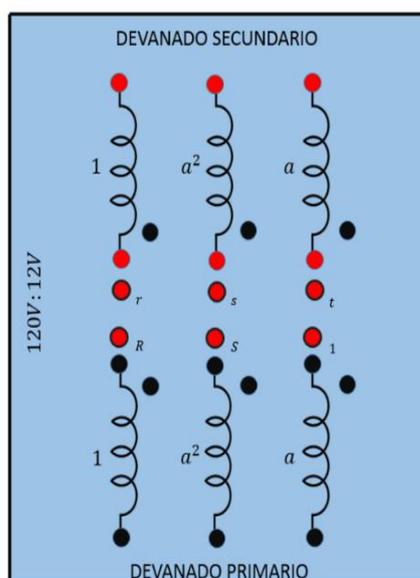


FIGURA 44: Vista frontal del módulo, "Elaboración propia"

En la parte exterior se representa la configuración de los elementos conectados interiormente:

- ✓ Devanados primarios
- ✓ Devanados secundarios
- ✓ Voltaje de entrada
- ✓ Voltaje de salida
- ✓ “Jack bananas”, para hacer diversas conexiones
- ✓ Alimentación trifásica “R, S, T”
- ✓ Su polaridad positiva



FIGURA 45: Módulos didácticos parte exterior, “Elaboración propia”

- **Parte interna**

Es la cubierta del gabinete metálico, en donde constan los diferentes elementos de trabajo, ensamblados de la forma más conveniente para ahorrar la mayor cantidad de espacio físico posible.

La facilidad en la manipulación de los módulos didácticos se debe a la correcta estructura interna tanto en los puntos de conexión como en el cableado.

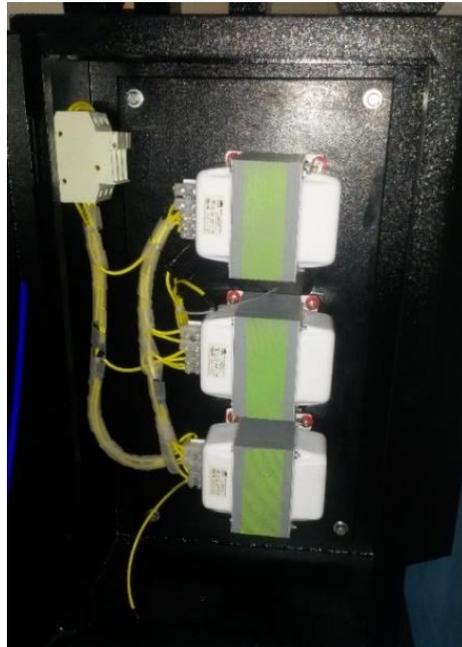


FIGURA 46 : Módulos didácticos parte interior, “Elaboración propia”

A continuación se indican cada uno de los elementos internos:

a) Transformadores

Como elemento principal, los cuales están ensamblados fijamente dentro del gabinete; están conectados con su respectiva protección y “Jack bananas” al exterior del módulo.

b) Elementos de protección

La alimentación eléctrica para los transformadores del módulo didáctico es tomada desde la línea principal que existe en el laboratorio de máquinas eléctricas, es conveniente seleccionar los fusibles de protección con el cálculo de la corriente de acuerdo a la utilidad del módulo.

Para poder colocar la protección en cada módulo, se calculó la corriente por medio de la ley de ohm.

- Donde:

$$P = V * I$$

$$I = P/V$$

$$I = 250VA/120V$$

$$I = 2.08 A$$

c) Borneras

Permiten todas las conexiones entre parte interna y externa para el uso completo de los módulos didácticos.

- **Cableado general del módulo didáctico**

A continuación se presenta el diagrama de conexión de los módulos didácticos:

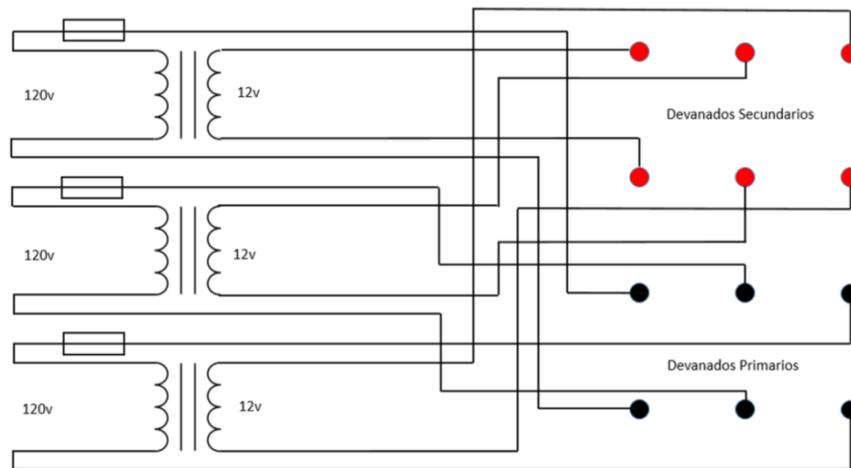


FIGURA 47: Conexión interna del módulo didáctico, “Elaboración propia”

En la anterior figura se puede apreciar la conexión para la conformación de un banco de tres transformadores monofásicos, así de esta manera el módulo didáctico puede operar con sistemas trifásicos, dejando a criterio del usuario la conexión del grupo de bobinas mediante los “Jack bananas”.

4.5.2 ELEMENTOS PARA CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO

En la siguiente tabla se muestra los diferentes materiales que se usan para la construcción del módulo, cada uno de estos elementos cumple con una función específica detallada a continuación.

TABLA 12: Elementos del módulo didáctico

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Transformador monofásicos (120V : 12V)	9
Fusibles (6A)	9
Porta fusible para riel	9
Rollo de cable (#12) THNN (metro)	100
Espiral camscó ½ durable (metros)	3
riel para sujeción de los fisibles	1
Tablero Metálico SBOX pesado con plafón pesado	3
Jack Banana rojos	35
Jack Banana negros	35
Pedestales metálicos para sujeción de los módulos	3
Diseño de gráficos externo del modulo	3
Pernos de una pulgada (sujeción de los transformadores)	12
Pernos de media pulgada (sujeción individual de los transformadores)	36
Diseño de siglas UTN	1
Ruedas para los pedestales	12
Remaches (sujeción de ruedas)	48
Terminales tipo puntera	45

Mediante los datos técnicos de placa se obtiene la información de la corriente nominal disponible en el transformador y la potencia de cada uno de ellos. De esta manera se obtiene información necesaria sobre el posible uso de una fuente de energía externa que existe en el laboratorio de máquinas eléctricas.

Los módulos didácticos poseen una entrada de 120V y una salida de 12V por transformador, mientras que la corriente nominal es de 3.15A en el primario. Esto debe ser considerado por el personal que maneje el equipo.

4.6 CONSTRUCCIÓN DEL TABLERO

El tablero consta con estandarizaciones locales a fin de que el módulo didáctico tenga una presentación estética, acorde a otros tableros existentes en el laboratorio de máquinas eléctricas.

4.6.1 CONSTRUCCIÓN DE LOS GABINETES

Con el fin de contar con módulos didácticos compactos se construyeron los gabinetes con medidas detalladas en la siguiente figura.

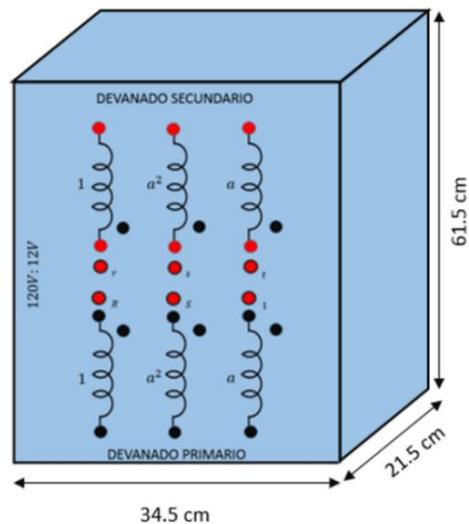


FIGURA 48: Medidas gabinete, "Elaboración Propia"

Se realizaron los siguientes pasos en el proceso de construcción.

- Diseño y colocación de las Jack bananas

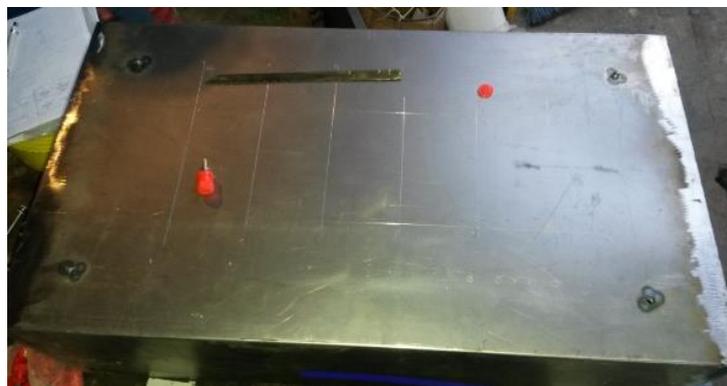


FIGURA 49: Diseño para los huecos del tablero, "Elaboración propia"



FIGURA 50: Huecos y colocación de Jack banas en el tablero, "Elaboración propia"

- Cableado

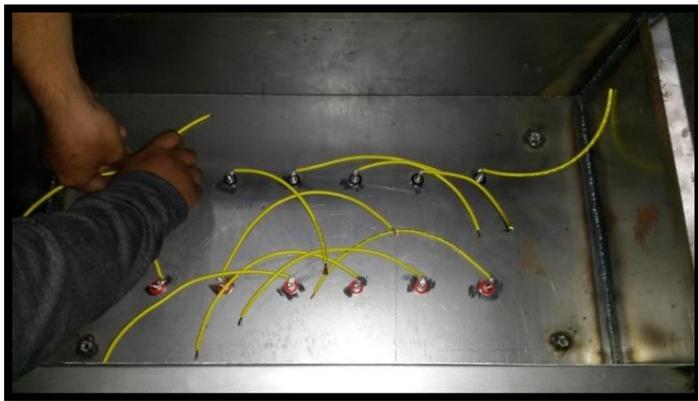


FIGURA 51: Cableado del módulo, "Elaboración propia"

- Montaje de los transformadores



FIGURA 52: Montaje de los transformadores, "Elaboración propia"

- Construcción de pedestales y ensamblaje de los módulos



FIGURA 53: Ensamblaje de los módulos didácticos, “Elaboración propia”

- Pruebas de funcionamiento



FIGURA 54: Pruebas de funcionamiento en módulos didácticos, “Elaboración propia”

En el proceso de construcción de los módulos didácticos el Jack bananas se colocaron con distancias específicas para evitar en gran medida contactos involuntarios y accidentales.

El cableado se realizó con normas técnicas, aplicando criterios de selección en el calibre del conductor a fin de que no se tenga ningún contacto a la carcasa. Por otro lado los puntos de contacto fueron soldados para tener contactos seguros al momento de energizar al equipo.

Cada pedestal fue construido para el soporte de los módulos didácticos, cuenta con ruedas para su fácil transportación y forman con los gabinetes una estructura desarmable.

Entre las pruebas de funcionamiento se tiene:

- Continuidad en el cableado del equipo.
- Verificación de puntos conexión fijos.
- Toma de medidas para fijar si los datos de placa en los transformadores son correctos.
- Chequeo de efectos como el calor, ruido, vibraciones.

Después de concluir la construcción de los módulos didácticos y realizar las pruebas de correcto funcionamiento de los equipos se realiza el proceso de adquisición de datos para obtener los circuitos equivalentes.



FIGURA 55: Módulos didácticos terminados, “Elaboración propia”

4.7 PRUEBAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Es posible determinar en el laboratorio los valores de las impedancias del circuito equivalente de un transformador aplicando dos pruebas:

Prueba de corto circuito

Prueba de circuito abierto

4.7.1 PRUEBA DE POLARIDAD

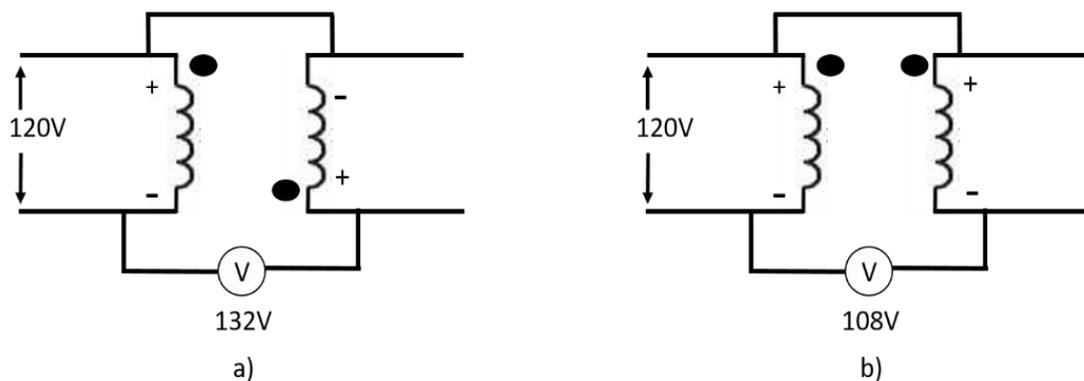


FIGURA 56: a) Polaridad Aditiva b) Polaridad Sustractiva

Antes de conectar un transformador es necesario conocer su polaridad de los devanados. Para determinar si un transformador posee polaridad aditiva o sustractiva.

En este ensayo de polaridad, consiste en conectar un puente en los dos terminales de alta y baja tensión, en el extremo del primario se aplica una tensión de 120V, si el resultado se suma su polaridad es aditiva, y si se resta es sustractiva. En esta prueba se utilizó un multímetro.

En este ensayo se adquirió los siguientes datos:

TABLA 13: Prueba de Polaridad.

Aditiva	Sustractiva
132V	108V

4.7.2 PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

En el ensayo de corto circuito en un transformador, se cortocircuita en el lado de baja tensión (devanado secundario). En el otro extremo se aplica una tensión variable inferior a la nominal, tal que haga circular por el devanado en cortocircuito la corriente nominal. La tensión que debemos aplicar en este ensayo de cortocircuito es en el orden del 2 al 15 % de la tensión nominal del transformador.

Se debe tener en cuenta que si se sobre pasa la tensión del 12% se puede ocasionar un recalentamiento en los conductores y posible accionamiento en las protecciones. Dentro de esta prueba se utilizaron los siguientes equipos:

- ✓ Voltímetro
- ✓ Amperímetro
- ✓ Watímetro
- ✓ Variac

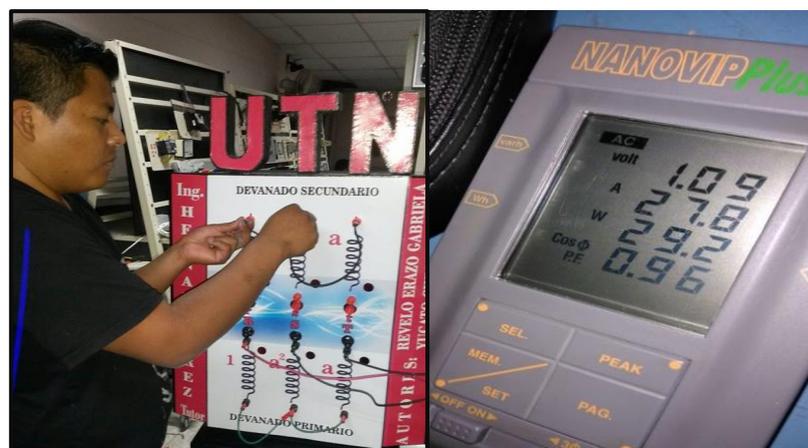


FIGURA 57: Elaboración de pruebas de cortocircuito, “Elaboración propia”.

Con el fin de obtener datos promedios se realiza la adquisición de los mismos parámetros varias veces, para después de aplicar las fórmula general de la media aritmética y de esta manera tener un valor promedio. Así se pretende reducir datos erróneos, a causa de los posibles errores.

Los valores obtenidos son voltaje, corriente del devanado primario en esta prueba se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 14: Valores obtenidos en la prueba de cortocircuito

	VI	II	PI (W)	COSΦ
1	1,09	27,8	29,2	0,96
2	1,06	27,5	28,8	0,96
3	1,10	27,9	29,3	0,96
4	1,12	28,2	30,1	0,96
5	1,09	27,8	29,1	0,96
6	1,11	28,1	30	0,97
7	1,07	27,6	28,9	0,96
8	1,09	27,8	29,1	0,96
9	1,13	28,3	30,2	0,96
10	1,08	27,9	29,1	0,96
11	1,05	27	28,4	0,97
12	1,14	28,4	30,4	0,96
\bar{X}	1,09116	27,8583	29,3833	0,961

Se realiza el cálculo de la media y de la desviación estándar con cada uno de los parámetros tomados.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

ECUACIÓN 18: Fórmula de la desviación estándar

Para Vi

$$S = \sqrt{\frac{0,051 + 0,046 + 0,308 + 0,002 + 0,003 + 0,027 + 0,00063 + 0,051 + 0,189 + 0,027 + 0,055 + 0,46}{12 - 1}} = \sqrt{\frac{0,80563}{11}}$$

= 0,082

ECUACIÓN 19: Desviación estándar para Vi prueba de CC

Para li

$$S = \sqrt{\frac{0,0009 + 0,0049 + 0,0169 + 0,0049 + 0,0009 + 0,0009 + 0,0049 + 0,0009 + 0,0169 + 0,0049 + 0,0049 + 0,004}{12 - 1}}$$

= 0,023

ECUACIÓN 20: Desviación estándar para li prueba de CC

Para Pi

$$s = \sqrt{\frac{0,7396 + 2,132 + 5,48 + 0,096 + 0,0016 + 0,0576 + 0,212 + 0,436 + 5,018 + 0,0676 + 0,5776 + 0,3136}{12 - 1}} = 0,35$$

ECUACIÓN 21: Desviación estándar para Pi prueba de CC

Con los valores medios obtenidos de Vi, li y Pi se pueden obtener los valores de la impedancia como se describió anteriormente, a continuación los cálculos.

$$|Z_{SE}| = \frac{V_{CC}}{I_{CC}}$$

$$|Z_{SE}| = \frac{1,09116V}{27,8583A} = 0,039\Omega$$

ECUACIÓN 22: Magnitud de las impedancias en serie referidas al lado primario

$$\phi = \cos^{-1} \frac{P_{CC}}{V_{CC} \times I_{CC}}$$

$$\phi = \cos^{-1} \frac{29,3833W}{1,09116V \times 27,8583I} = 0,96 = 16,26 \text{ En retraso}$$

ECUACIÓN 23: El factor de potencia durante la prueba de corto circuito

$$|Z_{SE}| = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \angle \cos^{-1} FP$$

$$|Z_{SE}| = \frac{1,09116}{27,8583} \angle \cos^{-1} 0,96$$

$$|Z_{SE}| = 0,0391 \angle 16,26^\circ \Omega$$

$$|Z_{SE}| = 0,089 + j0,026 \Omega$$

ECUACIÓN 24: Resistencia y Reactancia equivalente (En el primario)

$$|R_{Eq}| = 0,089 \Omega$$

$$|X_{Eq}| = j0,026 \Omega$$

4.7.3 PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

En el ensayo de circuito abierto del transformador, por lo general en el lado de baja tensión (devanado secundario), se deja abierto los enrollamientos; mientras que en el devanado primario se aplica una tensión variable inferior a la nominal, tal que haga circular por el devanado secundario la corriente nominal.

TABLA 15: Valores obtenido en la prueba de circuito abierto

	VI	II	PI (W)	COSΦ
1	14	2,47	13,5	0,39
2	13,8	2,22	12,1	0,38
3	13,3	2,19	12	0,41
4	13,1	2,12	12	0,40
5	13,9	2,42	12,5	0,40
6	13,8	2,33	12,3	0,40
7	14	2,47	13,2	0,36
8	13,9	2,45	13	0,37
9	14	2,46	12,7	0,37
10	13,3	2,14	11,8	0,40
11	14,2	2,57	13,5	0,37
12	14,6	2,78	13,8	0,34
\bar{X}	13,82	2,40	12,7	0,38

Dentro de esta prueba se manejaron los mismos equipos que se utilizaron en la prueba de cortocircuito.

Se obtiene el valor de magnitud de la admitancia, aplicando la ecuación 7, utilizando los datos obtenidos de corriente y voltaje en la prueba de circuito abierto.

$$|Y_E| = \frac{I_{CA}}{V_{CA}}$$

$$|Y_E| = \frac{2,40A}{13,83V} = 0,173 \Omega$$

ECUACIÓN 25: Magnitud de las impedancias en serie referidas al lado primario

El ángulo de admitancia se puede calcular mediante el factor de potencia.

$$FP = \cos\phi = \frac{P_{CA}}{V_{CA} \times I_{CA}}$$

$$\phi = \cos^{-1} \frac{12,7W}{13,83V \times 2,40A} = \cos^{-1} 0,38 = \angle 67,6^\circ$$

ECUACIÓN 26: Obtención del ángulo de la admitancia

El factor de potencia alcanzado en el cálculo es igual al valor obtenido en la tabla 8 que se obtuvo con el analizador de red. Por otra parte el ángulo calculado es negativo para la admitancia por característica general de los transformadores.

$$Y_E = \frac{I_{CA}}{V_{CA}} \angle -\cos^{-1} FP$$

$$Y_E = \frac{2,40}{13,83} \angle -\cos^{-1} 0,38$$

$$Y_E = |0,173| \angle -67,66^\circ$$

$$Y_E = 0,065 - j0,16 \Omega$$

ECUACIÓN 27: Admitancia en función de sus componentes rectangulares

Transformando la admitancia en función de sus componentes rectangulares se encuentran los valores de conductancia y susceptancia del resistor y del inductor, calculando sus inversos se obtienen los valores de R_N y X_M .

$$R_N = \frac{1}{0,065} = 15,38 \Omega$$

ECUACIÓN 28: cálculo de R_N

$$X_M = \frac{1}{0,16} = 6,25 \Omega$$

ECUACIÓN 29: cálculo de X_M

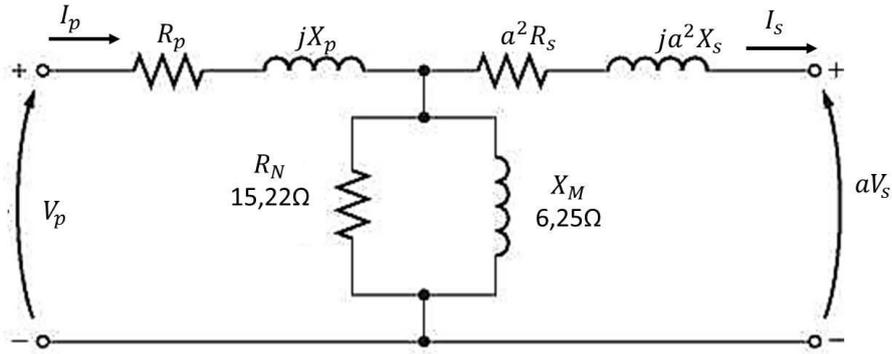


FIGURA 58: Circuito equivalente, "Elaboración propia"

Convirtiendo los valores de la derivación de excitación al lado primario:

$$R_{N,P} = a^2 R_{N,S} = (10)^2 \times 15,22 = 1522 \Omega$$

ECUACIÓN 30: Cálculo de R_N reflejado al primario

$$X_{M,P} = a^2 X_{M,S} = (10)^2 \times 6,25 = 625 \Omega$$

ECUACIÓN 31: cálculo de X_M reflejado al primario

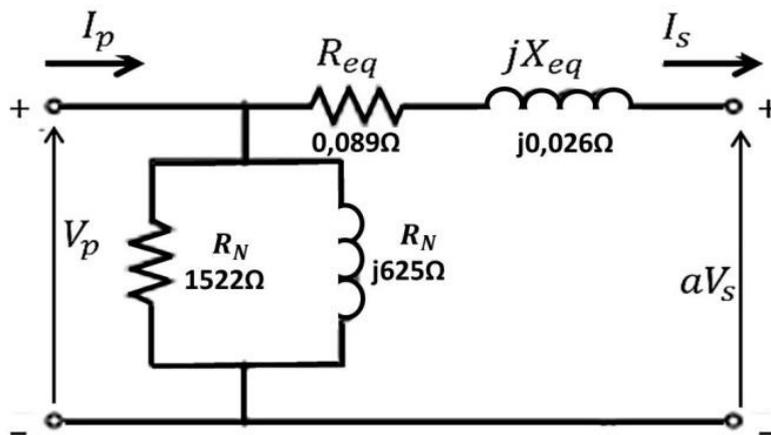


FIGURA 59: Circuito equivalente simplificado "Elaboración propia"

Para obtener el circuito equivalente por unidad se toman como valores base los datos de placa de potencia y voltaje, $S_{base} = 250VA$ y, $V_{base} = 120V$ respectivamente.

Se realiza el cálculo de la impedancia base:

$$Z_{base} = \frac{(V_{base})^2}{S_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(120)^2}{250} = 57,6 \Omega$$

ECUACIÓN 32: Cálculo de la impedancia base

Ahora se obtienen los valores por unidad de la rama de excitación e impedancia equivalente

$$Z_{SE,pu} = \frac{0,089 + j0,026}{57,6}$$

$$Z_{SE,pu} = 1,54 \times 10^{-3} + j4,51 \times 10^{-4}$$

ECUACIÓN 33: Calculo de impedancia equivalente en por unidad

$$R_N = \frac{1522}{57,6} = 26,46 pu$$

$$Z_M = \frac{625}{57,6} = 10,85 pu$$

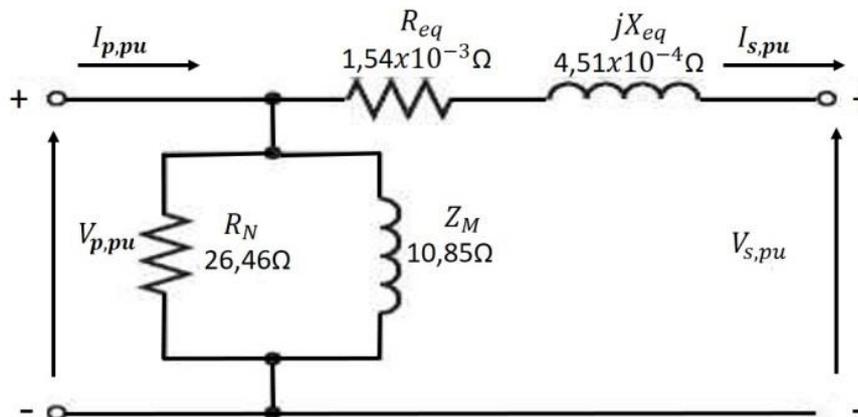


FIGURA 60: Circuito equivalente por unidad. "Elaboración propia".

4.8 CONEXIONES TRIFÁSICAS

Los módulos de transformación trifásica tienen valores en sus parámetros que dependen del tipo de conexión que en estos estén realizados, se ejecutaron la toma de medida con el fin de analizar cada configuración y obtener un conocimiento práctico del comportamiento de los transformadores en general, existen las siguientes conexiones en la siguiente tabla:

TABLA 16: Combinaciones de conexiones posibles

Conexiones	Combinaciones
Estrella	2
Triangulo	2

4.8.1 PRUEBA CONEXIÓN Y-Y

➤ **Ventajas**

- ✓ La posibilidad de sacar el neutro como medida de seguridad en cierto tipo de instalación.
- ✓ Su buen funcionamiento para pequeñas potencias, es más económico, por aplicar una tensión en cada fase $V_L/\sqrt{3}$.
- ✓ Si una fase en cualquier bobina funciona defectuosa, las dos fases restantes pueden funcionar resultando una transformación monofásica.

➤ **Desventajas**

- ✓ Si las cargas en el circuito del transformador no están desequilibradas entonces los voltajes en las fases del transformador pueden llegar a desequilibrarse severamente.
- ✓ Los neutros negativos son muy inestables, a menos que sean conectados a una toma a tierra.

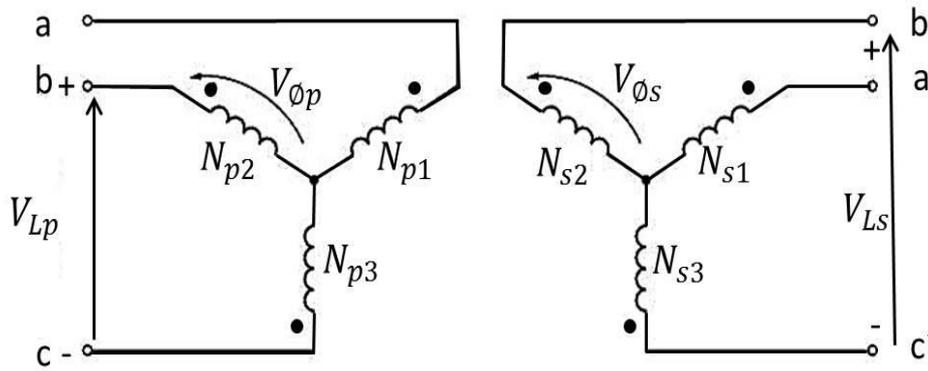


FIGURA 61: Conexión Y-Y

Dentro de esta prueba se tomaron los siguientes datos:

TABLA 17: Voltajes en el primario obtenidos en la prueba Y-Y

Voltajes en el primario					
Voltaje de línea [V]			Voltaje de fase [V]		
RS	RT	ST	RN	SN	TN
221,5 V	218,6 V	221,8 V	126,3 V	128 V	126,9 V

TABLA 18: Voltajes en el secundario obtenidos en la prueba Y-Y

Voltajes en el secundario					
Voltaje de línea [V]			Voltaje de fase [V]		
r-s	r-t	s-t	r-n	s-n	t-n
23,25 V	22,95 V	23,34 V	14,5 V	14,7 V	14,56 V

Estos valores se obtuvieron utilizando el multímetro y recopilando cada dato obtenido en las tablas 16-17 respectivamente.

Para obtener datos más reales se utilizó el analizador FLUKE 435 y se obtuvo los siguientes valores:

TABLA 19: Datos obtenidos con el analizador FLUKE 435.

	A	B	C	N
Vrms	127,8	124,15	129,7	0,09
	AB	BC	CA	
Vrms	217,32	221,82	221,35	
Hz	59,99			

TABLA 20: cálculos y comprobaciones (conexión Y-Y)

Conexión Y-Y	
voltaje de línea del primario	$V_{LP} = \frac{V_{\emptyset P}}{\sqrt{3}}$
voltaje de línea del secundario	$V_{LS} = \sqrt{3} * V_{\emptyset S}$
Relación	$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3} * V_{\emptyset P}}{\sqrt{3} * V_{\emptyset S}} = a$

Dónde:

V_{LP} = voltaje de línea del primario

$V_{\emptyset P}$ = voltaje de fase del primario

V_{LS} = voltaje de línea del secundario

$V_{\emptyset S}$ = voltaje de fase del secundario

a = Relación de transformación

4.8.2 PRUEBA CONEXIÓN Y- DELTA

➤ Ventajas

- ✓ Esta conexión no presenta problemas con sus voltajes, puesto que se consume una corriente circulando en el lado de la conexión delta.
- ✓ El neutro del primario se puede conectar con la tierra por mayor seguridad.
- ✓ En esta conexión es estable con respecto a cargas desequilibradas, debido a que la delta distribuye cualquier desequilibrio que se presente.

➤ Desventajas

- ✓ Esta conexión tiene como desventaja que el voltaje secundario se desplaza en retraso 30° con respecto al voltaje del primario.
- ✓ No se puede disponer de un neutro en el secundario para conectar con la tierra.
- ✓ Un defecto en una fase hace que no pueda funcionar la unidad trifásica, hace que se retarse.

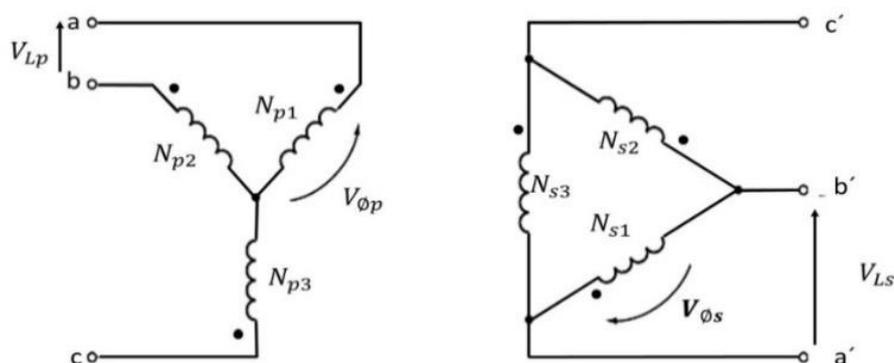


FIGURA 62: Conexión Y- delta

En esta prueba se adquirieron los siguientes datos:

TABLA 21: Voltajes en el primario obtenidos en la prueba Y-delta

Voltajes en el primario					
Voltaje de línea [V]			Voltaje de fase [V]		
RS	RT	ST	RN	SN	TN
217,3 V	221,2 V	220,4 V	127,1 V	126,2 V	128,2 V

TABLA 22: Voltajes en el secundario obtenidos en la prueba Y-delta

Voltajes en el Secundario					
Voltaje de línea [V]			Voltaje de fase [V]		
r-s	r-t	s-t	r-n	s-n	t-n
11,63 V	11,21 V	11,61 V	11,78 V	11,07 V	11,69 V

TABLA 23: Datos obtenidos con el analizador FLUKE 435.

	A	B	C	N
Vrms	124,08	125,40	129,35	0,08
	AB	BC	CA	
Vrms	215,54	220,88	220,56	
Hz	60,009			

TABLA 24: Cálculos y comprobaciones (conexión Y-D)

Conexión Y-D	
voltaje de línea del primario	$V_{LP} = \sqrt{3} * V_{\emptyset P}$
voltaje de línea del secundario	$V_{LS} = V_{\emptyset S}$
Relación	$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3} * V_{\emptyset P}}{V_{\emptyset S}} = \sqrt{3} * a$

Dónde:

V_{LP} = voltaje de línea del primario

$V_{\phi P}$ = voltaje de fase del primario

V_{LS} = voltaje de línea del secundario

$V_{\phi S}$ = voltaje de fase del secundario

a = Relación de transformación

4.8.3 PRUEBA DE CONEXIÓN DELTA-DELTA

➤ Ventaja

➤ Advertencia en el delta se deben conectar en serie dos bobinados, sino no se dispone de un variac. Por qué este equipo es indispensable para controlar el voltaje y la corriente.

✓ No tiene problemas con cargas desequilibradas

➤ Desventajas

✓ Cuando las cargas están desequilibradas los voltajes en las fases del transformador pueden desequilibrarse bastante.

✓ No dispone de salida de neutro tanto como en el primario como en el secundario.

✓ Cuando opera con altas tenciones de línea sus corrientes son mayores y puede ocasionar daños severos en la bobinas.

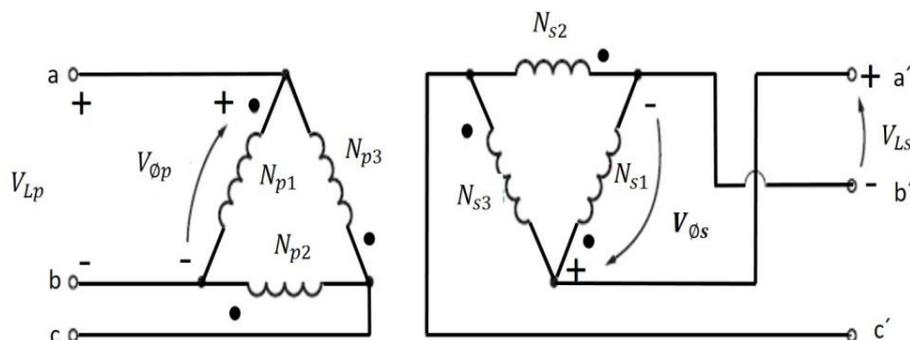


FIGURA 63: Conexión Delta- Delta

Para esta prueba se ocupó dos módulos de transformación teniendo un total de seis transformadores monofásicos los cuales van hacer conectados de dos en dos en serie tanto en el devanado primario como en el secundario conformando un banco de transformación más grande. Esto es necesario ya que el voltaje inyectado a cada bobina primaria va hacer igual a 220V, comparando con el transformador monofásico a 120V este sufriría daños.

TABLA 25: Voltajes en el primario obtenidos en la prueba delta-delta

Voltajes en el primario					
Voltaje de línea [V]			Voltaje de fase [V]		
RS	RT	ST	RN	SN	TN
220,8V	224.3V	224.1V	128.4V	128.1V	129.6V

TABLA 26: Voltajes en el secundario obtenidos en la prueba delta-delta

Voltajes en el secundario					
Voltaje de línea [V]			Voltaje de fase [V]		
r-s	r-t	s-t	r-n	s-n	t-n
19,86 V	19,8 V	19,82 V	11,64 V	9,2 V	11,5 V

TABLA 27: Datos obtenidos con el analizador FLUKE 435.

	A	B	C	N
Vrms	125,55	126,61	132,35	0,09
	AB	BC	CA	
Vrms	219,38	223,66	223,13	
Hz	60,04			

TABLA 28: Cálculos y comprobaciones (conexión D-D)

Conexión D-D	
voltaje de línea del primario	$V_{LP}=V_{\emptyset P}$
voltaje de línea del secundario	$V_{LS}=V_{\emptyset S}$
Relación	$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\emptyset P}}{V_{\emptyset S}} = a$

Dónde:

V_{LP} = voltaje de línea del primario

$V_{\emptyset P}$ = voltaje de fase del primario

V_{LS} = voltaje de línea del secundario

$V_{\emptyset S}$ = voltaje de fase del secundario

a = Relación de transformación

4.8.4 PRUEBA DE CONEXIÓN DELTA-Y

➤ **Ventajas**

- ✓ Es muy útil para elevar el voltaje a un valor muy alto.
- ✓ Utilizando esta conexión en el lado de alta, se puede poner a tierra el neutro.
- ✓ La ventaja de esta conexión presenta y los escasos inconvenientes motivan la utilización del transformador tanto en transmisión como en distribución de energía.

➤ **Desventajas**

- ✓ La falla de una fase deja fuera la operación del transformador.
- ✓ El devanado en delta puede ser mecánicamente débil.
- ✓ No se dispone de neutro en el primario para conectar con la tierra.

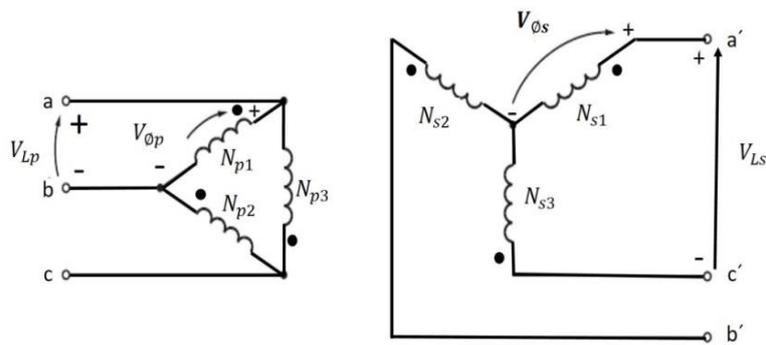


FIGURA 64: Conexión delta-Y

Para esta prueba se conserva la configuración de bobinados en serie por que la inyección de voltaje sigue siendo superior al dato de placa en los transformadores monofásicos

TABLA 29: Voltaje del primario obtenidos en la prueba delta - Y

Voltajes en el primario					
Voltaje de línea [V]			Voltaje de fase [V]		
RS	RT	ST	RN	SN	TN
219,3 V	215,9 V	219,4 V	128,1V	127,6V	129,2V

TABLA 30: Voltajes en el secundario obtenidos en la prueba delta - Y

Voltajes en el secundario					
Voltaje de línea [V]			Voltaje de fase [V]		
r-s	r-t	s-t	r-n	s-n	t-n
19,9 V	19,75 V	19,7 V	5,8 V	3,8 V	4,2 V

TABLA 31: Datos obtenidos con el analizador FLUKE 435.

	A	B	C	N
Vrms	125,76	126,87	132,24	0,09
	AB	BC	CA	
Vrms	220,2	224,20	223,75	
Hz	59,94			

TABLA 32: Cálculos y comprobaciones (conexión D-Y)

Conexión D-Y	
voltaje de línea del primario	$V_{LP}=V_{\emptyset P}$
voltaje de línea del secundario	$V_{LS}=\sqrt{3} * V_{\emptyset S}$
Relación	$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\emptyset P}}{\sqrt{3} * V_{\emptyset S}}$ $\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$

Dónde:

V_{LP} = voltaje de línea del primario

$V_{\emptyset P}$ = voltaje de fase del primario

V_{LS} = voltaje de línea del secundario

$V_{\emptyset S}$ = voltaje de fase del secundario

a = Relación de transformación

4.9 DESIGNACIÓN DE LAS CONEXIONES

De acuerdo a las anteriores conexiones existen otras combinaciones de conexiones trifásicas, y las diferentes conexiones se designan con las letras, de acuerdo a la siguiente nomenclatura.

TABLA 33: Designación de conexiones

	En el lado de A.T	En el lado de B.T.
Estrella	Y	Y
Triangulo	D	D

Para realizar estas conexiones se utilizara como factor principal la rosa de los vientos como se indica en la figura siguiente:

4.10 CONEXIONES EN DESFASE EN 0

4.10.1 CONEXIÓN Dd₀

Esta conexión se utiliza mucho en transformadores de baja tensión tanto en el primario como en el secundario están en triángulo la relación de transformación será directamente la relación entre el número de espiras.

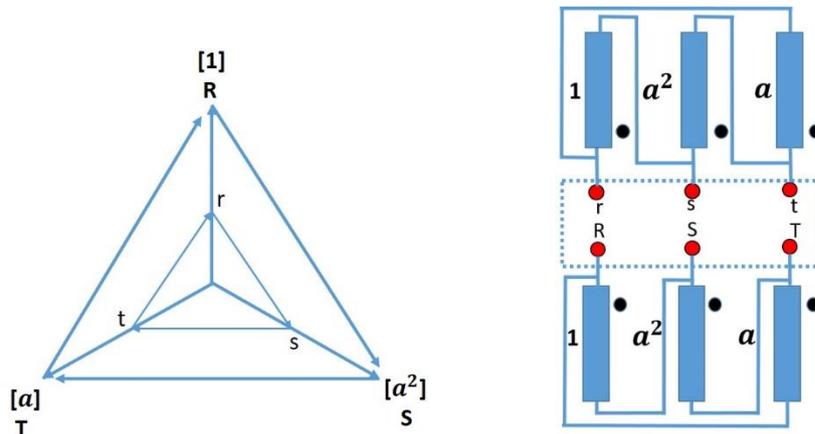


FIGURA 65: Conexión Dd₀

La ventaja de esta conexión Dd₀ es que en caso de averías, uno de los transformadores puede ser remplazado sin que esto impida la continuidad en el funcionamiento del sistema trifásico.

Con esta conexión se pudo adquirir los siguientes datos:

TABLA 34: Conexión Dd₀ (Primario)

Conexión Dd ₀ (Primario)	
VA	126,28 V
VB	128,51 V
VC	126,14 V
VAB	217,18 V
VBC	221,32 V
VCA	220,81 V

TABLA 35: Conexión Dd₀ (Secundario)

Conexión Dd ₀	
VA	0,20 V
VB	0,48 V
VC	0.49 V
VAB	0,91 V
VBC	0,94 V
VCA	0,83 V

En la figura 68, se puede observar el grado de desfase entre las líneas del primario (línea amarilla) como del secundario (línea roja), el resultado de desfase es de 0°. Tanto el voltaje de fase de línea del primario como la del secundario no se desplazan quedan en cero grados y su onda es sinusoidal.

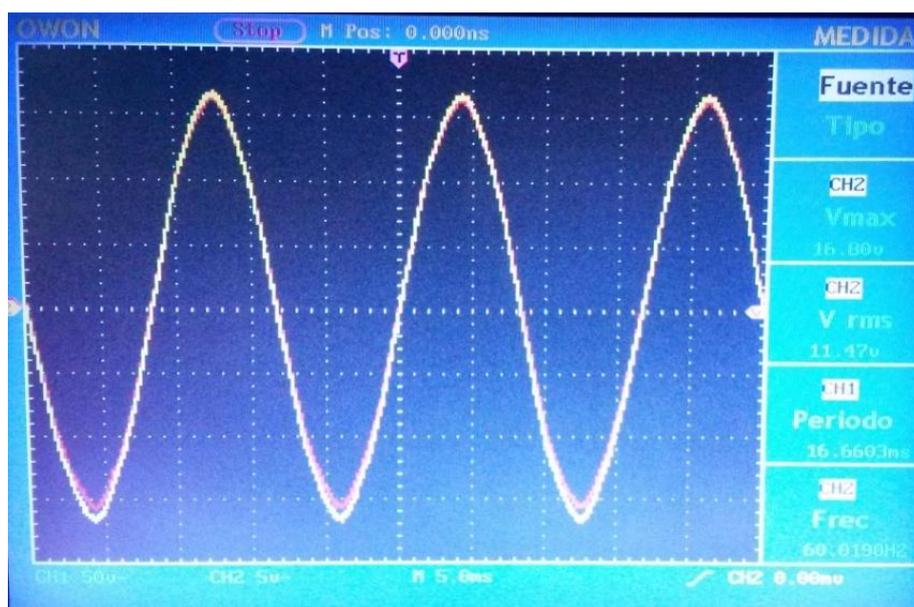


FIGURA 66: Conexión Dd₀.

4.10.2 CONEXIÓN Yy_0

En la conexión Yy_0 , la corriente de línea es la misma que la que circula por cada devanado del transformador. La ventaja en esta conexión permite disponer de neutro tanto en el devanado de alta tensión como el de baja tensión, como el primario y el secundario están en estrella, la relación de transformación será directamente la relación entre el número de espiras, $\frac{N1}{N2}$.

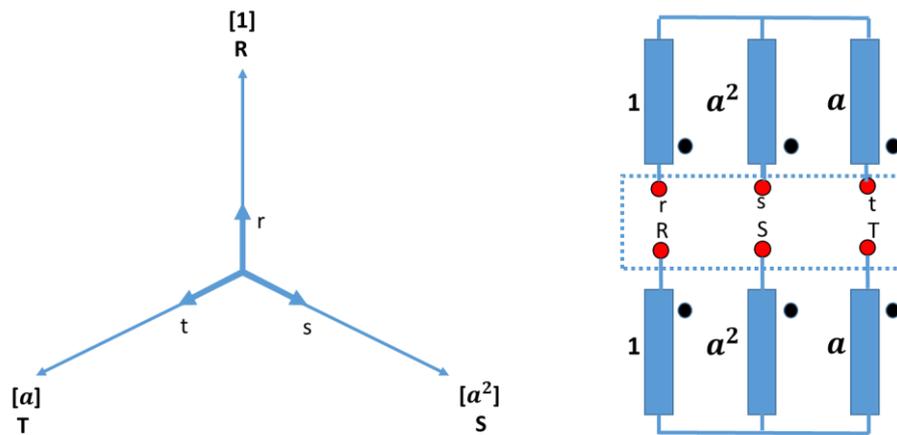


FIGURA 67: Conexión Yy_0

De acuerdo a esta medición se obtuvieron los siguientes datos:

TABLA 36: Conexión Yy_0 (Primario)

Conexiones Yy_0	
VA	125,78 V
VB	127,62 V
VC	125,70 V
VAB	216,55 V
VBC	220,58 V
VCA	220,23 V

Conexión Yy_0 (Secundario)

Conexiones Yy_0	
VA	13,19 V
VB	13,17 V
VC	13,45 V
VAB	22,71 V
VBC	23,15 V
VCA	23,12 V

En la figura 70, se puede observar el grado de desfase entre las líneas del primario como del secundario, el resultado de desfase es de 0° . Tanto el voltaje de fase de línea del primario como la del secundario no se desplazan quedan en cero grados y su onda es sinusoidal.

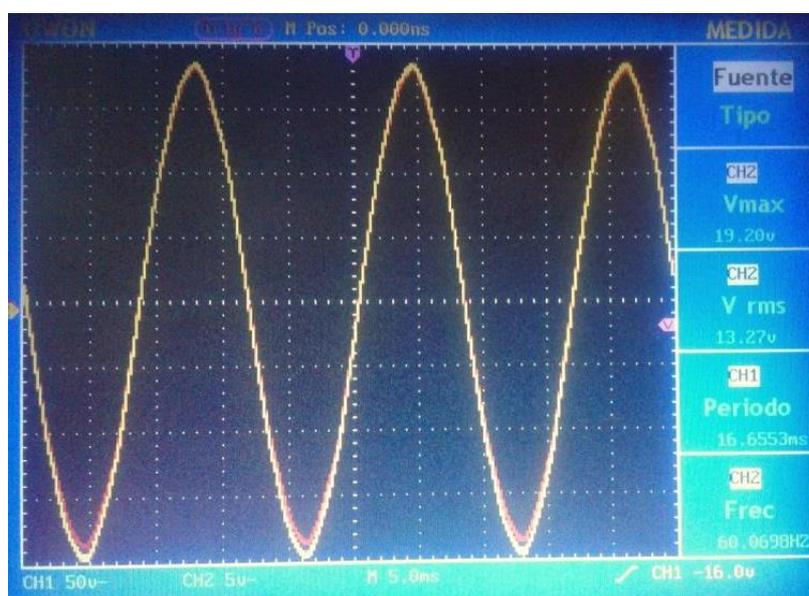


FIGURA 70: Conexión Yy_0

4.10.3 CONEXIÓN D_{Z0}

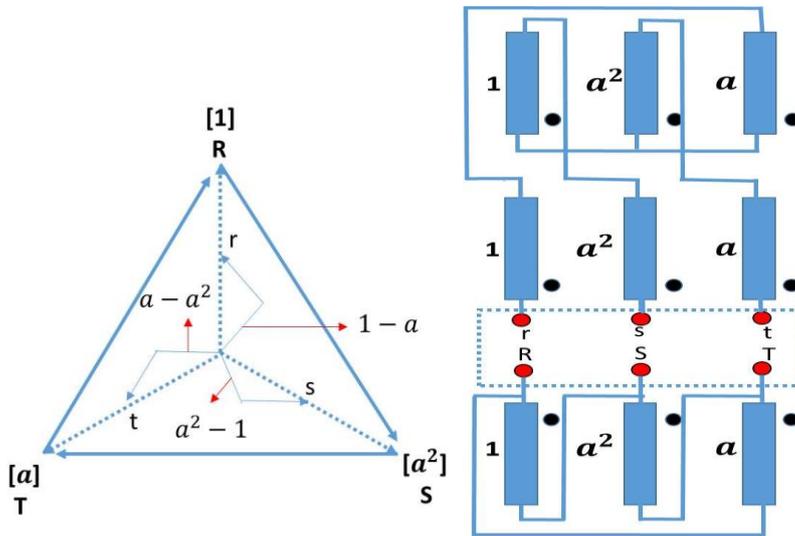


FIGURA 71: Conexión D_{Z0}

TABLA 37: Conexión D_{Z0} (Primario)

Conexiones D _{Z0}	
VA	125,78 V
VB	127,62 V
VC	125,70 V
VAB	216,55 V
VBC	220,58 V
VCA	220,23 V

Conexión D_{Z0} (Secundario)

Conexiones D _{Z0}	
VA	12,58 V
VB	11,98 V
VC	12,21 V
VAB	21,37 V
VBC	20,70 V
VCA	21,76 V

En la figura 72, se puede observar el grado de desfase entre las líneas del primario (línea amarilla) como del secundario (línea roja), el resultado de desfase es de 0°

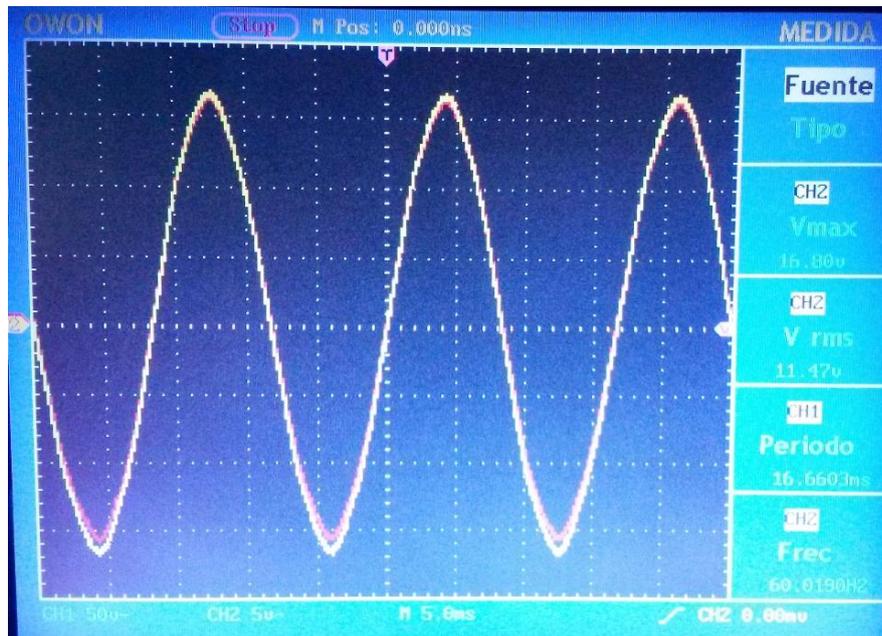


FIGURA 72: Conexión Dz0

En la figura 68, se puede observar el grado de desfase entre las líneas del primario como del secundario, el resultado de desfase es de 0° . Tanto el voltaje de fase de línea del primario como la del secundario no se desplazan quedan en cero grados y su onda es sinusoidal.

4.12 CONEXIÓN EN DESFASE 5

4.12.1 CONEXIÓN EN Dy_5

La conexión Dy se utiliza para elevar la tensión, ya que la propia relación de transformación debida a las espiras, interviene el factor tres que multiplica la tensión del secundario, $\frac{\sqrt{3}N_1}{N_2}$.

Esta conexión se utiliza mucho como transformador elevador en las redes de alta tensión. También se utiliza mucho esta configuración en transformadores de distribución colocando la conexión en estrella en el lado de baja tensión. Esto permite alimentar cargas trifásicas y monofásicas entre fase y neutro.

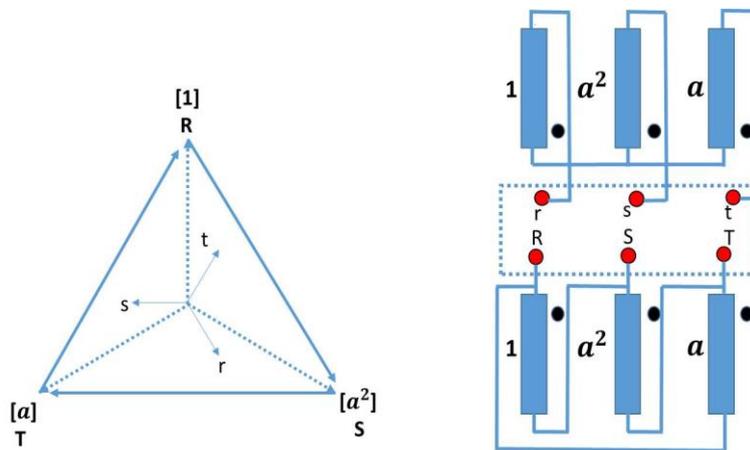


FIGURA 73: Conexión Dy_5

Mediante esta conexión se obtuvieron los siguientes datos:

TABLA 38: Conexión Dy_5 (Primario)

Conexiones Dy_5	
VA	127,70 V
VB	129,65 V
VC	127,23 V
VAB	219,58 V
VBC	223,71 V
VCA	222,88 V

Conexión Dy₅ (Secundario)

Conexiones Dy ₅	
VA	11,90 V
VB	11,72 V
VC	11,37 V
VAB	20,74 V
VBC	20,69 V
VCA	19,81 V

En la figura 72, se puede observar el grado de desfase entre las líneas del primario (línea amarilla) como del secundario (línea roja), el resultado de desfase es de 138.24°



FIGURA 74: Conexión En Dy₅

Mediante la siguiente ecuación se determina que su ángulo es de 138.24°

$$\theta = 2\pi ft$$

$$\theta = 2 * \pi * 60\text{Hz} * 0.0064\text{s} * \frac{180}{\pi}$$

$$\theta = 138.24^\circ$$

Utilizando un 6.24ms por división, que se adquirió en el osciloscopio.

4.12.2 CONEXIÓN Yd₅

Este tipo de conexión Yd₅ se utiliza para reducir la tensión, ya que además de la propia relación de transformación debida a las espiras, interviene el valor de tres para reducir la tensión del secundario, $\frac{N1}{\sqrt{3} \times N2}$.

La ventaja de esta conexión es que no tiene armónicos o perturbaciones en las líneas y se comporta bien ante cargas desequilibradas.

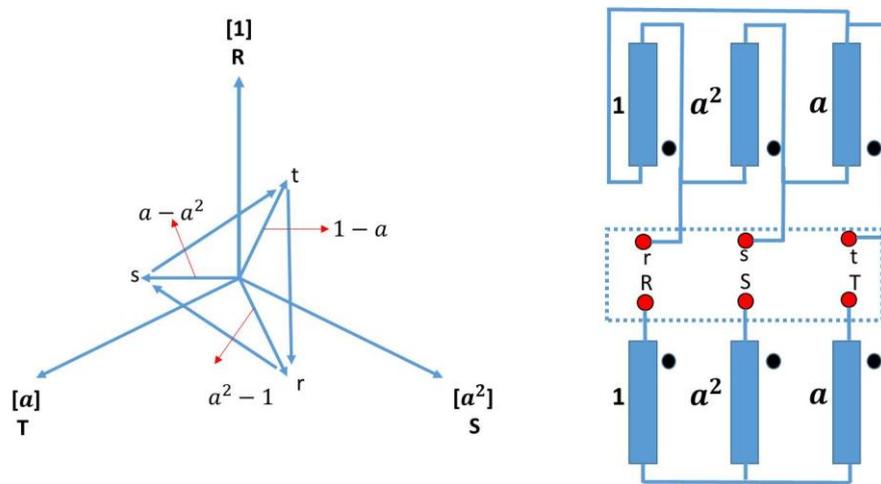


FIGURA 75: Conexión Yd₅

Con esta conexión se pudo adquirir los siguientes valores:

TABLA 39: Conexión Yd₅ (Primario)

Conexiones Yd ₅	
VA	127,90 V
VB	129,75 V
VC	127,57 V
VAB	220,28 V
VBC	223,86 V
VCA	223,22 V

Conexión Yd₅ (Secundario)

Conexiones Yd ₅	
VA	7,81 V
VB	7,73 V
VC	7,84 V
VAB	13,41 V
VBC	13,46 V
VCA	13,61 V

En la figura 74, se puede observar el grado de desfase entre las líneas del primario (línea amarilla) como del secundario (línea roja), el resultado de desfase es de 151.2°.

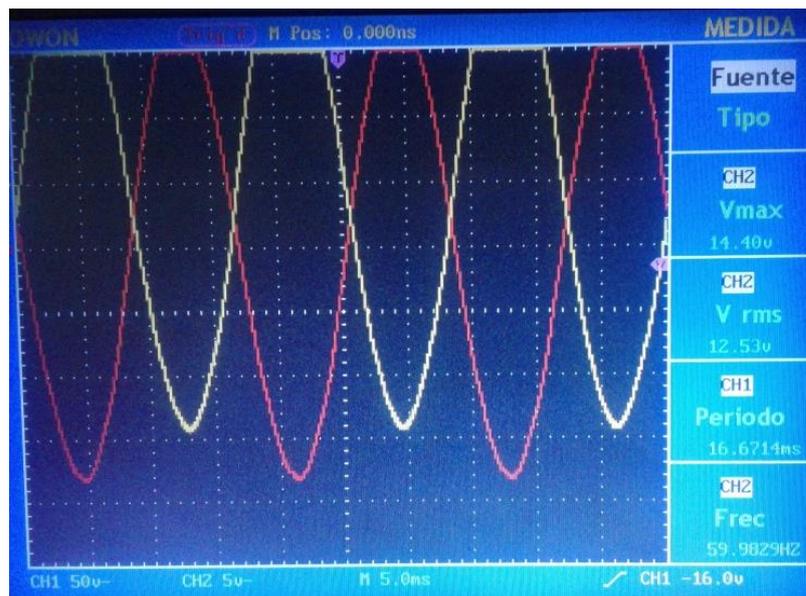


FIGURA 76: Conexión Yd₅

Mediante la siguiente ecuación se determina que su ángulo es de 151.2°

$$\theta = 2\pi ft$$

$$\theta = 2 * \pi * 60\text{Hz} * 0.007\text{s} * \frac{180}{\pi}$$

$$\theta = 151.2^\circ$$

Utilizando 7.2ms por división, que se adquirió en el osciloscopio.

4.12.3 CONEXIÓN Yz₅

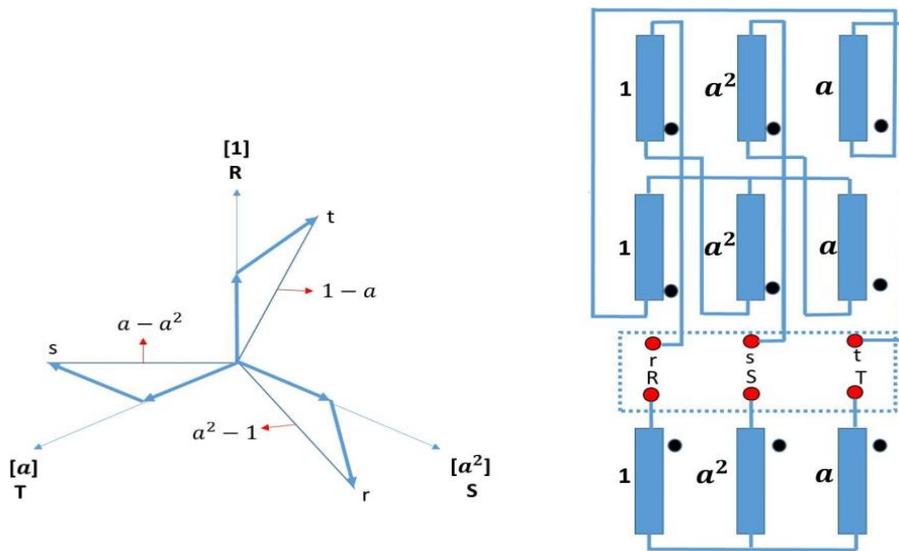


FIGURA 40: Conexión Yz₅

TABLA 40: Conexiones Yz₅ (primario)

Conexiones Yz ₅	
VA	127,90 V
VB	129,75 V
VC	127,57 V
VAB	220,28 V
VBC	223,86 V
VCA	223,22 V

Conexión Yz₅ (Secundario)

Conexiones Yz ₅	
VA	13,21 V
VB	13,50 V
VC	13,25 V
VAB	23,20 V
VBC	23,31 V
VCA	22,79 V

En la figura 76, se puede observar el grado de desfase entre las líneas del primario como del secundario, el resultado de desfase es de 155.5°



FIGURA 78: Conexión Yz₅

Mediante la siguiente ecuación se determina que su ángulo es de 155.5°

$$\theta = 2\pi ft$$

$$\theta = 2 * \pi * 60\text{Hz} * 0.0072\text{s} * \frac{180}{\pi}$$

$$\theta = 155.5^\circ$$

Utilizando un 7.2ms por división, que se adquirió en el osciloscopio.

4.13 CONEXIÓN DE DESFASE EN 6

4.13.1 CONEXIÓN Dd₆

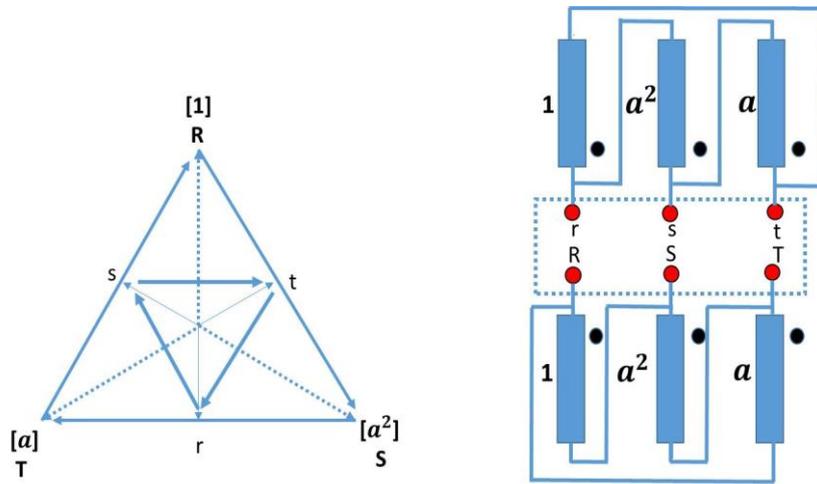


FIGURA 79: Conexión Dd₆

TABLA 41: Conexión Dd₆ (Primario)

Conexión Dd ₆	
VA	127,43 V
VB	129,26 V
VC	127,03 V
VAB	219,38 V
VBC	223,34 V
VCA	222,94 V

Conexión Dd₆ (Secundario)

Conexión Dd ₆	
VA	0,46 V
VB	0,28 V
VC	0,18 V
VAB	0,93 V
VBC	0,82 V
VCA	0,89 V

En la figura 78, se puede observar el grado de desfase entre las líneas del primario (línea amarilla) como del secundario (línea roja), el resultado de desfase es de 181.44°

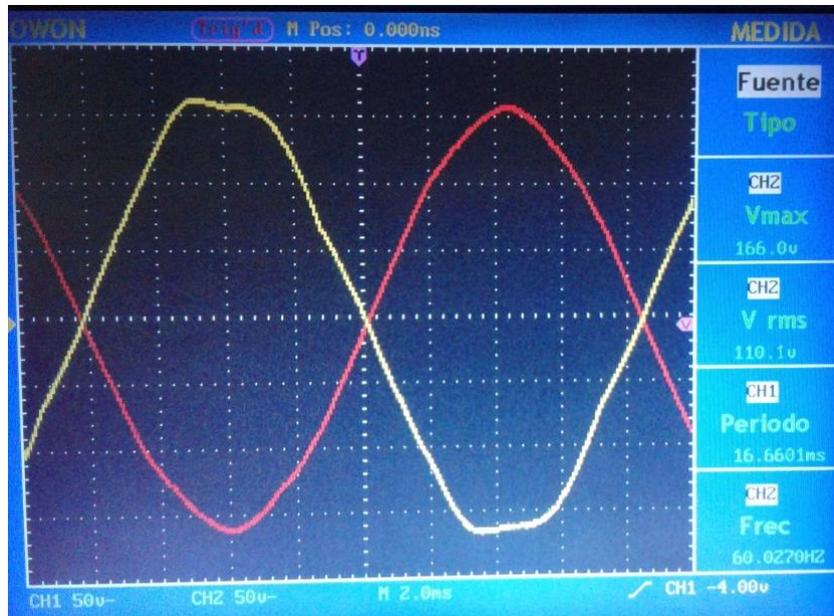


FIGURA 80: Conexión Dd₆

Mediante la siguiente ecuación se determina que su ángulo es de 181.44°

$$\theta = 2\pi ft$$

$$\theta = 2 * \pi * 60\text{Hz} * 0.0084\text{s} * \frac{180}{\pi}$$

$$\theta = 181.44^\circ$$

Utilizando un 8.4ms por división, que se adquirió en el osciloscopio.

4.13.2 CONEXIÓN Yy_6

Para esta conexión también se comprobaron de acuerdo a los diagramas fasorial mostrando en la siguiente figura:

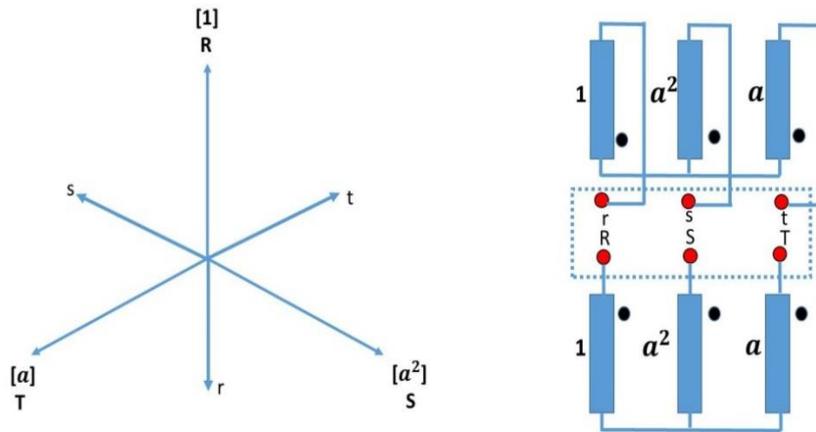


FIGURA 81: Conexión Yy_6

Mediante esta conexión se adquirió los siguientes datos:

TABLA 42: Conexión Yy_6

Conexiones Yy_6	
VA	127,60 V
VB	129,65 V
VC	127,39 V
VAB	219,50 V
VBC	223,09 V
VCA	222,25 V

Conexión Yy_6 (Secundario)

Conexiones Yy_6	
VA	13,41 V
VB	13,43 V
VC	13,62 V
VAB	23,10 V
VBC	23,51 V
VCA	23,45 V

En la figura 80, se puede observar el grado de desfase entre las líneas del primario (línea amarilla) como del secundario (línea roja), el resultado de desfase es de 181.44°

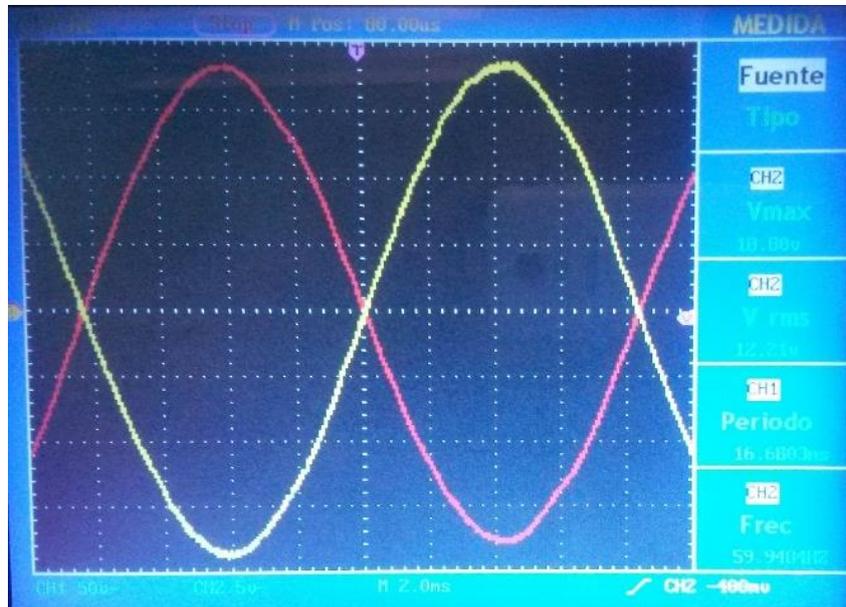


FIGURA 82: Conexión Yy₆

Mediante la siguiente ecuación se determina que su ángulo es de 181.44°

$$\theta = 2\pi ft$$

$$\theta = 2 * \pi * 60\text{Hz} * 0.0084\text{s} * \frac{180}{\pi}$$

$$\theta = 181.44^\circ$$

Utilizando un 8.4ms por división, que se adquirió en el osciloscopio.

4.13.3 CONEXIÓN Dz₆

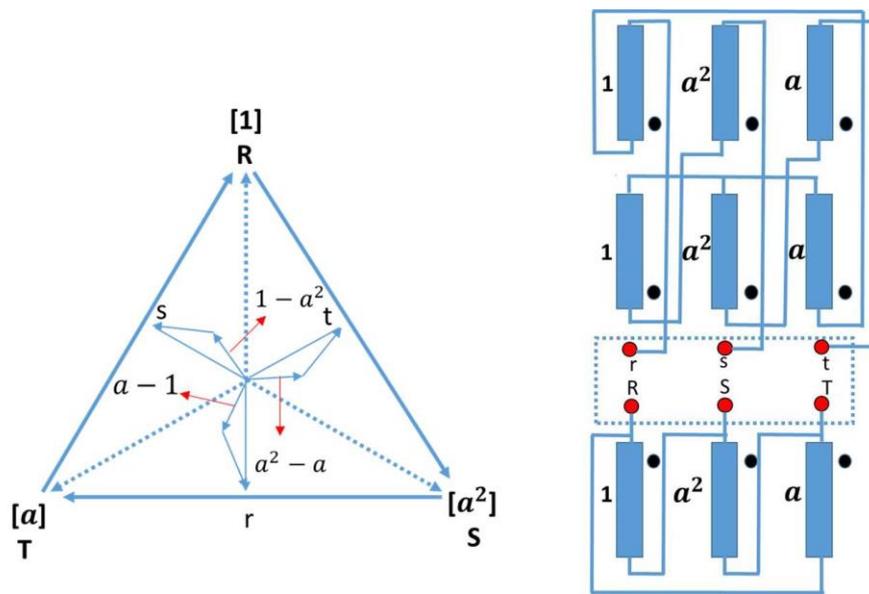


FIGURA 83: Conexión Dz₆

TABLA 403: Conexión Dz₆ (Primario)

Conexiones Dz ₆	
VA	127,60 V
VB	129,65 V
VC	127,39 V
VAB	219,50 V
VBC	223,09 V
VCA	222,25 V

Conexión Dz₆ (Secundario)

Conexiones Dz ₆	
VA	12,53 V
VB	11,87 V
VC	12,13 V
VAB	21,22 V
VBC	20,47 V
VCA	21,61 V

En la figura 82, se puede observar el grado de desfase entre las líneas del primario (línea amarilla) como del secundario (línea roja), el resultado de desfase es de 181.44°

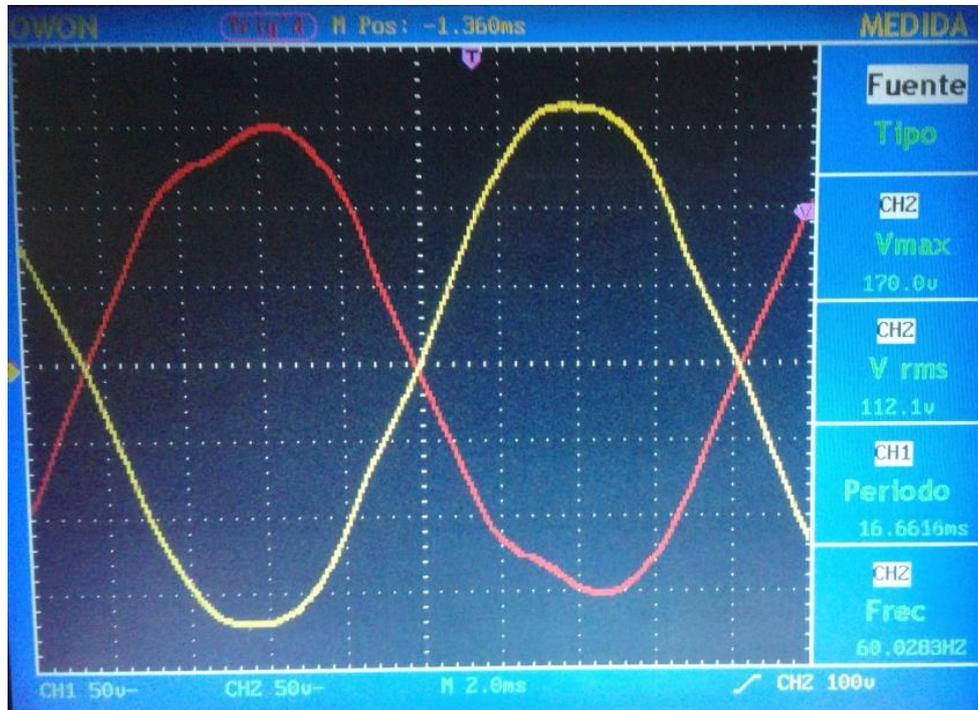


FIGURA 84: Conexión Dz₆

Mediante la siguiente ecuación se determina que su ángulo es de 181.44°

$$\theta = 2\pi ft$$

$$\theta = 2 * \pi * 60\text{Hz} * 0.0084\text{s} * \frac{180}{\pi}$$

$$\theta = 181.44^\circ$$

Utilizando un 8.4ms por división, que se adquirió en el osciloscopio.

4.14 CONEXIÓN DE DESFASE EN 11

4.14.1 CONEXIÓN Dy₁₁

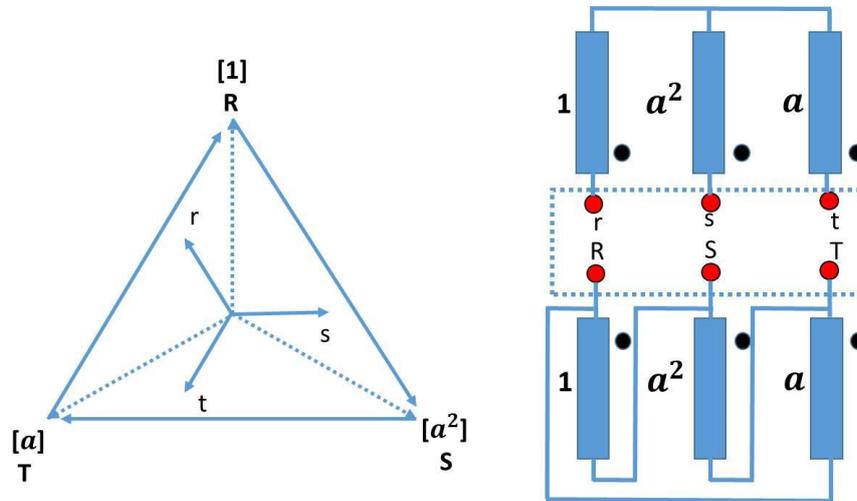


FIGURA 85: Conexión Dy₁₁

Con esta conexión se adquirió los siguientes datos:

TABLA 44: Conexiones Dy₁₁

Conexiones Dy ₁₁	
VA	127,14 V
VB	129,46 V
VC	127,10 V
VAB	219,21 V
VBC	223,51 V
VCA	222,87 V

Conexiones Dy ₁₁ (Secundario)	
Conexiones Dy ₁₁	
VA	11,34 V
VB	11,86 V
VC	11,66 V
VAB	20,05 V
VBC	20,61 V
VCA	19,73 V

En la figura 84, se puede observar el grado de desfase entre las líneas del primario (línea amarilla) como del secundario (línea roja), el resultado de desfase es de 34.56°

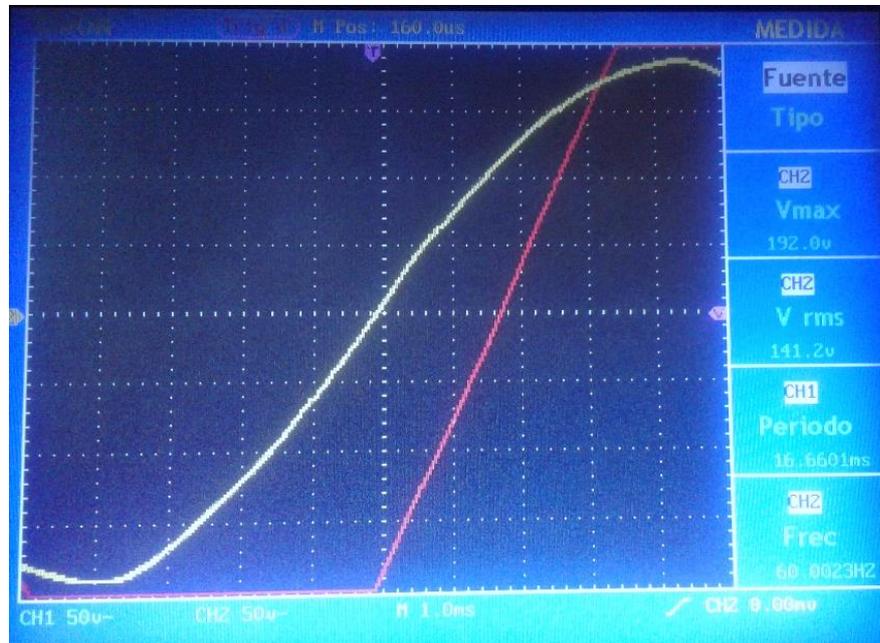


FIGURA 86: Conexión Dy₁₁

Mediante la siguiente ecuación se determina que su ángulo es de 34.56°

$$\theta = 2\pi ft$$

$$\theta = 2 * \pi * 60\text{Hz} * 0.0016\text{s} * \frac{180}{\pi}$$

$$\theta = 34.56^\circ$$

Utilizando un 1.6ms por división, que se adquirió en el osciloscopio.

4.14.2 CONEXIÓN Yd₁₁

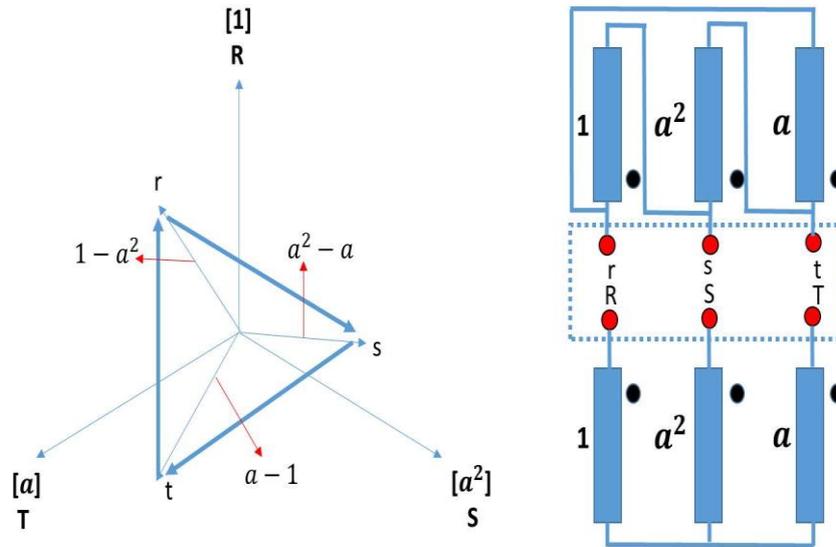


FIGURA 87: Conexión Yd₁₁

Con esta conexión se adquirió los siguientes datos:

TABLA 45: Conexiones Yd₁₁ (Primario)

Conexiones Yd ₁₁	
VA	127,14 V
VB	129,46 V
VC	127,10 V
VAB	219,21 V
VBC	223,51 V
VCA	222,87 V

Conexiones Yd₁₁ (secundario)

Conexiones Yd ₁₁	
VA	7,77 V
VB	7,69 V
VC	7,81 V
VAB	13,33 V
VBC	13,37 V
VCA	13,54 V

En la figura 86, se puede observar el grado de desfase entre las líneas del primario (línea amarilla) como del secundario (línea roja), el resultado de desfase es de 28.08°

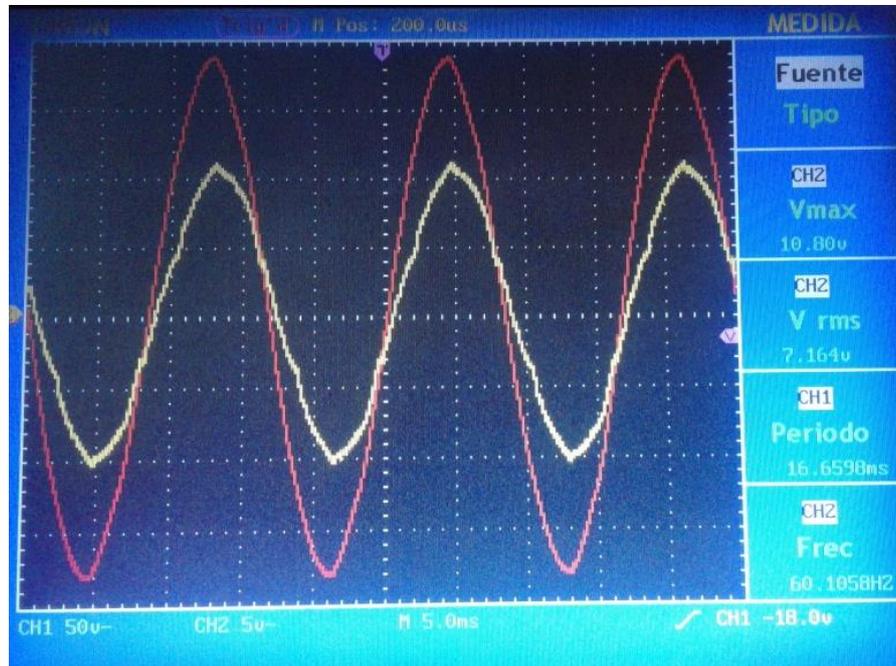


FIGURA 88: Conexión Yd₁₁

Mediante la siguiente ecuación se determina que su ángulo es de 28.08°

$$\theta = 2\pi fT$$

$$\theta = 2 * \pi * 60\text{Hz} * 0.0013\text{s} * \frac{180}{\pi}$$

$$\theta = 28.08^\circ$$

Utilizando un 1.3ms por división, que se adquirió en el osciloscopio.

4.14.3 CONEXIONES Yz₁₁

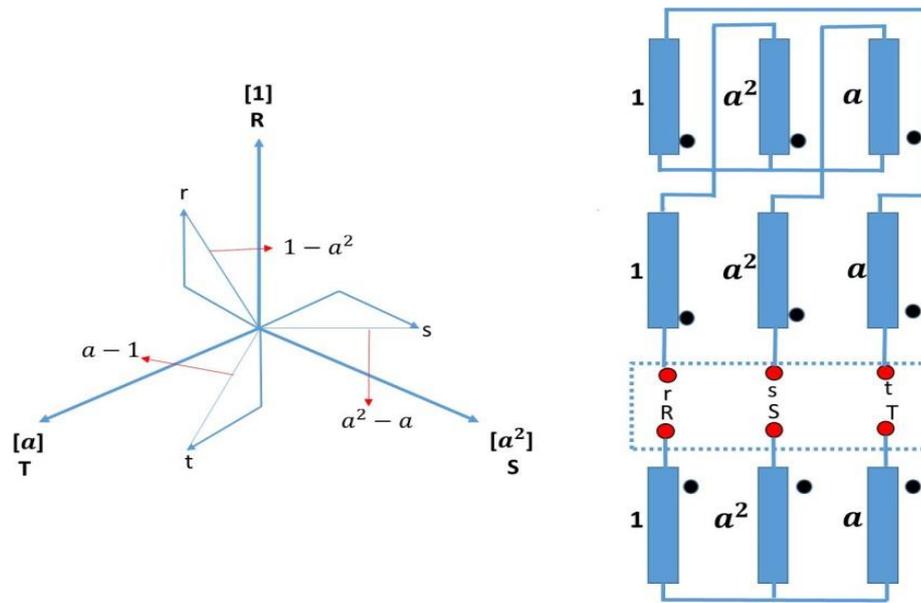


FIGURA 89: Conexión Yz₁₁

TABLA 46: Conexiones Yz₁₁ (Primario)

Conexiones Yz ₁₁	
VA	127,14 V
VB	129,46 V
VC	127,10 V
VAB	219,21 V
VBC	223,51 V
VCA	222,87 V

Conexiones Yz₁₁ (secundario)

Conexiones Yz ₁₁	
VA	13,26 V
VB	13,57 V
VC	13,32 V
VAB	23,36 V
VBC	23,42 V
VCA	22,90 V

En la figura 88, se puede observar el grado de desfase entre las líneas del primario (línea amarilla) como del secundario (línea roja), el resultado de desfase es de 34.56°

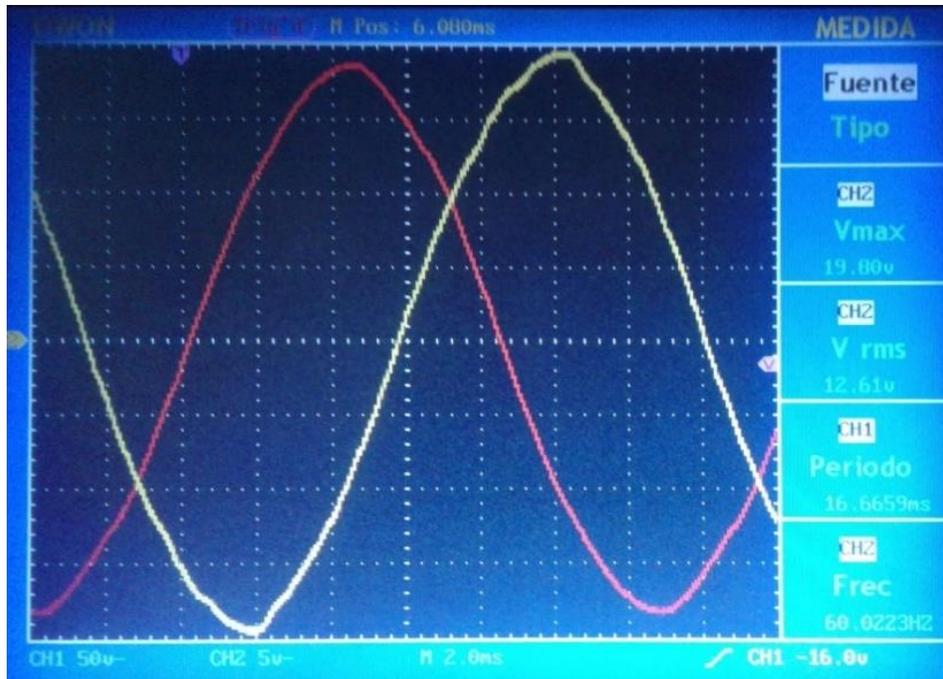


FIGURA 90: Conexión YZ₁₁

Mediante la siguiente ecuación se determina que su ángulo es de 34.56°

$$\theta = 2\pi ft$$

$$\theta = 2 * \pi * 60\text{Hz} * 0.0016\text{s} * \frac{180}{\pi}$$

$$\theta = 34.56^\circ$$

Utilizando 1.16ms por división, que se adquirió en el osciloscopio.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El analizador de red nos ayuda a determinar el ángulo de desfase en las conexiones trifásicas debido a que estas conexiones específicas en un punto de carga.
- Los desfases en los grupos de conexiones hacen que los voltajes del primario con respecto al secundario se desfasen siempre entre -30° o $+30^\circ$ dependiendo del grupo de conexión.
- El diseño y construcción de los módulos didácticos a pesar de ser fácil su implementación constituyen una buena herramienta para realizar diferentes prácticas en el laboratorio de máquinas eléctricas, a entender la polaridad del transformador, pruebas de vacío, pruebas de cortocircuito, circuito equivalente, conexiones trifásicas, que ayudan a entender los conceptos básicos de los transformadores.
- Es posible determinar en el laboratorio los valores de las impedancias del circuito equivalente aplicando solo dos pruebas la de cortocircuito y la de circuito abierto.
- La realización de pruebas para los transformadores monofásicos es una parte de gran importancia ya que tenemos que realizar con cuidado y respetando los valores de placa.
- Todas las pruebas realizadas a los transformadores deben ser claras y concreta.
- Las pruebas de cortocircuito y circuito abierto, nos permite calcular el estado del transformador y así encontrar el circuito equivalente.

- La implementación de los módulos se convierten en una herramienta de aprendizaje didáctica para los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico
- Las pruebas eléctricas que se recomiendan realizar constituyen una parte importante, ya que nos permiten conocer la vida útil del dispositivo.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda que para la operación de un transformador monofásico se debe tomar en cuenta tanto el bobinado primario (120V) como el bobinado secundario (12V).
- Para realizar la prueba de corto circuito se recomienda hacerlo con mucha precaución, no suministrar voltajes y corrientes no establecidos para no crear daño en el transformador.
- Para evitar daños en los módulos didácticos se debe realizar una revisión externa e interna de sus partes, y se recomienda hacer una revisión de cables con las que van hacer las conexiones antes de realizar los enlaces, que no tengan averías para no provocar algún daño o un corto circuito.
- Se recomienda tomar las debidas precauciones en las diferentes pruebas al momento de realizar las conexiones, ya que una mala conexión podría causar daños en los equipos y en el personal que está realizando las pruebas.
- Antes de realizar las pruebas con los módulos se recomienda revisar cada uno de los transformadores, fusibles y los cables con los que se realizara las diferentes conexiones.
- Como se mencionó la vida útil del transformador depende de varios factores y uno de ellos es el de la temperatura.
- Se recomienda primero leer todas las indicaciones antes de la manipulación de los transformadores y sus diferentes conexiones.

5.3. BIBLIOGRAFÍA Y LINGÜOGRAFÍA

Chapman, S. J. (2012). Maquinas Electricas 5ED. En S. Chapman, *Maquinas Electricas* (págs. 49-103). Mexico: McGraw-Hill.

CASTRO J., GARCIA D. (2011) (Tesis de ingeniería en electromecánica). Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga, Ecuador.

RECALDE S. (2012), Didáctica general. Cotacachi, Ecuador.

Pedro Avelino Pérez segunda edición (2001). Transformadores de distribución. Printed Mexico.

[\(http://factorelectrico.blogspot.com/\)](http://factorelectrico.blogspot.com/)

Norberto A. Lemozy (2015) transformadores trifásicos

<http://quintans.webs.uvigo.es/>

www.nichese.com

Víctor Hugo Yanes Salazar (2010). (Tesis de escuela de formación tecnológica). Escuela Politécnica Nacional. Quito. Ecuador.

Mg. Amancio R. Rojas Flores. Transformadores trifásicos. Universidad Nacional Del Santa. Chimbote. Perú.

[https://books.google.com.ec/books?id=_m_l-](https://books.google.com.ec/books?id=_m_l-NT38_UC&pg=PA44&dq=polaridad+de+un+transformador&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjH-NvHxrzNAhUDmR4KHW7vC_AQ6AEILTAA#v=onepage&q&f=false/)

[NT38_UC&pg=PA44&dq=polaridad+de+un+transformador&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjH-NvHxrzNAhUDmR4KHW7vC_AQ6AEILTAA#v=onepage&q&f=false/](https://books.google.com.ec/books?id=_m_l-NT38_UC&pg=PA44&dq=polaridad+de+un+transformador&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjH-NvHxrzNAhUDmR4KHW7vC_AQ6AEILTAA#v=onepage&q&f=false/)

Beeman, Donald, Industrial Power Systems Handbook, McGraw-Hill, Nueva York, 1995.

Del Toro, V., Electric Machines and Power Systems, Prentice-Hall, Englewood Cliffs. N.J., 1985.

Feinberg, R., Modern Power Transformer Practice, Wiley, Nueva York, 1979.

Fitzgerald. A.E., C. Kingsley, Jr. y S.D. Umans, Electric Machinery, 6a. ed., McGraw-Hill, Nueva York,

2003.

McPherson, George, An Introduction to Electrical Machines and Transformers, Wiley, Nueva York,

1981.

Personal del M.I.T., Magnetic Circuits and Transformers, Wiley, Nueva York, 1943.

Slemon, G.R. y A. Straughen, Electric Machines, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1980.

Electrical Transmission and Distribution Reference Book, Westinghouse Electric Corporation, East

Pittsburgh, 1964.

<https://tecnologiaalanhernandez.wordpress.com/2013/01/18/regulacion-de-tension-de-un-transformador/>

Jimmie J. Cathey (2002). Maquinas Electricas. Printed in Mexico.

<http://rte.mx/el-transformador-electrico-historia-y-perspectiva/>

http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3015/html/12_origen_y_antecedentes_del_transformador.html/

ANEXOS

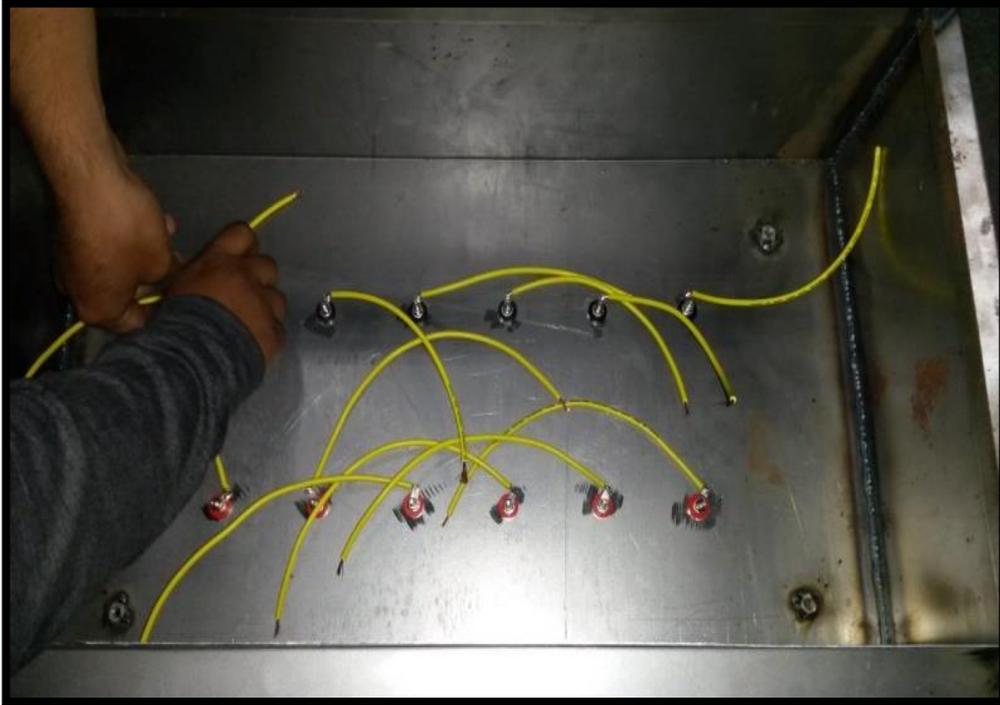
ANEXO 1. CONSTRUCCIÓN DE LOS MÓDULOS



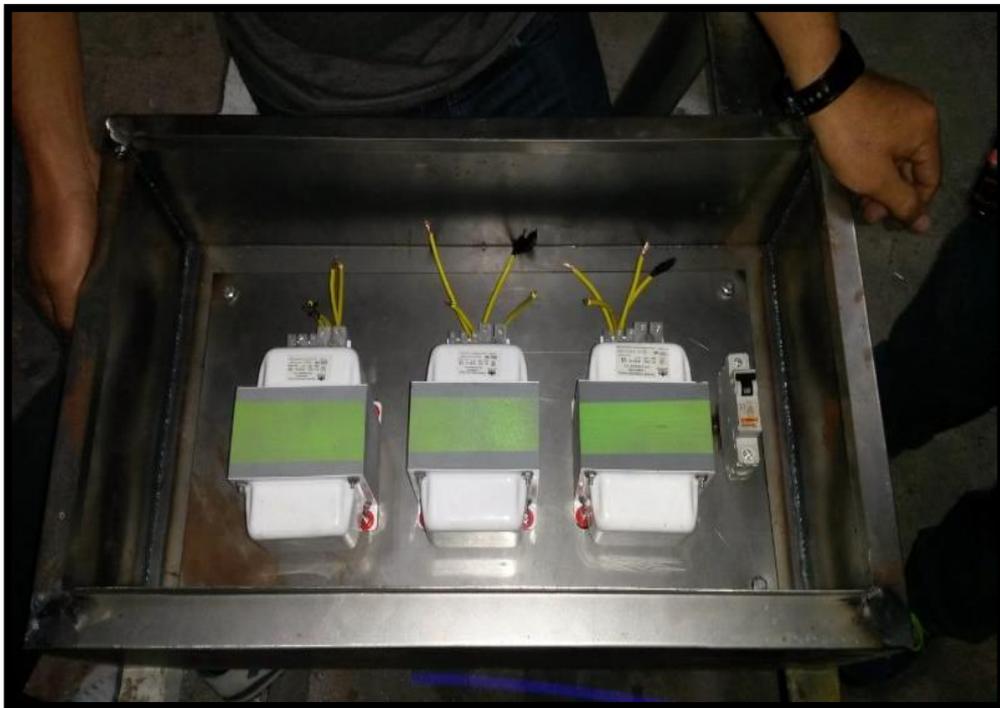
Elaboración de huecos del modulo



Colocación de Jack Banana



Cableado del modulo



Ensamblaje de los transformadores



Colocación de porta fusibles



Módulos didácticos terminados

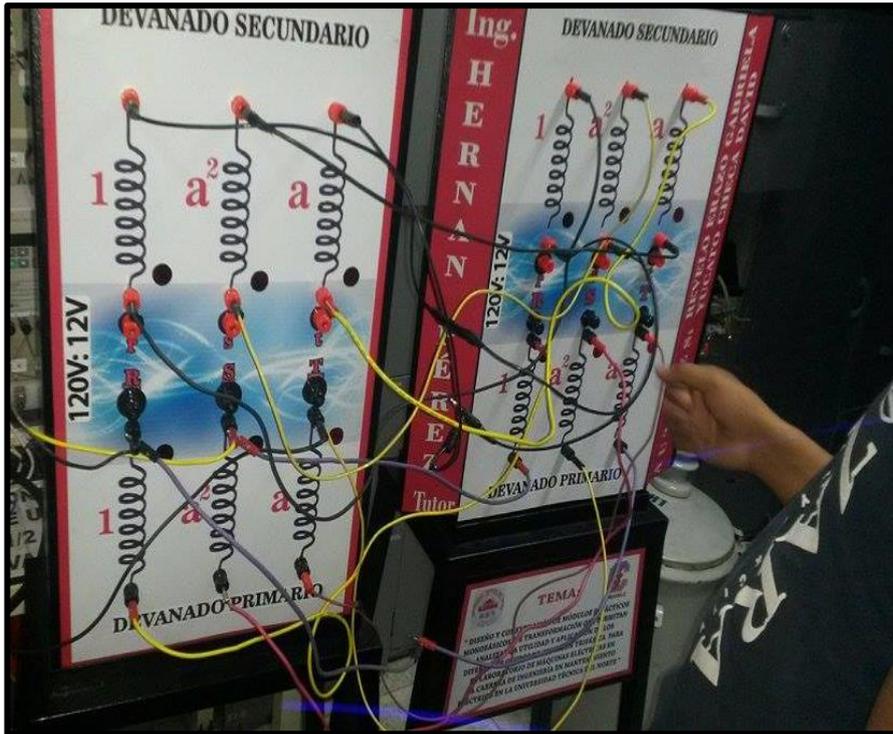
ANEXO 2. ELABORACIÓN DE PRUEBAS AL MÓDULO DIDÁCTICO



Pruebas de corto circuito



Pruebas de circuito abierto



Pruebas de conexiones trifásicas



Pruebas de conexiones trifásicas

ANEXO 3. REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS



ANEXO 4. PRACTICAS

INFORME DE PRACTICAS Se encuentra incluido en el CD