

MÓDULO DIDÁCTICO DE BANCO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS
PARA CONEXIONES TRIFÁSICAS, HEXAFÁSICAS Y TRANSFORMADOR
TRIDEVANADO



Autor

YAINER MOLINA RODELO

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA,
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELECTRÓNICA, ELÉCTRICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PAMPLONA, COLOMBIA

2017

MÓDULO DIDÁCTICO DE BANCO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS
PARA CONEXIONES TRIFÁSICAS, HEXAFÁSICAS Y TRANSFORMADOR
TRIDEVANADO

Autor

YAINER MOLINA RODELO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de: **Ingeniero
Eléctrico**

Director

LUIS DAVID PABÓN FERNÁNDEZ

M.Sc control industrial

Codirector

EDISON ANDRES CAICEDO PEÑARANDA

Ingeniero Eléctrico

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA,
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELECTRÓNICA, ELÉCTRICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PAMPLONA, COLOMBIA

2017

Nota de Aceptación

Director de trabajo de grado

Jurado

Jurado

Jurado

Pamplona, Diciembre de 2017

Dedicatoria

Dedico este logro alcanzado primeramente a Dios por darme fuerzas y la perseverancia de no desistir y seguir adelante en momentos difíciles, a mi madre Miladis Rodelo Aguas por ser mi amiga, consejera y ayudarme a crecer como persona, a mis hermanos Neider Molina Rodelo, Yuleys Molina Ruiz, Julieta Molina Ruiz, Kellys , Iris y Luis Salas, por brindarme gran apoyo, a mi padre Filiberto Molina Márquez por ayudarme hacer de este sueño realidad a mis abuelos Santiago Rodelo y Teresa Aguas por ser esos seres tan maravillosos, a mi novia Yenis Mejía Rúa por su gran apoyo moral en momentos difíciles, a mis amigos y compañeros que nunca me hicieron sentir solo y en especial alguien más que un amigo un hermano Omer Portacio Ortega QEPD por sus hermosas palabras , a mis padrastros Danilza Ruiz y Ever Toledo por su incondicional apoyo, a mi segundos padres Gledis Rodelo Aguas, Pablo Salas por ser esas persona que siempre han están allí cundo más lo necesité, al igual que todos mis tíos y parientes y a la hermosa universidad de Pamplona por formarme profesionalmente.

Agradecimientos

El autor expresa los agradecimientos a:

- ✓ Primeramente gracias a Dios por brindarme la vida salud y conocimientos para así poder hacer realidad este sueño, a mis padres que gracias a sus esfuerzos e incondicional apoyo han hecho posible que pueda superarme y culminar con éxitos mi carrera y este proyecto.

- ✓ Al M.Sc. Luis David Pabón Fernández, Ing. Edison Andrés Caicedo Peñaranda, por su gran apoyo y guiarme como profesores y tutores para la elaboración del siguiente proyecto.

- ✓ A mis amigos y compañeros de estudio en especial a mis amigos compañeros y paisanos Omar Josué Sierra Campo y Joel Rodelo, por su apoyo y colaboración para llevar acaba la elaborar de este proyecto.

Contenido

1. Introducción.....	14
2. Planteamiento del problema.....	15
3. Justificación.....	16
4. Objetivos.....	17
4.1. Objetivo General.....	17
4.2. Objetivos específicos.....	17
5. Marco referencial.....	18
5.1. Marco teórico.....	18
5.1.1. El transformador:.....	18
5.1.2. Núcleo:.....	18
5.1.3. Devanados:.....	19
5.1.4. Principio de funcionamiento:.....	19
5.1.5. Relación de transformación:.....	20
5.1.6. Transformador ideal:.....	21
5.1.7. Condiciones de vacío:.....	22
5.1.8. Transformador ideal con carga:.....	24
5.1.9. Polaridad del transformador:.....	25
5.1.10. Transformador monofásico real:.....	25
5.1.11. Transformador real sin carga:.....	27
5.1.12. Transformador real en carga:.....	28
5.1.13. Circuito equivalente de un transformador:.....	29
5.1.14. Circuitos equivalentes aproximados de un transformador:.....	30
5.1.15. Modelos aproximados de transformadores.....	30
5.1.16. El autotransformador:.....	32
5.1.17. Transformadores de tres devanados.....	32
5.1.18. Pruebas a los transformadores tridevanados:.....	33
5.1.19. Eficiencia de los transformadores tridevanados:.....	34
5.1.20. Conexiones de transformadores trifásicos:.....	34
5.1.21. Conexión Y-Y (Y-Y):.....	35
5.1.22. Conexión Y-D (Y- Δ):.....	35

5.1.23.	Conexión Delta-ye (Δ -Y):	36
5.1.24.	Conexión Delta-delta (Δ - Δ):.....	37
5.1.25.	Conexión Y-Z:.....	37
5.1.26.	Conexiones trifásicas utilizando dos transformadores monofásicos:	38
5.1.27.	Conexión Δ abierta (V-V):	38
5.1.28.	Conexión Y- abierta D-abierta:	42
5.1.29.	Transformación trifásica a hexafásica:	44
5.2.	Marco legal.	44
5.2.1.	Normas Colombianas para los transformadores.	44
5.2.2.	Normas internacionales para el transformador.	46
6.	Diseño y construcción de los transformadores monofásicos para el módulo didáctico. 50	
6.1.	Cálculo para el diseño de los transformadores.	50
6.2.	Voltajes de diseño del transformador.	51
6.2.1.	Sección del núcleo.	51
6.2.2.	Cálculo del número de espiras por devanados.....	52
6.2.3.	Sección del conductor.....	53
6.2.4.	Cálculo de las protecciones del transformador.....	53
6.3.	Cálculos teóricos teniendo en cuenta las diferentes conexiones en un transformador.....	54
6.3.1.	Voltajes de diseño del transformador para la obtención de los valores teóricos. 54	
6.3.2.	Conexión del transformador en Δ -Y.....	54
6.3.3.	Conexión del transformador en $\Delta - \Delta$	55
6.3.4.	Conexión del transformador en Y- Δ	56
6.3.5.	Conexión del transformador en Y-Y.	58
6.3.6.	Conexión Δ abierta (V-V):	59
6.3.7.	Conexión Y abierta-delta abierta:.....	60
6.3.8.	Conexión del transformador en Y-Y-D.....	61
6.3.9.	Conexión D-YD.....	63
6.3.10.	Conexión Y-zig-zag.....	64
6.3.11.	Conexión estrella zig-zag.	65

6.3.12.	Conexión delta-zig-zag.....	66
6.3.13.	Conexión Delta -Hexafásica.....	68
6.3.14.	Conexión Y – Hexafásica.....	70
7.	Diseño y construcción del módulo didáctico para pruebas de los transformadores monofásicos.....	72
7.1.	Construcción de los transformadores.....	72
7.2.	Proceso de bobinado y creación del núcleo.....	73
7.3.	Construcción de la estructura para el módulo.....	74
7.4.	Descripción de las guías de laboratorios.....	76
8.	Validación del funcionamiento del módulo didáctico.....	79
8.1.	Determinación de los lados homólogos de un transformador monofásico.....	79
8.2.	Determinación de la polaridad en un transformador trifásico.....	79
8.3.	Conexión DELTA-DELTA.....	80
8.4.	Ensayo de corto circuito conexión Y- Δ	84
8.5.	Conexión Y-DELTA.....	86
8.6.	Determinación del índice horario.....	89
9.	Conclusiones.....	91
10.	Bibliografía.....	92

Lista de Tablas

Tabla 1. Número de vueltas por devanados.....	53
Tabla 2. Valores teóricos conexión Δ -Y.....	55
Tabla 3. Valores teóricos conexión Δ - Δ	56
Tabla 4. Valores teóricos conexión Y- Δ	57
Tabla 5. Valores teóricos conexión Y-Y	59
Tabla 6. Valores teóricos conexión V-V	60
Tabla 7. Valores teóricos conexión Y Ab - Δ Ab.....	61
Tabla 8. Valores teóricos conexión yyd	63
Tabla 9. Valores teóricos conexión dyd.	64
Tabla 10. Valores teóricos conexión Y-Z.....	66
Tabla 11. Valores teóricos conexión D-Z.....	67
Tabla 12. Valores teóricos conexión Δ - hexafásica.....	70
Tabla 13. Valores teóricos conexión Y - hexafásica	71
Tabla 14. Valores medidos conexión Delta-Delta en vacío.....	81
Tabla 15. Valores medidos con carga	84

Tabla de figuras.

Figura 1. Circuito magnético de transformadores monofásicos	18
Figura 2. a) Devanado concéntrico b) Devanado alternado	19
Figura 3. Principio de funcionamiento	19
Figura 4. Relación de transformación.....	21
Figura 5. Transformador de dos devanados.....	22
Figura 6. Transformador con devanado secundario abierto.	23
Figura 7. Diagrama fasorial para condiciones de vacío.....	24
Figura 8. Transformador ideal con carga.....	24
Figura 9. Transformador real sin carga.	26
Figura 10. Curva de histéresis del transformador.....	26
Figura 11. Flujo mutuo y disperso en el núcleo de un transformador.	27
Figura 12. Circuito de un transformador sin carga	28
Figura 13. Circuito de un transformador con carga	29
Figura 14. Circuito equivalente de un transformador	29
Figura 15 . Modelo del transformador referido a su nivel de voltaje primario	30
Figura 16. Modelo del transformador referido a su nivel de voltaje secundario.....	30
Figura 17. Referido al lado primario.	31
Figura 18 . Referido al lado secundario	31
Figura 19 Sin rama de excitación, referido al lado primario	31
Figura 20. Sin rama de excitación, referido al lado secundario.	32
Figura 21. Conexión como un autotransformador	32
Figura 22 a. Transformador de 3 devanados. b. Circuito equivalente	33
Figura 23. Conexión Y-Y.....	35
Figura 24. Conexión Ye-delta (Y- Δ):.....	36
Figura 25. Conexión delta- Ye (Δ -Y):.....	36
Figura 26. Conexión delta-delta.	37
Figura 27. Conexión de un transformador en Δ abierta o V-V.....	39
Figura 28 a. Voltajes y corrientes en un banco de transformador Δ - Δ	40
Figura 29. Conexiones de transformador en Δ abierta para suministrar una pequeña.....	41
cantidad de potencia trifásica y mucha potencia monofásica.....	42

Figura 30. Conexión Y abierta- Δ abierta	43
Figura 31. Diagrama de conexión del transformador Y abierta- Δ abierta.....	43
Figura 32 Transformación trifásica a hexafásica	44
Figura 33. Devanado primario del transformador	50
Figura 34. Devanado secundario del transformador.....	50
Figura 35. Devanado terciario del transformador.....	50
Figura 36. Núcleo del transformador.....	51
Figura 37. Conexión Δ -Y	54
Figura 38. Conexión Δ - Δ	55
Figura 39. Conexión y- Δ	57
Figura 40. Conexión y-y	58
Figura 41. Conexión V-V	59
Figura 42. Conexión Y abierta - Δ abierta fuente.....	60
Figura 43. Conexión yyd	61
Figura 44. Conexión dyd	63
Figura 45. Conexión zig-zag	65
Figura 46. Conexión y-z.....	65
Figura 47. Conexión d-z.....	67
Figura 48. Conexión d-hexafásica f.....	68
Figura 49. Diagrama fasorial de tensiones	68
Figura 50. Diagrama fasorial de tensiones	69
Figura 51. Diagrama vectorial de tensiones	69
Figura 52. Conexión y-hexafásica f.....	71
Figura 53. Chapas monofásicas.....	72
Figura 54. Formaleta.	73
Figura 55. Embobinado primario.....	73
Figura 56. Construcción del núcleo.....	74
Figura 57 . Estructura de diseño.	74
Figura 58 . Tablero de conexiones	75
Figura 59. Vista frontal del módulo.	75
Figura 60. Sistema de cableado.	76

Figura 61.Polaridad	79
Figura 62. Polaridad en un transformador trifásico.....	80
Figura 63. Conexión Delta-Delta sin carga	80
Figura 64.Forma de onda de voltaje de la conexión Delta-Delta sin carga.....	81
Figura 65.Forma de onda de corriente de la conexión Delta-Delta sin carga	81
Figura 66. Potencia en vacío conexión d-d.....	82
Figura 67.Conexión Δ - Δ con carga	82
Figura 68. Forma de onda de voltaje conexión Δ - Δ con carga.....	83
Figura 69. Forma de onda de corriente conexión Δ - Δ con carga.....	83
Figura 70 . Potencia entregada.....	84
Figura 71.Conexión Y- Δ con el secundario e cc	84
Figura 72.....	85
Figura 73. Forma de onda voltaje de cc.....	85
Figura 74.Potencia de cc.....	86
Figura 75. Fuente de alimentación en presencia de neutro.....	86
Figura 76. Forma de onda de corriente conexión Y-D con neutro.....	87
Figura 77. Espectro armónico conexión Y-D.....	87
Figura 78. Fuente de alimentación sin neutro	88
Figura 79.Forma de onda de corriente sin neutro.....	88
Figura 80. Espectro armónico en ausencia del neutro.....	89
Figura 81.Conexion Y-D.....	89
Figura 82 Desfase de tensiones	90
Figura 83. Índice horario.....	90

Resumen.

Con este proyecto se desea diseñar e implementar un módulo didáctico de banco de transformadores monofásicos en el laboratorio de máquinas eléctricas de la universidad de pamplona. El cual permitirá realizar los respectivos análisis de las conexiones básicas y especiales, de igual manera se estará llevando a cabo la realización los cálculos pertinentes para la construcción de cada uno de los transformadores a implementarse en el banco. Complementariamente se elaborara una guía donde se encuentran las practicas a desarrollar respectivas a este módulo.

Palabras claves:

- ✓ Módulo didáctico.
- ✓ Transformador.
- ✓ Conexiones.
- ✓ Hexafásica.
- ✓ Tridevanado.

1. Introducción.

Es común encontrar en diferentes lugares o sectores tanto industriales o residenciales, que existen equipos o máquinas que operan con voltajes trifásicos, dado que en estas zonas se opera con dichos voltajes es importante resaltar lo que ocasiona al momento de presentar inconvenientes debido ya sea a fayas en los transformadores o por mantenimiento de alguna de sus fases, se puede recurrir a la utilización de las configuraciones abiertas o especiales que podemos encontrar en los transformadores, también brindando la oportunidad de alimentar a usuarios rurales de una conexión trifásica.

Las conexiones de los transformadores tradicionales que podemos encontrar son las DELTA-DELTA, Y-Y, DELTA-Y, Y-DELTA, estas conexiones la conexión delta- delta no es muy utilizada debido a que no posee una conexión para salidas monofásicas ya que no tiene la terminal del neutro.

El análisis que se realizará en este proyecto de una manera clara y entendible acerca de las diferentes conexiones que podemos encontrar o realizar a un banco de transformadores monofásicos.

2. Planteamiento del problema.

Actualmente en el laboratorio de máquinas del programa de la ingeniería eléctrica de la Universidad de Pamplona de Norte Santander, por falta de recursos didácticos en el área de los transformadores se vienen realizando los laboratorios de una manera poco adecuada puesto que el contacto que llegan a tener los estudiantes con las máquinas es nulo.

Por lo cual surge la necesidad de implementar un módulo didáctico el cual se desea representar de una manera fácil de interpretar las posibles conexiones básicas y especiales que se pueden presentar en los transformadores ya que el laboratorio no cuenta con dichos módulos actualmente, con el cual se busca mejorar la forma de enseñanza que se ha dado en relación a las prácticas de laboratorio y así lograr una integración más afondo del estudiante con los transformadores y sus conexiones.

3. Justificación.

En este trabajo se ha propuesto la utilización de un módulo didáctico para verificar algunas de las conexiones que se le pueden realizar a un banco de transformadores monofásicos como son las conexiones trifásicas, hexafásicas y de tridevanado, temáticas abordadas en la materia de máquinas eléctricas, curso en el cual se ha evidenciado la problemática expuesta.

En la actualidad la utilización de herramientas que mejoran el aprendizaje en el aula ha avanzado de manera significativa; sin embargo, las prácticas desarrolladas para comprobar lo visto en clases no son las suficientes, debido entre otras razones a la falta de herramientas útiles que permitan a los estudiantes interactuar de forma que puedan concebir mediante un proceso de articulación donde se referencie lo teórico con lo práctico, y, es por ello que se busca plantear un tipo de módulo de forma didáctica que facilite a los docentes realizar prácticas de laboratorio más interactivas, facilitando así el aprendizaje de sus pupilos.

Los módulos didácticos son una forma de aprendizaje el cual es utilizado para facilitar la enseñanza de los estudiantes, y se pretende que dichos patrones se implementen mediante diversas facetas para que el estudiante logre compaginar su accionar en el campo de la práctica, y es a través de ésta que él va a lograr mayores habilidades y/o destrezas que le servirán como su baluarte de cara al trabajo en el mercado laboral.

4. Objetivos.

4.1. Objetivo General.

Diseñar e implementar un módulo didáctico de banco de transformadores monofásicos para conexiones trifásicas, hexafásicas y transformador tridevanado en el laboratorio de máquinas eléctricas de la universidad de pamplona.

4.2. Objetivos específicos.

- ✓ Calcular los materiales necesarios para la construcción de cada uno de los transformadores a implementarse en el banco.
- ✓ Diseñar el módulo didáctico utilizando tablero de pruebas con terminales de conexión seguras y fácil de utilizar.
- ✓ Implementar los transformadores y las estructuras requeridas por el módulo.
- ✓ Diseñar guías de laboratorio en el área de transformadores, que le permita a los estudiantes afianzar los conocimientos.
- ✓ Validar el funcionamiento del módulo didáctico de transformadores monofásicos mediante la conexión del mismo.

5. Marco referencial.

5.1. Marco teórico.

A continuación se dará a conocer algunas definiciones teóricas e indicando las partes que conforman el transformador, el principio de funcionamiento, sus respectivos circuitos equivalentes, las diferentes conexiones que se pueden encontrar (transformadores). Así mismo la estructura que hace parte del módulo concerniente al banco de transformadores. Con respecto a lo anterior se pueden citar los siguientes aportes teóricos:

5.1.1. El transformador:

Los transformadores son dispositivos capaces de cambiar 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. El transformador es un dispositivo que consta de dos o más bobinas de alambre conductor enrolladas alrededor de un núcleo ferromagnético común. Estas bobinas (normalmente) no están conectadas en forma directa. La única conexión entre las bobinas es el flujo magnético común que se encuentra dentro del núcleo [1].

5.1.2. Núcleo:

Se denomina núcleo del transformador el sistema que forma su circuito magnético que está constituido por chapas de material ferromagnético aisladas para reducir considerablemente las pérdidas en el hierro.

El circuito magnético está compuesto por las columnas, que son las partes donde se montan los devanados y las culatas que son las partes que realizan la unión entre las columnas. Los transformadores pueden ser acorazados o de columnas [2]. **Ver figura 1.**

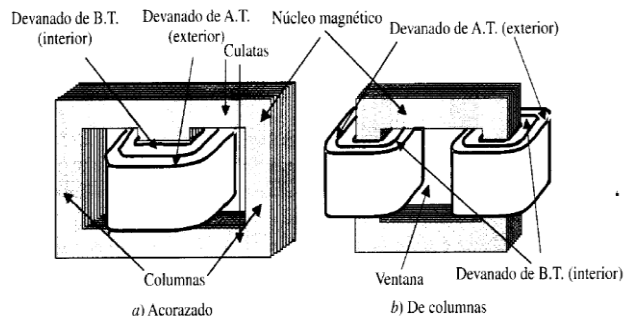


Figura 1. Circuito magnético de transformadores monofásicos fuente [2].

5.1.3. Devanados:

Constituyen el circuito eléctrico del transformador, los cuales se realizan por medio de conductores de cobre en forma de hilos redondos o de sección rectangular cuando se requieren secciones mayores los conductores están recubiertos por una capa aislante. Los devanados pueden ser concéntrico o alternados. En los devanados concéntricos las bobinas tienen forma de cilindro coaxial, y en los devanados alternos los arroyamientos se subdividen en secciones para difundir los flujos de dispersión [2]. Ver figura 2.

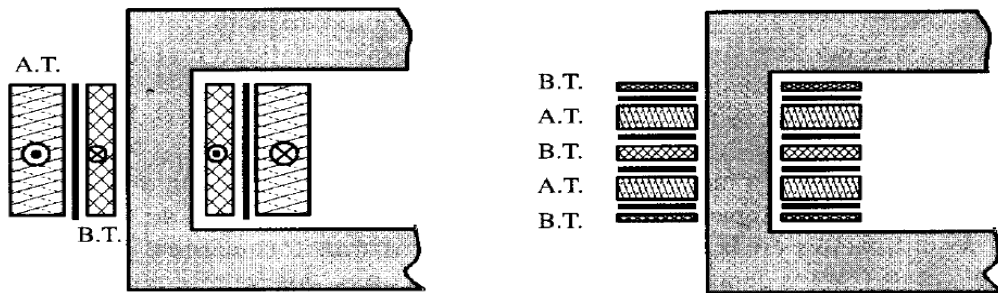


Figura 2. a) Devanado concéntrico b) Devanado alternado fuente [2].

5.1.4. Principio de funcionamiento:

Una de las mejores formas de comprender el funcionamiento del transformador es según el principio de inducción mutua entre dos (o más) bobinas o circuitos acoplados inductivamente [3]. Ver figura 3.

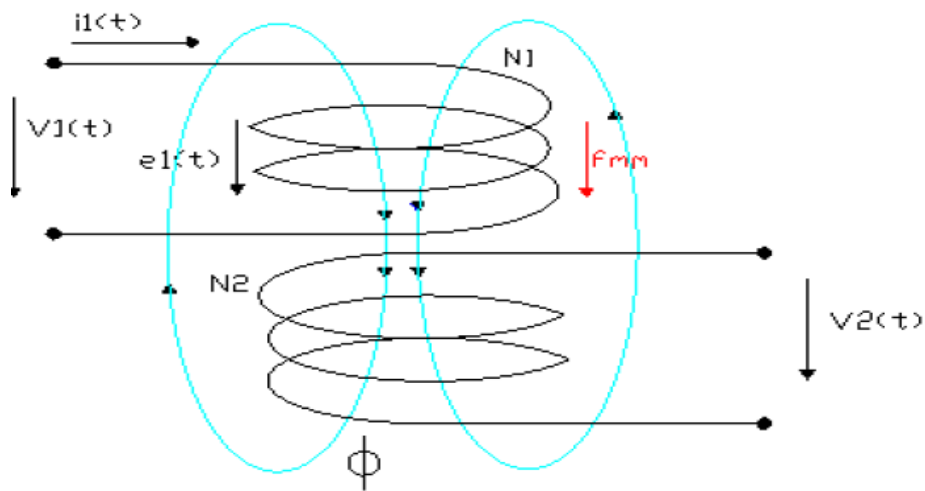


Figura 3. Principio de funcionamiento fuente [4].

Al conectar una fuente de corriente alterna al devanado primario se establece un flujo alterno en el circuito magnético y este a su vez inducirá una fem en el devanado secundario. Por otra parte, si una bobina de N_1 espiras se le aplica una tensión variable en el tiempo $V(t)$, circulará por ella una corriente $i(t)$ que producirá una fuerza magnetomotriz $f_{mm}(t)$ también variable en el tiempo que establecerá un flujo magnético variable en el tiempo. Por la ley de Faraday-Lenz aparece una fem que se opone a la causa que la produce, es decir se opone al flujo. Para tal efecto es necesario utilizar la ecuación [4]. **Ver Ecuación 1.**

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (1) \text{ Ecuación}$$

Ecuación 1. fem1

Donde:

- ✓ λ_1 . Acoplamiento de flujo inductivo del devanado primario
- ✓ ϕ . Flujo en el núcleo que vincula ambos devanados
- ✓ N_1 . Número de vueltas en el devanado primario

Por lo que si se coloca una segunda bobina de N_2 espiras que se conecte con el mismo flujo establecido por la fmm de la primera bobina el flujo inducirá en la segunda una fem.

Para la segunda bobina se emplea la siguiente ecuación. **Ver ecuación 2.**

$$e_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = N_2 \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (2) \text{ Ecuación}$$

Ecuación 2. fem1

5.1.5. Relación de transformación:

La relación de transformación pueden depender de varios parámetros importantes tales como:

- ✓ Numero de espiras de los devanados.
- ✓ Voltaje aplicado en los devanados.
- ✓ Corriente que circulo.

Por medio de la siguiente ilustración se puede obtener la relación de transformación. Ver **figura 4.**

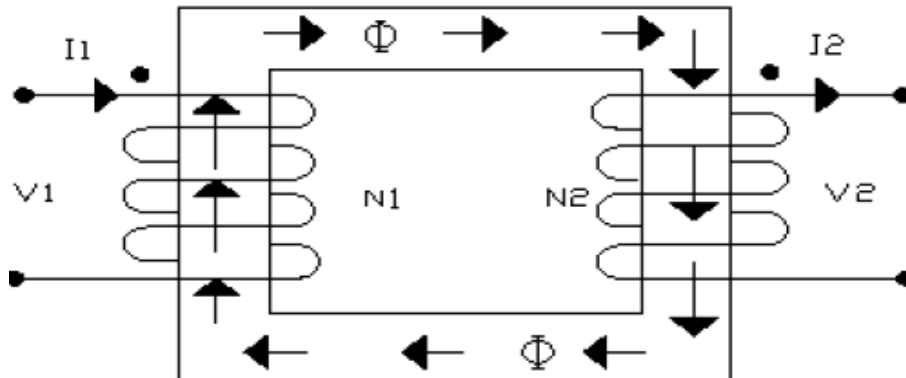


Figura 4. Relación de transformación fuente [4].

Dónde.

V1: Tensión de corriente alterna del primario.

N1 Número de espiras del devanado primario.

I1 Corriente primaria del transformador.

V2 Tensión CA del secundario del transformado.

N2 Número de espiras del devanado secundario del transformador.

I2 Corriente secundaria del transformador.

Estableciéndose la relación de transformación “a” cómo se visualiza en la ecuación. Ver **ecuación 3.**

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_1}{I_2} \quad \text{(3) Ecuación}$$

Ecuación 3. Relación de transformación

5.1.6. Transformador ideal:

El transformador es probablemente uno de los más útiles dispositivos eléctricos nunca inventados. Puede elevar O baja el voltaje o corriente en un circuito de CA, puede colocar

Circuitos aislados unos de otros, y puede aumentar O disminuir el valor aparente de un condensador, un inductor, O una resistencia. Además, el transformador Nos permite transmitir energía eléctrica a Distancias y distribuirlo de manera segura en fábricas y hogares. [25]. En el transformador ideal la permeabilidad μ del núcleo es infinita, todo el flujo está confinado en el núcleo y por tanto, enlaza todas las vueltas o espiras de ambos devanados, y las pérdidas del núcleo y las resistencias de los devanados son ceros. Así de esta forma los voltajes e_1 y e_2 inducidos por la variación del flujo son iguales a los voltajes en terminales V_1 y V_2 [17].

Por medio de la **figura 5** se pude ver que los voltajes instantáneos e_1 y e_2 inducidos por el flujo variable están en fases.

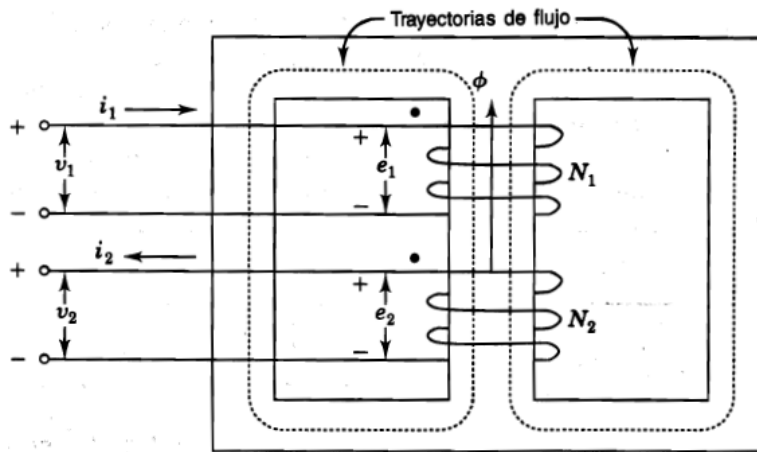


Figura 5. Transformador de dos devanados fuente [17].

Entonces por la ley de Faraday se establecen las ecuaciones 4 y 5:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (4) \text{ Ecuación}$$

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (5) \text{ Ecuación}$$

5.1.7. Condiciones de vacío:

El transformador en condiciones de vacío opera de tal forma que el devanado primario se conecta a la red y el secundario no se le conecta carga alguna como se puede apreciar en la figura 6.

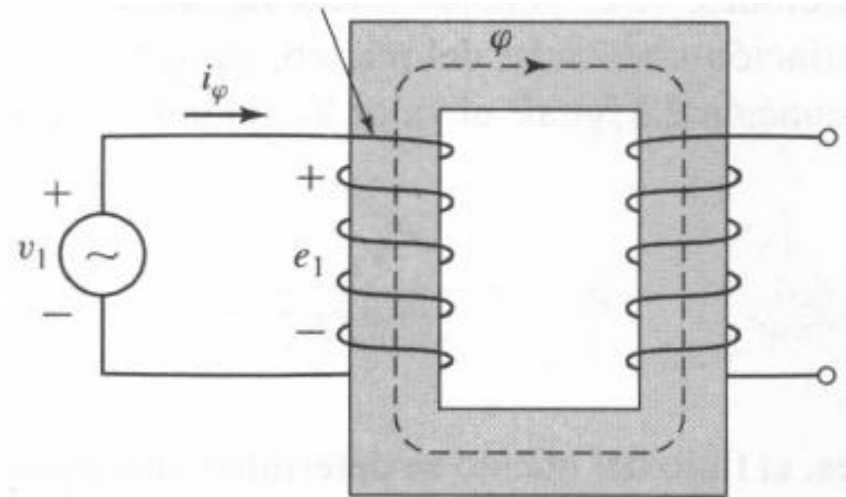


Figura 6. Transformador con devanado secundario abierto fuente [5].

La fem junto con la caída de voltaje en la resistencia principal R_1 , deberá equilibrar el voltaje aplicado v_1 de donde se deduce la siguiente expresión: **ver ecuación 6.**

$$v_1 = R_1 i_\phi + e_1 \quad \text{(6) Ecuación}$$

Como la resistencia en vacío R_1 es muy pequeña por tal motivo la fem inducida se puede decir que va ser igual al voltaje aplicado v_1 como se muestra en la ecuación 7.

$$v_1 = e_1 \quad \text{(7) Ecuación}$$

Como el valor rms de la fem inducida e_1 es $\sqrt{2}\pi f N_1 \phi_{max}$ donde f es la frecuencia en H_z y así de esta forma ignorando la caída de voltaje en la resistencia bajo estas condiciones el máximo valor del flujo será **ver ecuación 9.**

$$\phi_{max} = \frac{V_1}{\sqrt{2}\pi f N_1} \quad \text{(9) Ecuación}$$

Ecuación para el flujo máximo

En la figura 7 se muestra el diagrama de un transformador en condiciones de vacío o sin carga donde se está mostrando las relaciones de fases entre los numerosos voltajes, y las corrientes de un sistema en forma de vector.

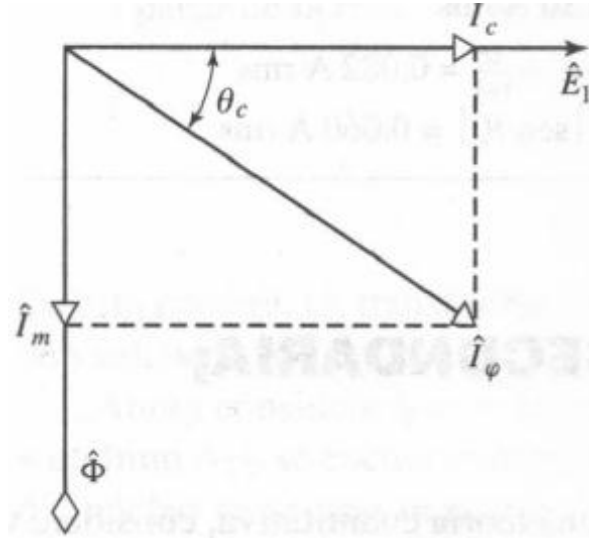


Figura 7. Diagrama fasorial para condiciones de vacío fuente [5].

5.1.8. Transformador ideal con carga:

A diferencia del sin carga por este circula una corriente en el secundario al conectársele una carga en los devanados, como se puede visualizar en la figura 8. Por lo tanto la corriente del secundario producirá una fuerza magnetomotriz en dirección opuesta con respecto a la corriente primaria manteniendo el flujo constante ya que se oponen las corrientes [5].

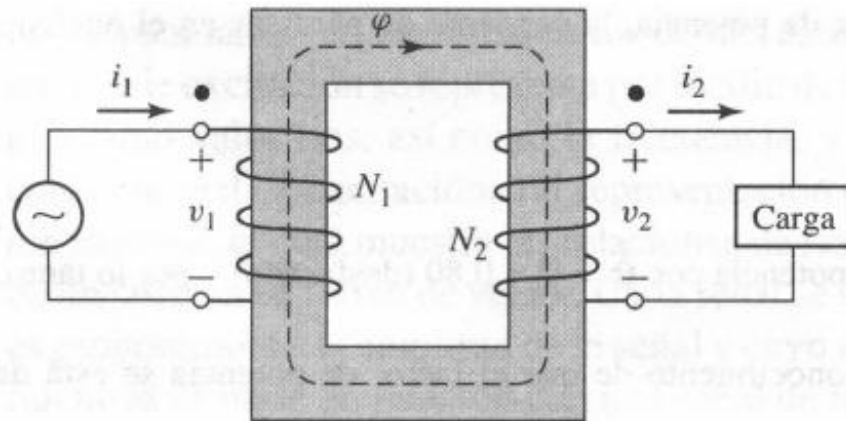


Figura 8. Transformador ideal con carga fuente [5]

Para el caso del funcionamiento con carga en un transformador ideal tenemos las siguientes ecuaciones.

La fmm de excitación neta que actúa en el núcleo será. $N_1 i_1 - N_2 i_2$ Donde no presentara variación y como consecuencia permanecerá sin considerarse despreciable.

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \quad \text{(10) Ecuación}$$

Ecuación 10 igualdad de las fmm

Donde se muestra una fmm compensadora principal que deberá cancelar la secundaria.

$$V_2 = e_2 \quad \text{(11)}$$

Ecuación 11 igualdad de tensión fuente

Como se están despreciando todos los mecanismos de dispersión y de acumulación de energía en el transformador, se deduce que la entrada de potencia instantánea del devanado primario equivale a la salida de potencia del devanado secundario como se puede ver en la ecuación 12 [5].

$$v_1 i_1 = v_2 i_2 \quad \text{(12)}$$

Ecuación 12 potencia instantánea fuente

5.1.9. Polaridad del transformador:

Un transformador puede tener devanados múltiples conectados en series, para incrementar el voltaje de especificación o en paralelo para aumentar la corriente especificada. Sin embargo, antes de hacer las conexiones es necesario conocer la polaridad de cada devanado. Se entiende por polaridad la dirección relativa de la fem inducida en cada devanado [18].

5.1.10. Transformador monofásico real:

El transformador real tiene algunas características parecidas a la de un transformador ideal pero hasta cierto punto de vista, ya que en un transformador real existen pérdidas, en el cobre y por ende hay caída de tensión al igual que flujos dispersos y las pérdidas en el núcleo.

Para entender la operación de un transformador real. En la figura 9 se puede ver un transformador que consta de dos bobinas de alambre enrollado alrededor del núcleo de un transformador. En el transformador el primario está conectado a una fuente de potencia de ca y el devanado secundario está abierto. La base de la operación de un transformador se puede derivar de la ley de Faraday que se muestra en la ecuación 11. De igual forma se puede observar la curva de histéresis del transformador se muestra en la figura.10 [1].

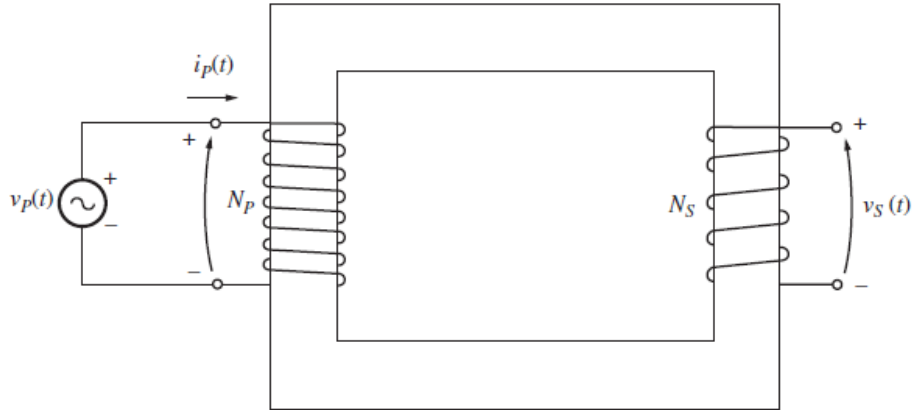


Figura 9. Transformador real sin carga fuente [1].

$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (13)$$

Ecuación 13

Donde λ es el flujo concatenado en la bobina a través de la cual se induce el voltaje. El flujo concatenado λ es la suma del flujo que pasa a través de cada vuelta en todas las vueltas de la bobina [1].

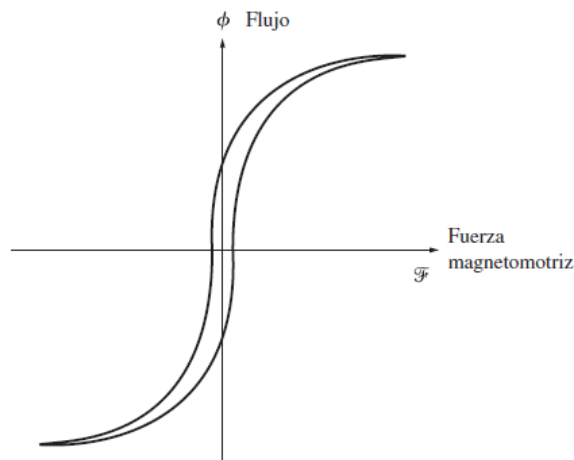


Figura 10. Curva de histéresis del transformador fuente [1].

Si se aplica directamente a través de las bobinas del devanado primario del transformador un voltaje se generara un flujo el cual estará presente en la bobina primaria del transformador ocasionando efectos en la bobina del secundario del transformador, El cual depende de qué tanto flujo llegue a la bobina secundaria. Ya que no todo el flujo que se produce en la bobina

primaria pasa a través de la bobina secundaria; algunas de las líneas de flujo abandonan el núcleo de hierro y pasan a través del aire como se aprecia en la **figura 11**.

La porción del flujo que pasa a través de una de las bobinas del transformador, pero no a través de la otra, se llama flujo disperso. El flujo en la bobina primaria del transformador se puede dividir en dos componentes: un flujo mutuo que permanece en el núcleo y uno ambos devanados, y un flujo disperso mínimo que pasa a través del devanado primario pero regresa a través del aire, sin cruzar por el devanado secundario [1].

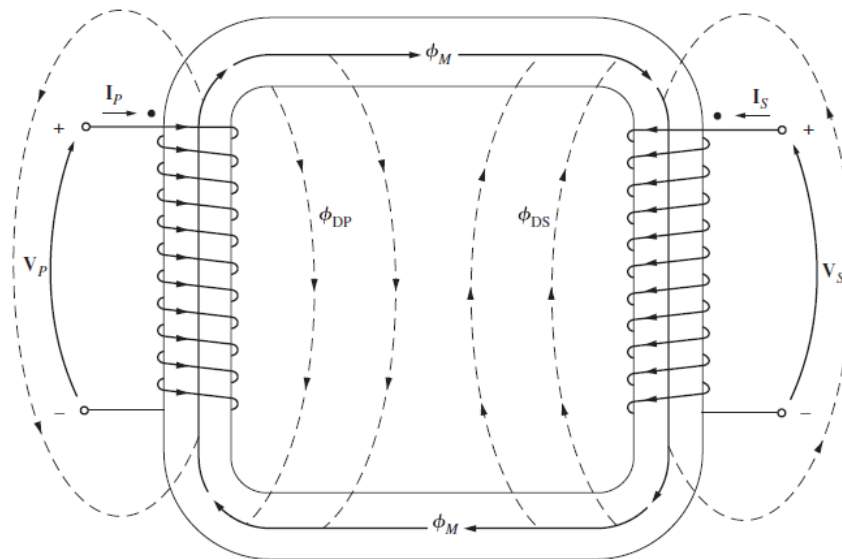


Figura 11. Flujo mutuo y disperso en el núcleo de un transformador fuente [1].

5.1.11. Transformador real sin carga:

El funcionamiento de un transformador real sin cargar se puede apreciar en la figura 12 donde no existe carga alguna en el devanado secundario y por donde no existe ningún paso de corriente.

La corriente consumida por el transformador real sin carga (corriente de vacío i_0) presenta frente a la tensión un desfase algo menor que la corriente de magnetización i_m , ya que el cambio de magnetización del hierro genera calor debido a la corriente de pérdidas i_p , representando a la carga de una resistencia efectiva. En vacío el factor de potencia es aproximadamente 0,2 [4].

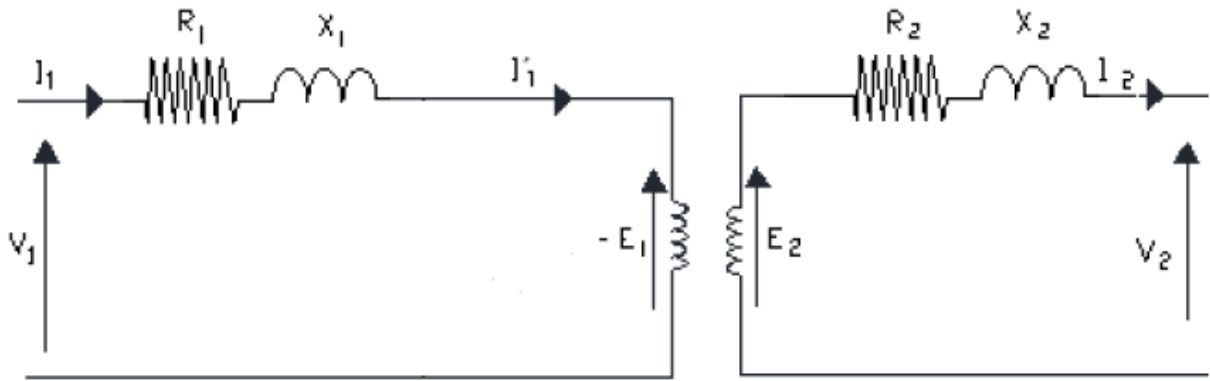


Figura 12. Circuito de un transformador sin carga fuente [4].

En vacío.

$$i_2 = 0 \quad , \quad i_1 = i_0 \quad (14)$$

$$\frac{V1}{V2} = \frac{i_1 R_1 + i_1 X_1 + E_1}{E_2} \quad (15)$$

Como i_0 es una corriente pequeña

$$\frac{V1}{V2} \cong \frac{E_1}{E_2} \cong m \quad (16)$$

Ecuación que se cumple tanto para transformador ideal como para el que se está estudiando

5.1.12. Transformador real en carga:

En el funcionamiento en carga con las relaciones aproximadas nos indica que los flujos magnéticos en vacío y en carga son prácticamente iguales queriendo decir que el flujo es constante, lo que significa que las fmm's en ambos estados de cargas coinciden de ahí que se considera válida la ecuación 15 para todos los efectos [2].

$$i_1 = i_0 + \frac{i_2}{m} \quad (17)$$

Ecuación 17. Comportamiento eléctrico del transformador en carga.

El flujo de dispersión primario Φ_1 produce una reactancia inductiva primaria X_1 . El flujo de dispersión secundario Φ_2 produce una reactancia secundaria X_2 . Además los devanados

primarios y secundarios están embobinados en cobre que tiene una cierta resistencia, las cuales son las resistencias internas de los devanados primarios y secundarios. R_1, R_2 [4].

Al estar una carga en el devanado secundario se va a presentar una caída de tensión en los bornes del secundario en términos de la carga, como se puede ver en la figura 13. Sin dejar de tener presente que en cada bobina va a existir perdidas por las resistencias por efecto joule.

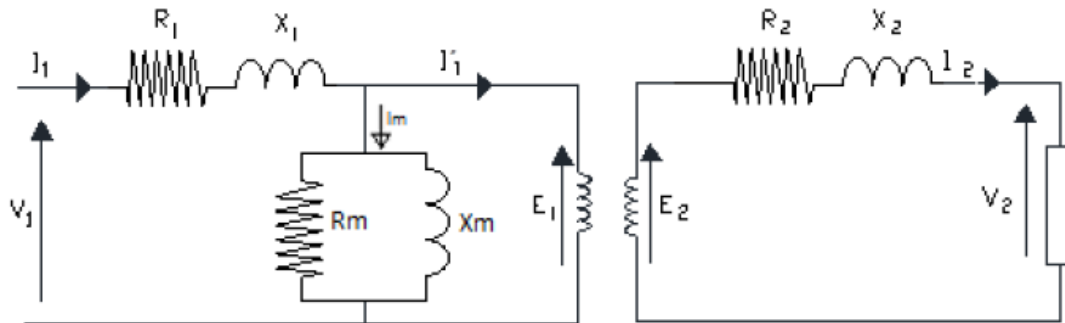


Figura 13. Circuito de un transformador con carga fuente [4].

5.1.13. Circuito equivalente de un transformador:

Los circuitos equivalentes representan ventajas a la hora de desarrollar circuitos de máquinas eléctricas permitiendo conocer con antelación la respuesta de la maquina en unas determinadas condiciones de funcionamiento, en el caso del transformador el desarrollar un circuito equivalente se inicia reduciendo ambos devanados al mismo número de espiras. En la figura 14 se puede observar el circuito equivalente de un transformador [2].

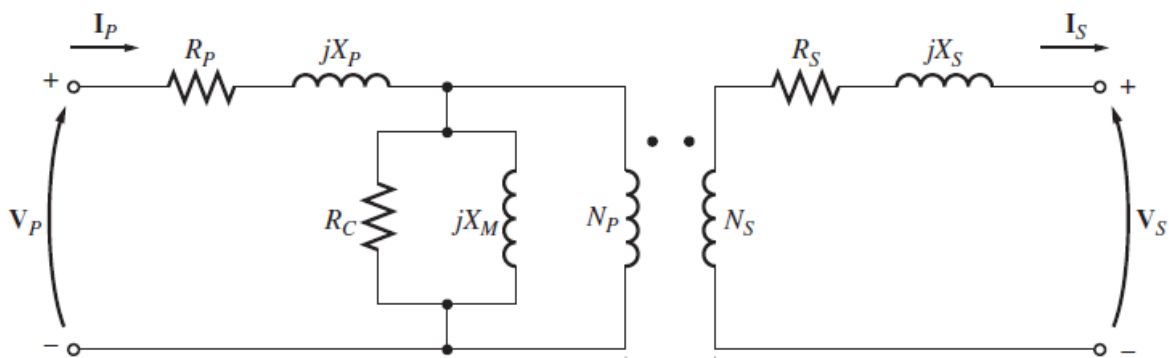


Figura 14. Circuito equivalente de un transformador fuente [5]

5.1.14. Circuitos equivalentes aproximados de un transformador:

En la figura 15 se puede apreciar el circuito equivalente aproximado de un transformador real referido a su nivel de voltaje al primario.

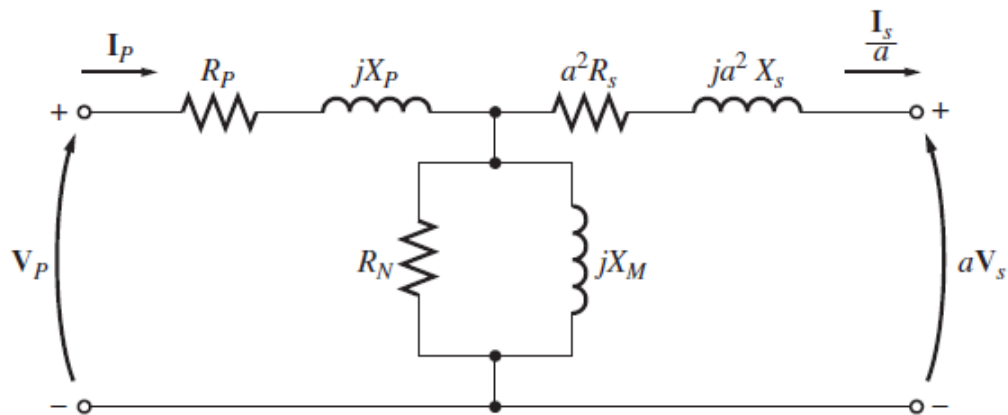


Figura 15 . Modelo del transformador referido a su nivel de voltaje primario fuente. [1].

Al igual en la figura 16 se aprecia cuando el nivel de voltaje está referido esta vez a su secundario.

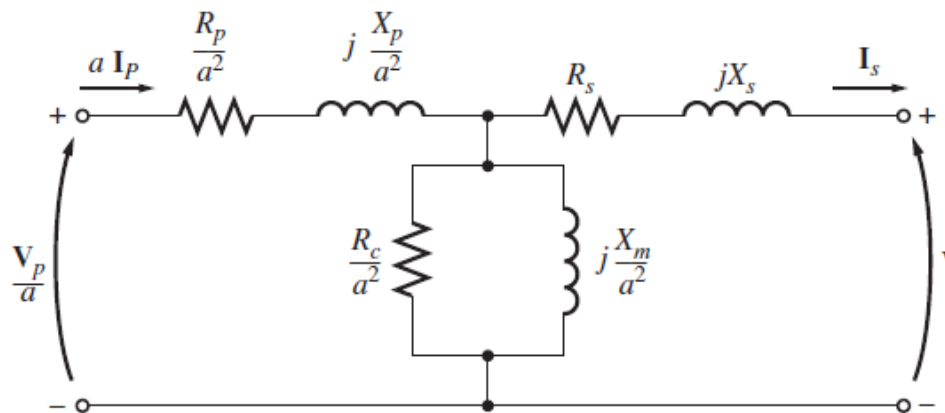


Figura 16. Modelo del transformador referido a su nivel de voltaje secundario fuente [1]

5.1.15. Modelos aproximados de transformadores.

En ciertas aplicaciones se puede omitir por completo la rama de excitación sin causar graves errores. En estos casos, el circuito equivalente del transformador se reduce a los circuitos simples de las figuras 19,20.

Las figuras 17 y 18 presentan el circuito aproximado del transformador con la rama de excitación presente [1].

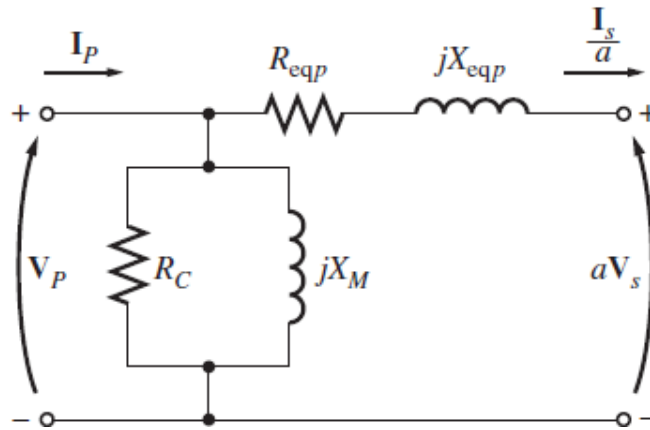


Figura 17. Referido al lado primario fuente [1].

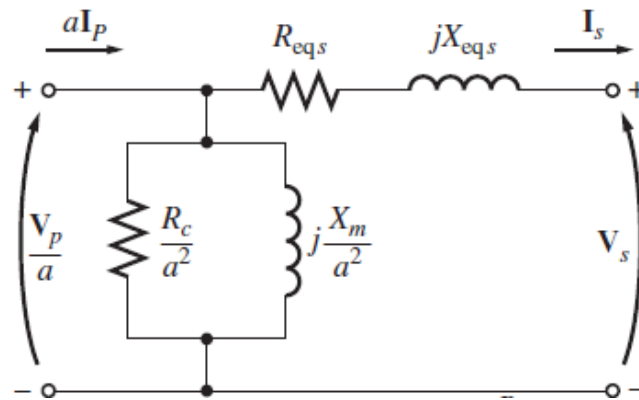


Figura 18. Referido al lado secundario fuente [1].

En las figuras 19 y 20 se presentan el circuito aproximado del transformador sin la rama de excitación presente.

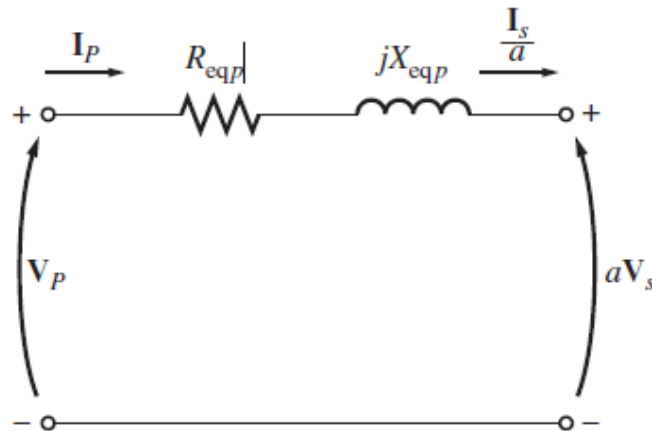


Figura 19 Sin rama de excitación, referido al lado primario fuente [1].

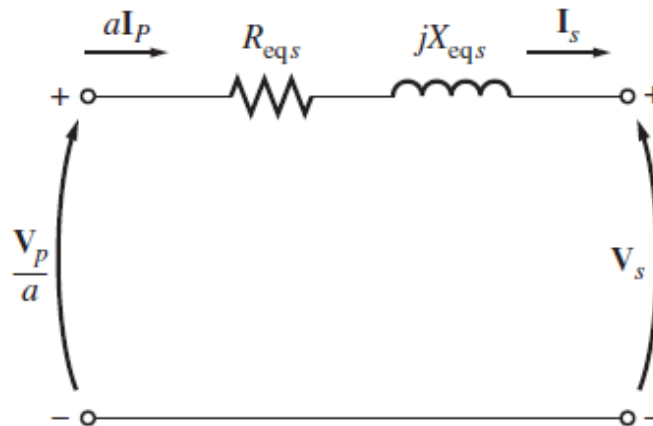


Figura 20. Sin rama de excitación, referido al lado secundario fuente [1].

5.1.16. El autotransformador:

Un autotransformador es simplemente un transformador ordinario que tiene los arrollamientos primario y secundario conectados en serie. Las dos bobinas son alimentadas desde una fuente de tensión mientras que la carga se conecta a una de las bobinas o viceversa. Sus funciones son análogas a las de un transformador, la de transformar (reflejar) tensiones, corrientes e impedancias, los autotransformadores presentan reactancia de dispersión menores, pérdidas mínimas así como corrientes de excitación más pequeñas [21].

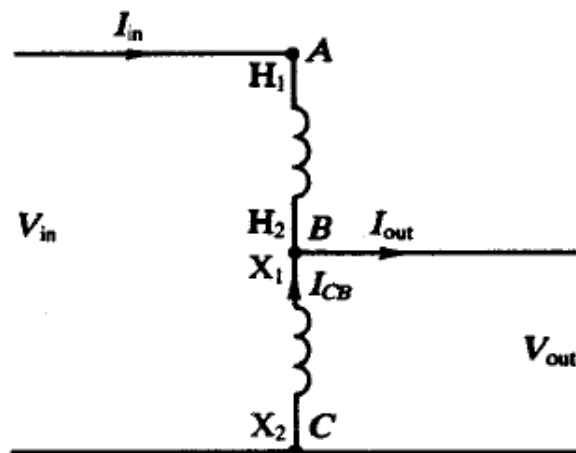


Figura 21. Conexión como un autotransformador fuente [24].

5.1.17. Transformadores de tres devanados.

Los transformadores de tres devanados son en ocasiones utilizados para la interconexión de tres circuitos a diferentes niveles de tensiones, el transformador tridevando se constituye de tres devanados ubicados en cada columna del núcleo magnético. En los modelos de transformadores tridevanado se pueden simplificar en modelos más simples como el modelo

monofásico y evaluar cada devanado, para las pruebas con estos tipos de transformadores se hacen en pares, por lo que las impedancias de la rama de dispersión se determinan a partir de tres ensayos de cortocircuito.

La operación de este tipo de transformadores resulta muy conveniente al alimentar dos cargas de diferentes tensiones con una única tensión de entrada a un devanado. Estos transformadores no poseen una conexión eléctrica entre sus devanados como en el caso del autotransformador. En la figura 22a se muestra esquemáticamente un transformador monofásico de tres devanados que se han designados como primario, secundario y terciario en la figura 22b su circuito equivalente [19].

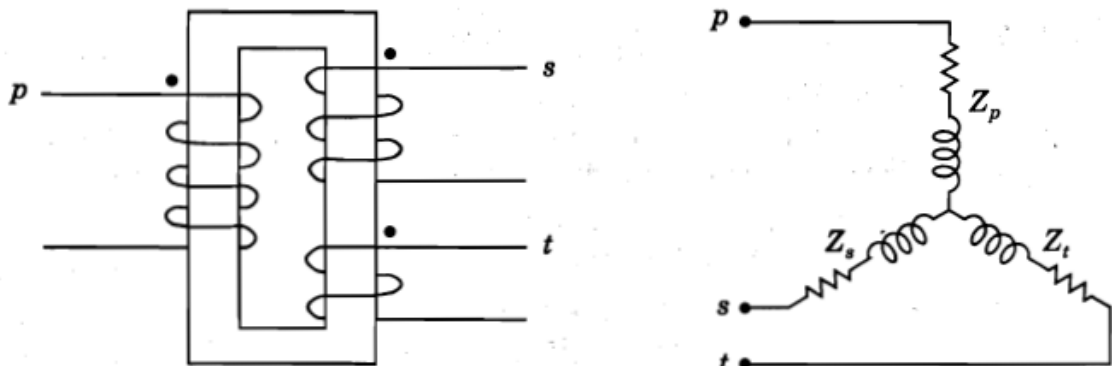


Figura 22 a. Transformador de 3 devanados fuente [17].

b. Circuito equivalente fuente [17].

5.1.18. Pruebas a los transformadores tridevanado:

En el caso del modelo de transformado en estrella, debemos realizar una prueba de corto circuito, de las cuales obtenemos un Z_{ps} que es la impedancia medida en primario con el secundario cortocircuitado y el terciario abierto, un Z_{pt} que es la impedancia medida en primario con el terciario cortocircuitado y el secundario abierto, y finalmente un Z_{st} que es la impedancia medida en secundario con el terciario en corto y el primario abierto [19].

Impedancia las cuales cumplirían las siguientes relaciones:

$$Z_{ps} = Z_p + Z_s \quad (18)$$

$$Z_{pt} = Z_p + Z_t \quad (19)$$

$$Z_{st} = Z_s + Z_t \quad (20)$$

Donde:

Z_p . Impedancia del primario.

Z_s . Impedancia del secundario.

Z_t . Impedancia del terciario.

Y finalmente despejando obtenemos:

$$Z_p = \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \quad (21)$$

$$Z_s = \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \quad (22)$$

$$Z_t = \frac{1}{2}(Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps}) \quad (23)$$

5.1.19. Eficiencia de los transformadores tridevanados:

Para los transformadores de tres devanados el caso de la eficiencia, estos tienen que cumplir con la siguiente relación:

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} * 100 \quad (24)$$

Donde realizando un análisis circuital del modelo en PU vemos que la eficiencia del transformador en cada uno de sus terminares sería igual a:

$$\eta_2 = \frac{V_{2pu} * I_{2p.u}}{V_{2pu} * I_{2p.u} + I_1^2 Z_1 + I_2^2 Z_2} \quad (25)$$

Para el segundo devanado, y para el tercer devanado tendríamos:

$$\eta_3 = \frac{V_{3pu} * I_{3p.u}}{V_{3pu} * I_{3p.u} + I_1^2 Z_1 + I_3^2 Z_3} \quad (26)$$

5.1.20. Conexiones de transformadores trifásicos:

1. Ye-ye (Y-Y)
2. Ye-delta (Y- Δ)
3. Delta-ye (Δ -Y)

4. Delta-delta (Δ - Δ)

5.1.21. Conexión Y-Y (Y-Y):

La conexión ye-ye es empleada más que todo cuando se desea disponer de neutro en baja tensión y cuando no se prevean grandes corrientes de desequilibrio (fase-neutro) como se muestra en la figura 23. Esta es muy útil para transformadores con potencias pequeñas o moderadas a tensiones elevadas [21].

Por lo tanto la relación de voltaje en el transformador es:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = a \quad (27)$$

Ecuación 16 relación de voltaje Y-Y

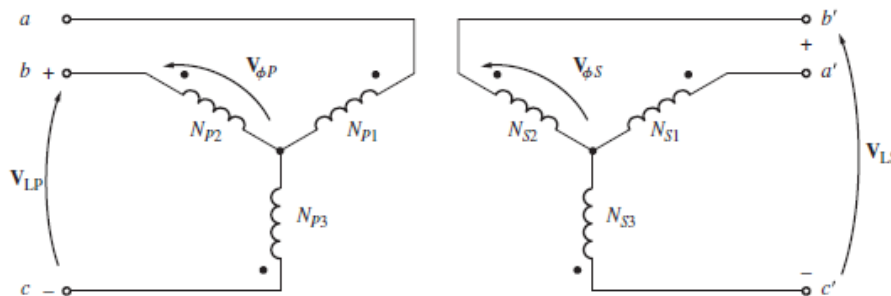


Figura 23. Conexión Y-Y fuente [1].

5.1.22. Conexión Y-DELTA (Y- Δ):

Con este tipo de conexiones se permite adecuar al transformador como un transformador reductor (cuando no se requiere puesta a tierra en el secundario). La conexión Y- Δ no presenta problemas con los componentes en sus voltajes de la tercera armónica, puesto que se consumen en una corriente circulante en el lado Δ . Esta conexión también es más estable con respecto a las cargas desequilibradas, debido que la Δ redistribuye parcialmente cualquier desequilibrio que se presente como se muestra en la figura 24 [21].

Su relación de voltaje estará dada como lo expresa las ecuaciones 17,18.

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{V_{\phi S}} \quad (28)$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \sqrt{3}a \quad (29)$$

Relación entre el voltaje de línea en el lado primario y el voltaje de línea en el lado secundario

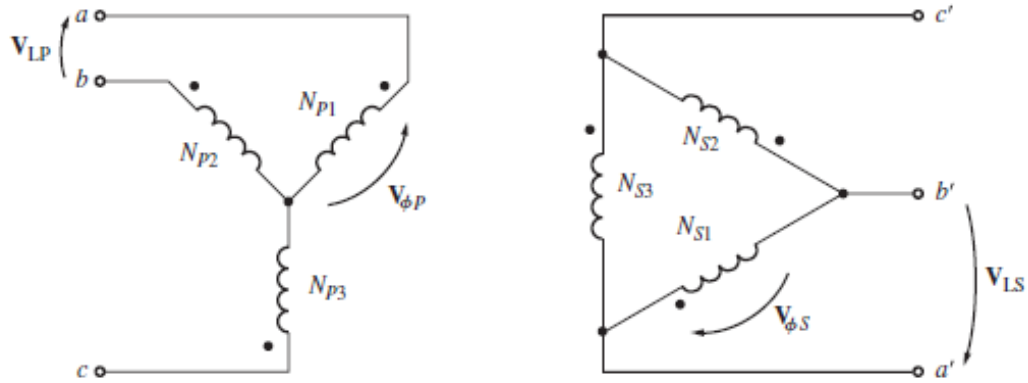


Figura 24. Conexión Ye-delta (Y-Δ): fuente [1].

5.1.23. Conexión DELTA-Y (Δ-Y):

Esta conexión no genera flujos dispersos por el aire en el caso de cargas desequilibradas, no produce terceros armónicos de tensión el cual presenta las mismas ventajas y el mismo desplazamiento de fase que el transformador Y-Δ. La conexión que se muestra en la figura 25 ocasiona que el voltaje secundario esté, como anteriormente, en retraso de 30° con respecto al voltaje primario [1].

Por lo tanto, la relación de voltaje de línea a línea en esta conexión es

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} \quad (30)$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (31)$$

Relación de voltaje

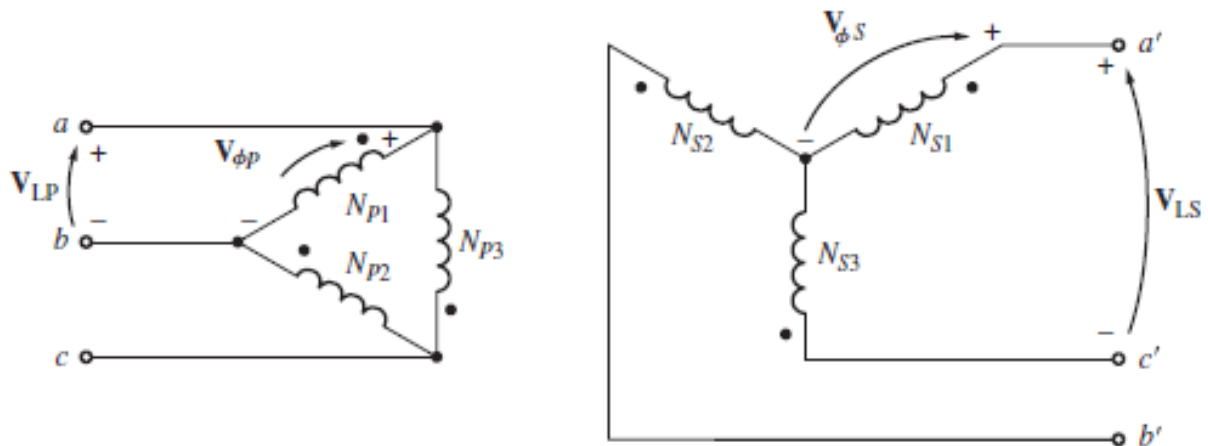


Figura 25. Conexión delta- Ye (Δ-Y): fuente [1].

5.1.24. Conexión DELTA-DELTA (Δ - Δ):

Esta conexión es utilizada en transformadores de B T, ya que se necesitan más espiras/fase de menor sección. Esta conexión se muestra en la figura 26 donde se presenta una muy buena respuesta frente a cargas desequilibradas, una de sus grandes desventajas es la ausencia de neutro. Esta topología puede lograr trabajar al 58% de la potencia asignada trabajando como triángulo abierto en el caso de un banco trifásico con transformadores monofásicos donde hay una unidad averiada y hay que proceder a repararla. Este transformador no tiene un desplazamiento de fase asociado y no tiene problemas con cargas desequilibradas o armónicos [2].

Su relación de voltaje presente es:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a \quad (32)$$

Ecuación 32 relación de voltaje

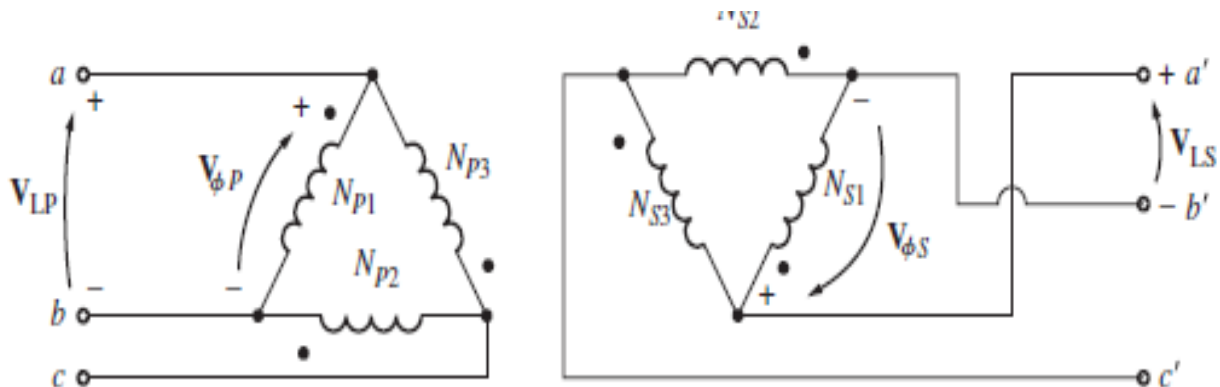


Figura 26. Conexión delta-delta fuente [1].

5.1.25. Conexión Y-Z:

Cabe resaltar que la conexión zig-zag se emplea únicamente en el lado de baja tensión, este montaje se utiliza en redes de distribución, ya que permite el uso de un neutro en el secundario. Se comporta bien frente a desequilibrio de cargas. Debido a la composición de tensión del lado secundario, se requiere un 15% más de espiras que en una conexión en estrella convencional [2].

5.1.26. Conexiones trifásicas utilizando dos transformadores monofásicos:

Se puede resaltar que se ha optado por información de gran validez para entender de la mejor manera los tipos de conexiones y su respectivo funcionamiento al igual que su desempeño de las mismas. Donde se estarán mencionando posteriormente una a una.

Además de las conexiones trifásicas estándar, existen modos de llevar a cabo la transformación trifásica con sólo dos transformadores. Estas técnicas se emplean algunas veces para crear potencia trifásica en ubicaciones en las que no están disponibles las tres líneas de potencia. Más que todo esto se aprecia en áreas rurales, donde la compañía eléctrica a menudo tiende una o dos de las tres fases en una línea de distribución, debido a que las necesidades de potencia en el área no justifican el costo de tender los tres cables. Pero si existe un usuario aislado de potencia trifásica a lo largo de una ruta atendida por una línea de distribución con dos de las tres fases, se puede usar esta técnica para crear potencia trifásica para ese usuario en particular [1].

Cabe mencionar que todas las técnicas de crear potencia trifásica con sólo dos transformadores involucran una reducción de la capacidad de manejo de potencia de los transformadores, pero en algunos casos se justifican en ciertas situaciones económicas [1].

Algunas de las conexiones más importantes con dos transformadores son:

1. Conexión Δ abierta (V-V).
2. Conexión Y abierta- Δ abierta.
3. Conexión Scott-T.
4. Conexión trifásica en T.
5. Transformación trifásica a hexafásica.

5.1.27. Conexión Δ abierta (V-V):

En ciertas situaciones no siempre puede utilizarse un banco de transformadores completo para realizar una transformación trifásica si no que depende de la situación que se presente. Por ejemplo, supóngase que un banco de transformadores Δ - Δ que consta de transformadores separados tiene una fase dañada que se debe retirar para su reparación. Por tanto la situación resultante en que queda el banco se muestra en la figura 27. Donde sí los dos voltajes secundarios que permanecen son. $V_A = V \angle 0^\circ$ y $V_B = V \angle 120^\circ$ V, entonces el voltaje que

pasa a través de la abertura que dejó el tercer transformador está dado por las siguientes expresiones [1].

$$V_C = -V_A - V_B$$

$$V_C = -V \angle 0^\circ - V \angle -120^\circ$$

$$V_C = -V - (-0.5V - j0.866V)$$

$$V_C = -0.5V - j0.866V$$

$$V_C = V \angle 120^\circ V$$

Ecuación. (33)

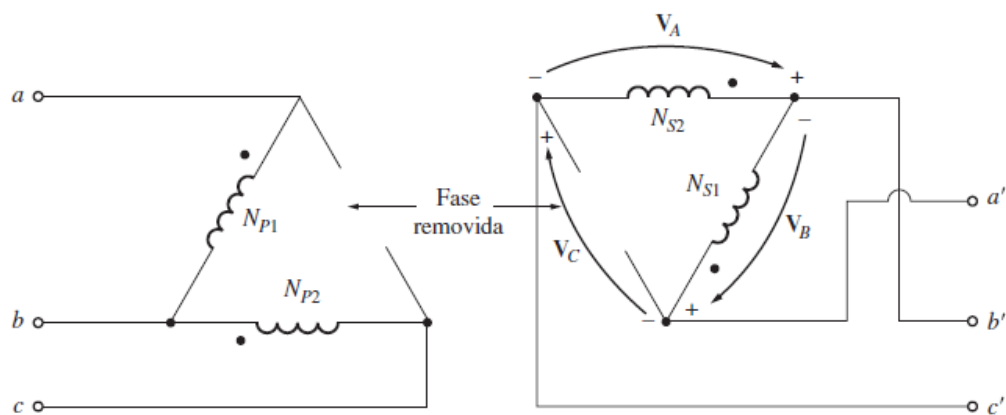


Figura 27. Conexión de un transformador en Δ abierta o V-V. fuente [1].

$$V_A = V \angle 0^\circ$$

$$V_B = V \angle 120^\circ V$$

$$V_A + V_B + V_C = 0 \quad (34)$$

$$V_C = -V_A - V_B$$

$$V_C = V \angle 120^\circ V \quad (35)$$

A la hora de realizar el respectivo despeje se observa que el valor del voltaje V_C en los terminales es el mismo valor si estuviese conectado el tercer transformador.

Normalmente a la fase C se le llama fase fantasma. Debido a que se puede prescindir de ella, esta conexión delta abierta permite que un banco de transformadores siga funcionando con

sólo dos de sus transformadores, lo que permite que fluya cierta potencia aun cuando se haya removido una fase dañada [1].

Es importante resaltar que el banco de transformadores tendrá un déficit de potencia aparente para entregar, ya que se encuentra sin la presencia del tercer transformador. En principio, parece que podría suministrar tan sólo dos tercios de su potencia aparente nominal, debido a que sólo dos tercios de los transformadores están presentes. Sin embargo, no es tan sencillo. En la figura 28a podemos observar lo que sucede cuando se retira un transformador del banco

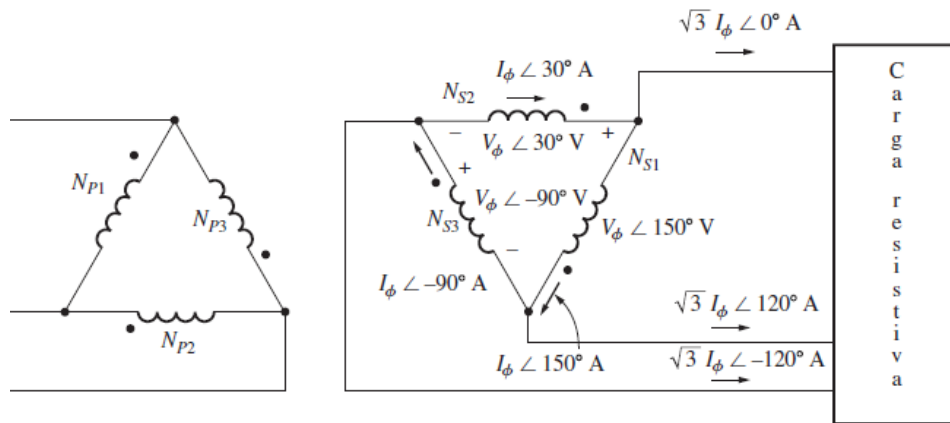


Figura 28 a. Voltajes y corrientes en un banco de transformador Δ-Δ fuente [1].

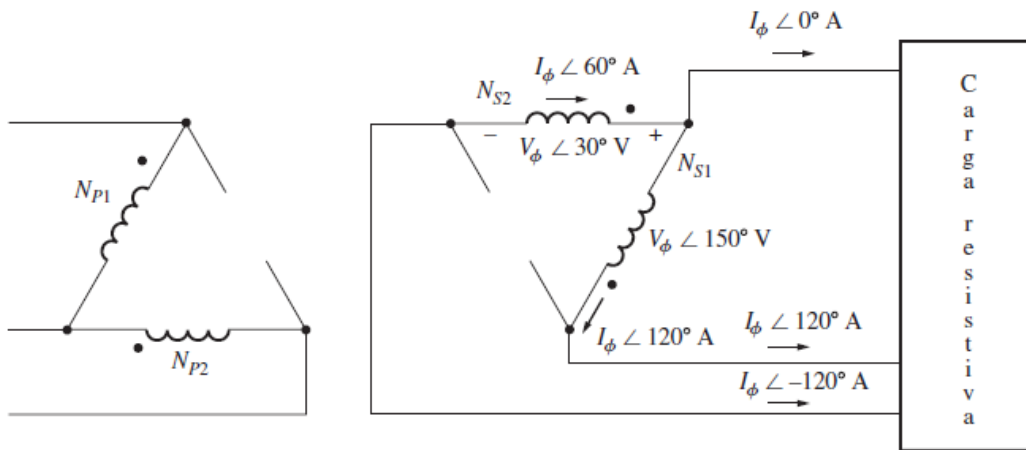


Figura 28 b. Voltajes y corrientes en un banco de transformador Δ abierta fuente [1].

Como se puede observar en la figura 28a donde se muestra el banco de transformadores en operación normal conectado a una carga resistiva. Si el voltaje nominal de un transformador en el banco es V_ϕ y la corriente nominal es I_ϕ , entonces la potencia máxima que puede suministrar a la carga es

$$P = 3V_{\phi}I_{\phi}\cos\phi \quad (36)$$

Ecuación. 36 potencia máxima

Como el ángulo entre el voltaje y la corriente en cada fase es 0° , lo permite decir que la potencia total suministrada por el transformador es.

$$\begin{aligned} P &= 3V_{\phi}I_{\phi}\cos\phi \\ &= 3V_{\phi}I_{\phi} \quad (37) \end{aligned}$$

Ecuación. 37 potencia total suministrada del banco

Por otro lado en la figura 28b se muestra un transformador con delta abierta. Es importante hacer notar los ángulos en los voltajes y corrientes en el banco de este transformador. Debido a que falta una de las fases del transformador, la corriente de línea de transmisión es igual a la corriente de fase en cada transformador y las corrientes y voltajes en el banco del transformador tienen un ángulo que difiere en 30° , es necesario examinar cada uno de los transformadores para determinar la potencia máxima que puede suministrar. El voltaje del transformador 1 tiene un ángulo de 150° y la corriente tiene un ángulo de 120° , por lo que la expresión de la potencia máxima en el transformador 1 se puede expresar de la siguiente forma [1].

$$P_1 = V_{\phi}I_{\phi}\cos(150 - 120)$$

$$P_1 = V_{\phi}I_{\phi}\cos(30)$$

$$P_1 = \frac{\sqrt{3}}{2}V_{\phi}I_{\phi} \quad (38)$$

Ecuación. 38 potencia máxima del transformador 1

En el caso del transformador 2, el voltaje tiene un ángulo de 30° y la corriente tiene un ángulo de 60° , por lo que la potencia máxima es.

$$P_2 = V_{\phi}I_{\phi}\cos(30 - 60)$$

$$P_2 = V_{\phi}I_{\phi}\cos(-30)$$

$$P_2 = \frac{\sqrt{3}}{2}V_{\phi}I_{\phi} \quad (39)$$

Ecuación. 39 potencia máxima del transformador 2

Por lo tanto, la potencia máxima total del banco delta abierta está dada por:

$$P_T = P_1 + P_2 \quad (40)$$

$$P_T = \sqrt{3} * V_{\phi} I_{\phi} \quad (41)$$

Ecuación. Potencia total del banco delta abierta.

Hay que tener en cuenta que no importa si son dos o tres transformadores la corriente nominal es la misma en cada transformador, al igual que el voltaje es el mismo en cada transformador, por lo que la razón entre la potencia de salida disponible del banco delta abierta y la potencia de salida disponible del banco trifásico normal es.

$$\frac{P_{abierta \Delta}}{P_{3fases}} = \frac{\sqrt{3} * V_{\phi} I_{\phi}}{3V_{\phi} I_{\phi}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577 \quad (42)$$

Ecuación. 42 potencia disponible en el banco delta abierta

La potencia disponible que sale del banco delta abierta es sólo 57.7% del valor nominal del banco $\Delta - \Delta$ original.

Este tipo de conexión ocasionalmente se utiliza cuando se desea suministrar una pequeña cantidad de potencia trifásica y mucha potencia monofásica. Ver figura 29.

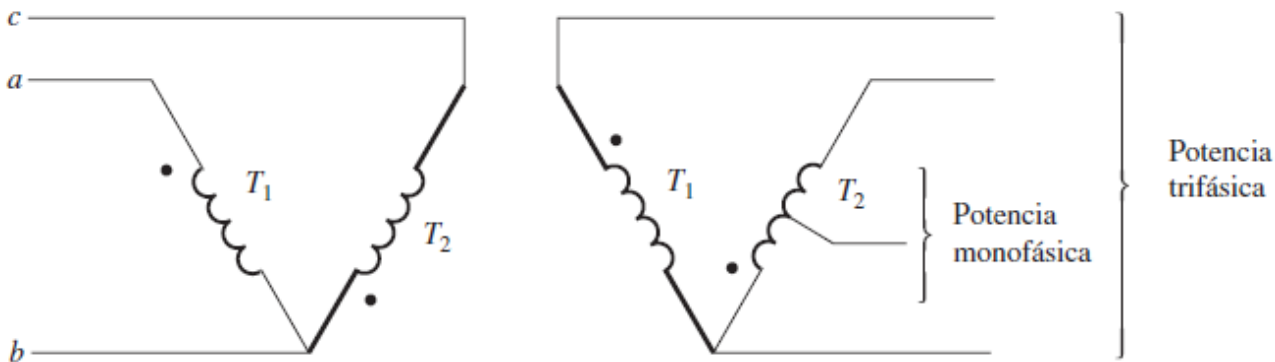


Figura 29. Conexiones de transformador en Δ abierta para suministrar una pequeña cantidad de potencia trifásica y mucha potencia monofásica fuente [1].

5.1.28. Conexión Y -abierta DELTA- abierta:

Esta conexión es muy parecida a la conexión delta abierta excepto en que los voltajes primarios se derivan de dos fases y el neutro, este tipo de conexiones se utilizar para dar

servicio a pequeños clientes comerciales que necesitan servicio trifásico en áreas rurales donde no están disponibles las tres fases. Con esta conexión se logra que un cliente puede obtener el servicio trifásico provisional hasta que la demanda haga necesaria la instalación de la tercera fase. Una de las grandes desventajas que presenta esta conexión es que debe fluir corriente de retorno muy grande en el neutro del circuito primario esta conexión se muestra en las figuras 30 y 31 [1].

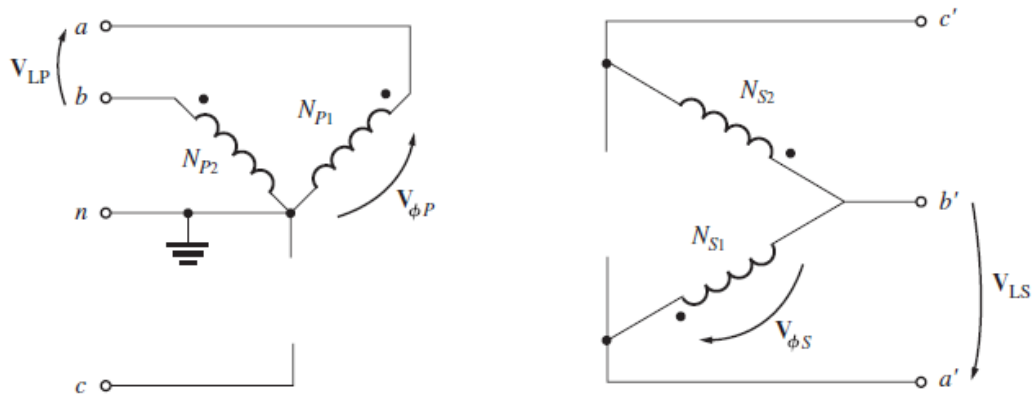


Figura 30. Conexión Y abierta- Δ abierta fuente [1].

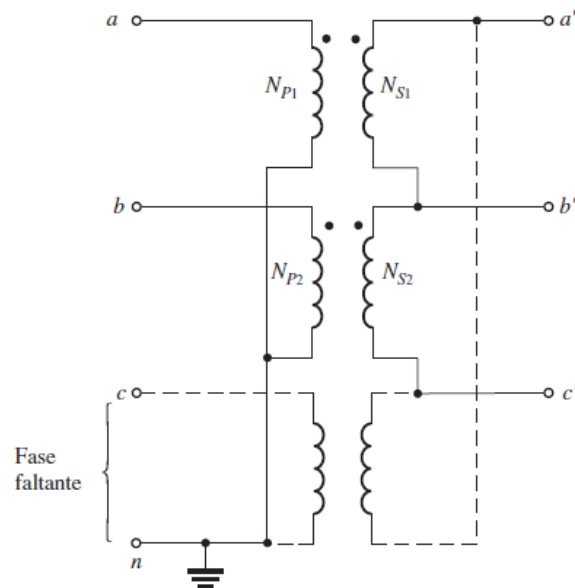


Figura 31. Diagrama de conexión del transformador Y abierta-Δ abierta. Fuente [1].

Este tipo de conexiones presenta características similares a la conexión delta abierta por ende sus pérdidas van a ser iguales que la de delta abierta. Donde solo se puede utilizar el 0.577 de la potencia del banco completo.

5.1.29. Transformación trifásica a Hexafásica:

Un sistema hexafásico consiste en seis tensiones desfasadas entre sí 60° . Existen varios procedimientos para obtener un sistema hexafásico a partir de un esquema trifásico como el que se puede observar en la figura 32 que es uno de los más utilizados. Este tipo de transformadores se utiliza en instalaciones rectificadoras para convertir la c.a. de una red de distribución de energía eléctrica en c.c. ya que tienen la ventaja de que al aumentar el número de fases se reduce el número de armónicos [2].

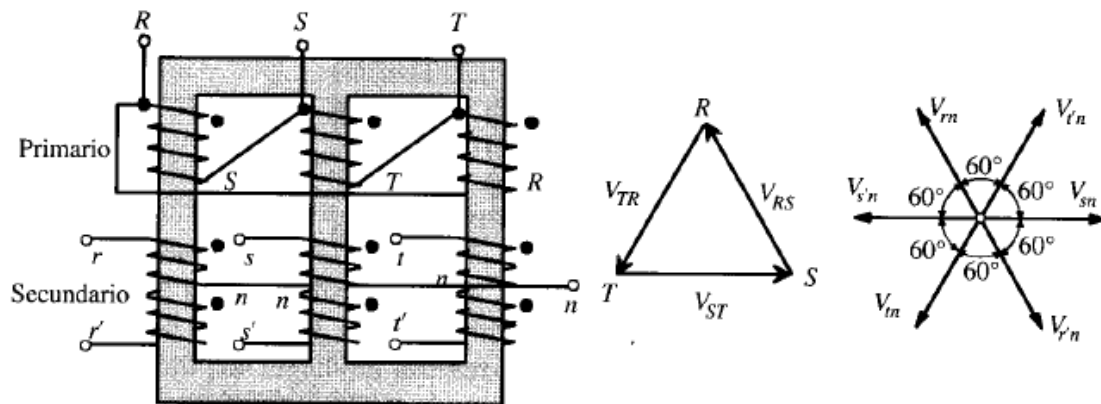


Figura 32 Transformación trifásica a hexafásica fuente [2].

a) Devanado del transformador

b) Diagrama fasorial de tensiones

5.2. Marco legal.

5.2.1. Normas Colombianas para los transformadores.

ICONTEC es el ente encargado de publicar los artículos de la norma que contemplan lo relacionado con los transformadores.

- **NTC 471. Relación de transformación. Verificación de la polaridad y relación de fase (1999):** Esta norma establece la forma de efectuar la medición de la relación de transformación, verificación de la polaridad y relación de fase (desplazamiento angular secuencia) en los transformadores de distribución y potencia.
- **NTC 1031. Ensayos para la determinación de pérdidas y corriente sin carga (09-231998):** Esta norma establece los ensayos a los cuales se deben someter los transformadores, para determinar sus pérdidas y corriente sin carga.

- **NTC 1005. Transformadores. Determinación de la tensión de cortocircuito y pérdidas con carga (19-12-2003):** Esta norma establece los métodos de ensayo para determinar la tensión de cortocircuito y las pérdidas con carga en transformadores.
- **NTC 837. Ensayo del dieléctrico (09-171997):** Esta norma establece los ensayos para determinar el nivel de aislamiento en los transformadores de potencia, de tipo seco y sumergido en líquido refrigerante.
- **NTC 735. Medida de la resistencia de los devanados.** Esta norma establece la forma de efectuar la medida de la resistencia de los devanados en los transformadores de distribución y de potencia.
- **NTC 618 .Transformadores eléctricos. Placa de características (09-15-1999):** Esta norma especifica la información que debe aparecer en la placa de características de los transformadores de potencia y distribución.
- **NTC 737. Transformadores especificaciones de devanados y sus características (15-12-200):** Esta norma establece la manera como se deben especificar las derivaciones de los transformadores de distribución y potencia. Esta norma aplica a transformadores en los que al menos uno de los devanados tiene derivaciones.
- **NTC 818. Transformadores monofásicos autorrefrigerados y sumergidos en líquido. Corriente sin carga, perdidas y tensión de corto circuito (29-11-1995):** Esta norma establece los valores máximos declarados, admisibles, de corriente sin carga (I_0), pérdidas sin cargas (P_0), pérdidas con cargas (P_c), y tensión de cortocircuito refrigeradas a 85°C (V_z), para transformadores monofásicos autorrefrigerados y sumergidos en líquido refrigerante.
- **NTC-IEC 60529. Grados de protección dados por encerramientos de equipo eléctrico (16-10-2013):** Esta norma se aplica a la clasificación de grados de protección provistos por encerramientos de equipo eléctrico con una tensión nominal que no exceda a 72,5 kV.
- **NTC 819. Transformadores trifásicos autorrefrigerados y sumergidos en líquido. corriente sin carga, pérdidas y tensión de cortocircuito (29-11-1995):** Esta norma establece los valores máximos declarados admisibles de corriente sin carga (I_0), pérdidas sin carga (P_0), pérdidas con carga (P_c) y tensión de cortocircuito,

a 85 °C (Vz), para transformadores trifásicos autorrefrigerados y sumergidos en líquido refrigerante.

- **NTC 3654. Transformadores de potencia tipo seco (19-12-2003):** Esta norma se aplica a transformadores de potencia tipo seco (incluyendo autotransformadores) con valores máximos de tensión para el equipo de hasta 36 kV (inclusive). No están cobijados, los transformadores pequeños y especiales de tipo seco como se enuncian algunos a continuación. Transformadores monofásicos menores de 1 kVA y polifásicos menores de 5 kVA. Transformadores de instrumentación cobijados por la norma IEC 185: Transformadores de Corriente y la norma IEC 186: Transformadores de tensión.
- **NTC 3445. Transformadores trifásicos autorrefrigerados, tipo seco abierto y encapsulado en resina. corriente sin carga, pérdidas y tensión de cortocircuito (26-03.2008):** Esta norma establece los valores máximos declarados permisibles de corriente sin carga (I_o), pérdidas sin carga (P_o), pérdidas totales (P_t) y tensión de cortocircuito V_z , para transformadores trifásicos autorrefrigerados, tipo seco abiertos y encapsulados en resina. Se aplica a transformadores de 15 kVA a 2 000 kVA, serie AT ≤ 15 kV, serie BT $\leq 1,2$ kV; de 10 kVA a 1 000 kVA, serie AT $\leq 1,2$ kV, serie BT $\leq 1,2$ kV.
- **NTC 380. Transformadores eléctricos. Ensayos eléctricos. Generalidades (26-01-2001):** Esta norma establece los ensayos a los que deben someterse los transformadores de distribución y potencia.

5.2.2. Normas internacionales para el transformador.

Las Normas internacionales que se tuvieron en cuenta para la elaboración de los cálculos y el diseño de los transformadores fueron IEEE C57 y la norma europea de la International Electrotechnical Commission – IEC. Donde los estándares más relevantes son los siguientes.

✓ IEEE. C57.12

- **Std C57.12.01-1998. Requisitos generales para transformadores de distribución tipo seco:** Esta norma está indica una base para el establecimiento de rendimiento, intercambiabilidad seguridad y requisitos del equipo descrito y para la selección adecuada de dicho equipo. Requisitos eléctricos, mecánicos y de seguridad de la

distribución de tipo seco ventilado, no ventilado y sellado y transformadores de potencia o autotransformadores (monofásicos y polifásicos, con una tensión de 601 V o superior en el bobinado de mayor tensión).

- **Std C57.12.01-2015 (revisión 2005). Requisitos generales en transformadores de distribución de tipo seco y de potencia:** Esta norma describe los requisitos eléctricos y mecánicos de ventilación simple y polifásica, sin ventilación, y transformadores o transformadores de potencia de tipo seco sellados o autotransformadores, con un voltaje de 601 V o más en el devanado de mayor voltaje. Esta norma se aplica a todos los transformadores de tipo seco, incluyendo aquellos con devanados sólidos y / o encapsulados en resina.
- **Std C57.12.90-1999. Código de prueba para transformadores de distribución, potencia y transformadores de regulación sumergidos en líquido.** Esta norma es aplicable a los transformadores de distribución, potencia y regulación sumergidos en líquido. Está destinada para su uso como una base para el rendimiento, la seguridad y la prueba adecuada de dichos transformadores. Esta norma se aplica a todos los transformadores sumergidos en líquido, excepto los transformadores de medida, voltaje de paso y Reguladores de tensión de inducción, transformadores de horno de arco, transformadores rectificadores, transformadores especiales, puesta a tierra y transformadores de minas
- **Std C57.12.80-2002 (revisión 1978). Terminología para transformadores de potencia y distribución.** Esta norma es una compilación de terminología y definiciones relacionadas principalmente con la energía eléctrica y transformadores de distribución y aparatos asociados. También incluye datos similares relacionados con los sistemas de energía y el aislamiento que comúnmente está involucrado en la tecnología de transformadores.
- ✓ **IEC 60076.**
- **IEC 60076-1. Transformadores de potencia generalidades (04-2000):** Esta parte de la norma internacional IEC 60076 se aplica a la alimentación trifásica y monofásica de transformadores (incluidos los autotransformadores), con la excepción de ciertas categorías de pequeños transformadores especiales tales como:

Transformadores monofásicos con potencia nominal inferior a 1 kVA y transformadores trifásicos menos de 5 kVA.

- **IEC 60076-2. Elevación de temperatura de transformadores sumergidos en líquido (02-2011):** Esta parte de la norma IEC 60076 se aplica a transformadores sumergidos en líquido, identifica transformadores de energía según sus métodos de refrigeración, define los límites de elevación de temperatura y provee métodos para los ensayos de elevación de temperatura.
- **IEC 60076-3. Niveles de aislamiento, ensayos dieléctricos y distancias de aislamiento en el aire (03-2000):** Esta norma es aplicable a transformadores monofásicos y trifásicos sumergidos en aceite (incluyendo autotransformadores), a excepción de ciertos transformadores pequeños y especiales, definidos en el ámbito de la Norma CEI 60076-1. Identifica los arrollamientos del transformador por la tensión más elevada para el material V_m asociada con sus correspondientes niveles asignados de aislamiento, y detalla los ensayos dieléctricos de interés aplicables y las distancias mínimas de aislamiento en el aire entre partes activas de aisladores pasantes (pasatapas o bornes) y a otras partes a potencial de tierra.
- **IEC 60076-5. Aptitud para soportar cortocircuitos (07-2000):** Esta parte de la Norma CEI 60076 define los requisitos para que los transformadores de potencia soporten sin daño los efectos de sobreintensidades originados por cortocircuitos externos. Describe los procedimientos de cálculo utilizados para demostrar la aptitud térmica de un transformador de potencia para soportar tales sobreintensidades así como el ensayo especial y el método de cálculo utilizados para demostrar su aptitud para soportar los efectos dinámicos inherentes. Los requisitos se aplican a los transformadores definidos en el objeto y campo de aplicación de la Norma CEI 60076-1.
- **IEC 60076-7. Guía de carga para transformadores de potencia sumergidos en aceites (12-2010):** Esta parte de la Norma IEC 60076 se aplica a los transformadores sumergidos en aceite. Describe el efecto del funcionamiento bajo diversas temperaturas ambiente y condiciones de carga durante la vida del transformador.
- **IEC 60076-10. Determinación de niveles de sonido (05-2001):** Esta parte de la norma IEC 60076 define la presión sonora y los métodos de medición de la intensidad

del sonido mediante qué niveles de potencia sonora de transformadores, reactores y sus auxiliares de refrigeración asociados puede ser determinado.

- **IEC 60076-10-1. Determinación de niveles de sonido- guía de aplicación (10-2005):** Esta parte de IEC 60076 proporciona información de apoyo para ayudar a los fabricantes y los compradores aplicar las técnicas de medición descritas en IEC 60076-10.
- **IEC 60076-11. Transformadores de tipo seco (05-2004):** Esta parte de la Norma IEC 60076 se aplica a los transformadores de potencia de tipo seco (incluyendo los autotransformadores), cuya tensión más elevada para el material es inferior o igual a 36 kV y funcionando al menos un arrollamiento a una tensión mayor de 1,1 kV.
- **IEC 60076-12. Guía de carga para transformadores de potencia de tipo seco (11-2008):** Esta parte de norma IEC 60076 es aplicable a los transformadores de tipo seco de acuerdo con el alcance de IEC 60076-11. Proporciona los medios para estimar la tasa de envejecimiento y el consumo de por vida del aislamiento del transformador en función de la temperatura de funcionamiento, el tiempo y la carga del transformador.

6. Diseño y Construcción De Los Transformadores Monofásicos Para El Módulo Didáctico.

6.1. Cálculo para el diseño de los transformadores.

En esta instancia se presentan los valores nominales mediante los cuales se diseña cada transformador. Los valores del devanado primario se muestran en la figura siguiente con un voltaje de 120 V y una potencia aparente de 1800VA

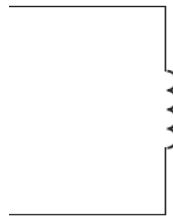


Figura 33. Devanado primario del transformador fuente [1].

Para el devanado secundario del transformador se diseñara con una potencia de 900 VA y con un voltaje de 115 V.

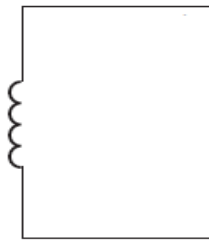


Figura 34. Devanado secundario del transformador fuente [1].

De igual manera que el devanado secundario el terciario de cada transformador se e diseña con un voltaje de 115 V a una potencia aparente de 900 VA.

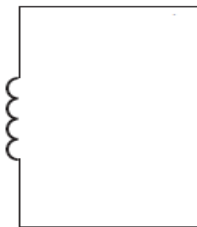


Figura 35. Devanado terciario del transformador fuente [1].

Luego de conocer los parámetros de tensión y potencia se procede a calcular y diseñar cada uno de los transformadores.

6.2. Voltajes de diseño del transformador.

Cada transformador se diseña con los siguientes niveles de tensión:

$$V_{pri\phi}=120V$$

$$V_{sec\phi}=115V$$

$$V_{ter\phi}=115V$$

6.2.1. Sección del núcleo.

Para la construcción de cada uno de los transformadores se tiene en cuenta un área cuyo núcleo confiere $44,8 \text{ cm}^2$. La siguiente figura ilustra el área del núcleo.

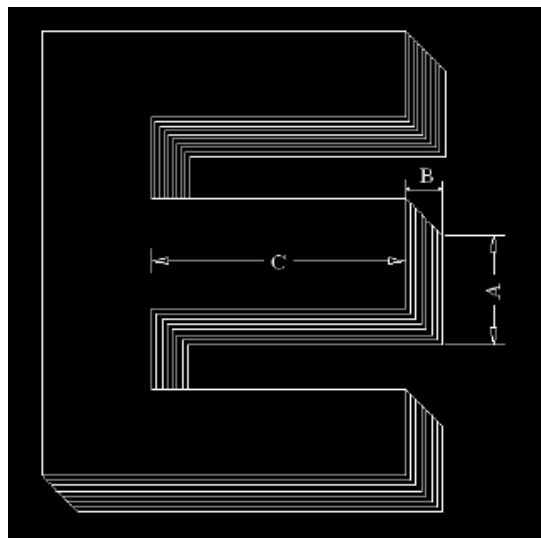


Figura 36. Núcleo del transformador fuente [4].

A continuación se dan a conocer las mediciones de las chapas ferromagnéticas con las cuales se realiza el núcleo de los transformadores.

$$A = 6.4 \text{ cm}$$

$$B = 7 \text{ cm}$$

$$C = 9,6 \text{ cm}$$

$$A_{nuc} = A * B$$

$$A_{nuc} = 6,4 * 7$$

$$A_{nuc} = 44,8 \text{ cm}^2$$

6.2.2. Cálculo del número de espiras por devanados.

En esta instancia se tiene en cuenta la siguiente relación, mediante la cual se efectúa el cálculo del número de espiras por devanado.

$$n_{esp}^{\circ} = \frac{V * 10^4}{k_f * f * \beta * A_{nuc}}$$

Donde:

k_f = Coeficiente de forma de onda.

$k_f = 4.0$. Para onda cuadrada.

$k_f = 4,44$. Para onda sinusoidal.

A_{nuc} = Área del núcleo.

f . =Frecuencia.

β . =Densidad de flujo.

$$n_{esp1}^{\circ} = \frac{120 * 10^4}{4,44 * 60 * 1 * 44,8} = 100,546 \cong 101v$$

$$n_{esp2}^{\circ} = \frac{115 * 10^4}{4,44 * 60 * 1 * 44,8} = 96,357 \cong 97 \text{ vel}$$

Número de espiras para la derivación en el devanado secundario con un voltaje de fase de 66.4 V.

$$n_{derivación2}^{\circ} = \frac{66.4 * 10^4}{4,44 * 60 * 1 * 44,8} = 55,6359 \cong 56 \text{ vel}$$

$$n_{esp3}^{\circ} = \frac{115 * 10^4}{4,44 * 60 * 1 * 44,8} = 96,357 \cong 97 \text{ vel}$$

Número de espiras para la derivación en el devanado terciario con un voltaje de fase de 66 V.

$$n_{derivación3}^{\circ} = \frac{66 * 10^4}{4,44 * 60 * 1 * 44,8} = 55,3 \cong 56 \text{ vel.}$$

Tabla 1. Número de vueltas por devanados.

	Primario	Secundario	Terciario
# vueltas	101	97	97
# vueltas por derivación		56	56

Fuente autor.

6.2.3. Sección del conductor.

La correcta selección del tipo y calibre de los conductores aumentan el rendimiento y la fiabilidad del sistema, lo cual permite eficiencia en la operación de los sistemas de transformación.

$$I_p = \frac{S}{v_1}$$

$$I_p = \frac{1800}{120} = 15A \text{ -----> calibre \# 13}$$

$$I_s = \frac{900}{115} = 7,826A \text{ -----> calibre \# 14}$$

$$I_t = \frac{900}{115} = 7,826A \text{ -----> calibre \# 14}$$

6.2.4. Cálculo de las protecciones del transformador.

En esta instancia se tiene en cuenta la corriente nominal de los devanados primario, secundario y terciario de cada transformador conforme a lo que establece la NTC 2050. En este sentido las corrientes se dimensionan no más de un 125% para la selección de los fusibles.: Primario = $15A * 1.25 = 18,75$.

Se selecciona un fusible de 20 A.

Para los lados secundario y terciario $7,826A * 1.25 = 9,785A$.

Para ellos se selecciona un fusible de 15 A.

6.3. Cálculos teóricos teniendo en cuenta las diferentes conexiones en un transformador.

6.3.1. Voltajes de diseño del transformador para la obtención de los valores teóricos.

Cada transformador tiene un voltaje en sus devanados de:

$$V_{pri\phi}=120V$$

$$V_{sec\phi}=115V$$

$$V_{ter\phi}=115V$$

6.3.2. Conexión del transformador en Δ -Y.

Consiste en hacer una conexión trifásica partiendo de un banco de transformadores monofásicos de tres devanados. Estos son secundarios y terciarios y se unen en serie para formar un solo devanado que toma el nombre de secundario, de esta manera se realizan dichas conexiones. Así lo constata la siguiente figura 37.

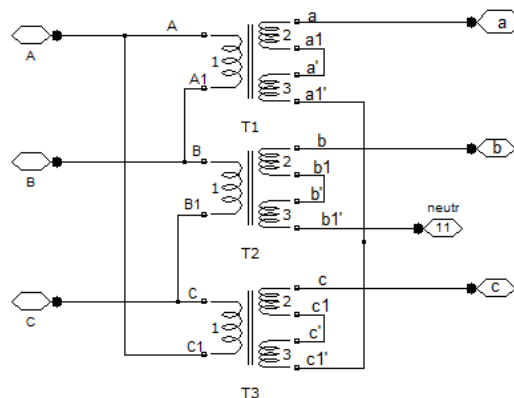


Figura 37. Conexión Δ -Y fuente autor.

Con los siguientes niveles de tensión se estarán realizando los cálculos para la anterior conexión:

$$V_{LP} = V_{\phi P} = 120V.$$

$$V_{LS} = \sqrt{3} * 230V = 398,371V.$$

Niveles de corrientes para la anterior conexión:

$$I_{LP} = \sqrt{3} * 15A = 25,98A$$

$$I_{LS} = I_{\phi} = 7,826A$$

Potencia.

$$S = 3 * V_{\phi} * I_{\phi} = 5399.94 VA$$

Tabla 2. Valores teóricos conexión Δ -Y.

Conexión	$V_{LP}(V)$	$V_{\phi P}(V)$	$V_{LS}(V)$	$V_{\phi S}(V)$	$I_{LP}(A)$	$I_{LS}(A)$	S(VA)
Δ -Y	120	120	398,371	230	25,98	7,826	5399,94

Fuente autor.

6.3.3. Conexión del transformador en $\Delta - \Delta$.

El procedimiento en esta instancia es similar al inmediatamente anterior, dado que consiste en conectar los devanados secundarios y terciarios para obtener un solo devanado como lo evidencia la siguiente imagen. Figura 38.

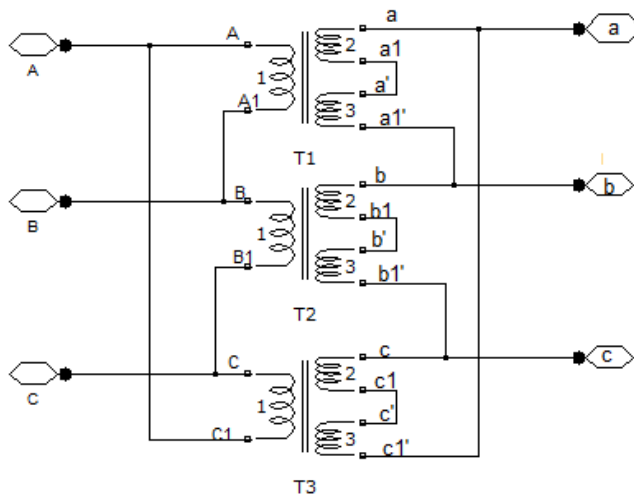


Figura 38. Conexión Δ - Δ fuente autor.

Los valores teóricos para la conexión de la figura 38 se presentan a continuación.

Niveles de tensión para la anterior conexión:

$$V_{IP} = V_{\phi P} = 120V$$

$$V_{IS} = V_{\phi S} = 230V$$

Niveles de corrientes para la anterior conexión:

$$I_{IP} = \sqrt{3} * 15A = 25,98A$$

$$I_{IS} = \sqrt{3} * 7,826A = 13,555A$$

Potencia.

$$S = \sqrt{3} * V_l * I_l = 5399,93 \text{ V}$$

Tabla 3. Valores teóricos conexión Δ - Δ .

Conexión	$V_{IP}(V)$	$V_{\phi P}(V)$	$V_{IS}(V)$	$V_{\phi S}(V)$	$I_{IP}(A)$	$I_{IS}(A)$	S(VA)
Δ - Δ	120	120	230	230	25,98	13,555	5399,93

Fuente autor.

6.3.4. Conexión del transformador en Y- Δ .

Al igual que en la conexión anterior en la figura 39 se interconectan los devanados secundarios para la determinación de los valores teóricos.

Para la conexión de la figura 39 se realizan los cálculos teóricos con los siguientes valores de tensión y corrientes:

$$V_{Ip} = \sqrt{3} * 120 = 207,846V$$

$$V_{IS} = V_{\phi S} = 230V$$

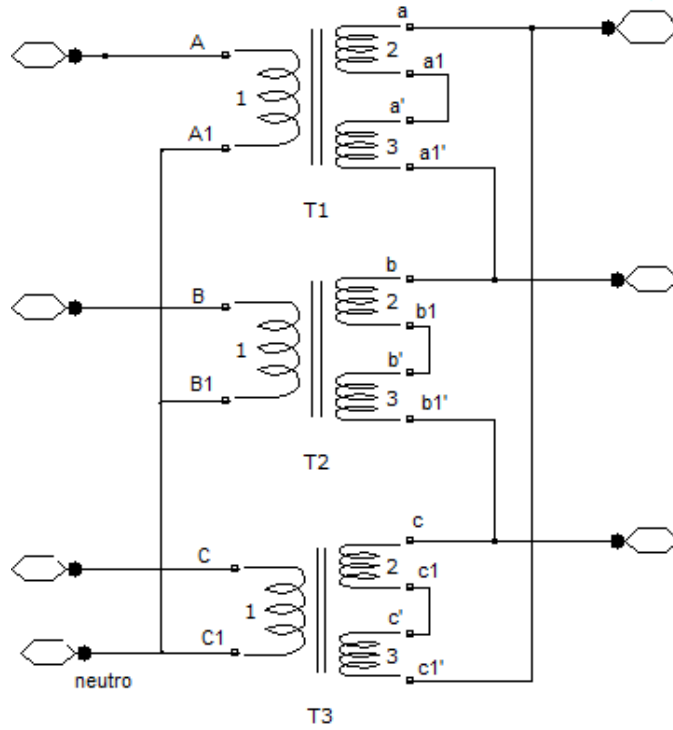


Figura 39. Conexión Y-Δ fuente autor.

Niveles de corrientes:

$$I_{IP} = I_{\phi p} = 15A$$

$$I_{IS} = \sqrt{3} * 7,826A = 13,555A$$

Potencia.

$$S = \sqrt{3} * V_l * I_l = 5399,93 VA$$

Tabla 4. Valores teóricos conexión Y-Δ.

Conexión	$V_{IP}(V)$	$V_{\phi p}(V)$	$V_{IS}(V)$	$V_{\phi S}(V)$	$I_{IP}(A)$	$I_{IS}(A)$	S(VA)
	208	120	230	230	15	13,555	5399,93

Fuente autor.

6.3.5. Conexión del transformador en Y-Y.

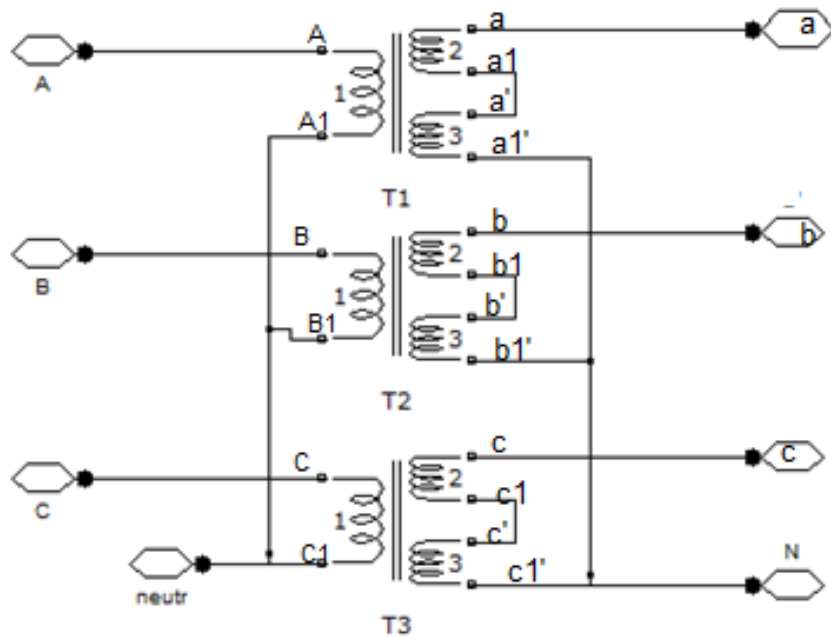


Figura 40. Conexión Y-Y fuente autor.

Al igual que en la anterior conexión, para ese caso se interconectan los devanados secundarios en aras de determinar de los valores teóricos. Ver figura 40.

Determinación de los niveles de tensión para la configuración de la figura 40:

$$V_{lp} = \sqrt{3} * 120 = 207,846V$$

$$V_{ls} = \sqrt{3} * 230V = 398,371V$$

Determinación de los niveles de intensidad para la configuración de la figura 40.

$$I_{lp} = I_{\phi p} = 15A$$

$$I_{ls} = I_{\phi s} = 7,826A$$

Calculo de la potencia aparente para la anterior conexión.

$$S = \sqrt{3} * V_l * I_l = 5399,930 VA$$

Tabla 5. Valores teóricos conexión Y-Y.

Conexión	V_{lP} (V)	$V_{\phi P}$ (V)	V_{lS} (V)	$V_{\phi S}$ (V)	I_{lP} (A)	I_{lS} (A)	S(VA)
Y-Y	208	120	398,371	230	15	7,826	5399,930

Fuente autor.

6.3.6. Conexión Δ abierta (V-V):

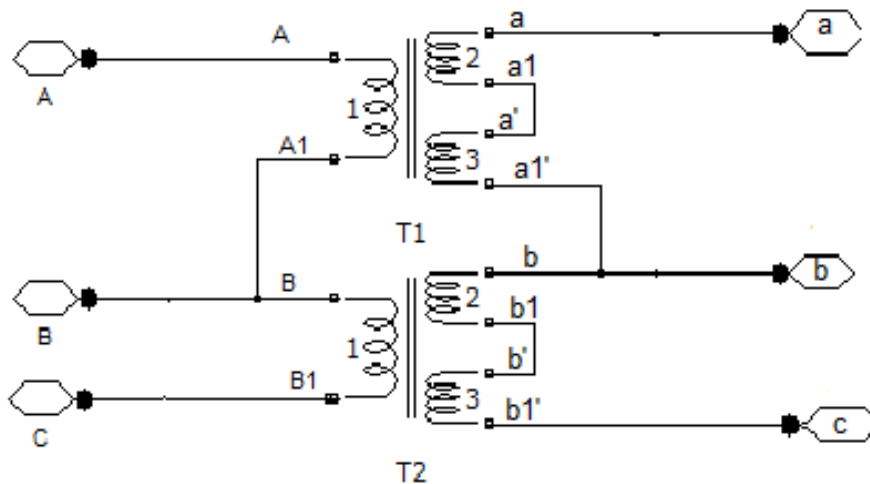


Figura 41. Conexión V-V fuente autor.

Para esta conexión se parte de un banco de transformadores monofásicos incompletos en pro de realizar un arreglo trifásico, donde se encuentra una fase abierta ya sea por mantenimiento o por daños en la misma, para un banco que normalmente es delta –delta ver figura 41.

En una conexión Δ - Δ normal los voltajes en líneas y fases son los mismos.

$$V_{\phi P} = 120V$$

$$V_{\phi S} = 230 V$$

Potencia.

$$P_{T1P} = \frac{\sqrt{3}}{2} * V_L * I_L$$

Como el desfase que existe entre la corriente y el voltaje es de 30° de ahí que el coseno del ángulo el valor del $\frac{\sqrt{3}}{2}$ al igual que la potencia para el transformador secundario

$$P_{T2P} = \frac{\sqrt{3}}{2} * V_L * I_L$$

$$P_{TP} = 2 * \frac{\sqrt{3}}{2} * V_L * I_L$$

$$P_T = \sqrt{3} * V_L * I_L = 3117,69 W$$

$$I_{LS} = \frac{3117,69}{\sqrt{3} * 230} = 7,826 A$$

Tabla 6. Valores teóricos conexión V-V.

Conexión	$V_{\phi P}$ (V)	$V_{\phi S}$ (V)	I_{LS} (A)	P(W)
V-V	120	230	7,826	3117,69

Fuente autor.

6.3.7. Conexión Y- abierta DELTA- abierta:

Con este tipo de conexiones se alimentan cargas trifásicas a partir de dos fases, procedimiento que se evidencia en la figura 42.

Voltajes.

$$V_{LP} = \sqrt{3} * 120 = 207,846$$

$$V_{LS} = V_{\phi S} = 230V$$

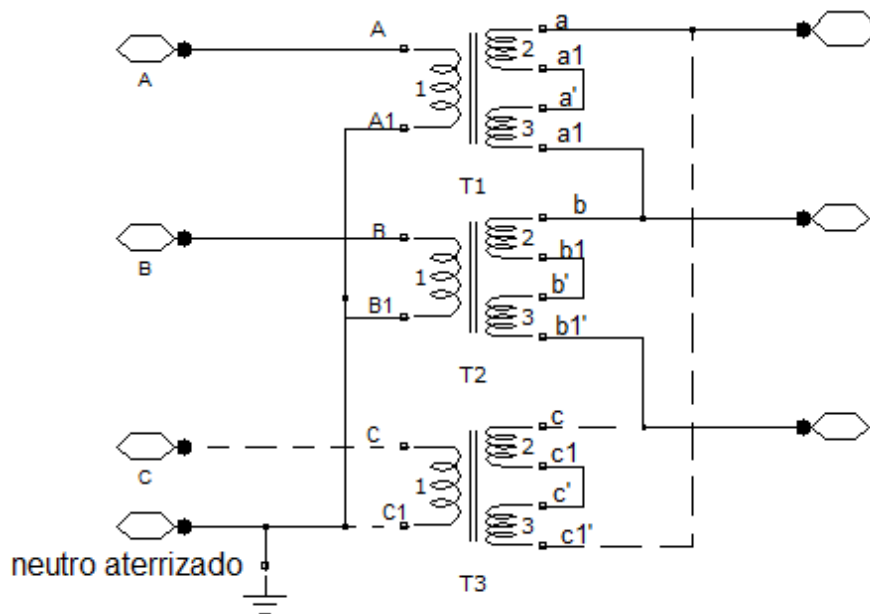


Figura 42. Conexión Y abierta -Δ abierta fuente autor.

La potencia para esta conexión se evidencia a continuación

$$S = 5400 * 0577 = 3115,8 = P$$

$$I_{LP} = I_{\phi P} = \frac{3115,8}{207,846} = 14,99A \cong 15A$$

$$I_{LS} = I_{\phi S} = \frac{3115,8}{230} = 13,546A$$

Tabla 7. Valores teóricos conexión Y Ab - Δ Ab.

Conexión	$V_{LP}(V)$	$V_{\phi P}(V)$	$V_{LS}(V)$	$V_{\phi S}(V)$	$I_{LP}(A)$	$I_{LS}(A)$	P(W)
Y Ab - Δ Ab	208	120	398,371	230	15	13,546	3115,8

Fuente autor.

6.3.8. Conexión del transformador en Y-Y-Δ

En la figura 43 se puede apreciar la conexión Y-Y-Δ para un transformador de tres devanados con sus respectivas indicaciones de conexión, lo que permite una comprensión factible en cuanto a la conexión.

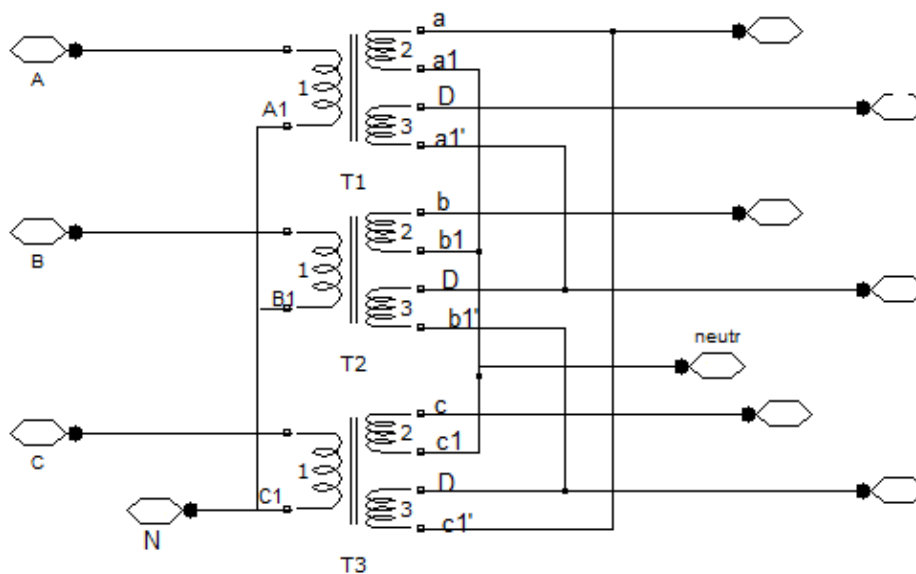


Figura 43. Conexión Y-Y-D fuente autor.

Los transformadores de tres devanados por fase (monofásica o trifásica) se usan en aplicaciones en las que es conveniente interconectar tres circuitos independientes con voltajes nominales diferentes. Nótese que los dos circuitos de suministro no deben operar simultáneamente ya que cada uno de ellos se comporta como una fuente independiente de voltaje (barra “infinita”), lo cual entraría en conflicto en relación al voltaje resultante en el tercer devanado, Los terceros armónicos nocivos que se presentan en los voltajes respecto al neutro en un transformador trifásico conectado en Y-Y se eliminan introduciendo un tercer devanado en cada fase y conectándolos en Δ , los cuales podrían suministrar energía a una carga local, tal como condensadores síncronos utilizados para regular el factor de potencia y, por tanto, la magnitud del voltaje para esta configuración se tienen unos niveles de voltajes tanto en línea como en fase partiendo de la siguiente relación $V_l = \sqrt{3} * V_\phi$. Para valores en y al igual para las corrientes. $I_l = \sqrt{3} * I_\phi$. Para valores en delta ya que el nivel de tensión en delta es igual el de línea que el de fase, pero en y la igualdad es para las corrientes [1].

Determinación de los niveles de tensión para la conexión yyd:

$$V_{lp} = \sqrt{3} * 120 = 207,846V$$

$$V_{ls} = \sqrt{3} * 115V = 199,185V$$

$$V_{lt} = V_{\phi T} = 115V$$

Determinación de los niveles de intensidad para la conexión yyd:

$$I_{lp} = I_{\phi p} = 15A$$

$$I_{ls} = I_{\phi s} = 7,826A$$

$$I_{lt} = \sqrt{3} * 7,826A = 13,555A$$

Calculo de la potencia para la conexión Y-Y-D.

$$S = \sqrt{3} * V_l * I_l$$

$$S_s = \sqrt{3} * 199,185 * 7,826$$

$$S_S = 2699,613\text{VA}$$

$$S_T = \sqrt{3} * 115 * 13,555$$

$$S_T = 2699,613\text{VA}$$

$$S_{SALIDA} = 5399,928 \text{ VA}$$

Tabla 8. Valores teóricos conexión Y-Y-Δ.

Conexión	V_{LP} (V)	V_{ls} (V)	V_{lT} (V)	I_{LP} (A)	I_{LS} (A)	I_{lT} (A)	S_S (VA)	S_T (VA)	S_{Total} (VA)
yyd	208	199,185	115	15	7,826	13,555	2699,613	2699,613	5399,928

Fuente autor.

6.3.9. Conexión Δ-Y-Δ.

En la figura 44 se puede apreciar la conexión Δ-Y-Δ. Para un transformador de tres devanados con sus respectivas indicaciones de conexión.

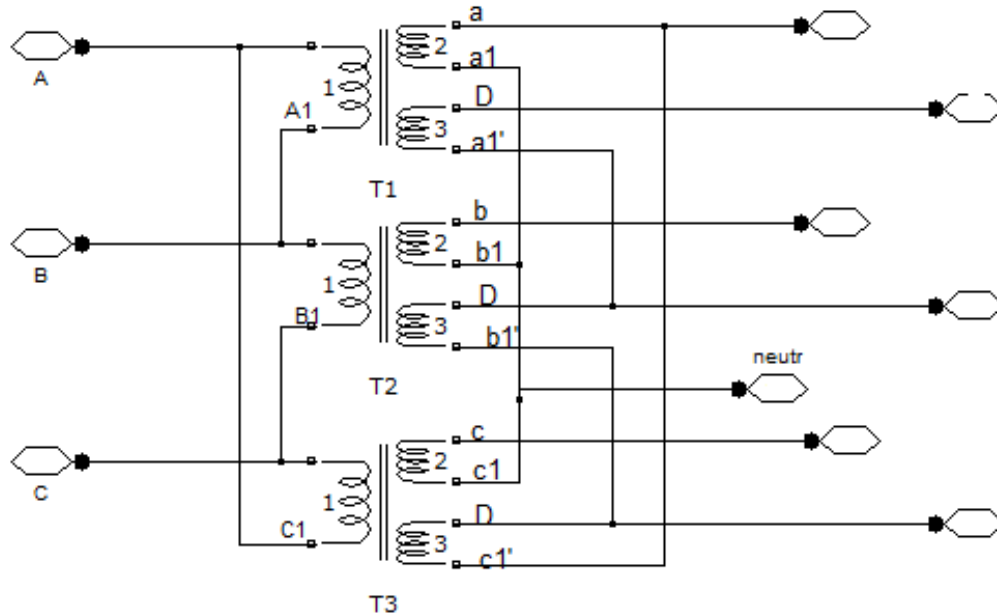


Figura 44. Conexión Δ-Y-Δ. Fuente autor.

Determinación de los niveles de tensión para la anterior conexión:

$$V_{LP} = V_{\phi P} = 120V$$

$$V_{lS} = \sqrt{3} * 115V = 199,185V$$

$$V_{lT} = 115V$$

Niveles teóricos de corriente para la configuración de la figura 44:

$$I_{lP} = \sqrt{3} * 15A = 25,98A$$

$$I_{lS} = I_{\phi S} = 7,826A$$

$$I_{lT} = \sqrt{3} * 7,826A = 13,555A$$

Determinación de los valores teóricos de potencia para la configuración anterior.

$$S = 3 * V_{\phi} * I_{\phi}$$

$$S_S = 3 * 115 * 7,826$$

$$S_S = 2699,97VA$$

$$S_T = 3 * 115 * 7,826$$

$$S_T = 2699,97 VA$$

$$S_{SALIDA} = 5399,94 VA$$

Tabla 9. Valores teóricos conexión Δ -Y- Δ ...

Conexión	$V_{lP}(V)$	$V_{lS}(V)$	$V_{lT}(V)$	$I_{lP}(A)$	$I_{lS}(A)$	$I_{lT}(A)$	$S_S(VA)$	$S_T(VA)$	$S_{Total}(VA)$
dYd	120	199,185	115	25,98	7,826	13,555	2699,97	2699,97	5399,94

Fuente autor.

6.3.10. Conexión Y- Zig-Zag.

La conexión en zigzag también se denomina conexión en estrella interconectada. Esta conexión tiene algunas de las características de las conexiones Y y Δ , combinando las ventajas de ambos. En la siguiente figura se puede apreciar esta conexión. Donde el devanado primario puede ir conectado tanto en delta como en estrella [4].

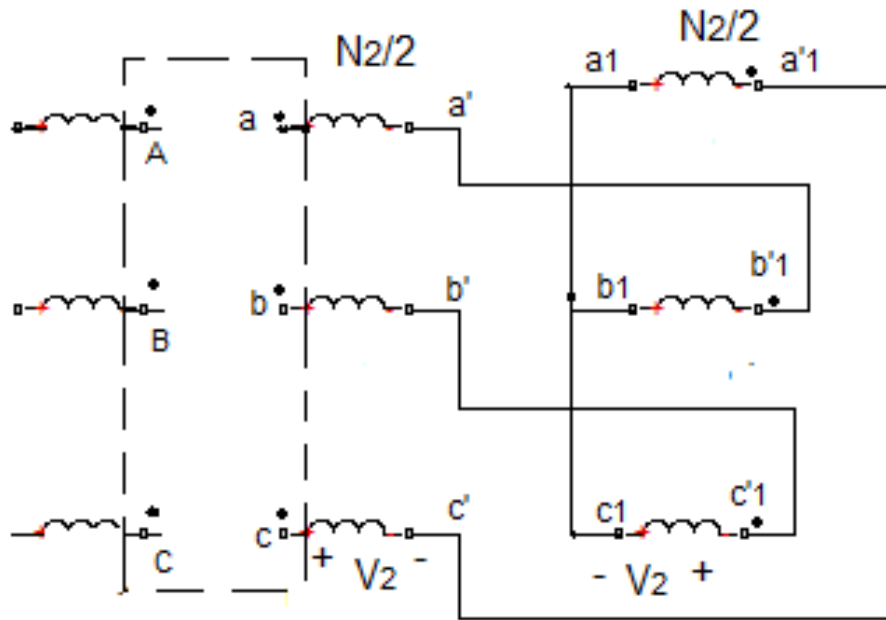


Figura 45. Conexión zig-zag fuente autor.

6.3.11. Conexión estrella - zig-zag.

Esta conexión se muestra en la figura 46.

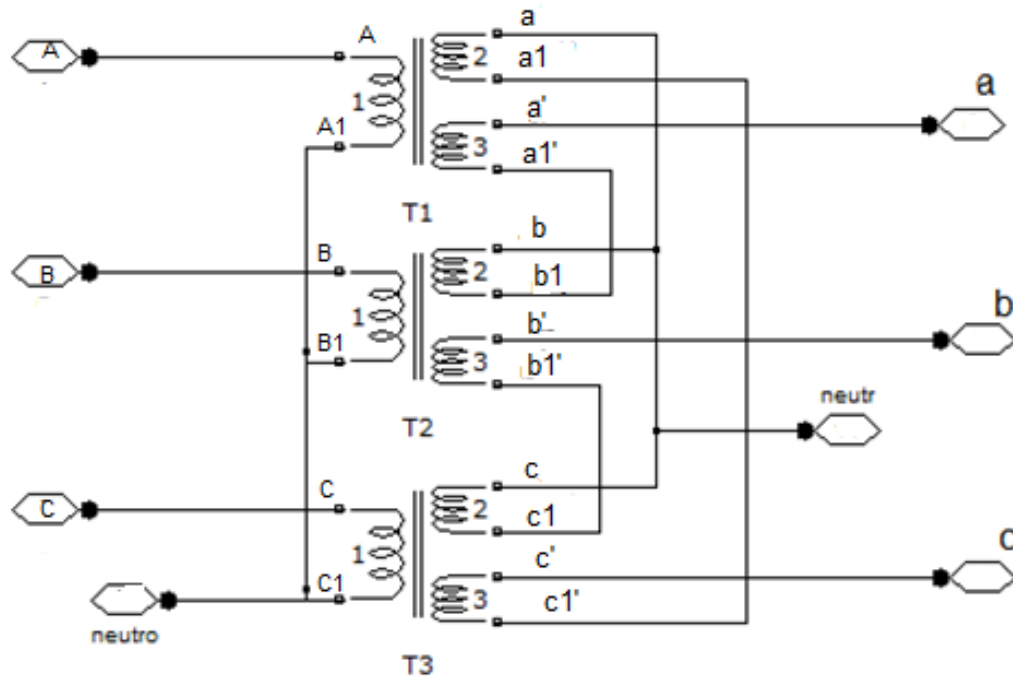


Figura 46. Conexión Y-Z fuente autor.

$$V_{\phi} = \sqrt{3} * V_{\phi}/2$$

$$V_L = \sqrt{3} * V_{\phi}$$

$$I_l = I_{\phi} = I_{\phi}/2$$

Determinación de los niveles de tensión para la anterior conexión:

$$V_{lp} = \sqrt{3} * 120 = 207,846V$$

$$V_{ls} = \sqrt{3} * 230V = 398,371V$$

Determinación de los niveles de corriente para la anterior conexión:

$$I_{lp} = I_{\phi p} = 15A$$

$$I_{ls} = I_{\phi s} = 7,826A$$

Potencia.

$$S = 5399,93 \text{ VA}$$

Tabla 10. Valores teóricos conexión Y-Z.

Conexión	$V_{lp}(V)$	$V_{ls}(V)$	$I_{lp}(A)$	$I_{ls}(A)$	S(VA)
Y-Z	208	398,371	15	7,826	5399,93

Fuente autor.

6.3.12. Conexión DELTA-ZIG-ZAG.

La conexión en zigzag también se denomina conexión en estrella interconectada. Esta tiene algunas características de las conexiones Y y Δ , lo cual combina ventajas. En la figura 47 se puede apreciar esta conexión.

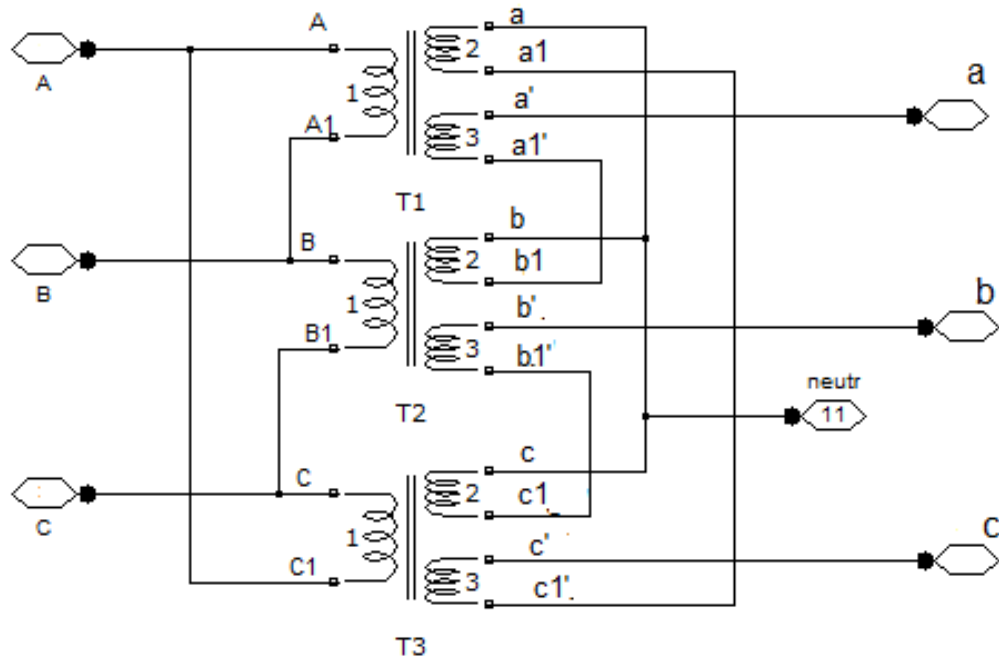


Figura 47. Conexión d-z fuente autor.

Determinación de los niveles de tensión para la anterior conexión:

$$V_{lp} = V_{\phi P} = 120V$$

$$V_{ls} = \sqrt{3} * 230V = 398,371V$$

Determinación de los niveles de corriente para la anterior conexión:

$$I_{lp} = \sqrt{3} * 15A = 25,98A$$

$$I_{ls} = I_{\phi s} = 7,826A$$

Potencia.

$$S = 5399,93 \text{ VA}$$

Tabla 11. Valores teóricos conexión D-Z.

Conexión	$V_{lp}(V)$	$V_{ls}(V)$	$I_{lp}(A)$	$I_{ls}(A)$	S(VA)
D-Z	120	398,371	25,98	7,826	5399,93

Fuente autor.

6.3.13. Conexión Delta-Hexafásica.

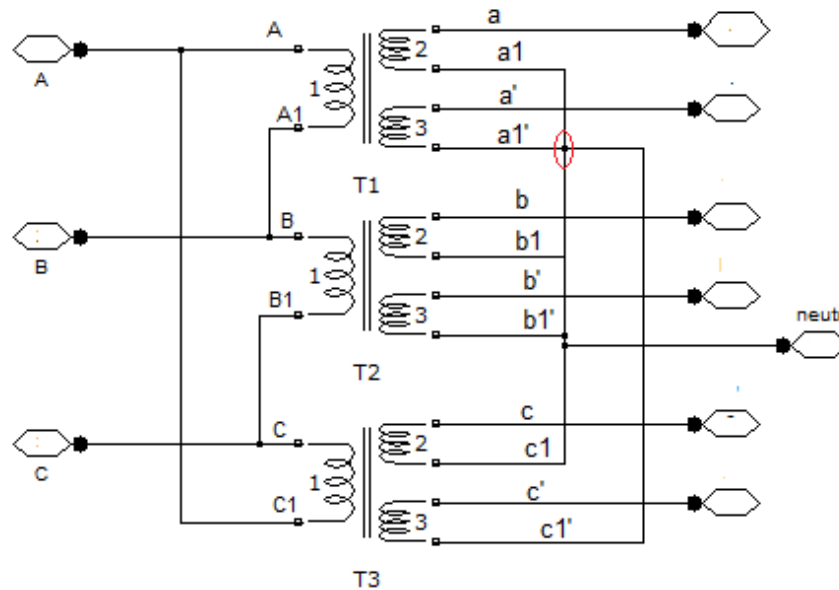


Figura 48. Conexión D-Hexafásica fuente autor.

Un sistema Hexafásico consiste en seis tensiones desfasadas entre sí 60° . Existen varios procedimientos para obtener un sistema Hexafásico; uno de ellos es como se muestra en la figura 48. Este tipo de conexión tiene la ventaja de brindar diversos niveles de tensión en la salida del secundario, pero es poco usual debido a la ausencia de neutro en el lado primario como se muestra en la figura anterior.

Como las tensiones en cada fase están desfasadas 60° entre ellas, los voltajes de líneas van a ser los mismos voltajes de fases constatándose en el siguiente diagrama fasorial.

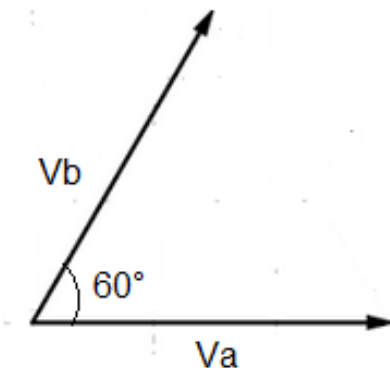


Figura 49. Diagrama fasorial de tensiones fuente auto.

$$V_{ba} = V_L = V_a - V_b$$

En la siguiente figura se da a conocer la relación entre los voltajes de línea y fase, para la configuración Hexafásica.

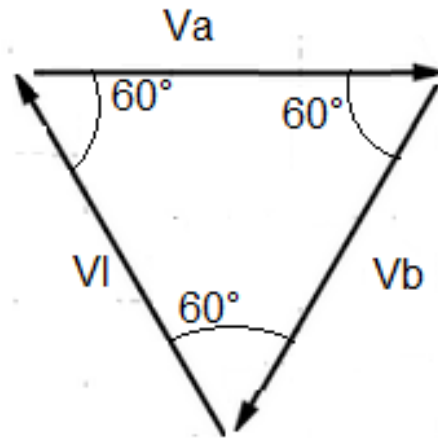


Figura 50. Diagrama fasorial de tensiones fuente autor.

A continuación se muestra el diagrama vectorial de las tensiones en la configuración Hexafásica donde se denota el desfase que existe encada una de ellas que corresponde a un valor de 60° .

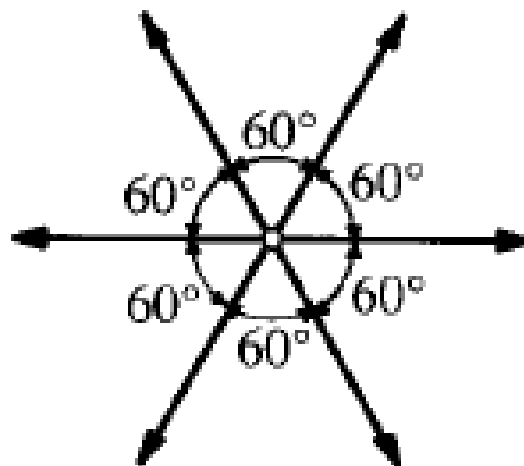


Figura 51. Diagrama vectorial de tensiones fuente autor.

Los niveles de tensión para la anterior conexión Delta-Hexafásica de la figura 48 son los siguientes:

$$V_{IP} = V_{\phi P} = 120V$$

$$V_{IS} = V_{\phi S} = 115V$$

Los niveles de corrientes para la anterior conexión Delta-Hexafásica de la figura 48 son los siguientes:

$$I_{IP} = \sqrt{3} * 15A = 25,98A$$

$$I_{IS} = I_{\phi S} = 7,826A$$

Al igual la potencia calculada para esta configuración es la mostrada a continuación.

$$S = 3 * V_{\phi} * I_{\phi}$$

$$S_S = 3 * 115 * 7,826$$

$$S_S = 2699,97VA$$

$$S_{ST} = (2699,97)(2) = 5399,94 VA$$

Tabla 12.Valores teóricos conexión Δ - Hexafásica.

Conexión	$V_{IP}(V)$	$V_{\phi P}(V)$	$V_{IS}(V)$	$V_{\phi S}(V)$	$I_{IP}(A)$	$I_{IS}(A)$	S(VA)
Δ - H	120	120	115	115	25,98	7,826	5399,94

Fuente autor.

6.3.14. Conexión. Y – Hexafásica.

Un sistema Hexafásico consiste en seis tensiones desfasadas entre si 60. La configuración de esta conexión se evidencia en la figura 52 donde se aprecia una conexión de doble estrella en el secundario con el primario conectado en estrella, esta conexión es más empleada que la Delta- Hexafásica ya que brinda una salida a neutro en el devanado primario.

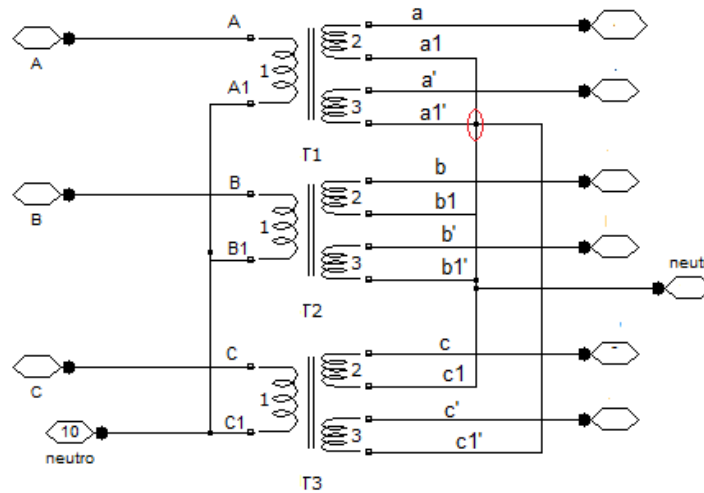


Figura 52. Conexión Y-Hexafásica fuente autor.

Los niveles de tensión para la anterior conexión Y-Hexafásica de la figura 52 son los siguientes:

$$V_{LP} = \sqrt{3} * 120V = 207,846$$

$$V_{LS} = V_{\phi S} = 115V$$

Niveles de corrientes para la anterior conexión:

$$I_{LP} = 15A$$

$$I_{LS} = I_{\phi S} = 7,826A$$

Potencia.

$$S = 3 * V_{\phi} * I_{\phi}$$

$$S_S = 3 * 115 * 7,826$$

$$S_S = (2699,97)(2) = 5399,94 \text{ VA}$$

Tabla 13. Valores teóricos conexión Y – Hexafásica.

Conexión	$V_{LP}(V)$	$V_{\phi P}(V)$	$V_{LS}(V)$	$V_{\phi S}(V)$	$I_{LP}(A)$	$I_{LS}(A)$	$S(VA)$
$\Delta - H$	208	120	115	115	15	7,826	5399,94

Fuente autor.

7. Diseño y construcción del Módulo Didáctico Para pruebas delos transformadores monofásicos.

Además del cálculo y la construcción de los transformadores monofásicos de tres devanados, en este proyecto se llevó a cabo la implementación de un módulo para la realización de prácticas complementarias para el desarrollo y adquisición de habilidades que le permitan al educando fomentar competencias a la hora de salir al campo laboral.

A continuación se dimensiona cada una de las actividades desarrolladas para la construcción de los diferentes transformadores, y la implementación del módulo.

7.1. Construcción de los transformadores.

La construcción de cada transformador se realiza con la implementación de chapas ferromagnéticas, las cuales constan de un núcleo de 64mm, evidenciándose en la figura siguiente.



Figura 53. Chapas monofásicas.

En esta instancia el material ferromagnético se utiliza mediante formaletas de 64x70 mm para la construcción de los bobinados de los transformadores como se muestra en la figura siguiente.

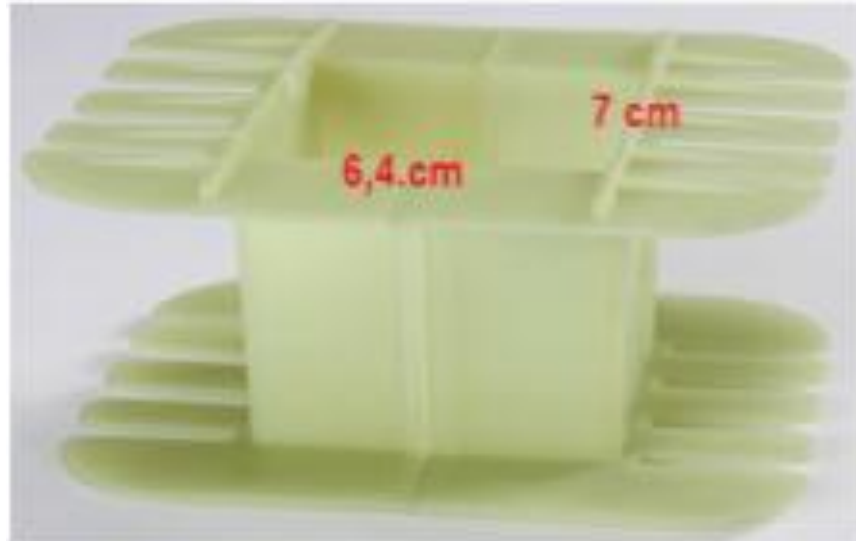


Figura 54. Formaleta.

7.2. Proceso de embobinado y creación del núcleo.

Aquí se elabora cada transformador con la utilización de un calibre conductor de cobre número 13 para el devanado primario y, número 14 para los devanados secundarios y terciarios. A continuación se puede observar en la siguiente imagen la forma de cómo se llevó a cabo la construcción de cada bobina para los transformadores.



Figura 55. Embobinado primario.

Luego de construir las bobinas, se procede a armar el núcleo de cada transformador organizando las chapas ferromagnéticas.



Figura 56. Construcción del núcleo.

7.3. Construcción de la estructura para el módulo.

La base de la estructura para la elaboración del módulo didáctico se diseña por medio del Software Solidworks y, para la construcción del mismo; se ejecuta con la implementación de ángulos de hierro de 3/4 por 1/8 y láminas metálicas que confieren cubrimiento, así mismo mediante material acrílico.

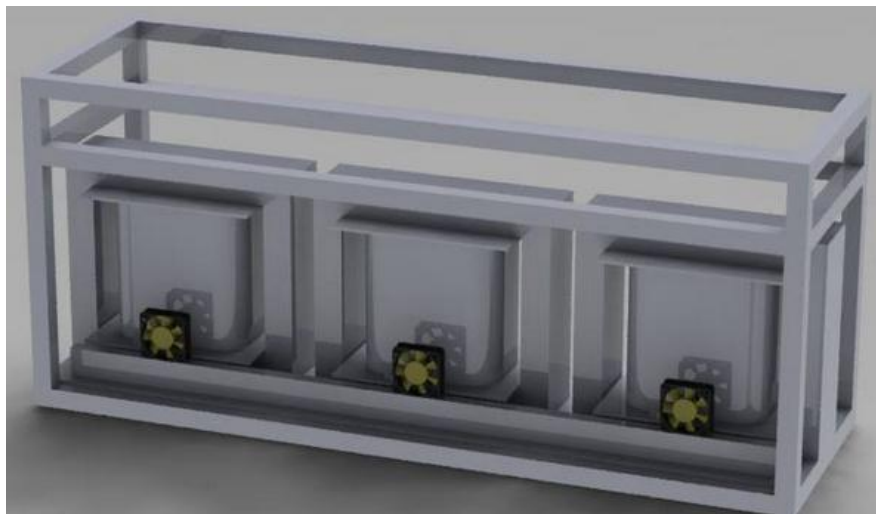


Figura 57 . Estructura de diseño.

Con ayuda del software AutoCAD se lleva acabo el diseño del tablero de conexiones para el módulo didáctico, el cual se puede evidenciar en la figura 58.

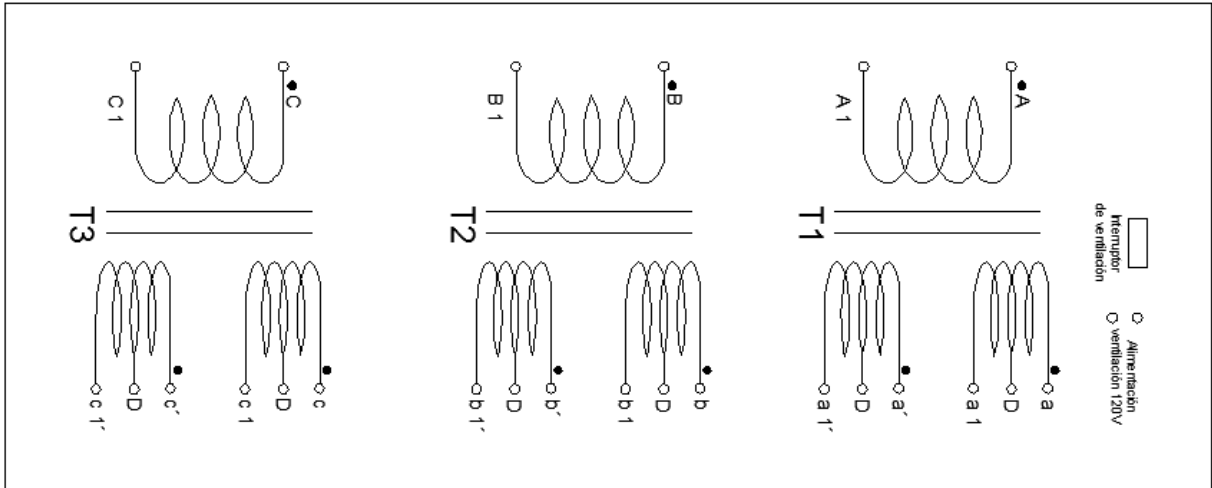


Figura 58 . Tablero de conexiones

Para cada transformador se utiliza un sistema de refrigeración que busca brindar mayor eficiencia a la hora de desarrollar prácticas de laboratorio, evitando un posible calentamiento de los devanados de cada dispositivo como se evidencia en la siguiente imagen.



Figura 59. Vista frontal del módulo.

En la siguiente figura se apesria el proceso de cableado que se realiza para la conexión de las diferentes terminales de cada transformador que conforman el módulo.

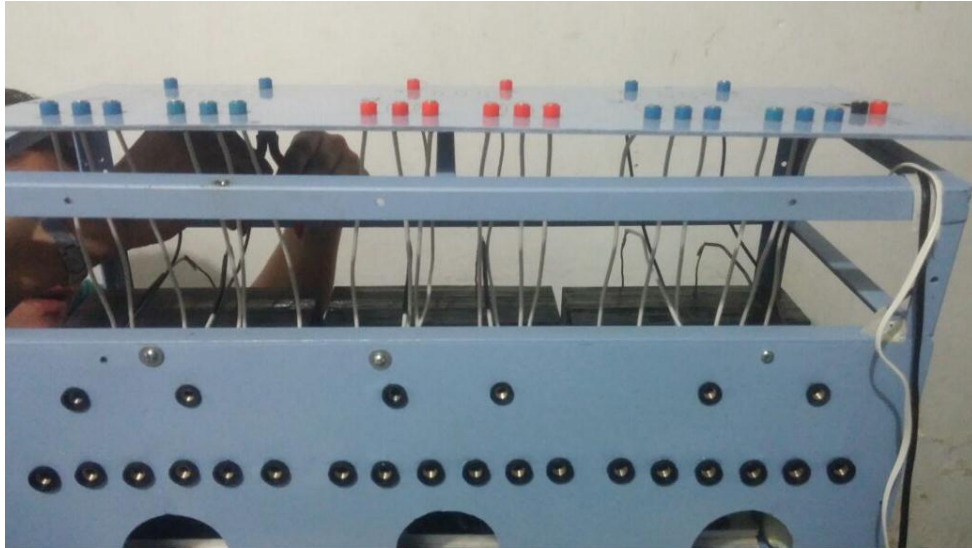


Figura 60. Sistema de cableado.

De esta manera se llevó a cabo la implementación del módulo diabático de transformadores monofásico, para el laboratorio de máquinas eléctrica de la universidad de pamplona.

7.4. Descripción de las guías de laboratorios.

Una vez terminado el módulo didáctico se realizó las guías de laboratorio, las cuales constan de 12 prácticas que le permiten al docente en conjunto con los estudiantes llevar a cabo prácticas concernientes a la temática abordada en aula de clase.

A continuación se realiza una descripción de cada una de las prácticas a desarrollar:

La primera práctica de laboratorio permitirá desarrollar y determinar la polaridad de un transformador monofásico, esta práctica tiene como objetivo que el estudiante adquiera habilidades y destrezas que le permitan poder identificar los lados homólogos en un transformador monofásico cuando estos no son identificados.

La segunda práctica a desarrollar es la determinación de la polaridad de un transformador trifásico, la cual tiene como objetivo que el estudiante identifique los lados homólogos en un transformador trifásico partiendo de la conexión entre fases donde se busca que el estudiante desarrolle habilidades para la identificación de la polaridad.

En la tercera práctica se realizarán las conexiones comunes que se pueden lograr en un transformador trifásico partiendo de un banco de transformadores monofásicos, esta práctica

tiene como objetivo implementar las diferentes conexiones comunes que se pueden lograr en un transformador trifásico, partiendo de un banco de transformadores monofásicos. Donde se busca que el estudiante determina los diferentes niveles de tensiones y corrientes que se pueden medir en un transformador trifásico.

En la cuarta práctica se realizará la conexión zig-zag para un transformador trifásico donde se tiene como objetivo que el estudiante implemente este tipo de conexiones haciendo uso del módulo didáctico de transformadores, de tal forma poder hacer mediciones de los diferentes niveles de tensión y corriente en ambos devanados del transformador.

En la práctica número cinco se estarán realizando dos de las conexiones especiales que se le pueden realizar a un transformador trifásico, esta práctica tiene como objetivo la implementación de las conexiones V-V y la conexión Y abierta y DELTA abierta, para la simulación de un fallo en una de las fases del transformador, donde se estarán tomado las mediciones de corriente y voltaje y analizar el nivel de potencia que puede suministrar un transformador cuando se le es retirada una de sus fases.

En la práctica número seis se llevará a cabo el emparellamiento de dos transformadores monofásicos, se pretende analizar el funcionamiento de dos transformadores monofásicos conectados en paralelo, tomando registro de las medidas de los niveles de tensión y corrientes que estos pueden arrojar y el análisis de la potencia de salida que estos pueden suministrar.

La práctica número siete tiene como objetivo primordial determinar los parámetros característicos de un transformador tridevanado, por lo que se estará realizando la respectiva toma de datos para llevar a cabo la determinación del circuito equivalente del transformador.

Práctica número ocho, se desarrollará la conexión hexafásica partiendo de una conexión trifásica, donde se busca identificar el desfase que existe en la conexión hexafásica, de igual manera tomar medidas de los diferentes niveles de tensión y corriente que se pueden registrar en esta conexión.

La práctica número nueve tiene como objetivo determinar el rendimiento y la regulación en un transformador trifásico, en esta práctica se llevará a cabo la determinación de la

regulación de tres maneras diferentes de obtener, al igual que para la determinación del rendimiento se estará realizando su determinación de manera directa y analítica.

La práctica número diez, tiene como objetivo determinar los parámetros del circuito equivalente de un transformador trifásico, en la que se realizará diferentes en sayos; en vacío al igual que en corto circuito, lo que permite llevar obtener la determinación de estos parámetros que conforman el circuito equivalente.

Finalmente, la práctica número once tiene como objetivo la determinación del índice horario en un transformador trifásico.

La descripción completa de las guías de laboratorio se encuentra en el anexo A.

8. Validación del funcionamiento del módulo didáctico.

En este capítulo se da a conocer el funcionamiento del módulo mediante la implementación de varias prácticas de laboratorios realizadas en el aula de máquinas eléctricas.

8.1. Determinación de los lados homólogos de un transformador monofásico.

En esta práctica se lleva a cabo la determinación de la polaridad en un transformador monofásico. Esto deja como resultado que la polaridad de los transformadores es sustractiva. Así se constata en las siguientes imágenes, donde se evidencia que la tercera medida es la resta de las dos medidas anteriores, tal como lo establece la Norma NTC 471.

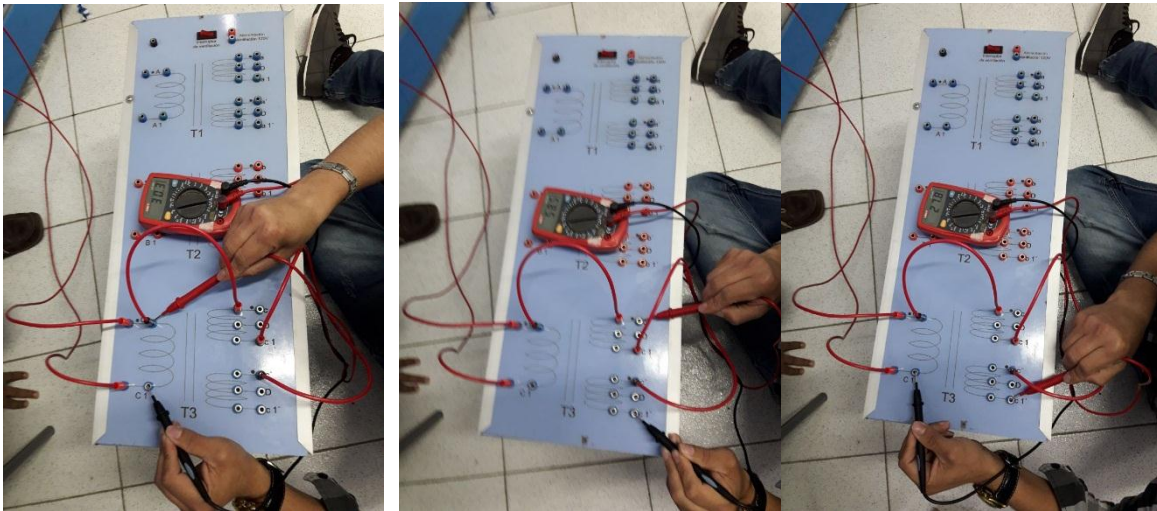


Figura 61. Polaridad

8.2. Determinación de la polaridad en un transformador trifásico.

Al igual que en la práctica número uno, en esta se determina la polaridad, pero para un transformador trifásico, estableciendo lo citado en la norma NTC 471. Donde se hallan los lados homólogos, partiendo de dos bobinados en paralelos, y así sucesivamente para el otro bobinado. En las siguientes imágenes se muestran los lados homólogos, dado que en estos la diferencia de potencial es cero como se marca en el multímetro.

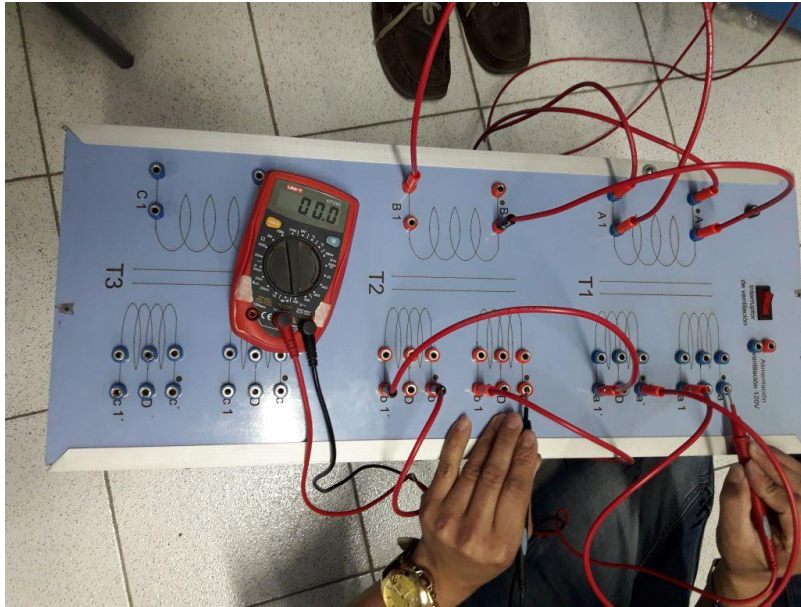


Figura 62. Polaridad en un transformador trifásico.

8.3. Conexión DELTA-DELTA.

En esta práctica se realizan una de las diferentes conexiones que se pueden lograr en un transformador trifásico partiendo de un banco de transformadores monofásicos. Así; se establece la toma de datos en vacío al igual que con carga, como lo demanda la Norma NTC 3445 y la NTC 1031.

En las imágenes siguientes se pueden evidenciar las diferentes conexiones realizadas.

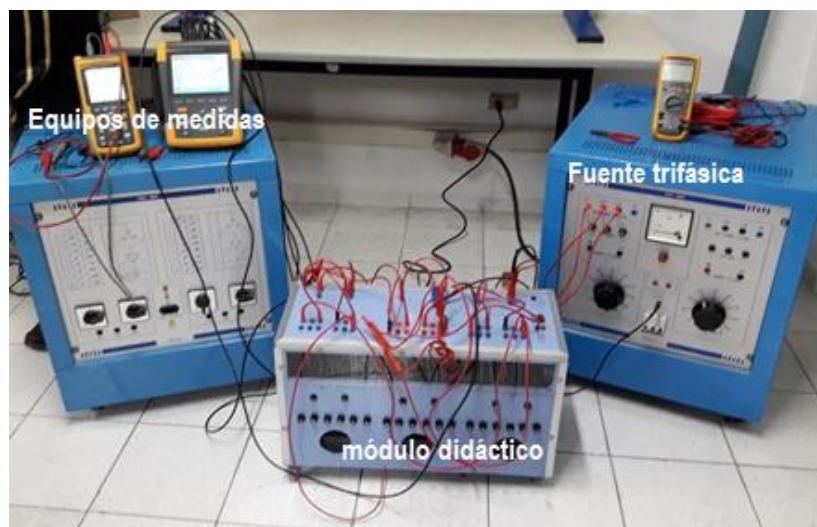


Figura 63. Conexión Delta-Delta sin carga

En la siguiente figura se muestra la forma de ondas del voltaje correspondiente a la conexión Delta-Delta sin carga.

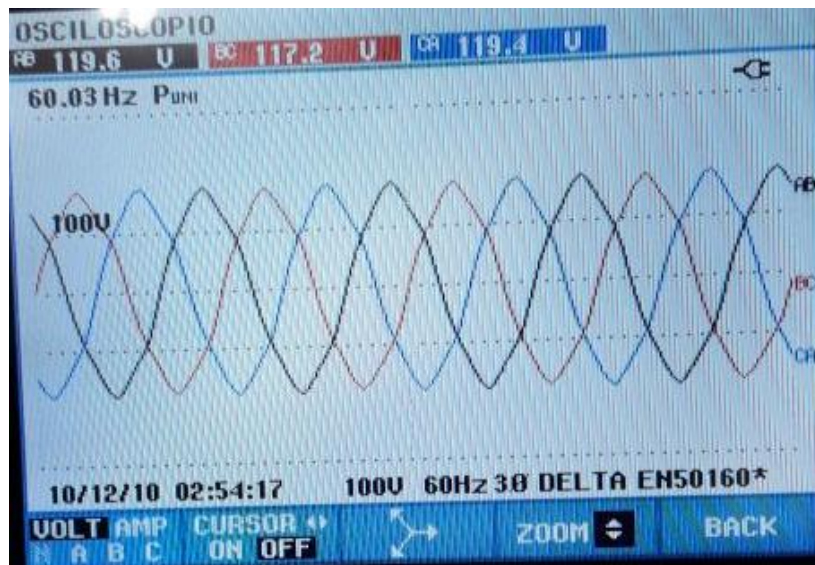


Figura 64. Forma de onda de voltaje de la conexión Delta-Delta sin carga

Esta figura muestra la forma de ondas del corriente correspondiente a la conexión Delta-Delta sin carga.

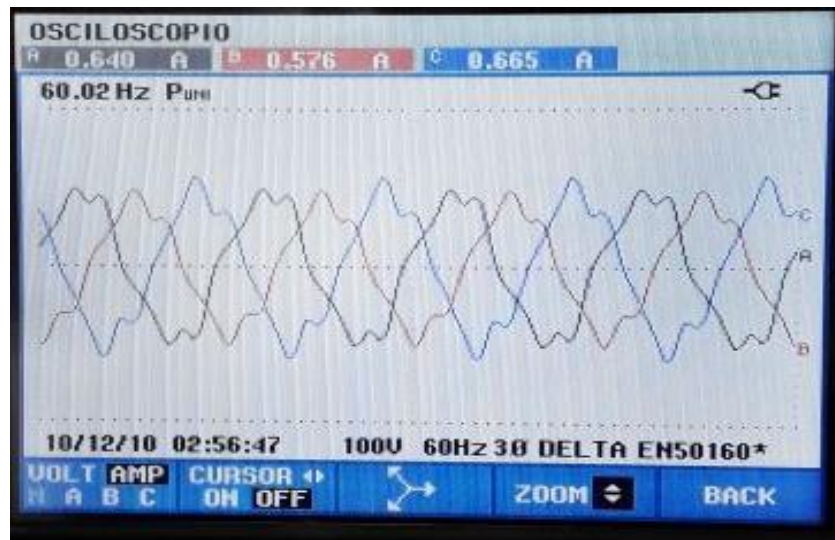


Figura 65. Forma de onda de corriente de la conexión Delta-Delta sin carga

En la siguiente figura se muestra el valor de la potencia en vacío correspondiente a la conexión Delta-Delta sin carga.



Figura 66. Potencia en vacío conexión d-d

Los valores de medidos en el lado primario de esta práctica son los registrados en la siguiente tabla.

Tabla 14. Valores medidos conexión Delta-Delta en vacío.

$\Delta-\Delta$	$V_{AB}(V)$	$V_{BC}(V)$	$V_{CA}(V)$	$I_A(A)$	$I_B(A)$	$I_C(A)$	$P(W)$
	119,4	117,4	119,3	0,634	0,573	0,662	49,9

Una vez realizado las diferentes mediciones para la anterior conexión se realizó el mismo procedimiento pero para en el lado secundario alimentando una carga resistiva de 300 Ω .

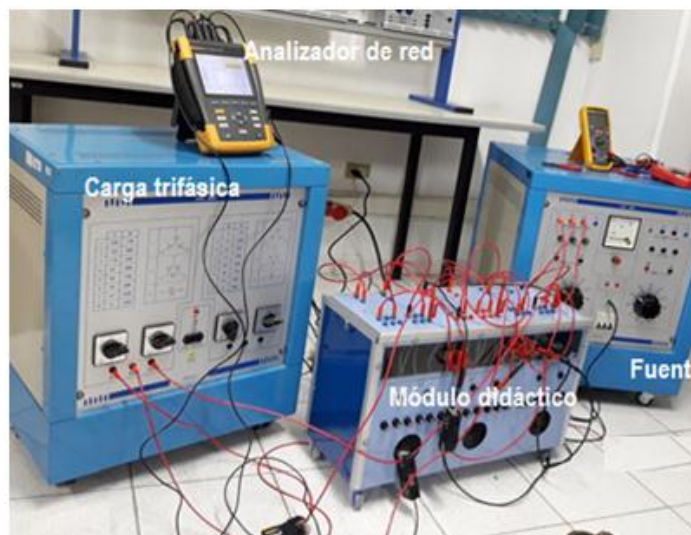


Figura 67. Conexión $\Delta-\Delta$ con carga

En la siguiente figura se muestra la forma de onda de voltaje para la conexión Δ - Δ alimentando la carga.

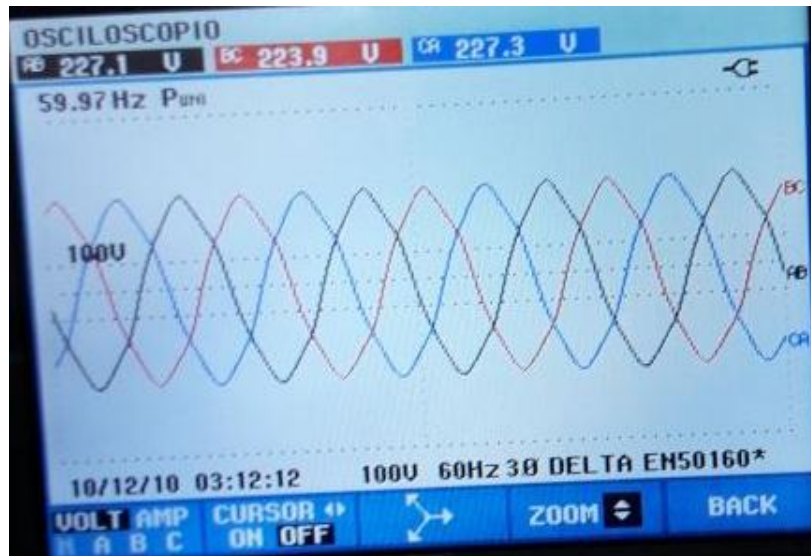


Figura 68. Forma de onda de voltaje conexión Δ - Δ con carga.

En esta figura se evidencia la forma de onda de corriente para la conexión mencionada con antelación.

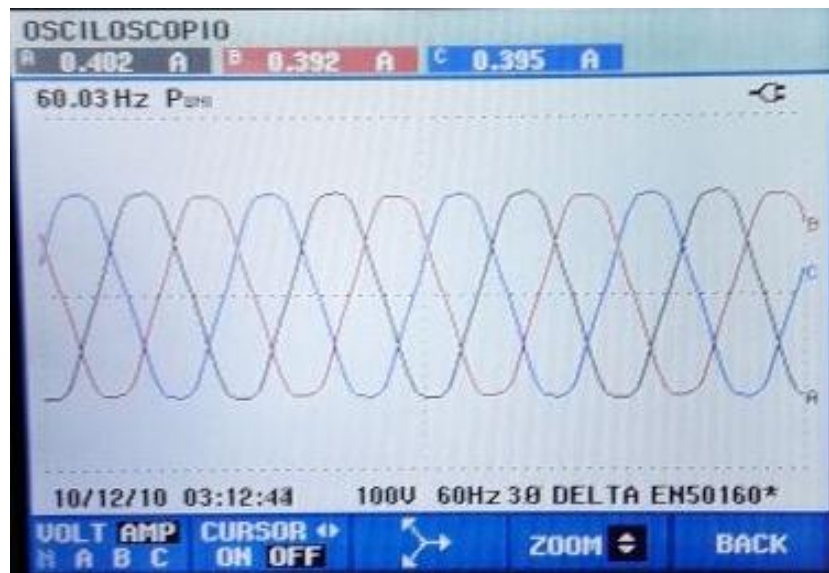


Figura 69. Forma de onda de corriente conexión Δ - Δ con carga.

La siguiente figura muestra el valor de la potencia correspondiente a la conexión Delta-Delta con carga.



Figura 70 . Potencia entregada.

Los valores de medidos en el lado secundario de esta práctica se registran en la siguiente tabla.

Tabla 15. Valores medidos con carga.

$\Delta-\Delta$	$V_{AB}(V)$	$V_{BC}(V)$	$V_{CA}(V)$	$I_A(A)$	$I_B(A)$	$I_C(A)$	$P(W)$
	226,7	223,7	227	0,4	0,392	0,395	154,5

Fuente autor

8.4. Ensayo de corto circuito conexión Y- Δ .

La implementación de la prueba se hace con base a lo establecido en la Norma NTC 1005 la cual establece los parámetros para la prueba de corto circuito.

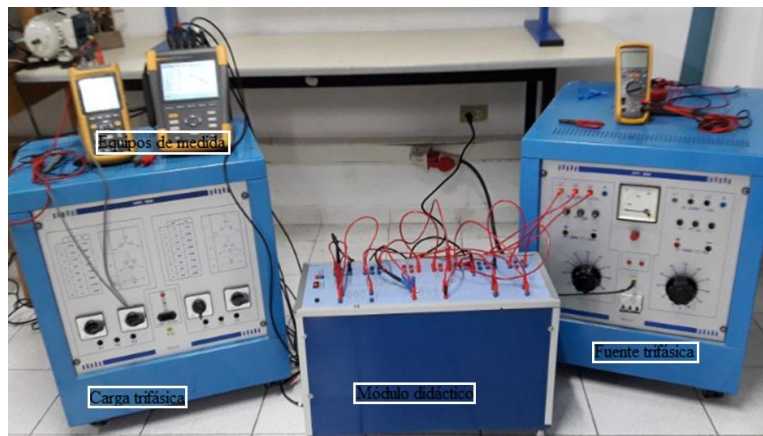


Figura 71. Conexión Y- Δ con el secundario e cc

Una vez energizado el módulo se da registro del nivel de intensidad de cortocircuito, como se visualiza en la siguiente figura.

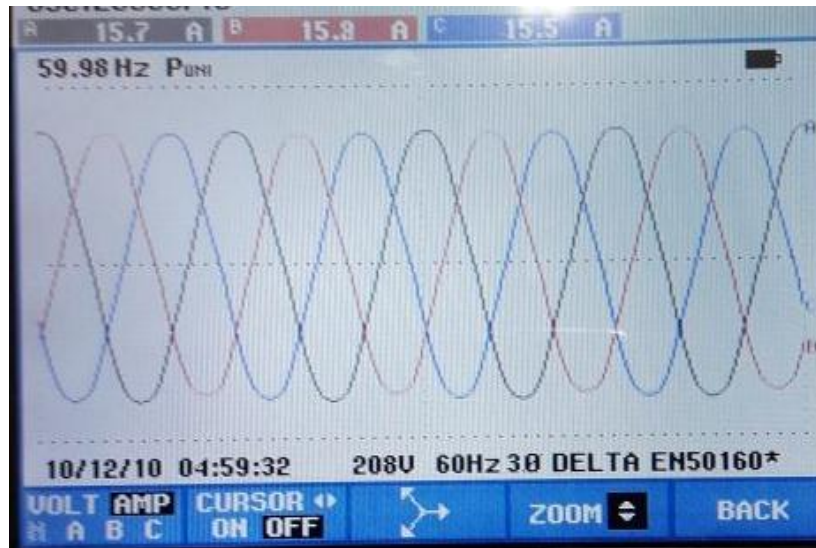


Figura 72. Corriente de corto circuito

La forma de onda de voltaje y el nivel de tensión de corto circuito se evidencian en la siguiente figura.

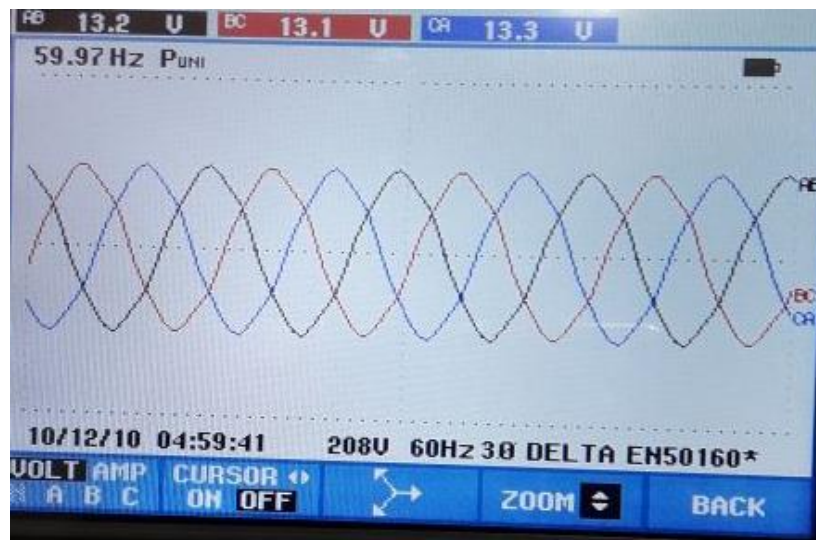


Figura 73. Forma de onda voltaje de c.c.

La potencia de corto circuito medida en esta prueba se muestra en esta figura.



Figura 74. Potencia de c.c.

8.5. Conexión Y-DELTA.

En la figura 75 se puede observar la alimentación hacia el módulo con la presencia de neutro para la conexión Y.



Figura 75. Fuente de alimentación en presencia de neutro.

A continuación se muestra la forma de onda de corriente tomada en la conexión Y-D haciendo uso de la terminal neutra, lo cual ocasiona presencia de terceros armónicos que distorsionan la forma de onda.

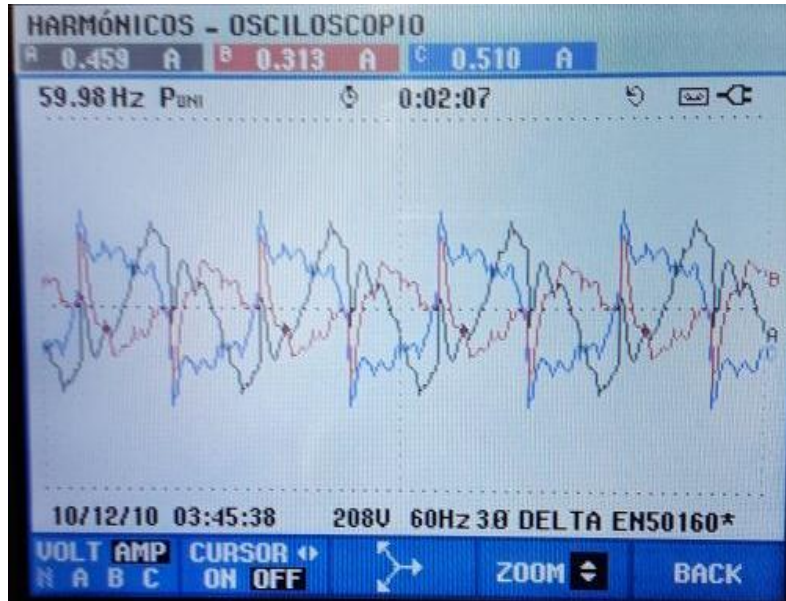


Figura 76. Forma de onda de corriente conexión Y-D con neutro.

Lo anterior se corrobora en la siguiente figura, donde se muestra el espectro que evidencia la alta presencia de terceros armónicos.

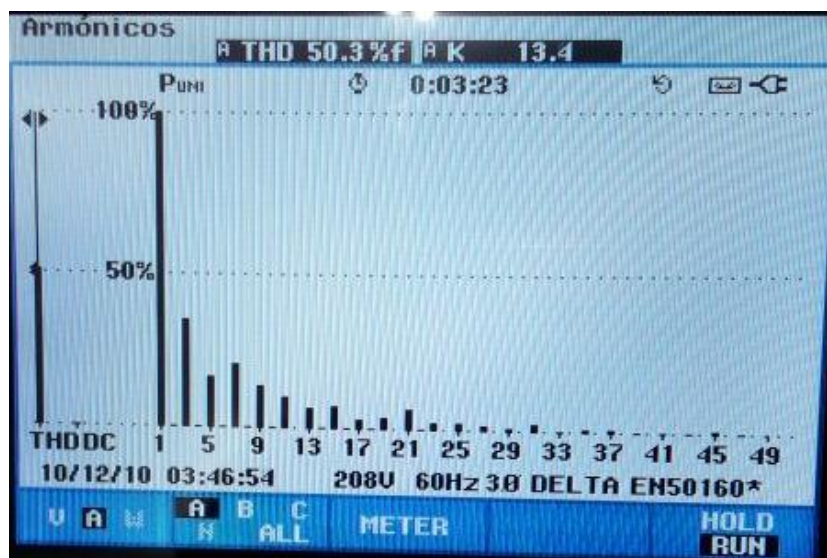


Figura 77. Espectro armónico conexión Y-D.

Al realizar nuevamente la toma de datos para conexión Y-DELTA con la ausencia de neutro sin variar los valores nominales, se hace evidente la mitigación del contenido armónico. En la siguiente figura se observa la alimentación del módulo con la ausencia del terminal neutro.

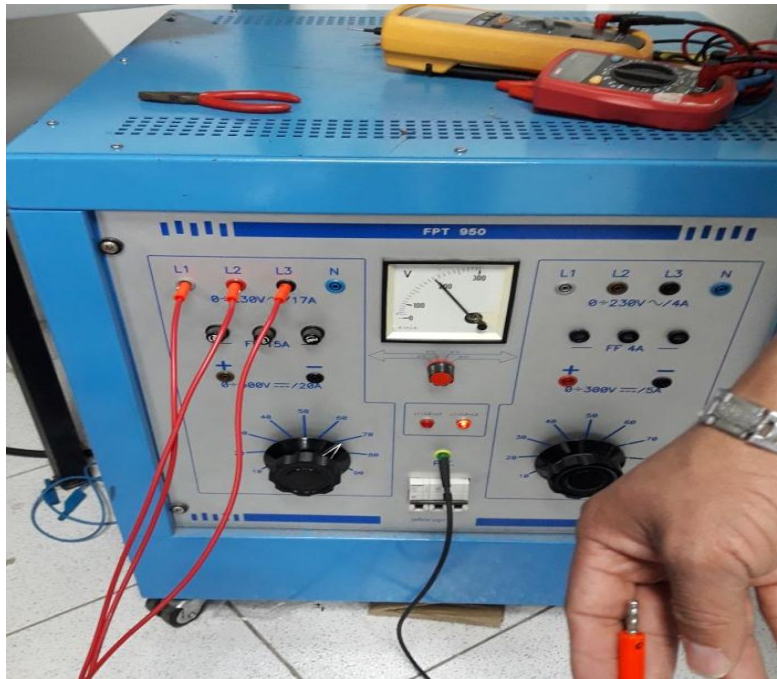


Figura 78. Fuente de alimentación sin neutro

La siguiente figura se muestra la forma de onda de corriente para la conexión Y-DELTA en ausencia del neutro, donde se es evidente la mitigación en la distorsión de la forma de onda.

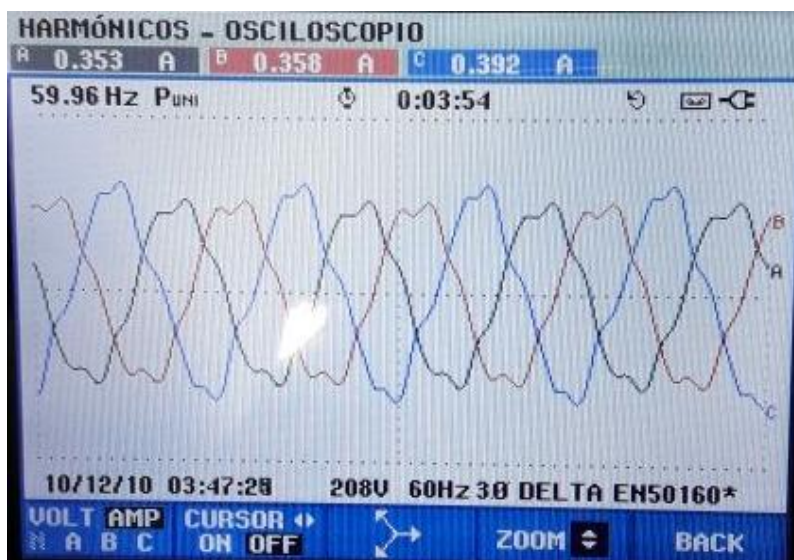


Figura 79. Forma de onda de corriente sin neutro.

De igual manera se muestra el espectro, y es evidente la diferencia de armónicas al usar el terminal neutro para el módulo como se muestra en la siguiente figura.

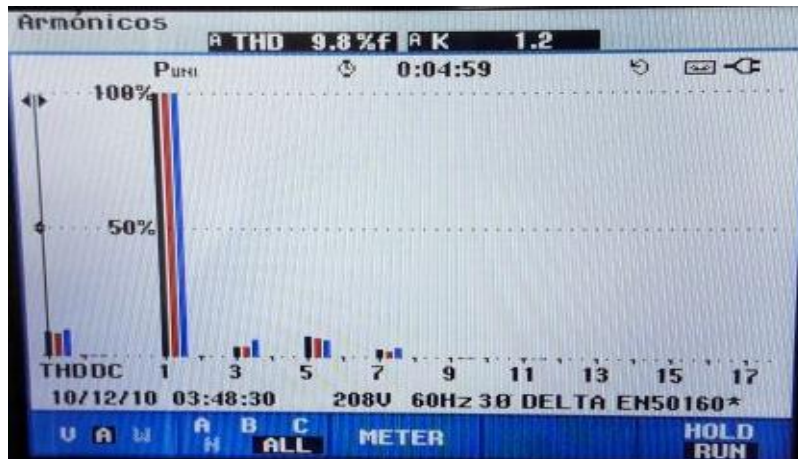


Figura 80. Espectro armónico en ausencia del neutro.

8.6. Determinación del índice horario.

En esta práctica se lleva a cabo la determinación del índice horario en un transformador trifásico, en la siguiente imagen se muestra la conexión del módulo para la realización de la prueba. Esto se determina conforme a lo establecido en la norma NTC 471.

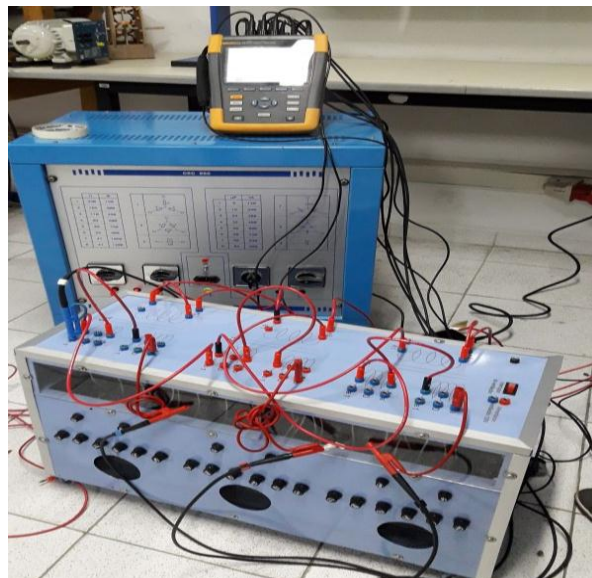


Figura 81. Conexión Y-D.

El desfase que existe en los niveles de tensión del primario y secundario se muestra en la siguiente imagen, con un tiempo de 1,44 milisegundos.

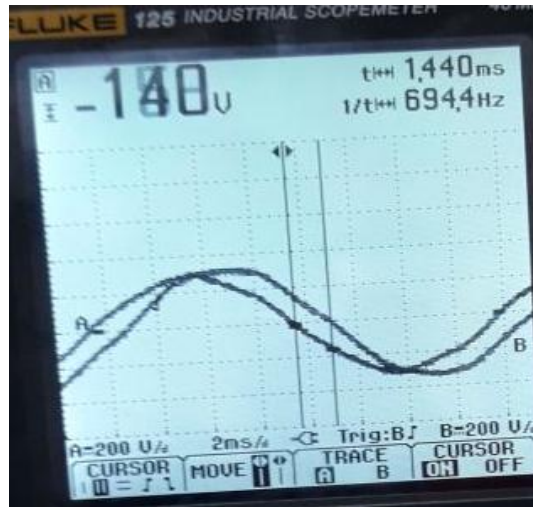


Figura 82 Desfase de tensiones

$$\text{Desfase} = \frac{360 \cdot 1,44}{16,66} = 31,1 \quad \text{YnD1}$$

Una vez determinada esta información se logra establecer el índice horario del transformador. Situación que se evidencia en la siguiente figura.

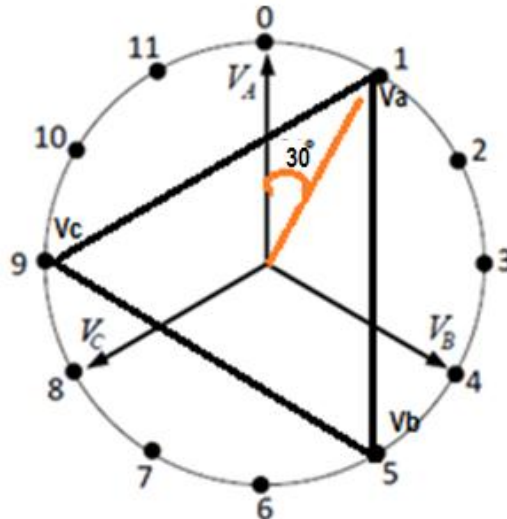


Figura 83. Índice horario.

Así se da validez al funcionamiento del módulo, en el cual se obtuvieron los valores esperados comprobando así su buen desempeño, con esto se le brinda una herramienta para el laboratorio de maquina eléctricas lo cual será muy útil para el desarrollo de prácticas de laboratorio.

9. Conclusiones

Se implementó un Módulo Didáctico De Transformadores Monofásicos referido al área de ingeniería eléctrica, cuya aplicación estuvo enmarcada mediante prácticas de laboratorios y a la luz de concepciones epistémicas abordadas durante el transcurso de la carrera en mención, la cual queda beneficiada con esta herramienta didáctica que será de gran importancia para las implementaciones teórico-prácticas que proyecte a futuro en sus educandos.

El programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Pamplona queda muy bien dotado con el Módulo, no en vano, es una herramienta didáctica con la cual no contaba y que ahora tendrá a disposición.

Dada la aplicación de este módulo, los estudiantes de la carrera de Ingeniera Eléctrica del Alma mater arriba aludida, ya pueden comparar valores teóricos con valores obtenidos de manera experimental, y lo que en efecto; permite determinar márgenes de error.

Vale recalcar que tras el diseño y desarrollo de la guía de laboratorio, el estudiante se beneficia de manera preponderante, dado que en esta se exponen algunos temas que hasta el momento se habían abordado sólo de manera teórica.

Se llevó acabo la validación del funcionamiento del Módulo Didáctico De Transformadores Monofásicos mediante el desarrollo de prácticas de laboratorio, y con ello se comparó los valores teóricos con valores experimentales que se pueden obtener a través de diferentes conexiones enmarcadas mediante un transformador.

Por medio de la validación del módulo didáctico de transformadores monofásicos de pudo establecer que a la hora de hacer uso del terminal neutro este ocasiona un alto grado de terceros armónicos en la forma de onda de corriente.

10. Bibliografía

- [1] S. J. Chapman, Máquinas Eléctricas, New York,: MC GRAW HILL, 2012.
- [2] j. Fraile Mora, Máquinas eléctricas, Madrid: Mc Graw Hill, 2003.
- [3] I. L. Kosow, Máquinas Eléctricas y Transformadores, Mexico: Prentice-Hall, 1991.
- [4] I. D. Lorenzo León y M. E. Burbano Hurtado, Análisis para sistemas trifásicos de transformadores conexiones abiertas y especiales, guayaquil: Universidad politécnica salesiana , 2015.
- [5] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr y S. D. Umans, Máquinas eléctricas, Mexico: Mc Graw Hill, 2004.
- [6] D. Ionescu, «The importance of working integrated learning and relevant,» *ScienceDirect*, nº 174, p. 2825 – 2830, 2015.
- [7] E. V. Caloto Catota, implementación de un módulo didáctico de transformador trifásicos elevador, mexico: instituto tecnológico superior aeronáutico, 2010.
- [8] J. M. Díaz Chacón, C. Amaro Hernández, V. Mata Brauer y A. Navarro Valle, «Uso de un módulo didáctico de transformadores eléctricos en la enseñanza de la asignatura de Máquinas de Inducción,» *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, nº 04, pp. 1-13, 2016.
- [9] A. lino carpio, implementacion de un modulo didactico de 3kva para conexiones especiales, arequipa – Perú: universidad católica de santa maría, 2017.
- [10] J. C. Beroes montiel y J. D. Berríos Rodríguez, Diseño e implementación de un módulo didactico de control computarizado para el laboratorio de controles industriales, Maracaibo: Universidad rafael urdaneta, 2012.
- [11] A. Mirkouei, R. Bhinge, C. McCoy, K. R. Haapala y D. A. Dornfeld, «A Pedagogical Module Framework to Improve Scaffolded Active Learning in Manufacturing Engineering Education,» *Procedia Manufacturing*, vol. V, p. Pages 1128–1142, 2016.
- [12] D. A. Enriquez Vásquez y H. F. ortiz falconí, diseño y construcción de un módulo didáctico svc con hmi incorporado mediante el protocolo ethernet para el laboratorio de control eléctrico, latacunga: universidad de las fuerzas armadas extensión latacunga, 2014.
- [13] R. G. Cárdenas jaime y J. z. Villacís Macias, Diseño e implementación de modulo didactico para prácticas de laboratorio de controles industriales con aplicación en arranque e inversión de giro de motores, Guayaquil ecuador: Universidad politécnica salesiana del ecuador, 2015.

- [14] M. E. Burbano Hurtado y I. D. Lorenzo León, Análisis para sistemas trifásicos de transformadores conexiones abiertas y especiales, Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, 2015.
- [15] A. Mirkouei, R. Bhinge, C. McCoy, K. R. Haapala y D. A. Dornfeld, «A Pedagogical Module Framework to Improve Scaffolded Active Learning in Manufacturing Engineering Education,» *CrossMark*, vol. 5, n° 4, pp. 1128-1142, 2016.
- [16] S. E. Oses y L. E. Carrasco(, Módulos Alternativos en la Enseñanza de las Ciencias.Estrategia Didáctica Orientada al Logro de Aprendizajes Significativos, Temuco-Chile: Universidad de la Frontera,, 2013.
- [17] J. .. Grainger y W. .. Stevenson Jr, Análisis de sistemas de potencia, México: Mc Graw Hill, 1996.
- [18] B. S. Guru y R. H. Hüseyin, Máquina eléctricas y transformadores, México: Alfaomega, 2003.
- [19] M. Linares Rubiano y A. F. Serrano Medina , Autotransformadores y Transformadores Tridevanados, Bogotá: UNC, 2013.
- [20] J. J. Manzano Orrego , Mantenimiento de Máquinas Eléctricas, paraninfo, 2001.
- [21] A. Gutierrez páucar, Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas, Perú: UNI-FIEE, 2000.
- [22] E. Ras Oliva, Transformadores de potencia medida y protección, Barcelona: Marcombo, 1994.
- [23] W. T. mclyman, transformer and inductor design handbook, California,: Marcel Dekker, 2004.
- [24] S. Nasar , Electric machines and electromechanics, New York: Mc Graw Hill, 1997.
- [25] T. wildi, electrical machines, drives, and power systems, New Jersey: Prentice hALL, 2002.
- [26] Icontec, Norma Técnica Colombiana, Bogotá : Icontec.
- [27] I. o. E. a. E. Engineers, Trnsformer, New York: IEEE.