

# UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA,  
MECÁNICA ELECTRICA Y MECATRONICA



## IMPLEMENTACION DE UN MODULO DIDACTICO DE TRANSFORMADORES TRIFASICOS DE 3KVA. PARA CONEXIONES ESPECIALES

Tesis presentada por el Bachiller:

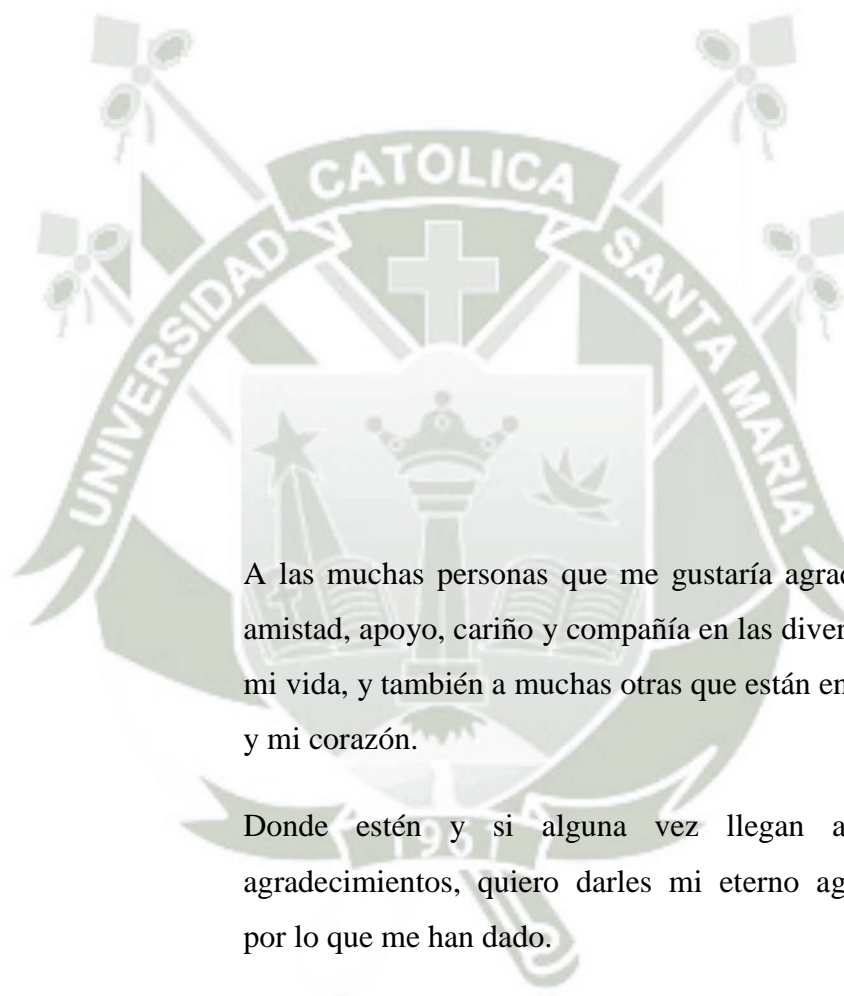
**ALEXANDER LINO CARPIO**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

AREQUIPA – PERÚ

2017

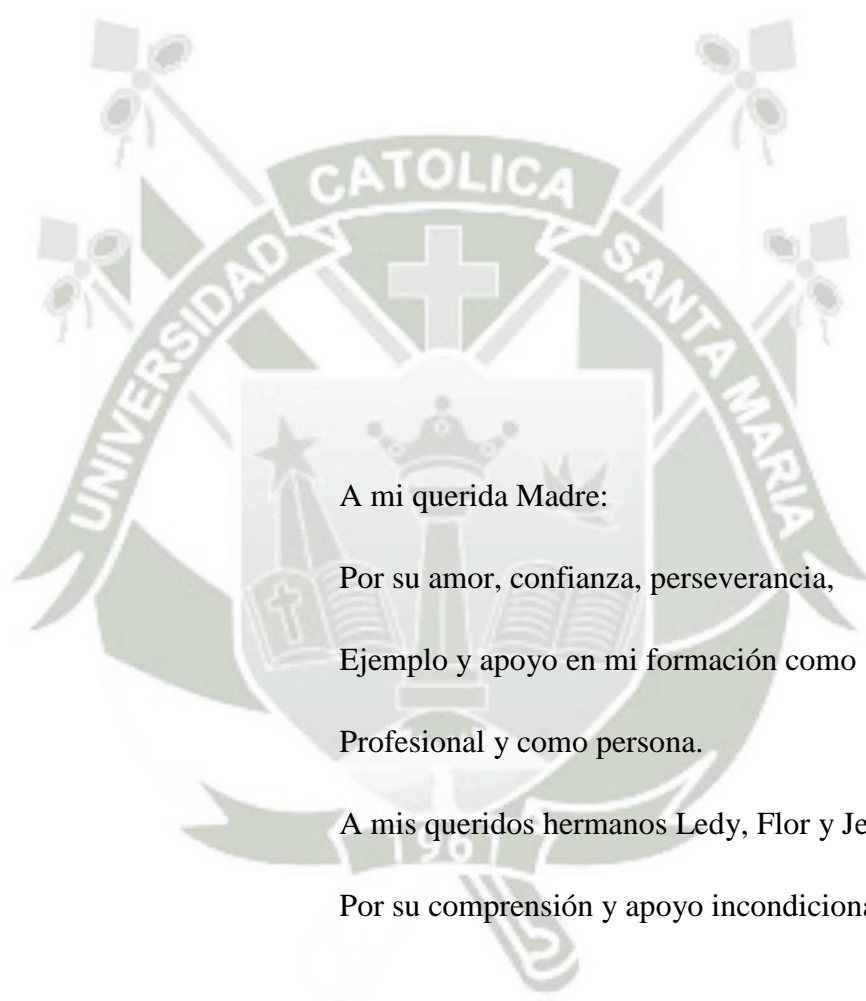


A las muchas personas que me gustaría agradecer, por su amistad, apoyo, cariño y compañía en las diversas etapas de mi vida, y también a muchas otras que están en mi memoria y mi corazón.

Donde estén y si alguna vez llegan a leer estos agradecimientos, quiero darles mi eterno agradecimiento por lo que me han dado.

**Muchas gracias.**

**Alexander Lino Carpio**



A mi querida Madre:

Por su amor, confianza, perseverancia,  
Ejemplo y apoyo en mi formación como  
Profesional y como persona.

A mis queridos hermanos Ledy, Flor y Jesús

Por su comprensión y apoyo incondicional

**Muchas gracias.**

**Alexander Lino Carpio**

## ÍNDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>10</b>
<b>CAPITULO I: GENERALIDADES.....</b>	<b>11</b>
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	11
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1. Objetivo General .....	12
1.2.2. Objetivos Específicos.....	12
1.3 ALCANCES .....	12
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO .....	13
1.4.1. Justificación social .....	13
1.4.2. Justificación técnica .....	13
<b>CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
2.1 ASPECTOS GENERALES.....	14
2.1.1. Clasificación y Utilización de los Transformadores.....	14
2.1.2. Partes Componentes de un Transformador.....	17
2.1.3. Parámetros eléctricos empleados .....	22
2.1.4. Normas y Especificaciones aplicables.....	24
2.2 TEORÍA de TRANSFORMADORES ELECTRICOS.....	25
2.2.1. Principios de operación del transformador monofásico .....	25
2.2.2. Reactancia de Dispersión en los Transformadores .....	32
2.2.3. Circuito equivalente de un transformador .....	33
2.2.4. Circuito equivalente aproximado de un transformador .....	34
2.2.5. Transformador Trifásico .....	35
2.2.6. Perdidas de energía en los núcleos ferromagnéticos .....	48
2.3 PARAMETROS DEL TRANSFORMADOR. ....	52
2.3.1. Ensayo en vacío .....	52
2.3.2. Ensayo en cortocircuito.....	55
2.4. DISEÑO DE TRANSFORMADORES.....	58
2.4.1. Consideraciones generales.....	58
2.4.2. La construcción del núcleo.....	58

2.4.3 Elementos de los núcleos de transformadores.....	59
2.4.4 Diseño y Cálculo de Transformadores de Distribución.....	61
<b>CAPITULO III: MATERIALES Y PROCESO DE MANUFACTURA DEL TRANSFORMADOR TRIFASICO .....</b>	<b>72</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	72
3.2 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL NÚCLEO ACORAZADO.....	77
3.3 PROCESO DE MANUFACTURA DE LAS BOBINAS.....	80
<b>CAPITULO IV: PARAMETROS ELECTRICOS DEL TRANSFORMADOR TRIFASICO DE 3KVA QUE CONFORMA EL MODULO DIDACTICO PARA CONEXIONES ESPECIALES .....</b>	<b>84</b>
4.1 DATOS DE PLACA O NOMINALES DEL TRANSFORMADOR TRIFASICO.....	84
4.2 ENSAYOS SIMULADOS EN EL TRANSFORMADOR, EMPLEANDO EL SOFTWARE ESPECIALIZADO MATHCAD.....	85
<b>CAPITULO V: ELABORACIÓN DE LAS GUIAS DE PRÁCTICAS PARA EL MODULO TRANSFORMADOR TRIFASICO.....</b>	<b>103</b>
5.1. PRUEBAS, ENSAYOS Y CONEXIONES.....	103
5.2. GUÍAS DE PRÁCTICAS. ....	103
5.2.1 Metodología de las Prácticas .....	103
5.3. MODELOS DE GUÍAS DE PRÁCTICAS:.....	105
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>153</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>154</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>155</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>156</b>
<b>ANEXO 1 MATERIALES AISLANTES ELÉCTRICOS .....</b>	<b>157</b>
<b>ANEXO 2 BARNIZ DIELECTRICO .....</b>	<b>163</b>
<b>ANEXO 3 CONDUCTORES ELÉCTRICOS.....</b>	<b>165</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b>	<i>Perdidas en acero al silicio a 60 Hz.</i>	18
<b>Tabla 2:</b>	<i>Comparación de las propiedades físicas del aluminio y cobre.</i>	19
<b>Tabla 3:</b>	<i>Densidad de flujo medio en función de la potencia en transformadores.</i>	62
<b>Tabla 4:</b>	<i>Valores de la constante C para el cálculo de flujo.</i>	64
<b>Tabla 5:</b>	<i>Valores medios de Volts/Espira en función de la Potencia.</i>	65
<b>Tabla 6:</b>	<i>Densidad de corriente para distintos transformadores.</i>	66
<b>Tabla 7:</b>	<i>Valores medios de Ampere-Espira/Centímetro en función de la potencia y tipo de transformadores.</i>	67
<b>Tabla 8:</b>	<i>Espeso de tubos aislantes contra tensión de operación en transformadores.</i>	68
<b>Tabla 9:</b>	<i>Distancias mínimas para diseño de núcleos trifásico tipo columna.</i>	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b>	<i>Diagrama eléctrico, transformador monofásico.</i>	15
<b>Figura 2:</b>	<i>Diagrama eléctrico, transformador trifásico.</i>	15
<b>Figura 3:</b>	<i>Tipos de núcleo de transformadores.</i>	16
<b>Figura 4:</b>	<i>Tanque con radiadores tubulares.</i>	21
<b>Figura 5:</b>	<i>Transformador monofásico con el secundario en circuito abierto.</i>	25
<b>Figura 6:</b>	<i>Variación senoidal del flujo con el tiempo.</i>	27
<b>Figura 7:</b>	<i>Transformador monofásico con carga en el secundario.</i>	31
<b>Figura 8:</b>	<i>Diagrama vectorial del transformador en vacío.</i>	31
<b>Figura 9:</b>	<i>Flujo de dispersión en los transformadores.</i>	33
<b>Figura 10:</b>	<i>Circuito equivalente aproximado de un transformador.</i>	34
<b>Figura 11:</b>	<i>Circuito equivalente aproximado de un transformador ideal.</i>	35
<b>Figura 12:</b>	<i>Núcleos de transformadores trifásicos tipo columna (o Core) y tipo acorazado</i>	35
<b>Figura 13:</b>	<i>Análisis deductivo de la construcción de un transformador trifásico tipo núcleo.</i>	36
<b>Figura 14:</b>	<i>Constitución de transformadores; (a) conexión Y-Y y (b) conexión -</i>	37
<b>Figura 15:</b>	<i>Diagrama vectorial de cargas equilibradas.</i>	38
<b>Figura 16:</b>	<i>Representación abstracta de la suma de flujos trifásicos.</i>	39
<b>Figura 17:</b>	<i>Aplicación de la adición vectorial de los flujos en un núcleo trifásico para economizar material.</i>	40
<b>Figura 18:</b>	<i>Conexión delta-delta de transformadores; (a) esquema eléctrico; (b) y (c) diagramas vectoriales.</i>	42
<b>Figura 19:</b>	<i>Conexión estrella-estrella con neutro aislado; (a) conexión eléctrica; (b) carga equilibrada, (c) carga desequilibrada.</i>	44
<b>Figura 20:</b>	<i>Conexión delta-estrella de transformadores; (a) esquema eléctrico; (b) y (c) diagramas vectoriales.</i>	45
<b>Figura 21:</b>	<i>Conexión estrella-delta de transformadores; (a) esquema eléctrico; (b) y (c) diagramas vectoriales.</i>	47
<b>Figura 22:</b>	<i>Área del ciclo de histéresis.</i>	48
<b>Figura 23:</b>	<i>Corrientes de Foucault en las masas y chapas de hierro.</i>	49

<b>Figura 24:</b> Disposición de los aparatos de medida para determinar la polaridad.....	52
<b>Figura 25:</b> Esquema eléctrico del ensayo de vacío. ....	53
<b>Figura 26:</b> Circuito equivalente en vacío y diagrama fasorial correspondiente. ....	54
<b>Figura 27:</b> Esquema para hallar las pérdidas reales en el hierro.....	54
<b>Figura 28:</b> Circuito equivalente de cortocircuito y esquema fasorial de tensiones.....	56
<b>Figura 29:</b> Fleje de acero al silicio estandarizado de 100 mm.de ancho.....	72
<b>Figura 30:</b> Conductor de Cobre Electrolítico Recocido en bobina.....	73
<b>Figura 31:</b> Aislante de film poliéster .....	73
<b>Figura 32:</b> Aislante barniz.....	74
<b>Figura 33:</b> Aislante en cintas de vidrio virgen .....	74
<b>Figura 34:</b> Papel PRESSPAN aislante de alta dureza .....	75
<b>Figura 35:</b> Cinta aislante de algodón de ½ y ¾de pulgada.....	75
<b>Figura 36:</b> Spaguetty de fibra de vidrio simple.....	76
<b>Figura 37:</b> Spaguetty de fibra de vidrio reforzada .....	76
<b>Figura 38:</b> Chapas de acero silicoso grado M-4 para la fabricación de núcleos.....	77
<b>Figura 39:</b> Proceso de armado del núcleo magnético.....	78
<b>Figura 40:</b> Prensado del núcleo en forma horizontal con ángulos y varilla roscada .....	79
<b>Figura 41:</b> Núcleo en posición vertical para desmontar la parte superior del yugo.....	79
<b>Figura 42:</b> Prensado de las columnas con cinta poliéster.....	80
<b>Figura 43:</b> Preparado de la matriz de la bobina.....	80
<b>Figura 44:</b> Bobina preformada, trazado de cada cierto tramo para las derivaciones.....	81
<b>Figura 45:</b> Presentación de las tres bobinas.....	82
<b>Figura 46:</b> Proceso de aislamiento de bobina.....	82
<b>Figura 47:</b> Vista de frente del transformador de potencia trifásico .....	83
<b>Figura 48:</b> Vista posterior del transformador de potencia trifásico .....	83
<b>Figura 49:</b> Transformador trifásico componente del modulo.....	84

## RESUMEN

Hoy en día, la gran mayoría de los sistemas trifásicos, tanto para la producción como para el transporte y la distribución de la energía eléctrica son de Corriente Alterna.

Es por lo cual, el estudio de los transformadores trifásicos es de mucha importancia, en el mundo de las maquinas eléctricas. En nuestra Universidad contamos con un laboratorio de Electricidad en la cual se efectúan las prácticas de los cursos de máquinas eléctricas, pero no se cuenta con módulos de transformadores trifásicos con múltiples salidas que nos permitirían investigar sobre todos los tipos de conexiones existentes en los transformadores de potencia trifásicos.

En esta tesis se presenta la implementación de un módulo de transformadores trifásicos para conexiones especiales, con el cual se podría realizar prácticas mucho más especializadas tales como la conexión zigzag y la conexión en polígono, pudiendo modificar además el número de vueltas de las bobinas del lado primario y secundario, lo cual nos permitiría no solo tener tensiones de salida de diferentes amplitudes sino y sobre todo podríamos variar el ángulo de desfaseamiento entre dichas ondas. Por lo que se plantea no solamente la implementación en si del módulo, sino que además realizar un aporte de guías de prácticas desarrolladas para dicho modulo.

Por lo que el modulo a implementar puede servir a nuestros compañeros de pregrado y postgrado, en sus prácticas generales y especializadas, además de servir como equipamiento para temas de investigación mas profundo.

Este módulo trifásico puede estar conformando de un único núcleo magnético en el que se han dispuesto tres columnas sobre las que sitúan los arrollamientos primario y secundario de cada una de las fases con varias salidas en cada fase.

**Palabras claves:** Modulo didáctico, transformadores trifásicos

## ABSTRACT

Today, the vast majority of three-phase systems, both for production and for the transportation and distribution of electrical energy, are Alternating Current.

This is why the study of three-phase transformers is very important, in the world of electric machines. In our University we have an Electricity laboratory in which the practices of the courses of electrical machines are carried out, but there are no three phase transformer modules with multiple outputs that would allow us to investigate all the types of connections in the transformers of Three-phase power.

This thesis presents the implementation of a three-phase transformer module for special connections, with which it could carry out much more specialized practices such as the zigzag connection and the connection in polygon, being able to modify also the number of turns of the side coils Primary and secondary, which would allow us not only to have output voltages of different amplitudes but above all we could vary the angle of phase difference between these waves. So it is not only the implementation of the module itself, but also a contribution of guides of practices developed for this module.

So the module to be implemented can serve our fellows of undergraduate and graduate, in their general and specialized practices, as well as serve as equipment for more profound research topics.

This three-phase module may consist of a single magnetic core in which three columns are arranged on which the primary and secondary windings of each of the phases are located with several outputs in each phase.

**Key words:** Didactic module, three-phase transformers

## CAPITULO I: GENERALIDADES

### 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los transformadores en el campo doméstico como en el industrial, cobran gran importancia ya que con ellos podemos cambiar la amplitud del voltaje, podemos aislar eléctricamente el lado primario del secundario, se puede una operación más segura en los equipos además en los transformadores trifásicos de acuerdo a la conexión de sus bobinas, podemos filtrar las ondas armónicas que se generan por los campos electromagnéticos, todos estos aspectos son vistos en los cursos teóricos de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica eléctrica y Mecatrónica, sin embargo la parte práctica se ve muy limitada ya que no se cuenta con módulos de transformadores trifásicos de múltiples conexiones, para poder experimentar y comprobar todos los aspectos teóricos, limitándose básicamente a las prácticas trifásicas con bancos de transformadores, es decir transformadores monofásicos, conectados entre sí.

Por tanto se hace necesario implementar un módulo de transformadores trifásicos para conexiones especiales, es decir que contara con múltiples salidas y entradas, con el cual se podría realizar prácticas mucho más especializadas tales como la conexión zigzag y la conexión en polígono, pudiendo modificar además el número de vueltas de las bobinas del lado primario y secundario, además se podrá analizar detalladamente los fenómenos que ocurren con los cambios de polaridad en las bobinas de un transformador observando su comportamiento al sumarle o restarle voltaje a las bobinas de acuerdo a sus conexiones. Dicho modulo será de una potencia de 2KVA.

Además una vez elaborado dicho modulo y con sus respectivas guías de práctica se donará al Laboratorio de Electricidad de la Universidad católica de Santa María, para su utilización tanto en los cursos de pregrado como postrado.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo General

- Implementar un módulo de transformadores trifásicos para conexiones especiales de 3KVA.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Construir el transformador trifásico para conexiones especiales de potencia de 3KVA, 380V/ variable, 60 Hz.
- Realizar un análisis riguroso de las características del módulo del transformador trifásico, bajo diferentes regímenes y condiciones de carga mediante pruebas específicas.
- Elaborar guías de práctica para el modulo del transformador trifásico.
- Implementar los laboratorios de Electricidad de nuestra Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.
- Contribuir con uno de los equipos necesarios, transformador trifásico para conexiones especiales de potencia de 2KVA, 380V/ variable, 60 Hz, para los cursos de pregrado, postgrado y trabajos de investigación a realizarse en nuestro Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.

## 1.3 ALCANCES

El alcance más importante de este proyecto de tesis es el de contribuir a la formación profesional de estudiantes y la investigación por parte de los docentes de nuestro Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica, mediante la implementación del módulo del transformador trifásico para conexiones especiales de potencia de 2KVA. Así como el de desarrollar las guías de práctica básicas de dicho modulo.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El presente es un trabajo aplicativo, en el área de máquinas eléctricas, a continuación se presenta su debida justificación.

### 1.4.1 Justificación social

El presente trabajo va a contribuir con el desarrollo intelectual de los alumnos en las prácticas que se desarrollan en el laboratorio, y egresados que realicen proyectos de tesis del área de Electricidad de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.

### 1.4.2 Justificación técnica

El presente trabajo va a contribuir con los proyectos de investigación de pregrado y postgrado que se desarrollen en el área de Electricidad de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica, además en el desarrollo de la presente tesis se va a presentar guías de práctica que servirán a los alumnos de pregrado y como base para postgrado e investigaciones.

## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 ASPECTOS GENERALES.

El transformador es un aparato estático empleado para transferir la energía eléctrica de un circuito de corriente alter a otro, sin variación de la frecuencia. Esta transferencia va acompañada habitualmente de un cambio de tensión, aunque también se manejan de relación uno a uno. Un transformador puede recibir energía y devolverla a una tensión más elevada, en cuyo caso se denomina transformador elevador, o puede devolverá a una tensión más baja, en cuyo caso es un transformador reductor, en el caso en que la energía suministrada tenga la misma tensión que la recibida en el transformador, se dice entonces que este tiene una relación de transformación igual a la unidad.

Los transformadores al no tener órganos giratorios, requieren poca vigilancia y escasos gastos de mantenimiento. El costo de los transformadores por kilowatts es bajo. Comparado con el de otros aparatos o maquinas, y su rendimiento es mucho muy superior.

#### 2.1.1 Clasificación y Utilización de los Transformadores

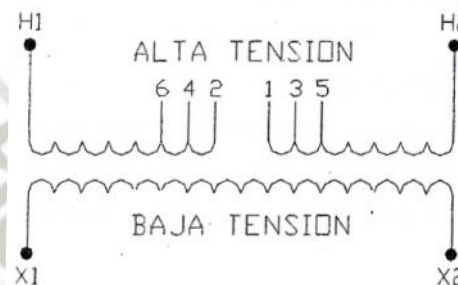
Los transformadores pueden ser clasificados de distintas maneras, según se tome como base la operación, la construcción o la utilización; así tenemos que:

**a) Por la Operación.-** Se refiere a la energía o potencia que manejan dentro del sistema eléctrico:

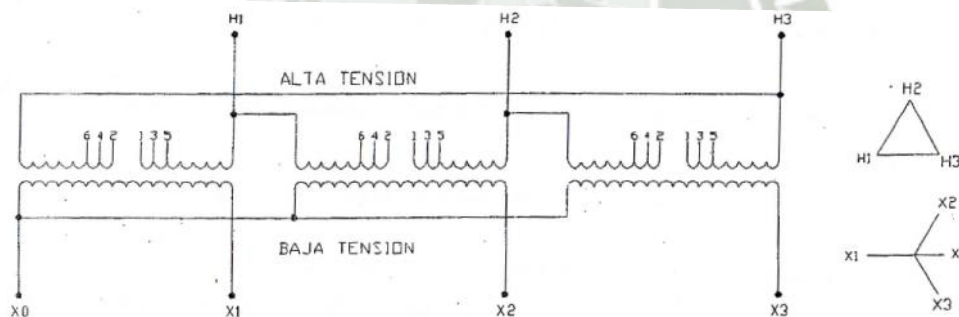
- **Transformadores de Distribución.-** Los que tienen capacidad desde 5 hasta 500 kVA ( monofásicos y/o trifásicos)
- **Transformadores de Potencia.-** Los que tienen capacidades mayores de 500 kVA.

**b) Por el número de fases.-** De acuerdo a las características del sistema al que se conectara:

- **Monofásico.-** Transformadores de potencia o de distribución que son conectado a una línea o fase y un neutro o tierra. Tienen un solo devanado de alta tensión y uno de baja tensión
- **Trifásico.-** Transformadores de potencia o de distribución que son conectados a 3 líneas o fases y pueden estar o no conectados a un neutro común o tierra, tiene 3 devanados de alta tensión y 3 devanados de baja tensión.



**Figura 1:** Diagrama eléctrico, transformador monofásico.



**Figura 2:** Diagrama eléctrico, transformador trifásico.

**c) Por su Utilización.-** De acuerdo a la posición que ocupan dentro del sistema:

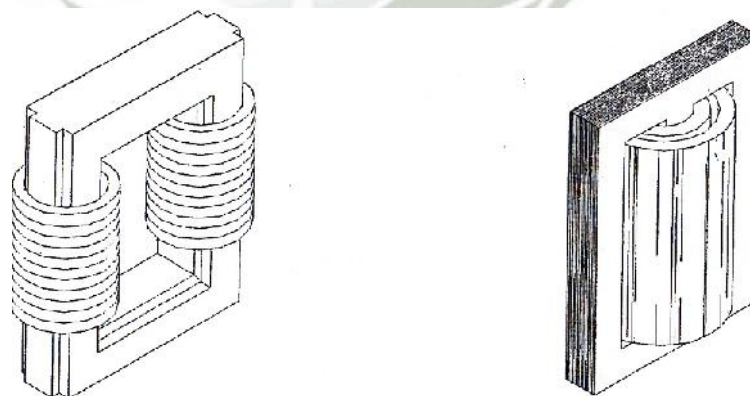
- **Transformador para generador.-** Son transformadores de potencia que van conectados a la salida del generador. Proporcionan la energía a la línea de transmisión.
- **Transformador de subestación.-** Los transformadores de potencia que se conectan al final de la línea de transmisión para reducir la tensión a nivel de subtransmisión.

- **Transformador de distribución.-** Reducen la tensión de subtransmisión a tensiones aplicables en zonas de consumos.
- **Transformadores especiales.-** Son transformadores de potencia diseñados para aplicaciones no incluidas en las anteriores y que pueden ser: reguladoras de tensión, transformadores para rectificador, transformadores para horno de arco eléctrico, autotransformadores, autotransformadores variables para pruebas, transformadores para fuentes de corriente directa y muchos otros.
- **Transformadores de instrumentos.-** Son transformadores de potencial y transformadores de corriente que son usados en la medición, en la protección y en el control.

**d) Por la Construcción o Forma del Núcleo.-** de acuerdo con la posición que existe entre la colocación de las bobinas y el núcleo, se conocen o generalizan por dos tipos:

- **Núcleo acorazado.-** También llamado tipo “Shell”, es aquel en el cual el núcleo se encuentra cubriendo los devanados de baja y alta tensión.
- **Núcleo no acorazado.-** También conocido como tipo “Columna” o “Core” y es aquel en el cual las bobinas abarcan una parte considerable del circuito magnético.

En las figuras 3 se pueden ver ambos tipos de núcleos y las formas constructivas de los mismos.



(a) Núcleo no acorazado.

(b) núcleo acorazado.

**Figura 3:** Tipos de núcleo de transformadores.

**e) En función de las condiciones de servicio:**

- Para su uso interior.
- Para uso a la intemperie.

**f) En función de los lugares de instalación:**

- Tipo poste.
- Tipo subestación.
- Tipo pedestal.
- Tipo bóveda o sumergible.

**g) De acuerdo al tipo de enfriamiento.** Existen los sumergibles en aceite y los tipos secos, entre los sumergibles en aceite, tenemos:

- Tipo OA
- Tipo OA/FA
- Tipo OA/FA/FOA
- Tipo FOA
- Tipo OW
- Tipo FOW

Entre los tipos secos, tenemos:

- Tipo AA
- Tipo AFA
- Tipo AA/FA

**2.1.2 Partes Componentes de un Transformador**

Las partes que componen un transformador son clasificadas en cuatro grandes grupos, los cuales comprenden:

- a) El Circuito Magnético (Núcleo).**- El circuito magnético es la parte componente del transformador que servirá para conducir el flujo magnético generado, el cual concatenará magnéticamente los circuitos eléctricos del transformador. El circuito magnético se conoce comúnmente como núcleo, este núcleo se encuentra formado por láminas de acero al silicio de grano orientado de bajas pérdidas y una alta permeabilidad magnética.

Todas las láminas están aisladas en ambas caras por medio de un aislante inorgánico llamado “carlite” que consiste de una capa especial aislante aplicada en el proceso final de planchado y recocido.

Se tienen básicamente cuatro tipos de lámina de grano orientado, cuyas características se encuentran mencionadas en la tabla 3.

**Tabla 1: Perdidas en acero al silicio a 60 Hz.**

Grado de Orientación	Espesor		60 Hz.			
	Pulg.	mm.	Watts por Lb		Watts por Kg	
			15 kGauss	17 kGauss	15 kGauss	17 kGauss
M-2	0.007	0.18	0.42		0.93	
M-3	0.009	0.23	0.46		1.01	
M-4	0.011	0.28	0.51	0.74	1.12	1.63
M-6	0.014	0.35	0.66	0.94	1.46	2.07

El tipo de lámina más usual en la fabricación de núcleos para transformadores es la M-4, cuyas características de Watts por libra o Watts por kilogramo contra la densidad de flujo están dadas en la misma tabla 3.

**b) El Circuito Eléctrico (Devanados).**- Los devanados son la parte que componen los circuitos eléctricos del transformador (devanados primarios y secundarios). Los devanados se fabrican en diferentes tipos dependiendo de las necesidades del diseño, y los materiales que se utilizan, básicamente, son: el cobre y el aluminio.

La función de los devanados (primarios) es crear un flujo magnético para inducir en los devanados (secundarios) una fuerza electromotriz, y transferir potencia eléctrica del primario al secundario mediante el principio de inducción electromagnética; este proceso se desarrolla con una pérdida de energía muy pequeña.

Aun cuando el cobre tiene una baja resistencia específica su mayor costo comparado con el aluminio dio lugar al incremento del uso del aluminio (usado por primera vez en 1952) especialmente en transformadores de

distribución y pequeña potencia, ya se sumergidos en liquido aislante o del tipo seco.

El diseñador debe considerar varias características particulares de ambos materiales. La tabla 2, presenta datos específicos de ciertas propiedades.

**Tabla 2:** Comparación de las propiedades físicas del aluminio y cobre.

PROPIEDAD	ALUMINIO	COBRE
Conductividad eléctrica a 20°C recocido.	62%	100%
Peso específico en gramos por centímetro cubico a 20°C.	2.7	8.89
Calor específico.	0.21	0.094
Punto de fusión C°.	660	1083
Conductividad térmica, a 20°C (calorías / °C / cm <sup>2</sup> / cm)	0.53	0.941
Esfuerzo mecánico a la tensión en (kg / mm <sup>2</sup> )	16	25

Las ventajas de las bobinas de cobre son:

- Resistencia mecánica.
- Conductividad eléctrica buena (bobina más pequeña).

Las ventajas de las bobinas de aluminio son:

- Estabilidad en el costo por suministro.
- Eficiente disipación de calor (capacidades muy pequeñas).
- Reducción en peso.

Los devanados de aluminio son construidos solamente en banda; en cambio los devanados de cobre pueden ser construidos con solera o conductor redondo, forrado con papel o esmaltado, o la combinación de ambos aislamientos dependiendo del tipo (seco o sumergido en líquido aislante), tensión y potencia del transformador.

**c) El sistema de aislamiento.-** Los transformadores poseen una serie de materiales aislantes los cuales juntos forman el sistema de aislamiento. Este sistema incluye materiales como:

- Cartón prensado (pressboard de entre 1.58mm a 6.35mm de espesor).
- Papel Kraft de 0.127 a 0.508mm de espesor.
- Papel manila y corrugado.
- Cartón prensado de alta densidad.
- Collares de cartón prensado y aislamientos finales.
- Partes de cartón prensado laminados.
- Esmalte y barnices.
- Recubrimientos de polvo epóxico.
- Madera de maple o machiche para armados.
- Fibra vulcanizada.
- Telas y cintas adhesivas, cintas de fibra de vidrio, etc.
- Fluido líquido dieléctrico que puede ser aceite mineral, aceite de siliconas.

El sistema de aislamiento aísla los devanados del transformador entre ellos y a tierra, así como las partes cercanas al núcleo y a las partes de acero que forman la estructura.

Por lo tanto, el aislamiento es mucho más que “solamente un medio mecánico para conservar los alambres apartados”.

Los materiales mencionados anteriormente forman el sistema de aislamiento sólido que debe cumplir con cuatro importantes funciones:

- Calidad para soportar las tensiones relativamente altas encontradas en servicio normal (esfuerzos dieléctricos). Esto incluye ondas de impulso y transitorios.
- Calidad para soportar esfuerzos mecánicos y térmicos (calor) los cuales acompañan a un cortocircuito.
- Calidad para prevenir excesivas acumulaciones de calor (transmisión de calor).

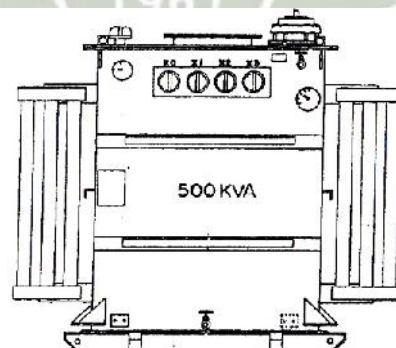
- Calidad para mantener las características deseadas para un periodo de vida de servicio aceptable dando un adecuado mantenimiento.

El aislante líquido que baña las bobinas, el núcleo y los materiales aislantes sólidos. Este fluido sirve para tres propósitos primordiales.

- Provee una rigidez dieléctrica.
- Proporciona un enfriamiento eficiente.
- Protege al demás sistema aislante.

Es evidente que cualquier debilitamiento en el aislamiento puede conducir a una falla en el transformador. El aislamiento está deteriorado cuando ha perdido una parte significativa de su propiedad dieléctrica original, característica mecánica o resistencia al impulso. La continuación en el proceso de deterioración terminara en lo inevitable, una falla mecánica o eléctrica.

**d) Tanque y Accesorios.-** Los transformadores deben ser construidos con un tanque hermético, con objeto de preservar el aceite ya que este tiene la función de dieléctrico y también de refrigerante del conjunto núcleo-bobinas. El transformador debe permanecer perfectamente sellado desde una temperatura de  $-5^{\circ}\text{C}$  a un máximo de  $105^{\circ}\text{C}$  en la parte superior del líquido aislante. La figura 4, muestra en conjunto un tanque de transformador.



**Figura 4:** Tanque con radiadores tubulares.

Entre los accesorios más importantes del transformador de distribución, están:

- a) Boquillas de porcelana de A.T. y B.T.
- b) Cambiador de derivaciones o taps.
- c) Terminales de cobre para A.T. y B.T.
- d) Válvula de muestreo de aceite.

Para los transformadores de potencia habrá que incluir lo siguiente:

- e) Termómetros con contacto y sin contacto de alarma.
- f) Niveles de aceite con contacto y sin contacto de alarma.
- g) Relevador Buchholz
- h) Ventiladores, etc.

A todo lo anterior habrá que agregar el bastidor y los herrajes.

### 2.1.3 Parámetros eléctricos empleados

Al hablar de transformadores, nos encontramos con términos eléctricos que conviene manejar adecuadamente. A continuación mencionaremos el concepto de los parámetros eléctricos más empleados en nuestro caso.

- a) **Voltaje o tensión.-** Es la fuerza que origina el flujo de corriente y se expresa:

$$V = \text{voltios}$$

$$kV = \text{voltios} \times 1000 (\text{voltios})$$

- b) **Corriente.-** Partículas eléctricas (electrones) libres que se mueven en un cierto sentido dentro del conductor del devanado, se expresa:

$$I = \text{Amperes}$$

- c) **Capacidad (Potencia).-** Energía necesaria para mantener un cierto flujo de corriente demandado por una carga. Se expresa:

$$P = kV \times A = kVA = \text{kilo voltio ampere}$$

- d) Flujo Magnético.-** Líneas de fuerza invisibles que viajan por el núcleo proporcionando el campo necesario para realizar la inducción. Se expresa:

$$w = Gauss$$

- e) Perdidas en vacío.-** Energía consumida por el núcleo del transformador al estar el primario conectado a la fuente y el secundario sin carga (en vacío). Se expresa:

$$W_{fe} = Watts$$

- f) Corriente de excitación.-** Corriente que circula por el devanado primario al aplicarle su tensión con el secundario sin carga. Es la corriente necesaria para producir el flujo magnético y se expresa en porciento de la corriente nominal como:

$$I_{ex} = \% I_N$$

- g) Perdidas con carga.-** Energía consumida por los devanados al tener en el secundario una carga demandando la corriente nominal de este devanado. Se expresa como:

$$W_{Cu} = Watts$$

- h) Impedancia (tensión de impedancia).-** Tensión aplicada al primario, capaz de producir la corriente nominal e el secundario, estando las terminales de este último en cortocircuito. Se expresa en porciento de la tensión nominal del primario y representa la oposición del transformador a la corriente durante el cortocircuito.

$$\% Impendencia = \% Z$$

- i) BIL (Basic Impulse Insulation Level).-** Es el nivel básico de aislamiento al impulso (NBI), y representa la capacidad en un transformador de soportar una “sobretensión” producida por una descarga atmosférica o por apertura-cierre del circuito de alimentación del transformador. Indica la tensión máxima de la sobretensión que debe soportar el equipo.

$$BIL = kV$$

- j) Eficiencia.-** Relación entre la potencia útil de salida y potencia de entrada.

$$\%n = P_s / P_E \times 100 \%$$

Dónde:  $P_s$ : potencia de salida útil;  $P_E$ : Potencia de entrada

- k) Regulación.-** Variación de la tensión en el secundario, expresada en % de la tensión nominal del mismo, que se produce al conectar una carga y manteniendo constante la tensión aplicada al primario.

$$\%Reg = (V_{02} - V_2) / V_2 \times 100$$

Dónde:  $V_{02}$ : tensión secundaria sin carga;

$V_2$ : tensión secundaria nominal bajo carga plena.

#### 2.1.4 Normas y Especificaciones aplicables

Los transformadores manufacturados por los fabricantes, son diseñados, fabricados y probados para cumplir con las siguientes normas y especificaciones, en su última revisión.

ANSI (American National Standard Institute)

C57.12.00 General requirements for distribution. Power and regulating transformers.

C57.12.00 a,b Thermal and Short circuit requirement supplement to ANSI C57.12.00.

C57.12.10 Requirements for Transformers 23000 – 10000 volts

C57.12.90 Test code for distribution, power and regulating Transformers.

C57.13 Requirements for instrument Transformers.

C62.1 Surge arresters and test code for outdoor apparatus bushings.

C76.2 Electrical dimensional and related requirements for outdoor apparatus bushings.

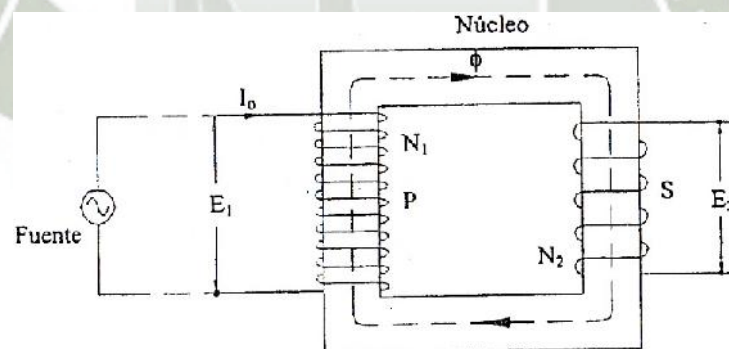
## 2.2 TEORÍA DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS.

### 2.2.1 Principios de operación del transformador monofásico

El transformador basa su operación en la acción mutua entre fenómenos eléctricos y magnéticos, y no contienen partes móviles o movibles (a la excepción hecha de los mecánicos para cambio de derivaciones y la impulsión de ventiladores o bombas de enfriamiento utilizados en los grandes transformadores de potencia). La transferencia de la energía eléctrica por inducciones electromagnéticas de un arrollamiento a otro, dispuestas en el mismo circuito magnético, se realiza con excelente rendimiento.

Las fuerzas electromotrices (f.e.m.) se inducen por la variación del flujo magnético.

Las espiras y el circuito están en reposo uno con respecto al otro, y las f.e.m. se inducen por la variación de la magnitud del flujo con el tiempo. La figura 5 permite aclarar este concepto



**Figura 5:** Transformador monofásico con el secundario en circuito abierto.

El núcleo, como se representa en la figura 3.5, está formado de chapas de acero (grado eléctrico) superpuestas y con aislamiento interlaminar propio, de forma rectangular.

En uno de los lados del núcleo se arrolla un devanado continuo P y en el opuesto otro devanado continuo S, que puede tener el mismo número de espiras que P, o no tenerlo, tal como se representa de una manera esquemática en la figura 1. Una fuente suministra corriente alterna al arrollamiento primario P, en el que, al estar montado sobre el núcleo, su f.m.m. produce flujo alternativo  $\phi$  en el mismo. Las espiras del arrollamiento S abrazan este flujo que, al ser alternativo, induce en S una f.e.m. de la misma frecuencia que el flujo. Debido a esta f.e.m. inducida, el arrollamiento secundario S es capaz de suministrar corriente y energía eléctrica. La energía por tanto, se transfiere del primario P al secundario S por medio del flujo magnético. El arrollamiento P, que recibe la energía, se llama el primario. El arrollamiento S, que suministra energía, se llama el secundario. En un transformador, cual quiera de los arrollamientos puede hacer de primario, correspondiendo al otro hacer de secundario, lo que solo depende de cuál es el que recibe la energía o el que la suministra a la carga.

#### 2.2.1.1 Fuerza electromotriz inducida en vacío.

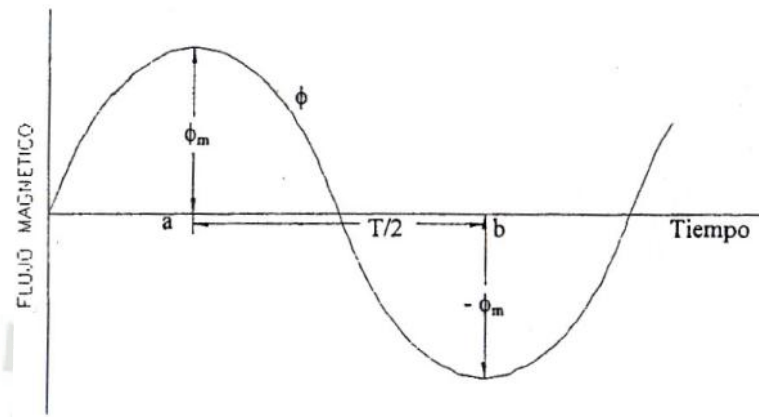
El flujo  $\phi$  o flujo común o mutuo, al pasar por el circuito constituido por el núcleo de hierro-acero eléctrico laminado, o solo lo abrazan las espiras del secundario S, sino también las del primario P, y, por lo tanto, debe inducir una f.e.m. en ambos arrollamientos S y P. Como el flujo en el mismo, en cada uno de ellos debe inducir la misma f.e.m. por espira, y la f.e.m. total inducida en cada uno de los arrollamientos debe ser proporcional al número de espiras que lo componen; es decir,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Siendo  $E_1$  y  $E_2$  la f.e.m. inducidas en el primario y en el secundario, y  $N_1$  y  $N_2$  los números de espiras en cada uno de ellos, respectivamente. En los transformadores ordinarios, la tensión en las terminales solamente difiere de la f.e.m. inducida en un porcentaje pequeño, de modo que para muchos casos prácticos puede decirse que las tensiones en terminales del primario y del secundario son proporcionales a sus respectivos números de espiras.

La f.e.m inducida en un transformador es proporcional a tres factores: la frecuencia  $f$ , el número de espiras  $N$  y el flujo instantáneo máximo  $W_m$ . La

ecuación de la f.e.m. inducida, suponiendo que el flujo varía según una ley senoidal, puede deducirse de la siguiente manera.



**Figura 6:** Variación senoidal del flujo con el tiempo.

La figura 6 representa el flujo común  $\phi$  que varía según una ley senoidal en función del tiempo. Entre los puntos a y b, la variación total del flujo es  $2W_m$  maxwell. Esta variación de flujo se produce durante un semiperíodo o en el tiempo  $T/2$  seg. Siendo T el periodo o tiempo necesario para que la onda complete un ciclo. El tiempo  $T/2$  es igual a  $1/2f$  segundos.

La f.e.m. media inducida es igual a la variación total del flujo dividida por el tiempo. Es decir,

$$e = -N \frac{2W_m}{\frac{T}{2}} 10^{-8} \text{ Volts}$$

$$e = -N \frac{2W_m}{\frac{1}{2f}} 10^{-8} \text{ Volts}$$

$$e = -4f N W_m 10^{-8} \text{ Volts}$$

Teniendo en cuenta que, en la senoidal, la relación entre el valor eficaz y el valor medio es 1.11 la f.e.m. eficaz inducida es:

$$e = -4.44f N W_m 10^{-8} \text{ Volts}$$

Habiéndose suprimido el signo negativo. El factor 4.44 es igual a 4 veces el factor de forma, que vale 1.11 para la curva senoidal. Si el flujo varía según una ley que no sea senoidal debe adoptarse un factor de forma  $K_f$ , distinto de 1.11

Puede deducirse más rigurosamente de la manera que sigue:

$$w = w_m \text{sen} \check{S}t$$

$$e = -N \frac{dw}{dt} 10^{-8} = -N w_m \check{S} \cos \check{S}t (10^{-8}) \text{ Volts}$$

Cuyo valor máximo es:

$$E_m = N w_m \check{S} 10^{-8} = 2f f N w_m 10^{-8} \text{ Volts}$$

De donde:

$$E = \frac{2f}{\sqrt{2}} f N w_m 10^{-8} = 4.44 f N w_m 10^{-8} \text{ Volts}$$

Si se emplea el sistema m.k.s. y,  $w$  y  $w_m$  se expresan en Weber, entonces la ecuación (3.02) se transformara en:

$$E = 4.44 f N w_m \text{ Volts}$$

El flujo máximo es  $w_m = B_m A$ , si  $B_m$  es la densidad de flujo máxima y A la sección transversal del núcleo, entonces la ecuación (2) puede escribirse:

$$E = 4.44 f N B_m A 10^{-8} \text{ Volts}$$

Esta forma suele ser más conveniente para el cálculo, ya que los núcleos de los transformadores se proyectan partiendo de la densidad de flujo admisible.

La expresión se suele llamar, con toda razón, la ecuación general del transformador. Si nos referimos al arrollamiento del lado primario, la tensión inducida es:

$$E_1 = 4.44 f N_1 B_m A 10^{-8} \text{ Volts}$$

De la misma forma; para el arrollamiento del lado secundario:

$$E_2 = 4.44 f N_2 B_m A 10^{-8} \text{ Volts}$$

### 2.2.1.2 Relación de tensiones y corrientes en un transformador

Refiriéndose a las ecuaciones anteriores, está claro que los volts por vuelta es exactamente la misma para los devanados primario y secundario porque se rigen con la misma ecuación  $4.44 f B_m A 10^{-8}$ . Esto significa que, en cualquier transformador, las tensiones inducidas en el primario y secundario están relacionadas una de la otra por la relación del número de vueltas del primario y del secundario. Así que:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

La ecuación puede ser derivada matemáticamente.

Los transformadores estáticos son extremadamente eficientes porque las únicas pérdidas son aquellas que se producen en el cobre de los devanados ( $RI^2$ ) y en el hierro (histéresis y corrientes de Eddy); de aquí que no hay pérdidas como resultado de la rotación, como están presentes en las máquinas rotatorias. Si asumimos que la potencia de entrada al transformador es igual a la potencia de salida del transformador (eficiencia = 100%) y considerando que las caídas de tensión son insignificantes, entonces:

$$E_1 \times I_1 \times FP_1 = E_2 \times I_2 \times FP_2$$

Esto es generalmente cierto si el factor de potencia  $FP_2$  de la carga del secundario es prácticamente igual al  $FP_1$  del primario. Por esta razón:

$$E_1 \times I_1 = E_2 \times I_2$$

Esto muestra que:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

y

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Esto es, la relación de tensiones  $E_1 : E_2$  y la relación de vueltas  $N_1 : N_2$  son ambas proporcionales a la relación inversa de las corrientes  $I_2 : I_1$ .

### 2.2.1.3 Relación de transformación

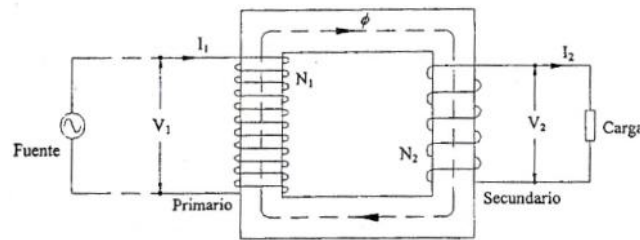
La relación de vueltas del primario y el secundario  $N_1 : N_2$ , las cuales equivalen a la relación de f.e.m. del primario y del secundario  $E_1 : E_2$  (ecuación 4), indica que la magnitud de la f.e.m. del primario es bajada o subida. La relación de vueltas, o la relación de tensiones inducidas, es llamada la relación de transformación, y es representada por el símbolo  $a$ , así que:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2}$$

Porque la entrada de tensión primario  $V_1$  y la tensión de carga del secundario  $V_2$  son casi iguales a sus tensiones inducidas respectivamente, la relación de las tensiones terminales  $V_1 : V_2$  es frecuentemente llamado la relación de transformación.

### 2.2.1.4 Corriente de vacío y corriente de carga

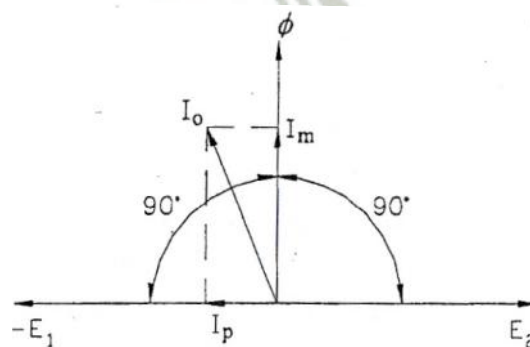
**a) Corriente de Vacío.-** La figura 7, representa un transformador con sus arrollamientos primario y secundario. Las direcciones del flujo, de las tensiones y de las corrientes están indicadas en la figura para el instante en que la terminal conductor superior primaria es positiva y la intensidad de la corriente aumenta. Supongamos primero que el secundario no tiene carga alguna. En este caso circula una corriente muy pequeña  $I_0$  en el primario, que suele ser del 1 al 3% de la corriente nominal del primario ( $I_1$ ).



**Figura 7:** Transformador monofásico con carga en el secundario.

La corriente de vacío ( $I_0$ ) del transformador, conocida también como corriente de excitación, genera f.m.m. que produce el flujo mutuo  $\phi$  y compensa también las pérdidas del núcleo o pérdidas en vacío.  $I_0$  Puede descomponerse en dos:  $I_m$  en fase con el flujo  $\phi$ , que genera f.m.m. que produce  $\phi$ ; y la otra  $I_p^2$ , en cuadratura con  $I_m$ , que corresponde a la corriente de pérdidas. Puesto que las pérdidas son pequeñas y el primario es muy inductivo,  $I_0$  tiene un retardo de casi  $90^\circ$  con respecto a la tensión  $V_1$  en las terminales.

También se tiene que, para todas las cargas ordinarias, la f.e.m.  $E_1$  Inducida en el primario por el flujo  $\phi$  es casi igual en magnitud a la tensión de terminales del primario  $V_1$ , y difiere de ella solo ligeramente debido a la pequeña impedancia del primario.



**Figura 8:** Diagrama vectorial del transformador en vacío.

**b) Corriente de Carga.-** Si se aplica una carga al secundario se tendrá una corriente  $I_2$  en este, cuya magnitud y desfase respecto a la tensión en los terminales de dicho secundario quedara determinada por las características de la carga. Sin embargo, en cada instante, la dirección de la corriente en el secundario debe ser tal que se oponga a las variaciones del flujo, de acuerdo con la ley de Lenz, que establece que una corriente inducida si tiene siempre una dirección que se opone a la causa que lo produce. En la figura de referencia se supone que la dirección del flujo es la de las agujas del reloj y que aumenta.

La variación de la f.c.e.m. en el primario al pasar de operación en vacío a operación en plena carga es aproximadamente de 1 o 2%. Como la f.c.e.m. es proporcional al flujo común  $\phi$ , el valor de  $\phi$  varia solo ligeramente dentro de los límites del trabajo del transformador, y, por lo tanto, los amperes-vuelta netos que actúan en el núcleo permanecen esencialmente invariables. El aumento de amperes-vuelta debidos al aumento de intensidad de corriente en el primario. Como el flujo se mantiene prácticamente constante, la corriente de excitación debe conservarse esencialmente constante.

### 2.2.2 Reactancia de Dispersión en los Transformadores

Hasta el momento no hemos considerado más que un flujo  $\phi$  común a los dos arrollamientos, pero los diagramas vectoriales que ya hemos construido demuestran que a causa de la pequeñez relativa de la f.m.m. en vacío, los amperes-vuelta primarios y secundarios son sensiblemente iguales y opuestos. En la figura 9, se ve claramente que :

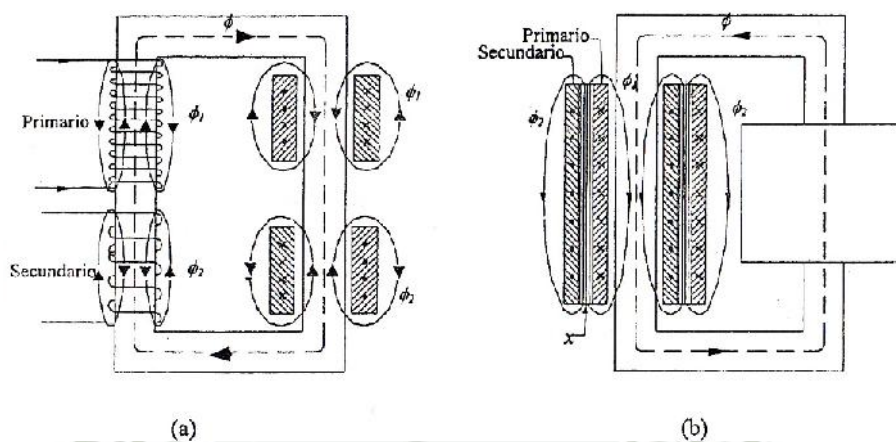
**a)** donde hay líneas de inducción abrazadas por los arrollamientos y cuyo conjunto constituye el flujo común  $\phi$ . Además se aprecia también

-líneas de inducción abrazadas solo por el arrollamiento primario. Su conjunto constituye el flujo de fuga  $W_1$  del primario con relación al secundario.

-líneas de inducción abrazadas solamente por el circuito secundario. Su conjunto constituye el flujo de fuga  $W_2$  del secundario con relación al primario.

Las bobinas primaria y secundaria, a fin de reducir los flujos de fuga  $W_1$  y  $W_2$ , no están dispuestas sobre cada rama del núcleo.

**b)** representa las líneas de inducción del flujo del primario  $W_1$  (no abrazado por la bobina secundaria) y las líneas de inducción del flujo de fuga secundario (que se cierra en el interior del arrollamiento secundario y no induce f.e.m. en el primario).



**Figura 9:** Flujo de dispersión en los transformadores.

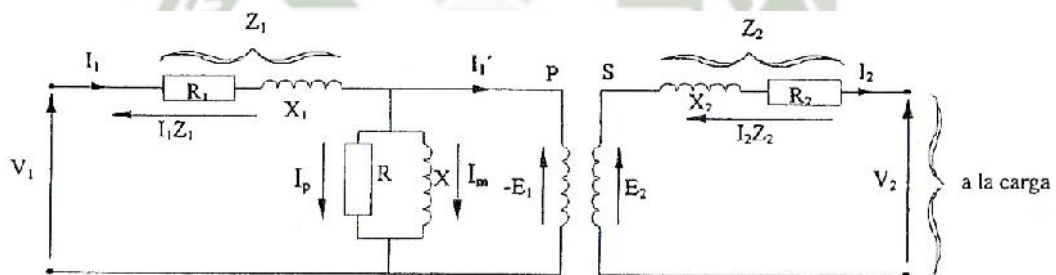
En los transformadores utilizados en la distribución de energía eléctrica, las reactancias de dispersión  $X_1$  y  $X_2$  se mantienen pequeñas construyendo el transformador de modo que  $W_1$  y  $W_2$  sean pequeños. Los flujos de dispersión tienen que concentrarse entonces dentro del espacio comprendido entre los arrollamientos, y cuanto más pequeño sea dicho espacio, tanto menores serán los flujos y las reactancias de dispersión.

### 2.2.3. Circuito equivalente de un transformador

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

secundario y la carga. Así, en la figura 10, P y S representa los devanados primario y secundario de un transformador ideal.  $R_1$  y  $R_2$  son resistencias iguales para las resistencias del devanado primario y secundario del transformador real. Similarmente, las reactancias inductivas  $X_1$  y  $X_2$  representan las reactancias de los devanados debido al flujo de dispersión en el transformador real.

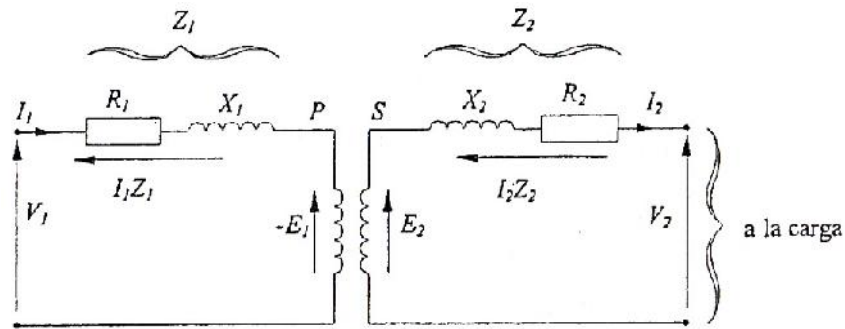
La reactancia inductiva X es tal que toma una corriente igual a la corriente de magnetización  $I_m$  del transformador real. Las pérdidas del núcleo debido a la histéresis y a las corrientes de Eddy son representados por un resistor R, de valor tal que toma una  $I_p$  igual a la componente de pérdidas del núcleo de la corriente primaria, por tanto  $I_p^2 R$  es igual a las pérdidas del núcleo del transformador real. La resultante de  $I_m$ , es  $I_p$  e  $I_o$ , sabiendo que la corriente es la que toma el transformador en vacío.



**Figura 10:** Circuito equivalente aproximado de un transformador.

#### 2.2.4. Circuito equivalente aproximado de un transformador

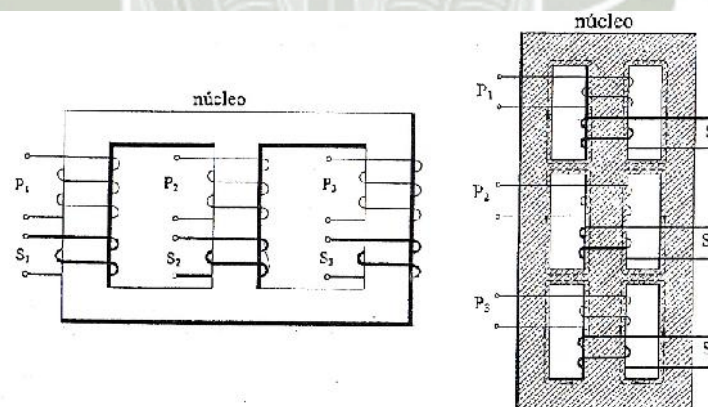
Puesto que la corriente en vacío de un transformador de distribución es solamente de 1 a 3% de la corriente primaria a plena carga, podemos omitir el circuito paralelo R y X de la fig. 10 sin la introducción de un error apreciable cuando estamos considerando el comportamiento del transformador a plena carga. Así tenemos el circuito equivalente simplificado en la figura 11.



**Figura 11:** Circuito equivalente aproximado de un transformador ideal.

### 2.2.5. Transformador Trifásico

Un transformador trifásico se compone esencialmente de tres transformadores monofásicos con sus tres núcleos formando un solo conjunto como se muestran en la figura 12 para los circuitos trifásicos se consigue una gran economía, tanto en costo como en espacio ocupado, y se utiliza un solo transformador trifásico en lugar de tres monofásicos, cada uno con su propio depósito (tanque) los inconvenientes principales del transformador trifásico estriban en que cualquier avería en el arrollamiento de una fase deja todo el transformador fuera de servicio, y también en que la reparación es más costosa.

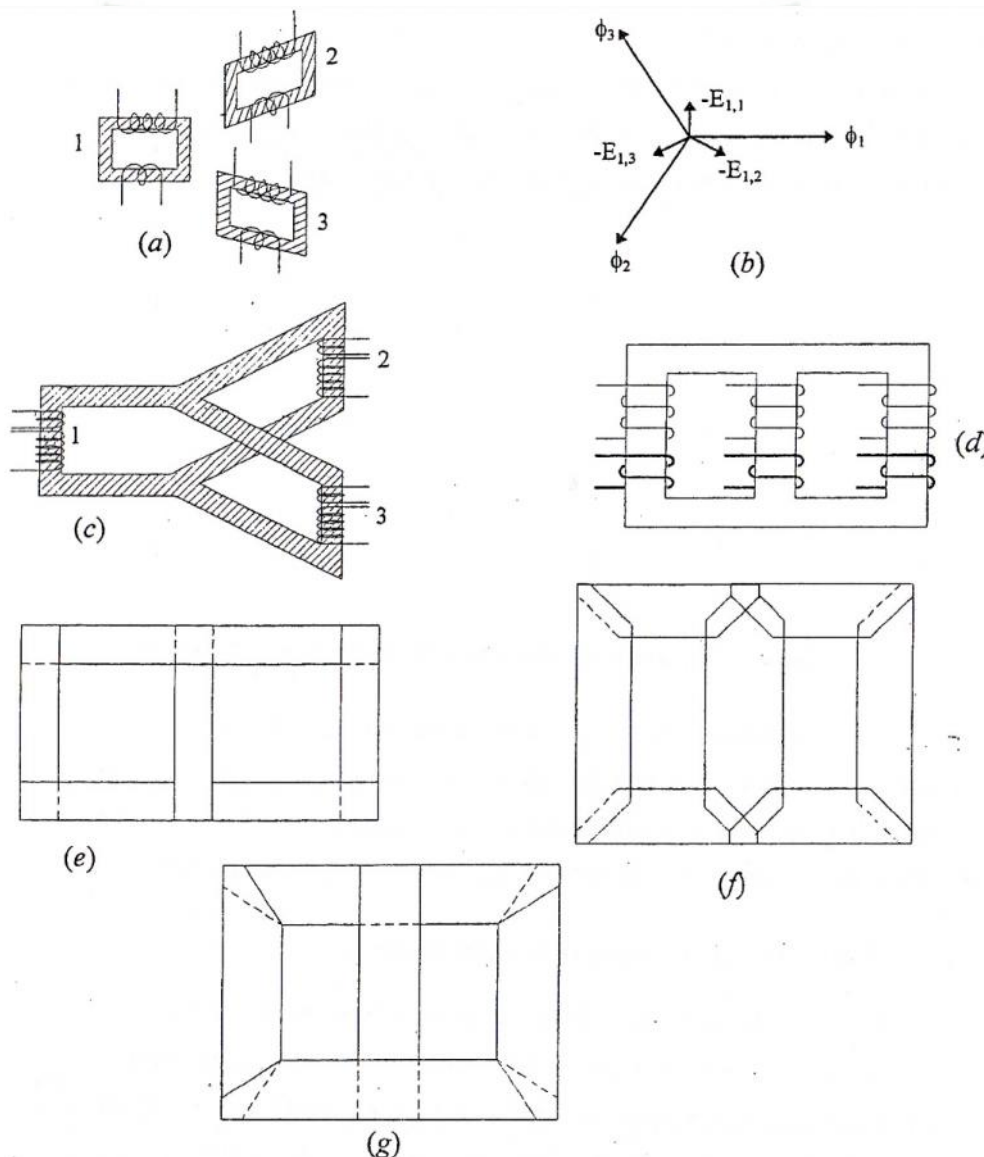


**Figura 12:** Núcleos de transformadores trifásicos tipo columna (o Core) y tipo acorazado

### 2.2.5.1 Constitución del Transformador de Tres Columnas

Supongamos el banco de la figura 13, a base de cargas equilibradas en los secundarios, en (b) se han representado los vectores  $-E_1$  de cada uno de los transformadores 1,2 y 3. También se han representado los flujos  $\phi_1, \phi_2$  y  $\phi_3$ . La suma de estos da:

$$W_1 + W_2 + W_3 = 0$$



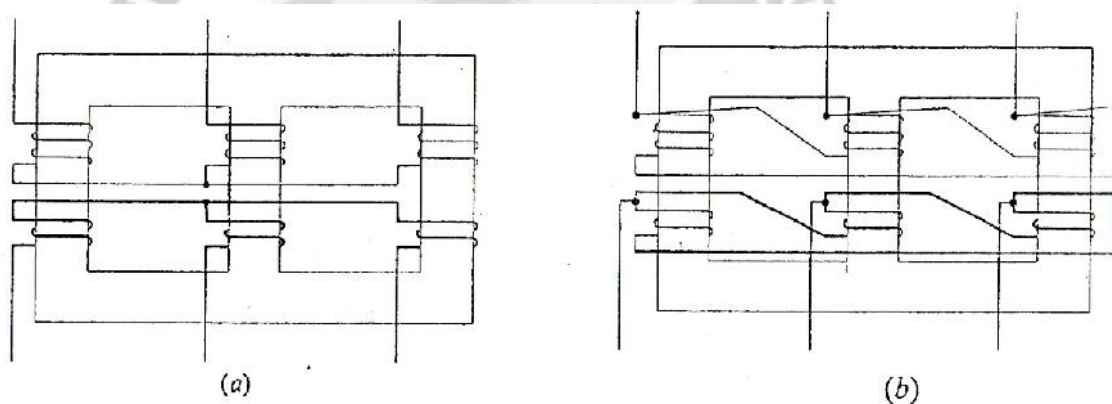
**Figura 13:** Análisis deductivo de la construcción de un transformador trifásico tipo núcleo.

Luego, si en (a) se fundieran en una las tres columnas centrales, por la resultante no circularía flujo alguno. Si por innecesaria se suprime, quedan los caminos magnéticos representados en (c), con notable ahorro de acero eléctrico, así como de las correspondientes pérdidas, en relación con (a).

No se olvide la constitución por láminas de los núcleos (laminación de acero al silicio de grano orientado). Es evidente que la construcción según (c) ofrece dificultades.

Supóngase que los núcleos 1 y 2 se sitúan en un mismo plano, y que los yugos de 3 se van acortando, hasta anularlas, que la configuración (d). La facilidad constructiva es evidente, como se ha representado en (e) a base de la disposición al solape.

Así se ha constituido el núcleo usual de los transformadores trifásicos. Los devanados puede conectarse de distintas maneras, la más usual en nuestros sistemas de distribución es la delta-estrella; la figura 14 presenta dos transformadores conectados en estrella-estrella y triángulo-triángulo.

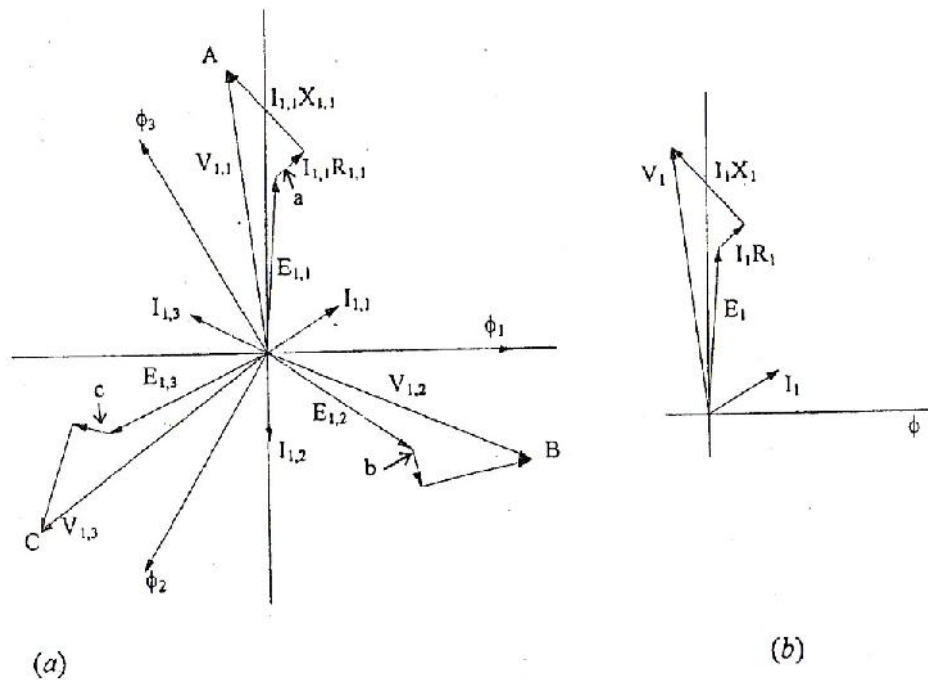


**Figura 14:** Constitución de transformadores; (a) conexión Y-Y y (b) conexión  $\Delta$ - $\Delta$ .

Con tal núcleo trifásico, se crea una asimetría en los circuitos magnéticos. Es claro que el correspondiente a la columna central es más corto (faltan yugos), luego entonces, requiere menor corriente de excitación, ( $I_o$ ). Esta asimetría es poco perceptible en carga, esencialmente con laminación de grano orientado que requieren corrientes pequeñas de excitación.

### 2.2.5.2 Teoría de los transformadores trifásicos en estado de equilibrio

Al igual si se trata de bancos trifásicos como de transformadores con núcleos de tres columnas, su estudio teórico en el caso de cargas equilibradas se remite al de los transformadores monofásicos. Los diagramas vectoriales suelen trazarse a base de tensiones de fase a neutro, sea el neutro real o ficticio, es decir, se dibujan como si todos los transformadores tuvieran la conexión estrella-estrella.



**Figura 15:** Diagrama vectorial de cargas equilibradas.

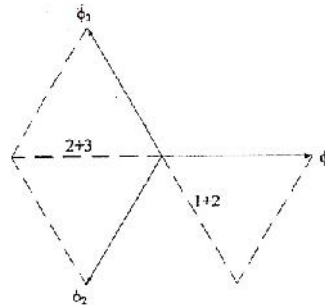
En la figura 15(a), se ha representado el diagrama vectorial en tales condiciones para no complicar, no se han trazado los triángulos de tensiones compuestas (ABC y abc), que fácilmente se suplen con la imaginación.

En lo sucesivo, se evitara la reiteración que se aprecia en la figura (con desfases de  $120^\circ$ ), y nos limitaremos a dar el diagrama vectorial, a base de tensiones de fase a neutro, de una de las fases (ejemplo, la A), tal como se presenta en la figura 15(b).

### 2.2.5.3 Núcleos Trifásicos

Por cuanto a las variaciones del flujo en las tres fases están desplazadas  $120^\circ$ , pueden sumarse dos flujos cualesquiera, como se muestra en la figura 16, para obtener un flujo de la misma magnitud. Esta fascinante posibilidad ha sugerido

varias maneras de construir bobinas, de modo que una pierna o rama común pueden llevar dos flujos, permitiendo economía en la construcción del núcleo como consecuencia reducir las pérdidas.

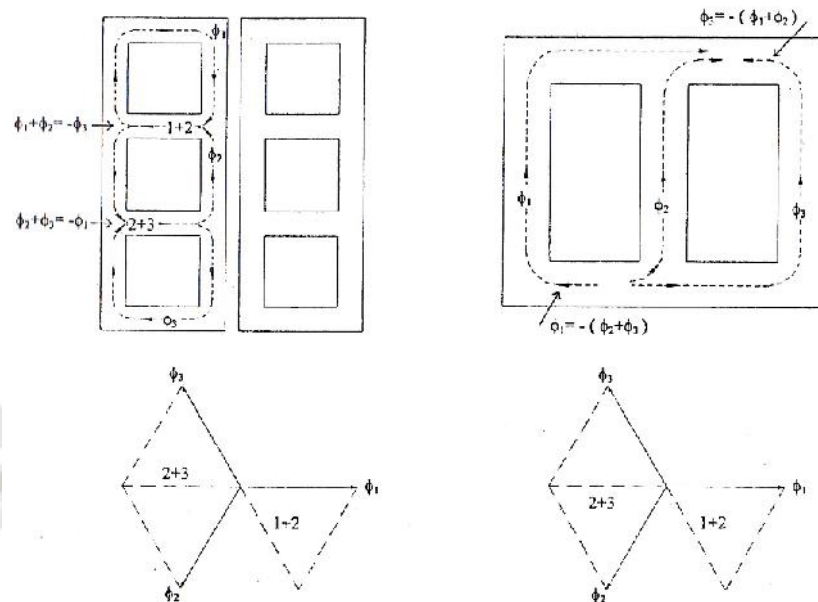


**Figura 16:** Representación abstracta de la suma de flujos trifásicos.

Existen, por supuesto, el hecho aún más fascinante de que la suma de los flujos es igual a cero, sugiriendo la posibilidad de que las tres piernas o ramas trifásicas estén conectadas de modo que no exista pierna de retorno como en la figura 17. Este tipo de núcleo tiene menos peso y, consecuentemente, menos costo y menos pérdidas.

- a) Corrientes armónicas y flujos en núcleo trifásicos.-** Si los devanados están conectados de manera que no se suministre una trayectoria para la corriente desde el punto neutro (Conexión Y), la corriente de tercera armónica (también novena, decimoquinta, etc.) se suprime y como consecuencia, su sola ausencia actúa como corrientes armónicas equivalente en el devanado, que tienden a producir correspondientes flujos armónicas equivalentes en el devanado, que tienden a producir correspondientes flujos armónicos. Sin embargo, en el tipo general de núcleo como se muestra en la figura 17, o cuando hay básicamente solo tres piernas del núcleo para piernas están todas en fase. Consecuentemente, el flujo de una pierna, no puede combinarse con el de otra. A los flujos de tercera armónica no les queda otra alternativa que salir por la parte superior de la pierna del núcleo y regresar a la pierna por la parte inferior. El flujo de tercera armónica que regresa por el aire tiene el efecto sumamente indeseable de inducir corrientes en las partes metálicas cercanas; por ejemplo en bastidores de acero se provocan serias dificultades. Por supuesto, los ampere –vueltas que fluyen en bastidores u otras partes no puede, posiblemente ser superior a los ampere-vueltas de mando que son las componente de tercera armónica

de la corriente excitante. Es no es, por lo general, una magnitud excesivamente grande, y si a propósito se dota de una resistencia suficientemente baja al circuito que recorre los bastidores, la pérdida puede ser mantenida dentro de límites razonables.



**Figura 17:** Aplicación de la adición vectorial de los flujos en un núcleo trifásico para economizar material.

En cualquier caso, no obstante, el flujo de tercera armónica resulta muy inferior al valor que tendrá si dispusiera de un circuito de hierro para fluir y será mucho menor el voltaje de tercera armónica inducido en cada devanado. El cálculo exacto de flujo es difícil, pero generalmente el voltaje de tercera armónica será inferior al 2% del normal.

**b) División de corrientes de tercera armónica entre trayectorias alternas.-** Lo anterior ha sugerido tres distintas posibilidades que rigen la tensión y la corriente de tercera armónica:

- 1.- La corriente de tercera armónica puede fluir en un devanado conectado en delta, limitada solamente por la impedancia del transformador.
- 2.- La corriente de tercera armónica puede también fluir del neutro del transformador al retorno a tierra, a través de cualquier impedancia que pueda existir en esta trayectoria.

3.- Además, hemos visto que la tensión de la tercera armónica que puede existir para producir este flujo de corriente de tercera armónica, resultara muy reducido si el transformador se hace con un núcleo trifásico de tres columnas.

Estas tres condiciones pueden existir en combinación. Las variables que afectan la corriente y la tensión serán: la impedancia del transformador, la impedancia del neutro y la impedancia de “secuencia cero” de un transformador con un núcleo de tres piernas.

#### 2.2.5.4 Conexiones Polifásicas en el Transformador

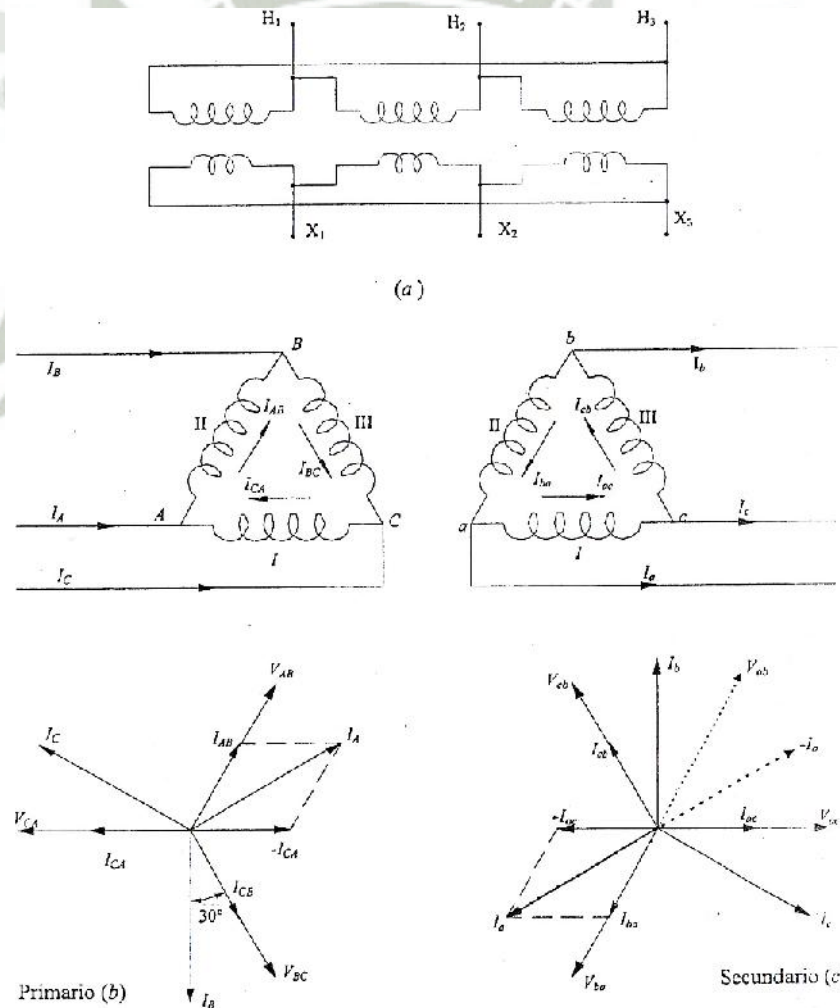
Como ya lo hemos comentado en el anterior capítulo, los transformadores desempeñan un papel importante en la utilización de la energía eléctrica. Entre muchas de sus características de estos transformadores es, que se les puede conectar de diferentes maneras, dependiendo de las necesidades o conveniencias del servicio; lo que permite toda flexibilidad para la óptima operación de sistemas eléctricos de distribución,

En sistemas de potencia es necesario a menudo instalar bancos de transformadores monofásicos en conexiones trifásicas. En transformadores para instrumento, se hacen también algunas de estas conexiones para alimentar los instrumentos de medición y protección.

Así tenemos, por ejemplo, conexiones: delta-delta, estrella-estrella, delta-estrella, estrella-delta, V-V, T-T, zigzag, etc.

**Conexión delta- delta ( - ).**-La conexión delta-delta también conocida como triángulo-triángulo, lo conforman tres transformadores monofásicos idénticos contenidos en un mismo reciente, ver figura 18. El arrollamiento secundario ab corresponde al primario AB; la polaridad de la terminal a es la misma que la de A. los diagramas vectoriales desprecian la corriente magnetizante y las caídas por impedancia en los transformadores, y están dibujados para factor de potencia unitario entre la tensión de fase y la corriente de fase. De este modo,  $I_{AB}$  está en fase con  $V_{AB}$ . Como en los diagramas previos, las tensiones finales primaria y secundaria, y también las corrientes primaria y secundaria están en

oposición de fase, así que  $V_{ba}$  corresponde a  $V_{AB}$ .  $I_{ba}$  Está en fase con  $V_{ba}$ , que corresponde a  $\cos \phi = 1$  entre la tensión de fase y la corriente de fase. Los diagramas vectoriales están mostrando para una carga equilibrada. Deberá notarse que las corrientes de línea son  $\sqrt{3}$  veces las corrientes de fase y están desplazadas  $30^\circ$  atrás de las corrientes de fase; el desplazamiento angular de  $30^\circ$  existe siempre para todas las cargas equilibradas, haciendo caso omiso del factor de potencia. Para transformadores idénticos, que tienen relaciones de transformación iguales e impedancias iguales, no existe corriente circulante entre cualquiera de las deltas primarias o secundaria, y los transformadores se repartían igualmente la carga total. La relación de transformación entre bancos es la misma que la del transformador individual.



**Figura 18:** Conexión delta-delta de transformadores; (a) esquema eléctrico; (b) y (c) diagramas vectoriales.

Resumiendo, a expresión matemática lo aquí comentado para la conexión - tenemos:

$$\begin{aligned}V_{LP} &= V_{FP} \\V_{LS} &= V_{FS}\end{aligned}$$

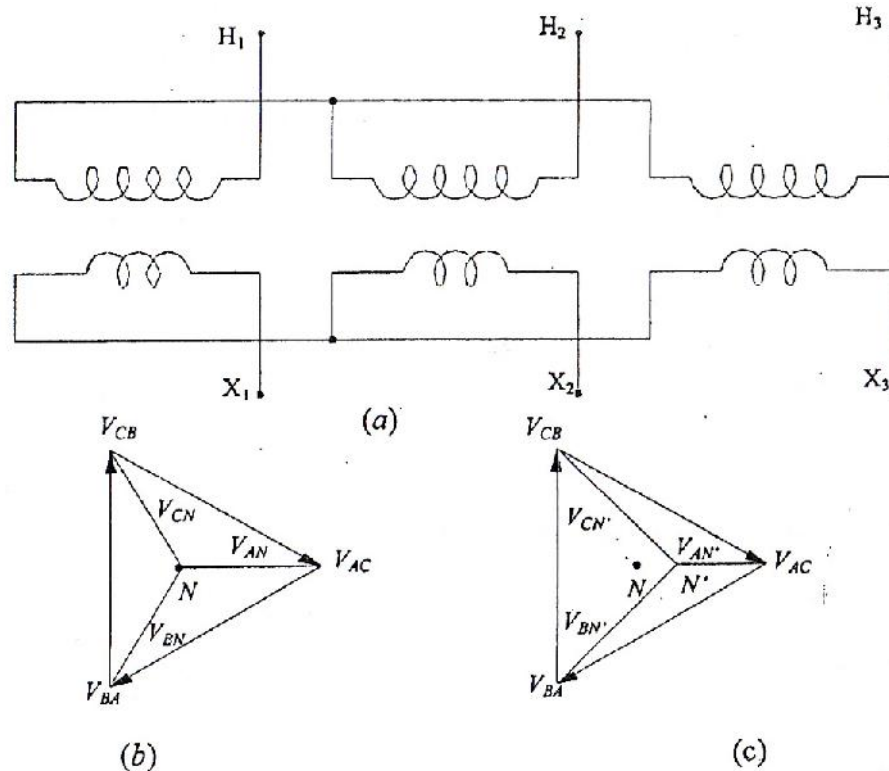
De esta forma las tensiones de línea del primario y secundario guardan la relación.

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}}{V_{FS}} = a$$

**Conexión estrella-estrella (Y-Y).**- Para esta conexión pueden dibujarse los diagramas vectoriales en la misma forma que para la conexión - . La tensión de línea es veces la tensión de fase, y las dos están desplazadas entre si en  $30^\circ$ . La relación de transformación entre las tensiones o corrientes de líneas primarias y secundarias es la misma que para el transformador individual.

Los bancos Y-Y funcionan con los neutros conectados a tierra, esto es, el neutro del primario se conecta al neutro de la fuente de potencia. Con el neutro aislado, cualquier desequilibrio en la cara o cualquier carga monofásica conectada a través de un transformador o bien entre líneas, causara un desplazamiento de la posición del neutro eléctrico, y las tensiones por fase estarán desequilibradas. Un neutro a tierra impide esta condición de funcionamiento no muy satisfactorio. La figura 19 muestra las condiciones existentes cuando se aísla el neutro. En la figura 19b, la carga esta equilibrada y en la figura 19c, la carga esta desequilibrada.

Con un neutro aislado, las componentes de la tercera armónica de la corriente en el primario se cancelan entre sí en las fases y el flujo del transformado no es entonces senoidal, produciendo de este modo tensiones de fase no senoidales; no obstante, las tensiones de líneas son senoidales. Tales tensiones armónicas son indeseables debido a los esfuerzos que éstas producen en el aislamiento de los arrollamientos. El uso de un neutro a tierra, o bien un arrollamiento terciario en , permitirá una trayectoria para la corriente de tercera armónica y producirá de este modo un flujo senoidal y una tensión de fase senoidal.



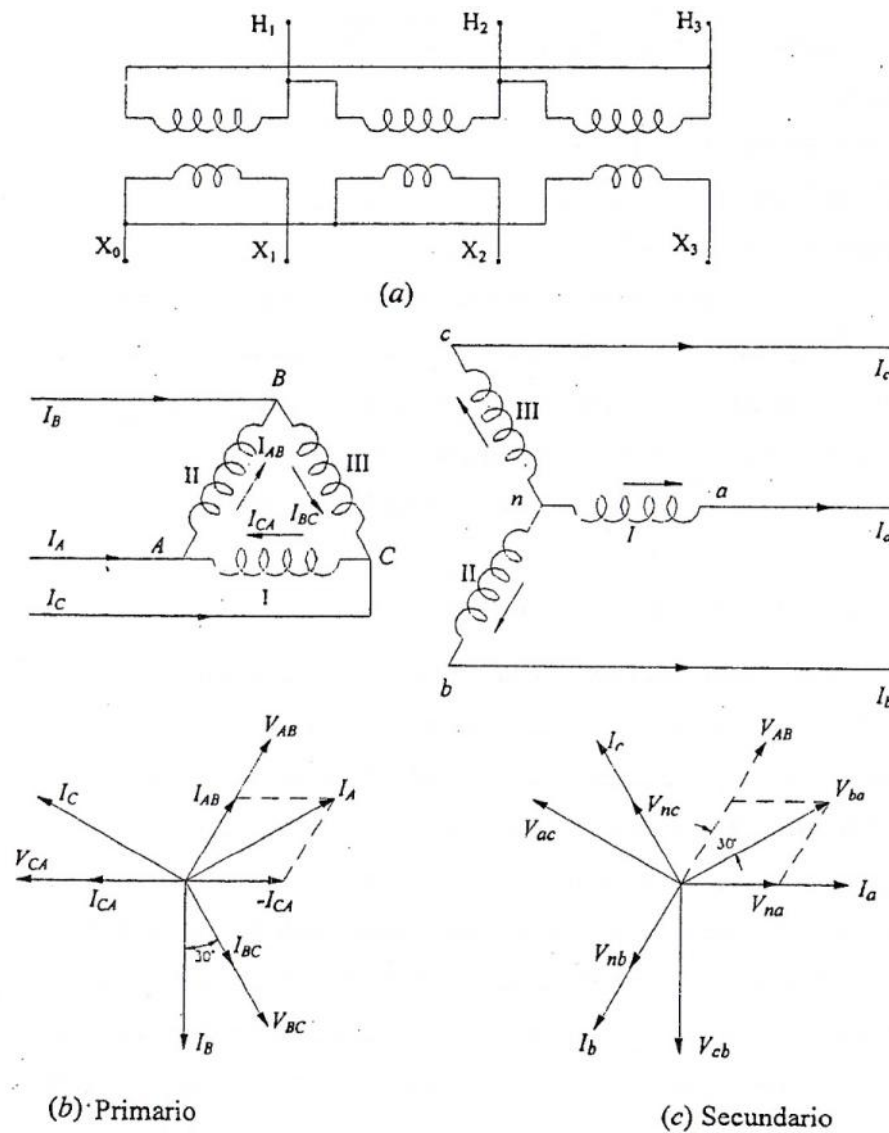
**Figura 19:** Conexión estrella-estrella con neutro aislado; (a) conexión eléctrica; (b) carga equilibrada, (c) carga desequilibrada.

Resumiendo, a expresión matemática lo aquí comentado para la conexión Y-Y tenemos:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \sqrt{3} \frac{V_{FP}}{V_{FS}}$$

**Conexión delta-estrella (Δ-Y).**- En la figura 20 se encuentran las conexiones y diagramas vectoriales para el arreglo Δ-Y alimentando una carga equilibrada de factor de potencia unitario. Los diagramas vectoriales pueden deducirse del diagrama de la figura 3.18. Se observa que las tensiones y corrientes de línea primarias y secundarias están desfasadas entre sí 30°. La relación de las tensiones de línea del primario al secundario es  $1/\sqrt{3}$  veces la relación de transformación para un transformador del banco. Ninguna dificultad aparece observando las corrientes de tercera armónica, ya que la existencia de una conexión en Δ permite una trayectoria para estas corrientes. El uso de un banco semejante permite un neutro a tierra en el lado secundario, proporcionando de

este modo un servicio de 3 fases a 4 hilos. El desequilibrio en las cargas causa muy pequeño desequilibrio de la tensión, ya que el primario del transformador está conectado en delta.



**Figura 20:** Conexión delta-estrella de transformadores; (a) esquema eléctrico; (b) y (c) diagramas vectoriales.

Resumiendo, a expresión matemática lo aquí comentado para la conexión  $\Delta$ -Y tenemos:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}}{\sqrt{3} V_{FS}}; \quad \text{pero} \quad \frac{V_{FP}}{V_{FS}} = a,$$

Entonces

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

**Conexión estrella-delta (Y- $\Delta$ ).**- Esta conexión es muy similar a la conexión Y-Y. aparece un desfase de  $30^\circ$  en las tensiones de línea entre el primario y el secundario, y las corrientes de tercera armónica fluyen en la línea para proporcionar un flujo senoidal. La relación entre las tensiones primarias y secundarias es  $\sqrt{3}$  veces la relación de espiras del transformador. Cuando funciona en Y- $\Delta$ , se acostumbra y es conveniente conectar a tierra el neutro primario, conectándolo de este modo en 4 hilos.

La figura 3.21 muestra la conexión Y- $\Delta$  de transformadores trifásicos. En esta conexión las tensiones primarias de línea y de fase cumplen la relación  $V_{LP} = \sqrt{3} V_{FP}$ , mientras que las tensiones secundarias de línea y de fase son iguales  $V_{LS} = V_{FS}$ . La relación de tensiones de fase es:

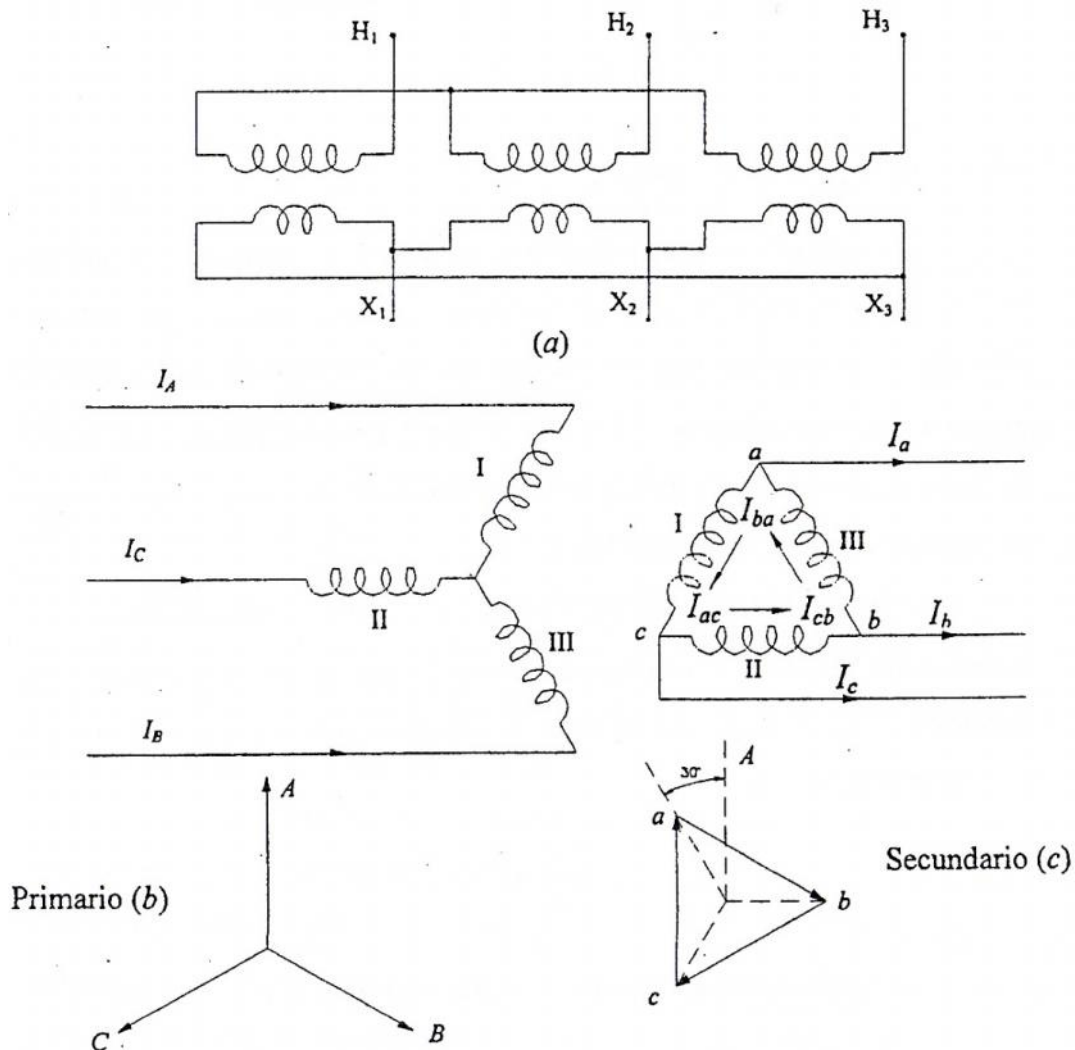
$$\frac{V_{FP}}{V_{FS}} = a$$

Así que la relación entre las tensiones de línea del primario y del secundario del banco es:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3} V_{FP}}{V_{FS}}$$

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

En la conexión Y- $\Delta$  no existen problemas con los componentes de tercera armónica de tensión, puesto que estos se consumen en corriente circulante en el lado conectado en triángulo. La conexión también es más estable bajo carga desbalanceada, ya que la delta redistribuye parcialmente cualquier desequilibrio que se presente.



**Figura 21:** Conexión estrella-delta de transformadores; (a) esquema eléctrico; (b) y (c) diagramas vectoriales.

### 2.2.5.5 Aspectos térmicos de los transformadores

Los transformadores se calientan debido a las pérdidas en el cobre (Cu) de los arrollamientos y a las pérdidas en el hierro (Fe) del núcleo. Este calor ha de disiparse para mantener la temperatura de los devanados del transformador por debajo del valor para el cual el aislamiento comienza a deteriorarse. Los transformadores de baja tensión de muy pequeña potencia pueden disipar su calor por convección al medio ambiente y por radiación directa, y no se sumergen en aceite. Los transformadores para tensiones superiores a 1000 voltios están colocados ordinariamente dentro de recipientes de acero, llenos de aceite aislante. El aceite mejora el aislamiento y al producirse corrientes de

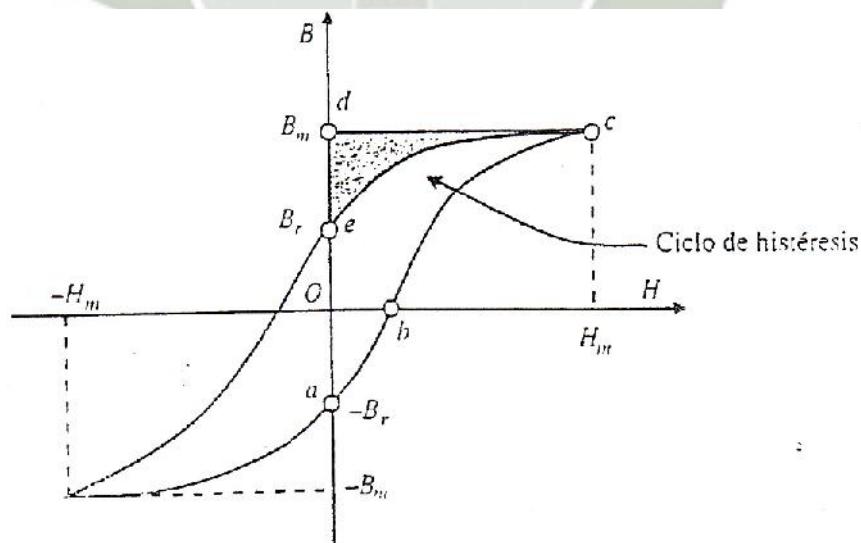
convección en el mismo, toman el calor de las superficies de los arrollamientos del núcleo para conducirlo a la superficie del tanque y radiadores, y de ahí disiparse por convección y radiación al medio ambiente, esta es la forma normal para refrigerar los transformadores de distribución.

### 2.2.6 Pérdidas de energía en los núcleos ferromagnéticos

Cuando se reducen los campos magnéticos asociados con los núcleos ferromagnéticos, parte de la energía almacenada es devuelta a la fuente. Sin embargo, parte de la energía almacenada se pierde irremediamente en el núcleo en forma de calor- estas pérdidas de energía es debida a dos causas: a) característica de histéresis del material (pérdidas por histéresis) y b) corrientes inducidas en el núcleo (pérdidas por corrientes parasitas o corrientes de Foucault).

#### 2.2.6.1 Pérdidas por histéresis

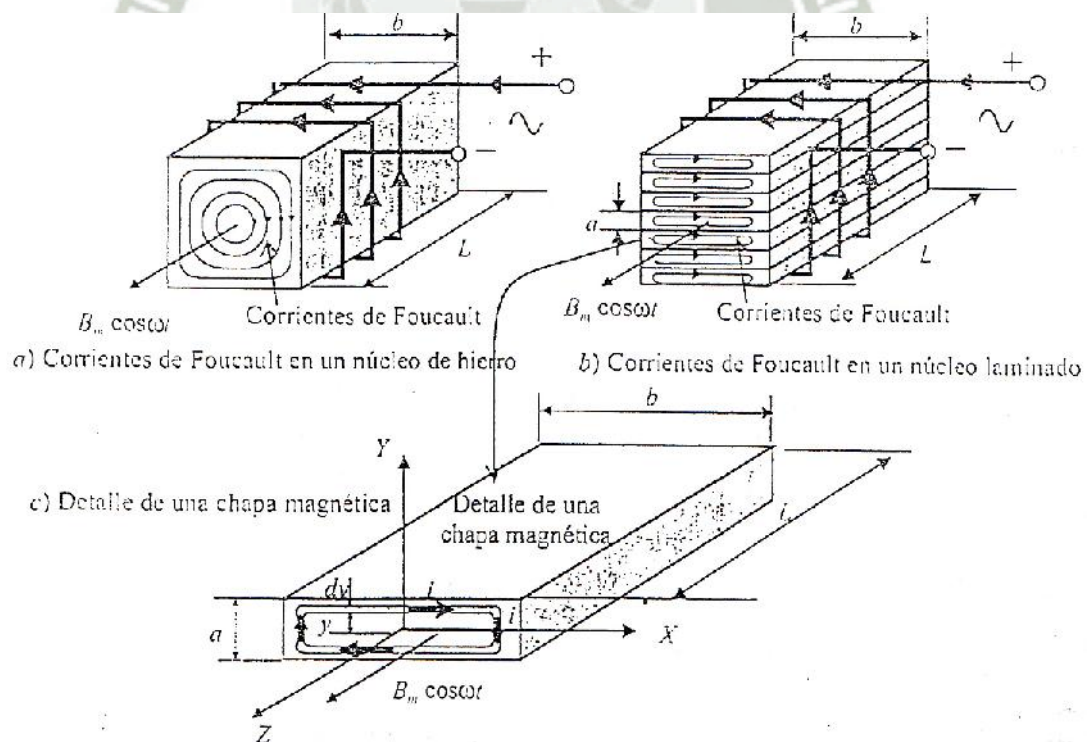
Supóngase que un núcleo ferromagnético es excitado por una bobina alimentada por una fuente de variación periódica (fuente de AC) y que el ciclo de histéresis del material magnético es el que se muestra en la figura 22.



**Figura 22:** Área del ciclo de histéresis.

**2.2.6.2 Perdidas por corrientes de Foucault.-** Considérese el esquema de la figura 3.23(a), donde una bobina arrollada sobre un núcleo de hierro macizo, al alimentar la bobina con corriente alterna se producirá, de acuerdo con la ley de ampere, un campo magnético alterno de inducción  $B_z = B_m \cos \omega t$  que atravesara toda la masa de hierro en el sentido del eje Z (eje de la bobina).

De acuerdo con la ley de Faraday, aparecerán en el material unas f.e.m.s. inducidas que darán lugar a unas corrientes parasitas que circulará por el material. Téngase en cuenta que el hierro es conductor de la electricidad, y aunque su conductividad es pequeña en comparación con la del cobre, las f.e.m.s. inducidas provocaran corrientes de circulación por la masa del hierro. Estas corrientes, denominadas corrientes de Foucault (Eddy currents o corrientes de torbellino en la bibliografía inglesa), se han señalado en la figura 3.23(a) por medio de círculos concéntricos en planos perpendiculares al flujo inductor y cuyo sentido de circulación es tal, que el flujo producido por estas corrientes se opone (ley de Lenz) al flujo inductor de la bobina.



**Figura 23:** Corrientes de Foucault en las masas y chapas de hierro.

Estas corrientes pueden originar grandes pérdidas de potencia, con el consiguiente calentamiento de los núcleos. Para prevenir estas pérdidas, el hierro empleado en los circuitos magnéticos suele estar laminado, en forma de chapas magnéticas de pequeño espesor, tal como se señala en la figura 23 (b). El plano de las chapas es paralelo al flujo, por lo que las corrientes parásitas quedan confinadas a trayectorias de sección transversal pequeña.

Consideremos una de estas chapas de dimensiones transversales  $a \times b$  (donde  $a \ll b$ ) y profundidad  $L$ . tal como se señala en la figura 23 (c), que es atravesada por el campo magnético  $B_z = B_m \cos \check{S}t$

Suponiendo que el campo es uniforme en la sección transversal de la chapa el flujo que atraviesa la espira sombreada de la figura 23 (c) es:

$$\Phi = 2by B_m \cos \check{S}t$$

Ya que la superficie cerrada de la espira es  $2by$ . Por la ley de Faraday. La f.e.m. inducida tiene un valor modular dado por:

$$e = 2\check{S}by B_m \text{sen} \check{S}t$$

Tomando una longitud unidad en la dirección del eje Z, la f.e.m. anterior produce una corriente de alrededor de la espira indicada, cuya resistencia vale:

$$R = \frac{2b}{\dagger dy}$$

Donde se ha tenido en cuenta que  $a \ll b$  y que la conductividad del material es  $\dagger$ . La potencia instantánea en la espira será:

$$dP_F = R i^2 = \frac{e^2}{R} = \frac{(2\check{S}by B_m \text{sen} \check{S}t)^2}{\left(\frac{2b}{\dagger dy}\right)} = \frac{4\check{S}^2 b^2 y^2 B_m^2 \dagger \text{sen}^2 \check{S}t dy}{2b}$$

Que corresponde a un valor medio:

$$dP_F = \check{S}^2 b y^2 B_m^2 \dagger dy$$

Y a una potencia disipada total:

$$P_F = \int_0^{a/2} \check{S}^2 B_m^2 b \dagger y^2 dy = \frac{\check{S}^2}{24} B_m^2 a^3 b \dagger$$

$$P_F = \frac{4f^2 f^2 B_m^2 a^3 b \dagger}{24} = \frac{f^2 f^2 B_m^2 a^2 (vol) \dagger}{6}$$

Desarrollando la anterior ecuación nos da una potencia disipada:

$$P_F = k_F f^2 B_m^2 a^2 \dagger (vol) \text{ watts}$$

Donde:

$P_F$  : Perdidas de potencia por corrientes parasitas (watts)

$k_F$  : Constante =  $f^2/6 = 1.65$

$vol$  : Volumen del material ( $m^3$ )

$f$  : Frecuencia de magnetización en (Hz)

$B_m$  : Densidad máxima de flujo magnético (Tesla)

$a$  : Espesor de las láminas que forman el núcleo (m)

$\dagger$  : Conductividad del material ( $1/ m$ )

El total de pérdidas en el núcleo es la suma de las perdidas debidas a la histéresis y a las corrientes parasitas, son llamadas pérdidas en el núcleo, pérdidas en el hierro, pérdidas de excitación o pérdidas constantes en el transformador, están das por la siguiente expresión:

$$P_T = P_H + P_F \text{ watts}$$

$$P_T = k_H f B_m^r (vol) + k_F f^2 B_m^2 a^2 \dagger (vol) \text{ watts}$$

$$P_T = (k_H f B_m^r + k_F f^2 B_m^2 a^2 \uparrow) \text{ vol watts}$$

Siendo *vol* el volumen del hierro. En la práctica, el fabricante de material magnético, suministra unas curvas donde se muestran estas pérdidas totales en función de B, a frecuencia constante.

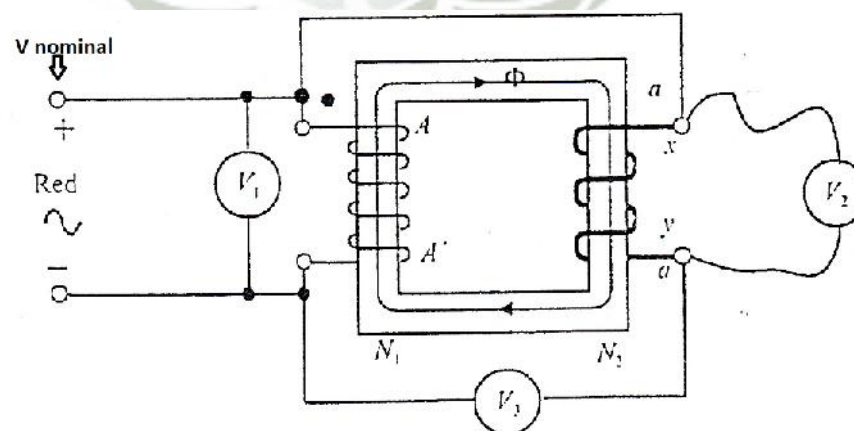
### 2.3 PARAMETROS DEL TRANSFORMADOR.

Los parámetros de un transformador son valores reales de resistencia y reactancia de los devanados de un transformador, se pueden obtener de pruebas de laboratorio mediante mediciones y algunos cálculos relativamente simples y que son la base de los valores usado en los circuitos equivalentes.

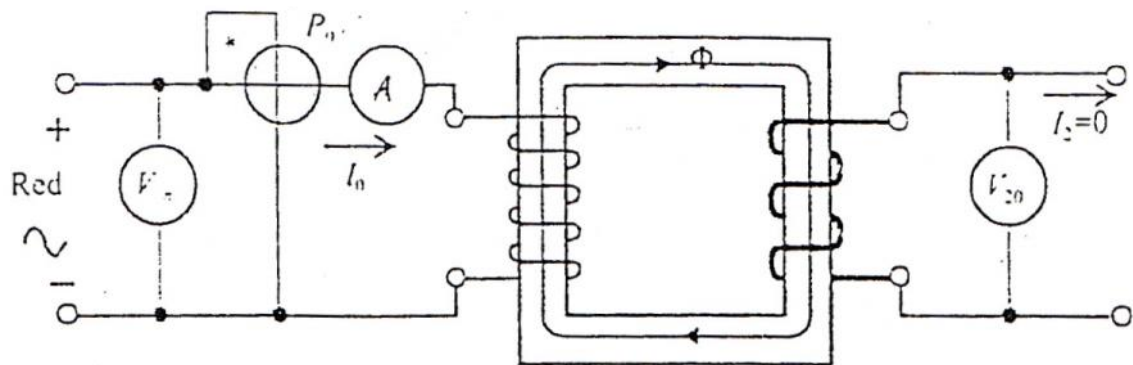
Los dos ensayos fundamentales que se utilizan en la práctica para la determinación de los parámetros del circuito equivalente de un transformador son: ensayo en vacío y ensayo en cortocircuito.

#### 2.3.1 Ensayo en vacío

Esta prueba consiste en aplicar al primario del transformador la tensión asignada. Estando el secundario en circuito abierto. Al mismo tiempo debe medirse la potencia absorbida  $P_0$ , la corriente de vacío  $I_0$  y la tensión secundaria, de acuerdo con el esquema de conexiones de la figura



**Figura 24:** Disposición de los aparatos de medida para determinar la polaridad.



**Figura 25:** Esquema eléctrico del ensayo de vacío.

Como quiera que las pérdidas  $R_1 I_0^2$  en vacío son despreciables (debido al pequeño valor de  $I_0$ ), la potencia absorbida en vacío coincide prácticamente con las pérdidas en el hierro, lo que está de acuerdo con el circuito equivalente aproximado de la figura 3.26 (a), al ser  $I_2 = 0$ . De las medidas efectuadas puede obtenerse el factor de potencia en vacío, de acuerdo con la ecuación:

$$P_0 = V_N I_0 \cos \phi_0 = P_{FE}$$

Por otra parte debido al pequeño valor de la caída de tensión primaria, se puede considerar que la magnitud  $V_N$  coincide prácticamente con  $E_1$ , resultando el diagrama vectorial de vacío de la figura 26 (b), en el que se ha tomado la tensión primaria como referencia de fases.

Es este esquema las dos componentes de  $I_0$  valen:

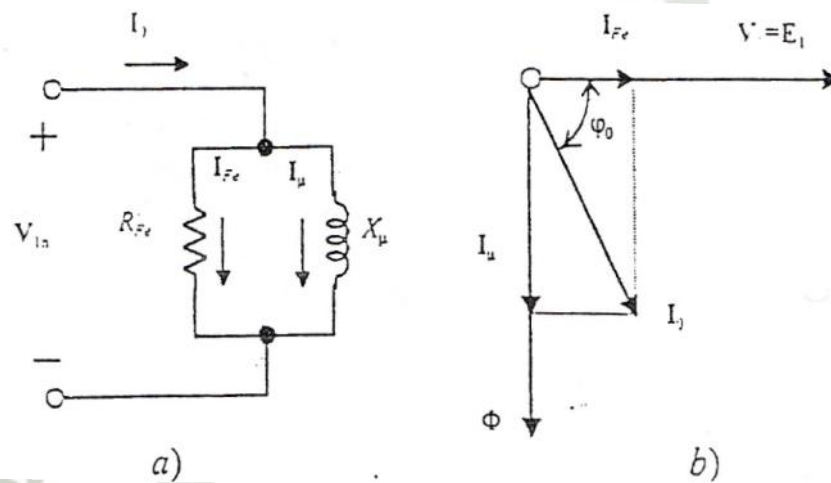
$$I_{Fe} = I_0 \cos \phi_0 \quad ; \quad I_w = I_0 \sin \phi_0$$

De donde puede obtenerse ya los valores de los parámetros  $R_{Fe}, X_w$

$$R_{Fe} = \frac{V_1}{I_{Fe}} = \frac{V_N}{I_0 \cos \phi_0} = \frac{V_N}{P_0/V_N} = \frac{V_N^2}{P_0}$$

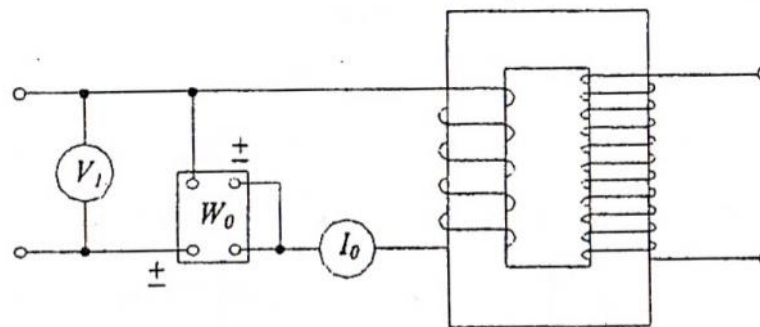
$$X_{-} = \frac{V_1}{I_{-}} = \frac{V_N}{I_0 \sin \alpha_0} = \frac{V_N}{Q_0 / V_N} = \frac{V_N^2}{Q_0}$$

El ensayo en vacío permite determinar las pérdidas en el hierro del transformador y también los parámetros de la rama paralela del circuito equivalente del mismo. Del ensayo de vacío puede obtenerse también la relación de transformación, merced a que la tensión  $V_N$  aplicada coincide prácticamente con  $E_1$ .



**Figura 26:** Circuito equivalente en vacío y diagrama fasorial correspondiente.

La lectura en el vatímetro  $W_0$  incluye la pérdida de potencia en su propio circuito de potencial, a menos que el vatímetro este compensado  $W_0$  incluye también la pérdida de potencia en el amperímetro. Por consiguientes,



**Figura 27:** Esquema para hallar las pérdidas reales en el hierro.

$$\text{Pérdida en el hierro} = W_0 - \frac{V_N^2}{R_p} - I_0^2 R_a - I_0^2 R_1$$

Siendo:

$R_p$ : Resistencia del circuito de potencial del vatímetro.

$R_a$ : Resistencia del amperímetro.

$R_1$ : Resistencia del arrollamiento del transformador que se utiliza en el ensayo como primario.

El modo más sencillo de eliminar la correlación  $I_0^2 R_a$  es cortocircuitar el amperímetro mientras se hace la lectura del vatímetro. La corrección  $I_0^2 R_1$  suele

ser despreciable, pero la  $\frac{V_N}{R_p}$  puede ser muy importante, especialmente si el transformador es pequeño. El ensayo en circuito abierto se hace siempre sobre el arrollamiento de baja tensión. La pérdida en el hierro es la misma, medida sobre cualquier de los arrollamientos, mientras se aplica la tensión nominal correspondiente a dicho arrollamiento; pero si la medida se hiciese sobre el arrollamiento de alta tensión, la corriente  $I_0$  resultaría en extremo pequeña y la tensión excesivamente grande.

### 2.3.2. Ensayo en cortocircuito

En este ensayo se cortocircuita el devanado secundario y se aplica al primario una tensión que se va elevando gradualmente desde cero hasta que circula la corriente asignada de plena carga por los devanados. El esquema y tipos de aparatos necesarios para la realización del ensayo se indican en la figura 28.

La tensión aplicada necesaria en esta prueba representa un pequeño porcentaje respecto a la asignada (se parte de 0 voltios hasta un máximo de 5% de  $V_N$ ). Por lo que el flujo en el núcleo es pequeño, siendo en consecuencia despreciables las pérdidas en el hierro. La potencia absorbida en cortocircuito coincide con las pérdidas en el cobre, lo que está de acuerdo con el circuito

equivalente aproximado de la figura 29 (a), al desprestigiar la rama en paralelo, como consecuencia del pequeño valor de la corriente  $I_0$  frente a  $I_N$ .

De las medidas efectuadas se puede obtener el f.d.p. de cortocircuito, de acuerdo con la ecuación:

$$P_{cc} = V_{cc} I_N \cos \{_{cc} = I_N^2 R_{cc}$$

Si en el circuito de la figura 29 (a) se toma la corriente como referencia. Se obtiene el diagrama vectorial de la figura 29 (b), del cual se deduce:

$$V_{R_{cc}} = R_{cc} I_N = V_{cc} \cos \{_{cc} \rightarrow R_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_N} \cos \{_{cc}$$

$$V_{X_{cc}} = X_{cc} I_N = V_{cc} \text{sen} \{_{cc} \rightarrow X_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_N} \text{sen} \{_{cc}$$

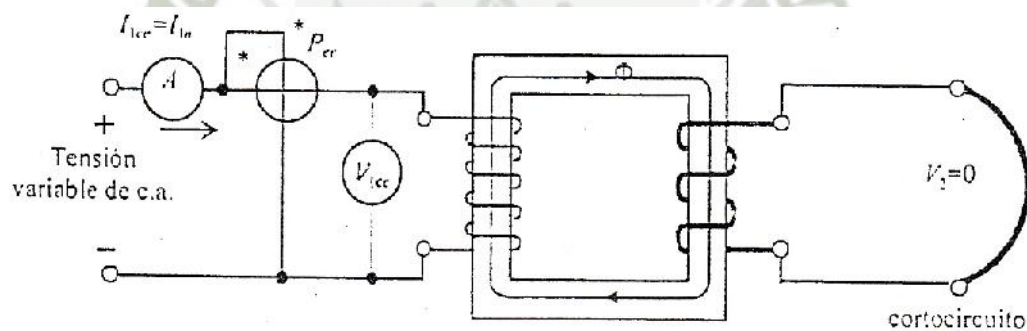


Figura 28.- Circuito eléctrico del ensayo de cortocircuito.

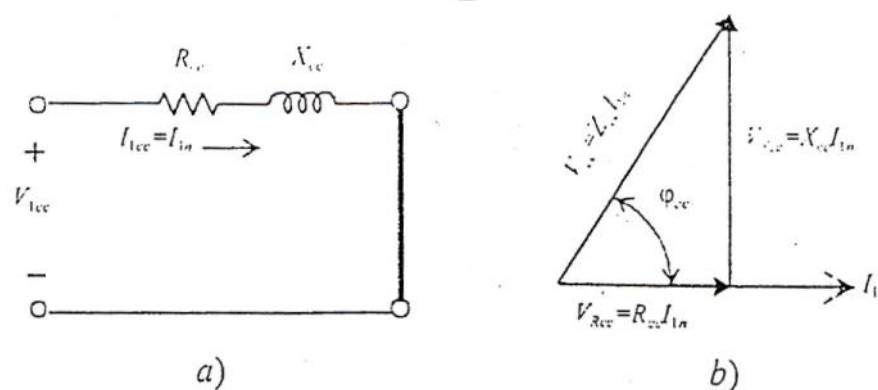


Figura 28: Circuito equivalente de cortocircuito y esquema fasorial de tensiones.

Es decir el ensayo de cortocircuito permite determinar los parámetros de la rama serie del circuito equivalente del transformador, y de ahí que se designen con los símbolos  $R_{cc}$  y  $X_{cc}$ .

Debe destacarse que el ensayo de cortocircuito determina la impedancia total del transformador pero no da información de cómo están distribuidos estos valores totales entre el primario y el secundario, se obtiene:

$$R_{cc} = R_1 + R_2' \quad ; \quad X_{cc} = X_1 + X_2'$$

Donde:

$$R_2' = a^2 R_2$$

$$X_2' = a^2 X_2$$

Siendo  $a$  la relación de transformación, para poder determinar los valores individuales de las resistencias  $R_1 + R_2'$  es preciso aplicar c.c. a cada uno de los devanados y obtener las resistencias  $R_1 + R_2$  (no  $R_2'$ ) aplicando la ley de Ohm y utilizando un factor corrector para tener en cuenta el efecto pelicular que se produce con c.a. (la resistencia óhmica en función de la frecuencia, debido a la distribución no uniforme de la corriente por la sección transversal del conductor. En la práctica de la ingeniería eléctrica, cuando se desea conocer la distribución de  $R_{cc}$  y  $X_{cc}$  entre ambos devanados es frecuente recurrir a la solución aproximada siguiente:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_{cc}}{2} \quad ; \quad X_1 = X_2' = \frac{X_{cc}}{2}$$

Entonces:

$$R_1 = \frac{R_{cc}}{2} \quad ; \quad R_2 = \frac{R_{cc}}{2a^2}$$

$$X_1 = \frac{X_{cc}}{2} \quad ; \quad X_2 = \frac{X_{cc}}{2a^2}$$

## **2.4. DISEÑO DE TRANSFORMADORES.**

### **2.4.1 Consideraciones generales**

Como se ha mencionado anteriormente, un transformador consta de dos partes esenciales: el núcleo magnético y los devanados, estos están relacionados con otros elementos destinados a las conexiones mecánicas y eléctricas entre las distintas partes al sistema de enfriamiento, al medio de transporte y a la protección de la maquina en general. En cuanto a la disposiciones constructivas, el núcleo determina características relevantes, de manera que se establece una diferencia fundamental en la construcción de transformadores, dependiendo de la forma del núcleo, pudiendo ser el llamado núcleo tipo columna o el núcleo tipo acorazado, existen otros aspectos que establecen diferencias entre tipos de transformadores, como por ejemplo el sistema de enfriamiento, que establece la forma de disipación del calor producido en los mismo, o bien en términos de su potencia y voltaje para aplicaciones, como por ejemplo clasificar en transformares de potencia o tipo distribución.

### **2.4.2 La construcción del núcleo**

El núcleo magnético esta formador por laminaciones de acero que tienen pequeños porcentajes de silicio (alrededor de 4-5%) y que se denominan "laminaciones magnéticas", éstas laminaciones tiene la propiedad de tener pérdidas relativamente bajas por efecto de histéresis y de corrientes circulantes.

Las laminaciones se disponen o colocan en la dirección del flujo magnético, de manera que los núcleos para transformadores están formador por un conjunto de laminaciones acomodadas en la forma y dimensiones requeridas. La razón de usar laminaciones de acero al silicio en los núcleos de las maquinas eléctricas, es que el silicio aumenta la resistividad del material y entonces hace disminuir la magnitud de las corrientes parasitas o circulantes y en consecuencia las perdidas por este concepto.

En general, las laminaciones al silicio se saturan para valores de inducción más bajos de aquellos relativos a las laminaciones normales, tales valores van disminuyendo al aumentar el contenido de silicio.

En el caso de transformadores de gran potencia, se usan las llamadas “laminaciones de cristal orientado” cuyo espesor es de algunos milímetros y contiene entre 3% y 4% de silicio, se obtienen de material laminado en caliente, después se hace el laminado en frío, dando un tratamiento térmico final a la superficie de las mismas. Este tipo de laminación cuando se sujetan al flujo en la dirección de las laminaciones, presentan propiedades magnéticas mejores que la laminación “normal” de acero al silicio usada para otro tipo de transformadores.

### **2.4.3 Elementos de los núcleos de transformadores**

En los núcleos magnéticos de los transformadores tipo columna se distinguen dos partes principales: “las columnas” o piernas y los “yugos”. En las columnas se alojan los devanados, los yugos unen entre sí a las columnas para cerrar el circuito magnético.

Debido a que las bobinas se deben montar bajo un cierto procedimiento y desmontar cuando sea necesario por trabajos de mantenimiento, los núcleos magnéticos son armador en tal forma que son desmontables, para poder meter y sacar las bobinas de las columnas. Pudiendo los núcleos que cierran el circuito magnético, terminar al mismo nivel en la parte que está en contacto con los yugos, o bien con salientes. En ambos casos los núcleos se arman con “juegos” de laminaciones para columnas y yugos que se arman por capas de arreglos “pares” e “impares”.

Como se ha mencionado anteriormente, cuando se emplean laminaciones de cristal orientado, es necesario que las uniones entre yugos y columnas se realicen con cortes inclinados para evitar trayectorias transversales de las líneas de flujo respecto a tales direcciones.

Cuando se han armado los niveles a base de juegos de laminaciones colocadas en “pares” e “impares” el núcleo se sujeta usando tornillos opresores y separa por medio de tornillos tensores.

El montaje del núcleo en los transformadores de media potencia (hasta algunos cientos de kVA), se hace como se ha mencionado antes, formando paquetes de laminaciones que se sujetan en distintas formas, pero usando elementos que no

dañen a las laminaciones como madera o fibras de pequeño espesor (2 a 3 mm.) como es el caso de la fibra de vidrio.

#### 2.4.3.1 Secciones de las columnas

Las secciones de las columnas determinan automáticamente las secciones de los núcleos. Por razones de tipo económico y también para equilibrar los esfuerzos electrodinámicos que se pueden presentar entre los conductores, los devanados se construyen casi siempre en forma circular.

Esto requiere, al menos técnicamente, que las columnas del núcleo deban tener sección circular. Debido a que esta condición no es prácticamente realizable. Se busca aproximarse haciendo la sección de la columna en escalones. Donde luego que la construcción es más costosa, mientras mayor sea el número de escalones, debido a que cada escalón requiere de dimensiones distintas de las laminaciones. Para transformadores pequeños se puede aceptar el uso de sección cuadrada o cruciforme (sección en cruz).

En cuanto a los yugos, se refiere no están vinculados estos con los devanados, pueden ser, entonces rectangulares, aun cuando pueden tener también escalones para mejorar el enfriamiento.

#### 2.4.3.2 Tipos de núcleos

Cuando se ha mencionado con anterioridad, los núcleos para transformadores se agrupan básicamente en las siguientes categorías: a) tipo núcleo o de columnas, b) tipo acorazado.

- a) **Tipo núcleo o de Columnas.-** Existen distintos tipos de núcleo tipo columna que están caracterizados por la posición relativa de las columnas y de los yugos.

**Núcleo monofásico.-** Se tienen dos columnas unidas en las partes inferior y superior por medio de un yugo, en cada una de estas columnas se encuentran incrustados la mitad del devanado primario y la mitad del devanado secundario.

**Núcleo Trifásico.-** Se tienen tres columnas dispuestas sobre el mismo plano unidas en sus partes inferior y superior por medio de yugos. Sobre cada columna se incrustan los devanados primario y secundario de una fase. Las corrientes magnetizantes de las tres fases son distintas entre sí, debido principalmente a que el circuito magnético de las columnas externas es más largo que el correspondiente a la columna central. Este desequilibrio, tomando en cuenta que la corriente de vacío es bastante baja, tiene influencia solamente para las condiciones de operación en vacío.

- b) **Tipo Acorazado.-** Este tipo de núcleo acorazado, tiene la ventaja con respecto al llamado tipo columna, de reducir la dispersión magnética, su uso es más común en los transformadores monofásicos. En el núcleo acorazado, los devanados se localizan sobre la columna central.

#### **2.4.4 Diseño y Cálculo de Transformadores de Distribución**

El cálculo o diseño de transformadores se puede decir que es un aspecto suficientemente tratado, en el que intervienen algunas variantes dependiendo del tipo de transformador y de los materiales empleados. En la actualidad los fabricantes de transformadores a gran escala, disponen por lo general de programas para computadora para diseño y de laboratorios apropiados de prueba y desarrollo.

No obstante, los conceptos básicos de cálculo de transformadores se deben conocer por las personas relacionadas con las maquinas eléctricas, ya que esto no solo permite una mejor comprensión de su funcionamiento, sino también si está en posibilidad de entender mejor las posibles fallas que tiene y su reparación.

##### **2.4.4.1. Dimensionamiento de las partes activas del transformador**

Como se sabe, los transformadores están constituidos principalmente por el núcleo y los devanados (bobinas), en principio el tratamiento para el cálculo de las características del núcleo corresponde al que se da para el cálculo de un circuito magnético, es decir se paren de los mismos conceptos y bases para el cálculo de un reactor, y en parte, un electroimán. Los conceptos básicos de

cálculo están dados por “la densidad de flujo magnético” ( $B_m$ ) expresada en  $weber / m^2$  y el flujo magnético ( $W_m$ ) expresado en weber, de manera que la sección de un núcleo magnético se puede calcular como:

$$S = \frac{W_m}{B_m}$$

Partiendo del hecho que se ha fijado la densidad de flujo  $B_m$  con un cierto criterio de convivencia que toma en consideración la potencia del transformador, las pérdidas en los materiales y el sistema de enfriamiento empleado como medida de orientación, se da la tabla siguiente en donde se da el valor medio de la inducción en función de la potencia.

**Tabla 3:** Densidad de flujo medio en función de la potencia en transformadores.

Potencia del Transformador en kVA	Densidad de flujo $B_m$ ( $weber / m^2$ )
5 - 10	1.10 - 1.20
10 - 20	1.15 - 1.25
20 - 50	1.20 - 1.30
50 - 200	1.25 - 1.35
200 - 500	1.30 - 1.40
Más de 500	1.35 - 1.50

Cuando se usa laminación de cristal orientado se puede tener una inducción hasta de  $1.6 weber / m^2$ .

**Determinación del flujo.-** Se tiene la ecuación

$$E_2 = 4.44 f N_2 B_m A$$

Si se desprecia la caída de tensión en el secundario del transformador se puede escribir la ecuación:

$$E_2 = 4.44 f N_2 w_m$$

Si se multiplica ambos miembros de la ecuación anterior por  $I_2$  (la corriente nominal secundaria) se obtiene la potencia nominal.

$$P_N = I_2 E_2 = 4.44 f I_2 N_2 w_m$$

De la expresión anterior al producto  $I_2 N_2$  se le puede sustituir por la relación  $w_m / K$ , donde  $K = w_m / I_2 N_2$  que se conoce como “el factor de flujo” y que depende del tipo, la potencia y tipo de enfriamiento del transformador. Con esta sustitución se tiene:

$$P_N = 4.44 f \frac{w_m^2}{K}$$

Si se expresa la potencia en kVA, desarrollando se obtiene la siguiente expresión:

$$w_m = \sqrt{\frac{P_N K}{4.44 f}} \times 1000 = \frac{K_F}{\sqrt{f}} \sqrt{P_N}$$

Donde  $K_F$  es:

$$K_F = \frac{100K}{4.44}$$

Para una frecuencia de 60 Hz, se puede escribir.

$$w_m = 10^{-2} C \sqrt{P_N}$$

Para la constante C se pueden adoptar los valores dados en la tabla siguiente:

**Tabla 4:** Valores de la constante C para el cálculo de flujo.

Tipo de Transformador		Constante C
Monofásico	Tipo columna	0.13 - 0.20
	Acorazado	0.26 - 0.39
Trifásico	Tipo Columna	0.16 - 0.23
	Acorazado	0.39 - 0.52

A los valores más bajos de C corresponden a los valores mayores del número de espiras de los devanados. Un dimensionamiento bien hecho debe conciliar necesariamente los factores técnico-económicos.

Después de haber determinado el valor de la sección y establecida la forma (según sea el caso, cruciforme o de cruz o de escalones) se obtiene el radio de la circunferencia circunscrita, tomando en consideración el factor de empaquetamiento (al atornillar el núcleo con herrajes y tornillos) y cuyos valores son:

0.86-0.90 para laminaciones aisladas con papel.

0.90-0.92 para laminaciones aisladas en barniz.

0.85-0.90 para núcleos con escalones.

Para transformadores de núcleo acorazado, la sección del núcleo es normalmente rectangular.

**Calculo del número de espiras.-** Se parte de la formula  $E_2 = 4.44 f N_2 W_m$ , para el devanado primario se considera el voltaje inducido o fuerza electromotriz igual a la tensión aplicada, despreciando así la caída de tensión. En los transformadores trifásicos la tensión a considerar es la de fase. En la formula anterior, conviene recordar que  $N_2$  representa "el número total de espiras por fase". Por lo tanto cuando hay espiras formadas por conductores en paralelo, se consideran como una sola vuelta.

Si se divide la tensión por fase entre el número de espiras en serie por fase se obtiene el número de volta/espira, este valor para un mismo tipo de transformador va aumentando con la potencia. Por ejemplo, para un transformador trifásico del tipo columna enfriado por aire, para una potencia de 1 kVA se puede tener de 0.25-0.5 volt/espira, en tanto que para una potencia de 100 kVA, tales valores pueden estar entre 3.2-5.5 volt/espira.

Desde el punto de vista de diseño, una vez que se determina el número de espiras, se calculan los volts/espira, que deben estar dentro de los límites establecidos por los fabricantes. Los valores medios a considerar para transformadores de pequeña y media potencia se indican en la tabla siguiente:

**Tabla 5:** Valores medios de Volts/Espira en función de la Potencia.

Potencia en kVA	Volts/Espira
1	0.3 - 0.6
5	0.7 - 1.1
10	1.0 - 1.6
25	1.6 - 2.5
50	2.3 - 3.5
75	2.7 - 4.5
100	3.2 - 5.5

**Densidad de corriente.-** La densidad de corriente (expresada en  $\text{Amperes} / \text{mm}^2$ ) en los conductores usados en la fabricación de transformadores depende desde luego de la sección o área de los conductores, pero para un cierto conductor dado, esencialmente depende del tipo de enfriamiento usado. Los valores de orden de magnitud que se recomienda usar son los que se indican a continuación:

**Tabla 6:** Densidad de corriente para distintos transformadores.

Transformadores enfriados por aire	Con enfriamiento natural	1.1-1.6 $A / mm^2$
Transformadores enfriados por aceite	Con enfriamiento natural	2.5-2.8 $A / mm^2$
	Con enfriamiento forzado	2.8-4.0 $A / mm^2$

**Relación entre las pérdidas en el fierro y las pérdidas en el cobre (devanados).**-

La condición de rendimiento máximo en un transformador se tiene cuando las llamadas pérdidas en vacío en el fierro y las pérdidas en los devanados (en el cobre) son iguales. Como en la práctica los transformadores es muy raro que trabajen con carga constante. Por lo general es mayor el tiempo que operan con carga debajo de su valor nominal, que aquel que opera a plena carga, entonces la relación  $P_{vacío} / P_{cobre}$  es menor que la unidad, y es tanto más pequeña respecto a la unidad, mientras sea mayor el tiempo de funcionamiento a carga reducida, para tomar en consideración el efecto de variación de la resistencia por temperatura, para corregir las pérdidas en los devanados se puede considerar un coeficiente  $K_M$  igual a 1.1.

**Los ampere-espira por unidad de longitud en la columna.**- Para determinar la altura  $h$  de las columnas o bien para verificar el valor obtenido en base al diámetro de la circunferencia circunscrita a la sección de este, sirve el parámetro de los ampere-espira.

$$\text{Ampere - Espira} / \text{cm} = \frac{N_1 I_1}{h} = \frac{N_1^2 I_1^2}{h}$$

De donde:

$$h(\text{cm}) = \frac{\text{Amp - Espira}}{\text{Amp - Espira} / \text{cm}}$$

$N_1$  y  $N_2$  son las espiras en serie por fase del primario y secundario respectivamente, y las corrientes primario y secundario son  $I_1$  e  $I_2$  respectivamente. Para que el dimensionamiento del núcleo sea bien realizado, es necesario que el valor de tal parámetro se encuentre dentro de los límites de la práctica constructiva que indica las conveniencias para los distintos tipos de transformadores en función de la potencia, tales límites de valores medios se dan en la tabla siguiente:

**Tabla 7:** Valores medios de Ampere–Espira/Centímetro en función de la potencia y tipo de transformadores.

POTENCIA (kVA)	AMPERE – ESPIRA/CENTIMETROS			
	TRIFASICOS		MONOFASICOS	
	TIPO COLUMNA	ACORAZADOS	TIPO COLUMNA	ACORAZADOS
1	50 - 66	65 - 83	60 - 80	100 - 130
5	85 - 100	110 - 130	100 - 120	170 - 200
10	95 - 120	124 - 156	115 - 140	190 - 240
50	150 - 200	196 - 260	180 - 240	300 - 400
100	170 - 250	220 - 320	200 - 240	340 - 500
500	230 - 300	300 - 390	270 - 360	460 - 600
1 000	280 - 370	360 - 480	430 - 570	560 - 740
5 000	420 - 500	550 - 650	500 - 600	840 - 1 000
10 000	550 - 650	720 - 850	660 - 780	1 100 - 1 300

**Aislamiento entre devanados y entre devanados y el núcleo.-** El aislamiento entre los devanados y entre estos y el hierro del núcleo sobre el cual se encuentran devanados, se puede hacer de distintas formas, según sea el tipo de transformador, la limitada rigidez dieléctrica del aire, la presencia de polvos y humedad, hacen que sea preferente el uso de transformadores en aceite cuando la tensión sobrepasa los 4 a 6 kV.

En la tabla siguiente se da como una medida de orientación la relación entre el espesor del tubo (en mm) y la tensión de operación (en kV).

**Tabla 8:** Espeso de tubos aislantes contra tensión de operación en transformadores.

Espesor del tubo (mm)	Tensión de operación (kV)
4	10
5	15
6	20
7	25
8	30
10	40

Cuando los tubos se subdividen, el espesor del conjunto aislante (tubo-aceite) se puede calcular prácticamente con la expresión:

$$d = 0.06 V \text{ (cm)}$$

Donde:

$V$  : Máxima tensión de los devanados, expresada en kV.

Todo lo mencionado anteriormente es aplicable tanto al aislamiento entre devanados, como al aislamiento con respecto al núcleo.

#### **Distancias entre devanados y el yugo y entre los devanados y el tanque.-**

Estas distancias mínimas no solo están relacionadas a las tensiones de operación, también lo están a la distribución del campo eléctrico en los puntos considerados. Con tal propósito, cualquier reducción para mejorar las distribuciones del campo eléctrico, deber ser un propósito del diseño, en la siguiente figura se indican cuáles son las distancias consideradas.

Con relación a la figura anterior y a título de orientación, se dan los siguientes valores de distancias mínimas en la tabla siguiente:

**Tabla 9:** Distancias mínimas para diseño de núcleos trifásico tipo columna.

Tensión de Operación	3	5	10	20	30	40	50	60	70	100
En Aire A min (mm)	35	50	--	--	--	--	--	--	--	--
En Aceite A min (mm)	--	25	35	55	80	90	100-120	120-130	130-160	160-200
B min (mm)	--	50	60	75	85	100	120	140	150	180

Por razones prácticas, se recomienda no usar valores inferiores a los siguientes

Para A: en aire 35 mm.  
en aceite 20 mm.

Para B: 40 mm.

Entre los devanados de columnas adyacentes se deben respetar también ciertos valores mínimos, indicados por la distancia C en la figura anterior, esta distancia se puede obtener de la relación:

$$C = 0.8 \text{ kV}$$

$$C = 0.9 \text{ kV}$$

Cuando se usa diafragma aislante, esta distancia puede descender hasta 10 o 50 mm.

#### 2.4.4.2 Dimensionamiento de los transformadores trifásicos en aire

Estos transformadores son por lo general de pequeña potencia y no existe normalmente un criterio unificado en cuanto al diseño de las laminaciones, de manera que a título de orientación se pueden considerar los valores siguientes referidos a la figura indicada.

$$A = B = 5C \quad E = 3C \quad C = D = G$$

Se dan también las siguientes relaciones:

$$A = B = \sqrt{A \times B}$$

$$C = \frac{A}{5} = \frac{B}{5}$$

$$E = 3C$$

También en este caso el punto de partida es la determinación de la superficie del núcleo (considerado de sección rectangular)

$$A \times B = 35 \sqrt{P_n / 3} \quad (cm^2)$$

Donde  $P_n$  es la potencia aparente del transformador, la sección del núcleo (S), subdividiendo la potencia de la maquina en las tres columnas y fijando un valor de la constante K que se selecciona entre 1.0 y 1.6.

$$S = K \sqrt{P_n}$$

Tomando:  $K=1.15$

$$S = 1.15 \sqrt{S / 3}$$

El cálculo del número de espiras y de la sección de los conductores para la fabricación de los devanados primario y secundario se hace tomando como base "las tensiones y corrientes de fase", de esta manera, por ejemplo, si los devanados están conectado en estrella y la tensión en tres fases es de 440 Volts, los devanados se calcula para una tensión de  $440 / \sqrt{3} = 254 \text{ V}$  tratándose de transformadores pequeños entre 3 y 10 kVA, el rendimiento o eficiencia se puede tomar entre 0.85 y 0.95.

#### **2.4.4.3 Dimensionamiento de los transformadores trifásicos de distribución enfriados por aceite**

Dentro de esta categoría se pueden ubicar los transformadores que comprenden potencias que van desde algunas decenas hasta algunas centenas de kVA y con tensiones primarias hasta 34.5 kV o valores alrededor de este. Las tensiones secundarias normalizadas dependen en cierta medida de la aplicación específica y pueden ser por ejemplo 4,160 volts, 440 volts o 220 volts entre fases, con una frecuencia normalizada que en el caso de Perú es 60 Hz. Por este y algunos otros problemas como son las pérdidas, el calentamiento es común a todas las maquinas, adquiere importancia el problema del aislamiento.

Por lo general en los procedimientos de cálculo de transformadores se hace uso de fórmulas y expresiones que algunas veces no tiene deducción matemática alguna, más bien es resultado del producto de la experiencia, del tipo de materiales usados y su calidad, etc. además no son aplicables a todos los casos, por lo que no existe un procedimiento de cálculo único y general, esto hace necesario que el lector tenga un poco de cautela en cuanto a las metodologías del diseño de transformadores se refiere.

#### **2.4.4.4 Datos de partida para el cálculo**

Los elementos de partida necesarios para la iniciación de un cálculo son: la potencia nominal en kVA, las tensiones de vacío primaria y secundaria, los taps para regulación de la tensión primaria, la conexión entre las fases. El procedimiento de cálculo se puede ilustrar a través de un ejemplo que se dará en el capítulo 6.

## CAPITULO III: MATERIALES Y PROCESO DE MANUFACTURA DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

### 3.1 INTRODUCCIÓN

En esta parte del trabajo de investigación se detallará en forma literal y gráfica las diferentes etapas de manufactura del transformador trifásico.

Luego de haber efectuado los cálculos de diseño, que no vienen a ser parte de este trabajo, se procederá a la compra de los materiales a utilizar. La manufactura de los componentes que conformaran el transformador, se procesan simultáneamente en diferentes ambientes de producción, para que al final se pueda integrarlos en una sola unidad.

En las figuras subsiguientes se muestran los principales materiales utilizados en la manufactura del transformador trifásico



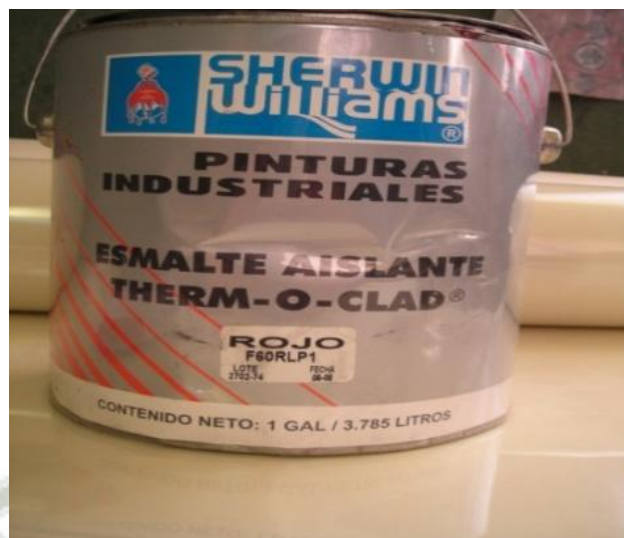
**Figura 29:** Fleje de acero al silicio estandarizado de 100 mm.de ancho



**Figura 30:** Conductor de Cobre Electrolytico Recocido en bobina



**Figura 31:** Aislante de film poliester



**Figura 32:** Aislante barniz



**Figura 33:** Aislante en cintas de vidrio virgen



**Figura 34:** Papel PRESSPAN aislante de alta dureza



**Figura 35:** Cinta aislante de algodón de  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$  de pulgada



**Figura 36:** Spaguetty de fibra de vidrio simple



**Figura 37:** Spaguetty de fibra de vidrio reforzada



**Figura 38:** Chapas de acero silicoso grado M-4 para la fabricación de núcleos

### 3.2 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL NÚCLEO ACORAZADO

A diferencia de los núcleos monofásicos, que para su fabricación se necesita solo dos arcadas, en el transformador trifásico, se compone de cuatro arcadas: dos arcadas pequeñas y dos arcadas grandes. La limitación que tiene este tipo de núcleo es, que sólo resulta práctico su manejo para el ensamble del conjunto núcleo-bobina.

El detalle del proceso de manufactura es el siguiente:

1. De la bobina de chapas de hierro silicoso se cortan las tiras de láminas al ancho especificado y la cantidad requerida.
2. Con una máquina bobinadora o devanadora se conforma el toroide y se programa en la máquina el número de espiras necesarias para dar el espesor especificado por diseño.
3. Un paso previo es pesar el material del núcleo que debe coincidir con el calculado para cada arcada.

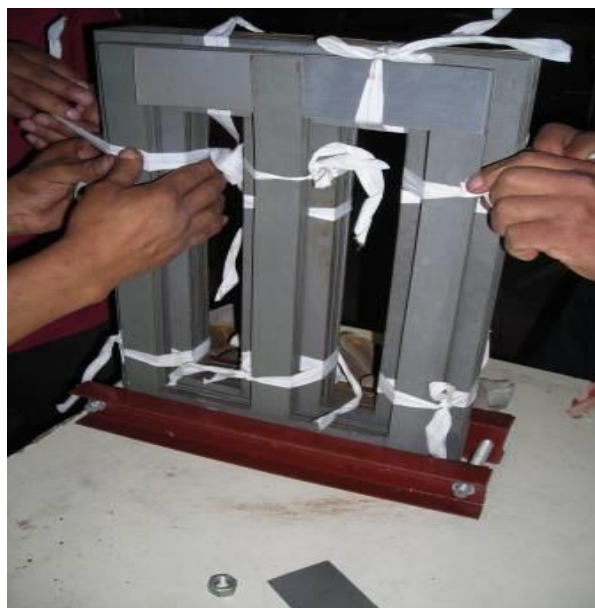
4. Una vez conformado el núcleo, se le hace un flejado transversal en dos o tres secciones, con el objeto de que éstos queden firmemente sujetos al molde.
5. Proceso de recocido de núcleos. Una vez conformados los núcleos se tiene que recocerlos a una temperatura de  $775^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$  en un horno eléctrico y bajo una atmósfera inerte controlada. El tiempo para el tratamiento térmico dura aproximadamente de 20 horas.
6. Una vez recocido el núcleo, se quita el molde y se verifica la calidad del recocido, esto determinara las pérdidas en watts/kg del núcleo. Si las pérdidas en los núcleos están dentro de los valores especificados, éstos quedan listos para el ensamble a la bobina.



**Figura 39:** Proceso de armado del núcleo magnético



**Figura 40:-** Prensado del núcleo en forma horizontal con ángulos y varilla roscada



**Figura 41:** Núcleo en posición vertical para desmontar la parte superior del yugo



**Figura 42:** Prensado de las columnas con cinta poliéster

### 3.3 PROCESO DE MANUFACTURA DE LAS BOBINAS

Los aislamientos que intervienen en la manufactura de una bobina de un transformador, es la parte más importante para la confiabilidad del mismo. La construcción debe permitir que salgan en forma adecuada las terminales y las derivaciones. Debe, además, permitir arreglos de devanado múltiple y esquemas prácticos para reducir el mínimo de pérdidas por corrientes parásitas.



**Figura 43:** Preparado de la matriz de la bobina

En términos generales, sólo hay dos tipos de disposiciones de bobinas: bobinas concéntricas y bobinas dispuestas alternativamente cruzadas

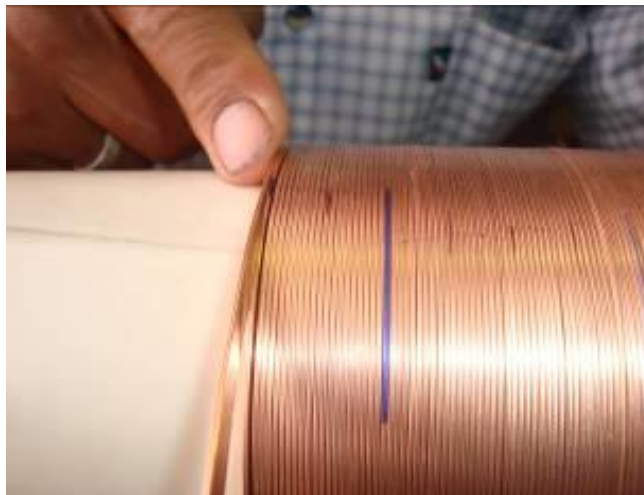
entre sí (bobina tipo dona, también conocida como de anillo). Son usadas muchas combinaciones de ambos tipos por diversos fabricantes.

#### 1. Preparación del molde o mandril

Para la fabricación de una bobina se requiere de un molde o mandril, cuyas dimensiones correspondan al perímetro interior del tubo de devanado a usar. En la fabricación del molde se debe considerar la facilidad de montaje en la máquina devanadora y su fácil extracción de la bobina al quedar ésta terminada.

#### 2. Tubo de devanado o casquillo

El tubo de devanado es el soporte de la bobina y el aislamiento entre la primera vuelta del conductor y el núcleo. El material es el presspan o pressboard.



**Figura 44:**-Bobina preformada, trazado de cada cierto tramo para las derivaciones



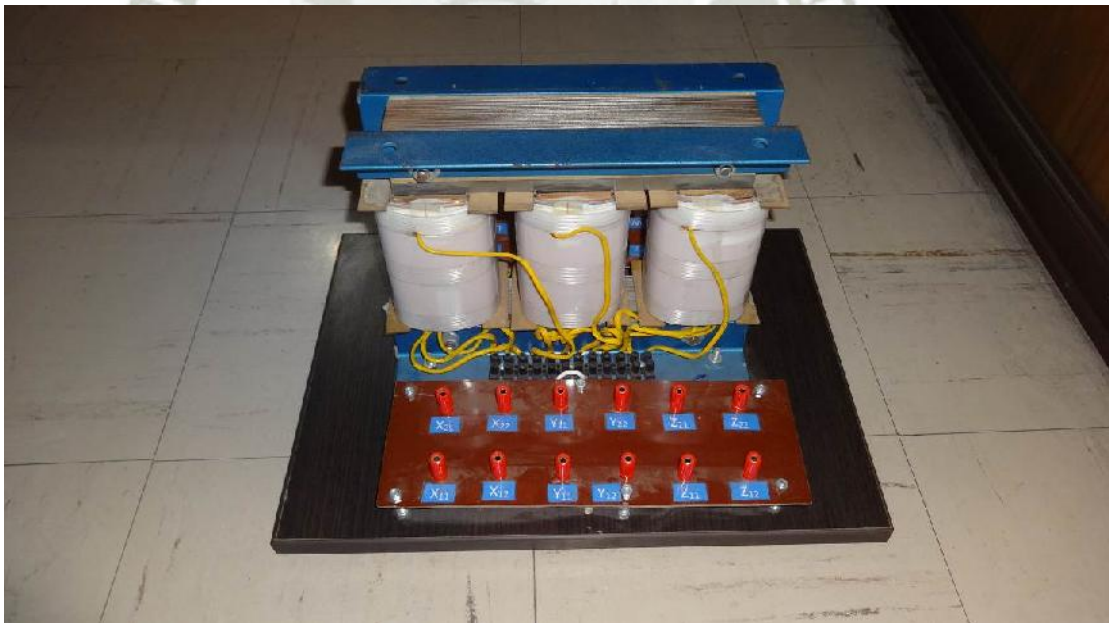
**Figura 45:** Presentación de las tres bobinas



**Figura 46:** Proceso de aislamiento de bobina



**Figura 47:** Vista de frente del transformador de potencia trifásico



**Figura 48:** Vista posterior del transformador de potencia trifásico

## CAPITULO IV: PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 3KVA QUE CONFORMA EL MODULO DIDÁCTICO PARA CONEXIONES ESPECIALES



**Figura 49:** Transformador trifásico componente del modulo

### 4.1 DATOS DE PLACA O NOMINALES DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Los datos eléctricos de placa del transformador en estudio son los siguiente:

Potencia	: 1500 VA.
Tensión de línea primaria	: 380 V.
Tensión de fase secundaria	: 220/127 V.
Tensión terciaria	: 220V.

#### 4.2 ENSAYOS SIMULADOS EN EL TRANSFORMADOR, EMPLEANDO EL SOFTWARE ESPECIALIZADO MATHCAD.

**TRANSFORMADORES TRIFASICOS**

TRANSFORMADOR #5 Conexion Yy

**DATOS NOMINALES DEL TRANSFORMADOR TRIFASICO**

$VA := V \cdot A$	$vn1\_fase := 220 \text{ V}$	$vn2\_fase := 127 \text{ V}$
$s\_total := 1500 \text{ V} \cdot \text{A}$	$in1\_fase := 2.27 \text{ A}$	$in2\_fase := 1.97 \text{ A}$
$s\_fase := \frac{s\_total}{3}$		$vn3\_fase := 127 \text{ V}$
$s\_fase = 500 \text{ W}$		$in3\_fase := 1.97 \text{ A}$

**LADO PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR**

**TENSIONES**

$v\_lineal := 380 \text{ V}$  Voltaje de linea PRIMARIO (promedio)  
(U2,V2,W2)

$v\_fase1 := \frac{v\_lineal}{\sqrt{3}}$

$v\_fase1 = 219.393 \text{ V}$  Voltaje de fase PRIMARIO (promedio) (U1-U2,V1-V2,W1-W2)

**CORRIENTES DE FASE Y DE LINEA**

$i\_fase1 := \frac{s\_total}{3 \cdot v\_fase1}$

$i\_fase1 = 2.279 \text{ A}$  Corriente nominal por FASE

$i\_lineal := i\_fase1$

$i\_lineal = 2.279 \text{ A}$  Corriente nominal por LINEA

## LADO SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR

### TENSIONES

$$v_{\text{linea2}} := 220 \text{ V}$$

Voltaje de línea SECUNDARIO (promedio)  
(X2,Y2,Z2)

$$v_{\text{fase2}} := \frac{v_{\text{linea2}}}{\sqrt{3}}$$

$$v_{\text{fase2}} = 127.017 \text{ V}$$

Voltaje de fase SECUNDARIO (promedio) (X1-  
X2,Y1-Y2,Z1-Z2)

### CORRIENTES

$$i_{\text{fase2}} := \frac{\frac{s_{\text{total}}}{2}}{3 v_{\text{fase2}}}$$

$$i_{\text{fase2}} = 1.968 \text{ A}$$

Corriente nominal por fase (X1-X2,Y1-  
Y2,Z1-Z2)

$$i_{\text{linea2}} := i_{\text{fase2}}$$

$$i_{\text{linea2}} = 1.968 \text{ A}$$

## LADO TERCIARIO DEL TRANSFORMADOR

$$v_{\text{linea3}} := 220 \text{ V}$$

Voltaje de línea TERCIARIO (promedio)  
(Xd,Yd,Zd)

$$v_{fase3} := \frac{v_{linea3}}{\sqrt{3}}$$

$$v_{fase3} = 127.017 \text{ V}$$

Voltaje de fase TERCARIO (promedio) (X3-Xd, Y3-Yd, Z3-Zd)

### CORRIENTES

$$i_{fase2} := \frac{\frac{s_{total}}{2}}{3 v_{fase2}}$$

$$i_{fase2} = 1.968 \text{ A}$$

Corriente nominal por fase

$$i_{linea2} := i_{fase2}$$

$$i_{linea2} = 1.968 \text{ A}$$

Corriente nominal por línea

### DATOS DE ENSAYO EN VACIO

$$v_{o\_fase} := 222.593 \text{ V}$$

Voltaje nominal promedio de vacio por fase

$$i_{o\_fase} := 0.509 \text{ A}$$

Promedio de las corrientes de vacio por fase

$$p_{o\_total} := 0.0554 \cdot 10^3 \cdot W$$

Sumatoria de las potencia de las tres fases en vacio

Parametros de la impedancia de magnetizacion se realiza en el ensayo en vacio

$$fp_o := \frac{po\_total}{3 \cdot (vo\_fase) \cdot (io\_fase)}$$

$$fp_o = 0.163$$

Factor de potencia en vacio

$$v\_fase1\_pract := 222.593 \text{ V}$$

Voltaje de fase en el primario - practico

$$v\_fase2\_pract := 128.098 \text{ V}$$

Voltaje de fase en el secundario - practico (x1-x2)

$$v\_fase3\_pract := 128.254 \text{ V}$$

Voltaje de fase en el terciario - practico (x3-xd)

$$v\_fase3\_pract\_tap := 166.332 \text{ V}$$

Voltaje de fase en el terciario - practico (x3-xd)

$$v\_fase1 = 219.393 \text{ V}$$

$$v\_fase2 = 127.017 \text{ V}$$

$$a' := \frac{v\_fase1}{v\_fase2} = 1.727$$

$$a_{12} := \frac{v\_fase1\_pract}{v\_fase2\_pract} = 1.738$$

$$a'_{13} := \frac{v\_fase1\_pract}{v\_fase3\_pract\_tap} = 1.338$$

$$a_{13} := \frac{v\_fase1\_pract}{v\_fase3\_pract} = 1.736$$

$$Y := \frac{io\_fase}{vo\_fase}$$

$$Y = 0.002 \text{ S}$$

Admitancia de excitacion referida al lado por el cual se realiza el ensayo en vacio

$$vo\_total$$

$$po\_fase := \frac{po\_total}{3}$$

$$po\_fase = 18.467 \text{ W}$$

Potencia promedio por fase

$$g := \frac{po\_fase}{vo\_fase^2}$$

$$g = (3.727 \cdot 10^{-4}) \text{ S}$$

Conductancia que representa las pérdidas totales del núcleo

$$b := \sqrt{Y^2 - g^2}$$

$$b = 0.002 \text{ S}$$

Susceptancia de magnetización, representa el efecto de la inducción magnética

$$RFE := \frac{1}{g} = (2.683 \cdot 10^3) \Omega$$

$$XM := \frac{1}{b} = 443.241 \Omega$$

### Metodo 2 para hallar los parametros

$$rfe := \frac{v\_fase1^2}{po\_fase}$$

$$rfe = (2.606 \cdot 10^3) \Omega$$

Resistencia del hierro

$$ife := \frac{v\_fase1}{rfe}$$

$$ife = 0.084 \text{ A}$$

Corriente del hierro

$$i\_mag := \sqrt{(io\_fase^2 - ife^2)}$$

$$i_{mag} = 0.502 \text{ A}$$

$$x_{mag} := \frac{v_{fase1}}{i_{mag}}$$

$$x_{mag} = 437.045 \ \Omega$$

$$r_{fe} = (2.606 \cdot 10^3) \ \Omega$$

$$x_{mag} = 437.045 \ \Omega$$

### DATOS DEL ENSAYO EN CORTO CIRCUITO

$$icc_{fase} := 2.23 \text{ A}$$

Corriente nominal de corto circuito por fase

$$vcc_{fase} := 9.53 \text{ V}$$

Promedio de las tensiones de corto circuito

$$pcc_{total} := 0.06229 \cdot 10^3 \text{ W}$$

Sumatoria de las potencia de las tres fase en corto

### Parametros de la impedancia de cortocircuito

$$fp_{cc} := \frac{pcc_{total}}{3 \cdot (vcc_{fase}) \cdot (icc_{fase})}$$

$$fp_{cc} = 0.977$$

Factor de potencia en corto circuito

$$z_{cc} := \frac{vcc_{fase}}{icc_{fase}}$$

$$z_{cc} = 4.274 \Omega$$

Impedancia de cortocircuito

$$p_{cc\_fase} := \frac{p_{cc\_total}}{3}$$

$$p_{cc\_fase} = 20.763 \text{ W}$$

Potencia de corto circuito por fase

$$r_{cc} := \frac{p_{cc\_fase}}{i_{fase1}^2}$$

$$r_{cc} = 3.998 \Omega$$

Resistencia de cortocircuito

$$x_{cc} := \sqrt{(z_{cc}^2 - r_{cc}^2)}$$

$$x_{cc} = 1.511 \Omega$$

Reactancia de corto

$$r_{cc} = 3.998 \Omega$$

$$x_{cc} = 1.511 \Omega$$

Corrección de la resistencia: normalizada a 75° C

$$temp\_amb := 21 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$temp\_norm := 75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$r_{cc} = 3.998 \Omega$$

$$x_{cc} = 1.511 \Omega$$

$$k\_temp := \frac{234.5 \text{ } ^\circ\text{C} + temp\_amb}{234.5 \text{ } ^\circ\text{C} + temp\_norm}$$

$$234.5 \text{ } ^\circ\text{C} + temp\_norm$$

$$k\_temp = 0.937$$

### Resistencia de corto circuito normalizada a 75°C

$$rcc\_norm := \frac{rcc}{k\_temp}$$

$$rcc\_norm = 4.267 \text{ } \Omega$$

### Reactancia de corto circuito normalizada a 75°C

$$xcc\_norm := \frac{xcc}{k\_temp}$$

$$xcc\_norm = 1.612 \text{ } \Omega$$

### DONDE:

$$rcc\_norm = 4.267 \text{ } \Omega$$

$$xcc\_norm = 1.612 \text{ } \Omega$$

$$r1 := \frac{rcc\_norm}{2}$$

$$r1 = 2.133 \text{ } \Omega$$

$$a_{12} = 1.738$$

$$r2 := \frac{r1}{a_{12}^2}$$

$$r_2 = 0.707 \, \Omega$$

$$r_{equ1} := r_1 + a_{12}^2 \cdot r_2$$

$$r_{equ1} = 4.267 \, \Omega$$

Con el siguiente criterio determinamos las reactancias

$$x_{d1} := \frac{x_{cc\_norm}}{2}$$

$$x_{d1} = 0.806 \, \Omega$$

$$x_{d2} := \frac{x_{d1}}{a_{12}^2}$$

$$x_{d2} = 0.267 \, \Omega$$

$$x_{equ1} := x_{d1} + a_{12}^2 \cdot x_{d2}$$

$$x_{equ1} = 1.612 \, \Omega$$

Primario con el terciario

$$a_{13} = 1.736$$

$$r_1 = 2.133 \, \Omega$$

$$r_3 := \frac{r_1}{a_{13}^2}$$

$$r_3 = 0.708 \, \Omega$$

$$r_{equ1\_1} := r1 + a_{13}^2 \cdot r3$$

$$r_{equ1\_1} = 4.267 \Omega$$

$$a'_{13} = 1.338$$

$$r1 = 2.133 \Omega$$

$$r3' := \frac{r1}{a_{13}^2}$$

$$r3' = 1.191 \Omega$$

$$r_{equ1\_1\_1} := r1 + a_{13}^2 \cdot r3'$$

$$r_{equ1\_1\_1} = 4.267 \Omega$$

Con el siguiente criterio determinamos las reactancias

$$xd1 = 0.806 \Omega$$

$$xd3 := \frac{xd1}{a_{13}^2}$$

$$xd3 = 0.268 \Omega$$

$$x_{equ1\_1} := xd1 + a_{13}^2 \cdot xd3$$

$$x_{equ1\_1} = 1.612 \Omega$$

$$xd1 = 0.806 \Omega$$

$$xd3' := \frac{xd1}{a_{13}^2}$$

$$xd3' = 0.45 \Omega$$

$$x_{equ1\_1\_1} := xd1 + a'_{13}{}^2 \cdot xd3'$$

$$x_{equ1\_1\_1} = 1.612 \, \Omega$$

Referido al lado secundario

$$r_{cc} = 3.998 \, \Omega$$

$$r_{cc\_norm} = 4.267 \, \Omega$$

$$x_{cc} = 1.511 \, \Omega$$

$$x_{cc\_norm} = 1.612 \, \Omega$$

$$r2' := \frac{r_{cc\_norm}}{2}$$

$$r2' = 2.133 \, \Omega$$

$$r1' := a_{12}{}^2 \cdot r2'$$

$$r1' = 6.442 \, \Omega$$

$$r_{equ2} := \frac{r1'}{a_{12}{}^2} + r2'$$

$$r_{equ2} = 4.267 \, \Omega$$

$$xd2' := \frac{x_{cc\_norm}}{2}$$

$$xd2' = 0.806 \, \Omega$$

$$xd1' := a_{12}{}^2 \cdot xd2'$$

$$xd1' = 2.434 \, \Omega$$

$$x_{equ2} := \frac{xd1'}{a_{12}{}^2} + xd2'$$

$$x_{equ2} = 1.612 \, \Omega$$

$$r_{equ2} = 4.267 \Omega$$

$$x_{equ2} = 1.612 \Omega$$

### Características externas del transformador

#### Regulación

$$v_{carga\_fase} := 220 \text{ V}$$

$$i_{carga\_fase} := in2\_fase$$

Plena carga

$$\alpha := \frac{i_{carga\_fase}}{in2\_fase}$$

$$\alpha = 1$$

Indice de carga

$$\cos(0^\circ) = 1 \quad \sin(0^\circ) = 0$$

$$reg = \alpha \cdot \frac{in2\_fase}{vn2\_fase} \cdot (r_{equ2} \cdot \cos(0^\circ) + x_{equ2} \cdot \sin(0^\circ)) + \frac{1}{2} \cdot \left( \alpha \cdot \frac{in2\_fase}{vn2\_fase} \right)^2 \cdot (x_{equ2} \cdot \cos(0^\circ) - r_{equ2} \cdot \sin(0^\circ))^2$$

$$reg = 0.066$$

$$reg' := reg \cdot 100 = 6.65$$

$$\Delta v := vn1\_fase \cdot \frac{reg'}{100}$$

$$\Delta v = 14.63 \text{ V}$$

$$m2\_pu := \frac{v_{carga\_fase}}{vn2\_fase}$$

$$vn2\_fase$$

$$vn2\_pu = 1.732$$

$$\alpha := 0, 0.25 .. 1.50$$

$$reg(\alpha) = \alpha \cdot \frac{in2\_fase}{vn2\_fase} \cdot (r\_equ2 \cdot \cos(0^\circ) + x\_equ2 \cdot \sin(0^\circ)) + \frac{1}{2} \cdot \left( \alpha \cdot \frac{in2\_fase}{vn2\_fase} \right)^2 \cdot (x\_equ2 \cdot \cos(0^\circ) - r\_equ2 \cdot \sin(0^\circ))^2$$

$$reg(\alpha) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.017 \\ 0.033 \\ 0.05 \\ 0.066 \\ 0.083 \\ 0.1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta v := \begin{bmatrix} 0 \\ 0.017 \\ 0.033 \\ 0.05 \\ 0.066 \\ 0.083 \\ 0.1 \end{bmatrix} \cdot [220] = \begin{bmatrix} 0 \\ 3.74 \\ 7.26 \\ 11 \\ 14.52 \\ 18.26 \\ 22 \end{bmatrix}$$

$$reg\_ind(\alpha) = \alpha \cdot \frac{in2\_fase}{vn2\_fase} \cdot (r\_equ2 \cdot \cos(37^\circ) + x\_equ2 \cdot \sin(37^\circ)) + \frac{1}{2} \cdot \left( \alpha \cdot \frac{in2\_fase}{vn2\_fase} \right)^2 \cdot (x\_equ2 \cdot \cos(37^\circ) - r\_equ2 \cdot \sin(37^\circ))^2$$

$$reg\_ind(\alpha) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.017 \\ 0.034 \\ 0.051 \\ 0.068 \\ 0.085 \\ 0.102 \end{bmatrix}$$

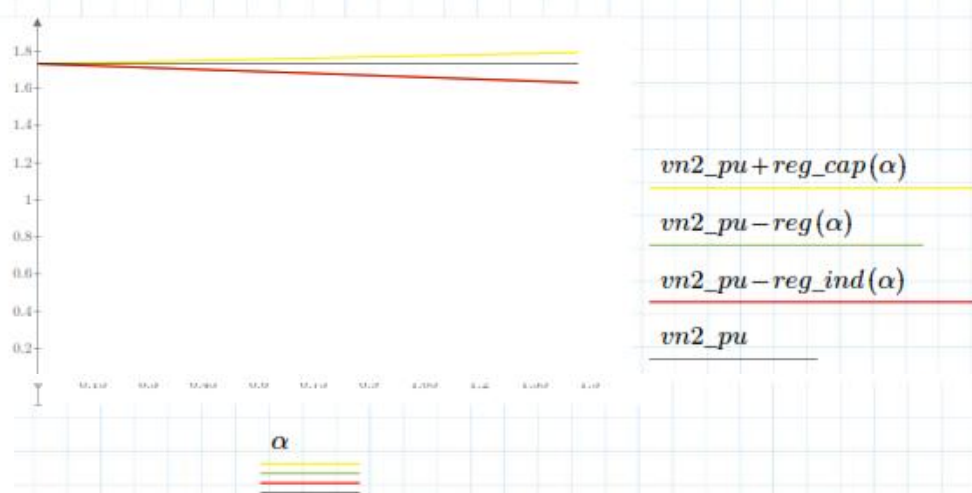
$$\begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta v_{ind} := \begin{bmatrix} 0.017 \\ 0.034 \\ 0.051 \\ 0.068 \\ 0.085 \\ 0.102 \end{bmatrix} \cdot [220] = \begin{bmatrix} 3.74 \\ 7.48 \\ 11.22 \\ 14.96 \\ 18.7 \\ 22.44 \end{bmatrix}$$

$$reg_{cap}(\alpha) := \alpha \cdot \frac{in2_{fase}}{vn2_{fase}} \cdot (r_{equ2} \cdot \cos(-37^\circ) + x_{equ2} \cdot \sin(-37^\circ)) + \frac{1}{2} \cdot \left( \alpha \cdot \frac{in2_{fase}}{vn2_{fase}} \right)^2 \cdot (x_{equ2} \cdot \cos(-37^\circ) - r_{equ2} \cdot \sin(-37^\circ))^2$$

$$reg_{cap}(\alpha) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.01 \\ 0.019 \\ 0.029 \\ 0.04 \\ 0.05 \\ 0.061 \end{bmatrix}$$

$$\Delta v_{cap} := \begin{bmatrix} 0 \\ 0.01 \\ 0.019 \\ 0.029 \\ 0.04 \\ 0.05 \\ 0.061 \end{bmatrix} \cdot [220] = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.2 \\ 4.18 \\ 6.38 \\ 8.8 \\ 11 \\ 13.42 \end{bmatrix}$$



### Eficiencia del transformador

$$p_{\text{carga\_fase}} := in2_{\text{fase}} \cdot vn2_{\text{fase}} = 250.19 \text{ W}$$

$$po_{\text{fase}} = 18.467 \text{ W}$$

$$pcc_{\text{fase}} = 20.763 \text{ W}$$

### Normalizando las pérdidas en el cobre a 75°C

$$pcc_{\text{fase\_norm}} := pcc_{\text{fase}} \cdot \frac{rcc_{\text{norm}}}{rcc}$$

$$pcc_{\text{fase\_norm}} = 22.162 \text{ W}$$

### Variación de potencias (potencia de vacío + potencia de corto circuito norm)

$$\Delta p := po_{\text{fase}} + pcc_{\text{fase\_norm}}$$

$$\Delta p = 40.628 \text{ W}$$

$$p1_{\text{fase}} := p_{\text{carga\_fase}} + \Delta p$$

$$p1_{\text{fase}} = 290.818 \text{ W}$$

$$p1_{\text{fase}'} := vn1_{\text{fase}} \cdot in1_{\text{fase}}$$

$$p1_{\text{fase}'} = 499.4 \text{ W}$$

$$n := \frac{p_{\text{carga\_fase}}}{p1_{\text{fase}}}$$

$$n = 0.86$$

$$\alpha := 0, 0.1 \dots 1.5$$

$$\phi_2 := 37^\circ$$

$$\cos(\phi_2) = 0.799$$

$$n_1(\alpha) := \frac{\alpha \cdot vn1\_fase \cdot in1\_fase \cdot \cos(\phi_2)}{\alpha \cdot vn1\_fase \cdot in1\_fase \cdot \cos(\phi_2) + \alpha^2 \cdot pcc\_fase\_norm + po\_fase}$$

$$n_1(\alpha) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.681 \\ 0.805 \\ 0.854 \\ 0.879 \\ 0.893 \\ 0.9 \\ 0.905 \\ 0.907 \\ 0.908 \\ 0.908 \\ 0.906 \\ 0.905 \\ 0.903 \\ 0.9 \\ 0.897 \end{bmatrix}$$

$$\phi_2 := 0^\circ$$

$$\cos(\phi_2) = 1$$

$$n_2(\alpha) := \frac{\alpha \cdot vn1\_fase \cdot in1\_fase \cdot \cos(\phi_2)}{\alpha \cdot vn1\_fase \cdot in1\_fase \cdot \cos(\phi_2) + \alpha^2 \cdot pcc\_fase\_norm + po\_fase}$$

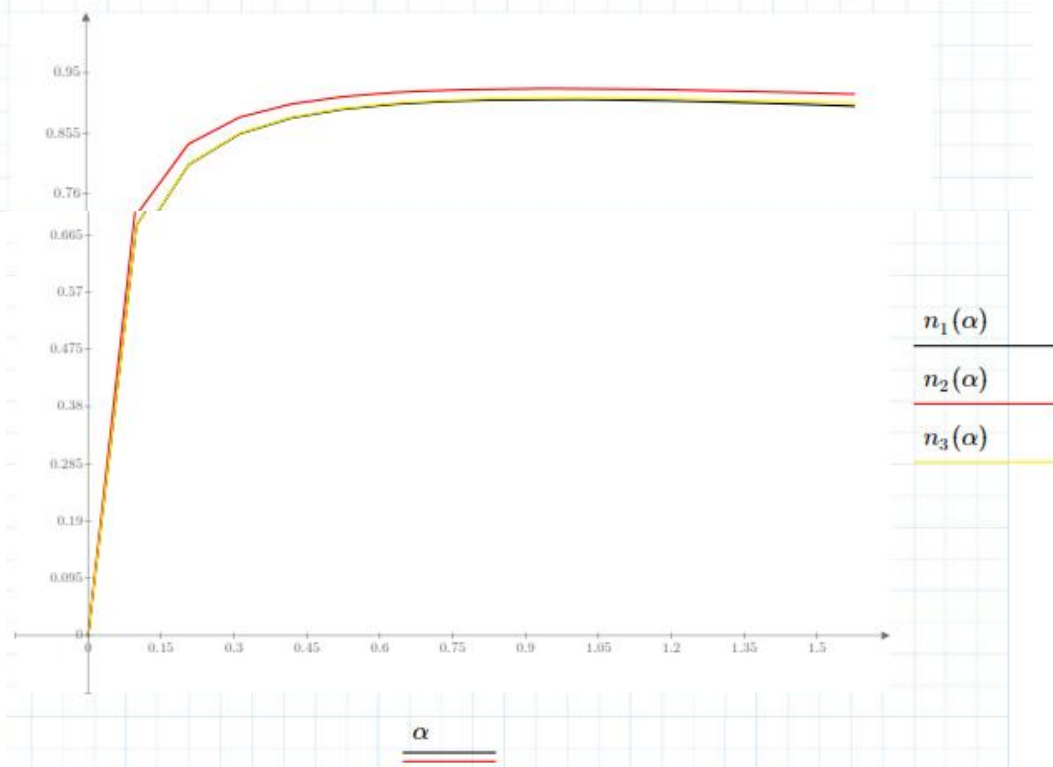
$$n_2(\alpha) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.728 \\ 0.838 \\ 0.88 \\ 0.901 \\ 0.912 \\ 0.919 \\ 0.923 \\ 0.924 \\ 0.925 \\ 0.924 \\ 0.922 \\ 0.921 \\ 0.919 \\ 0.916 \end{bmatrix}$$

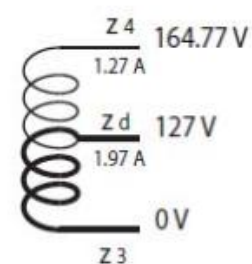
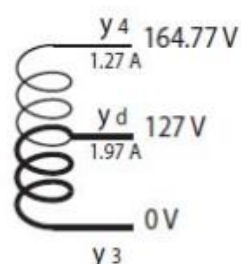
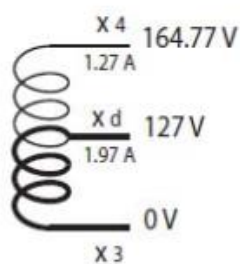
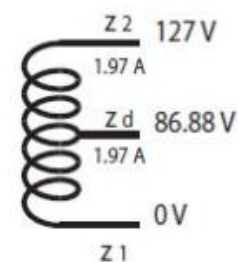
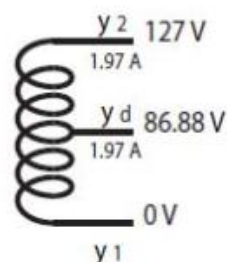
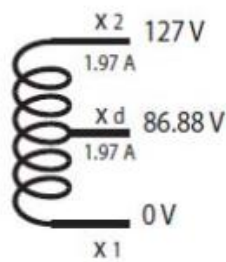
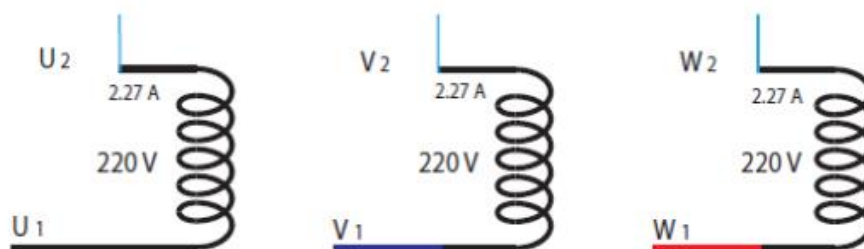
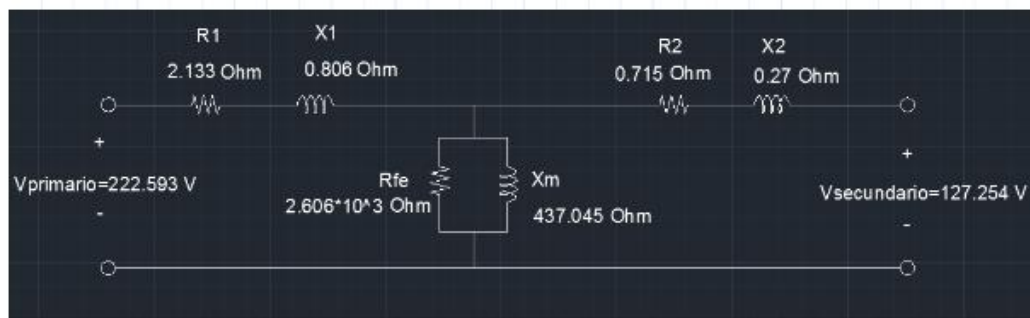
$$\phi_2 := -37^\circ$$

$$\cos(\phi_2) = 0.799$$

$$n_3(\alpha) := \frac{\alpha \cdot vn1\_fase \cdot in1\_fase \cdot \cos(\phi_2)}{\alpha \cdot vn1\_fase \cdot in1\_fase \cdot \cos(\phi_2) + \alpha^2 \cdot pcc\_fase + po\_fase}$$

$n_3(\alpha) =$	0
	0.681
	0.805
	0.855
	0.88
	0.894
	0.902
	0.907
	0.909
	0.91
	0.91
	0.91
	0.908
	0.906
	0.904
	0.902





## **CAPITULO V: ELABORACIÓN DE LAS GUÍAS DE PRÁCTICAS PARA EL MODULO TRANSFORMADOR TRIFASICO**

### **PRUEBAS Y GUÍAS DE PRÁCTICAS**

#### **5.1. PRUEBAS, ENSAYOS Y CONEXIONES.**

- Pruebas preliminares.
- Ensayo en vacío.
- Ensayo de corto circuito
- Ensayo con carga eléctrica.

#### **5.2 GUÍAS DE PRÁCTICAS.**

Luego de haber concluido con la implementación del módulo transformador de potencia trifásico, como parte de los objetivos que se pretendían alcanzar, se elaboraron un conjunto de guías de prácticas, para que los estudiantes de pre grado, como así también estudiantes de post grado de la Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales de la Universidad Católica de Santa María puedan efectuar la mayor cantidad posible de experiencias, y así poder comprobar la teoría aprendida en clases con la practica en el campo..

##### **5.2.1 Metodología de las Prácticas**

Sería muy conveniente que las practicas que se pretendan desarrollar en el laboratorio, sean previamente efectuadas por el personal técnico del laboratorio, esto con la finalidad de evitar improvisaciones delante de los alumnos.

##### **5.2.1.1 Objetivos**

En este punto se detalla que es lo que se pretende en la realización de la guía de práctica. Los objetivos deben de ser claros y susceptibles de

alcanzarse; asimismo, deben de ser congruentes entre sí, ya que la evaluación de dicha guía práctica se realiza en base a los objetivos propuestos.

#### **5.2.1.2 Generalidades**

Proporciona un panorama global de la práctica a desarrollarse, así como las descripciones básicas necesarias para contextualizarlo desde un punto de vista estudiantil.

#### **5.2.1.3 Fundamento Teórico**

El fundamento teórico, es una parte importante del desarrollo de la experiencia y se recomienda que esta sea desarrollada antes de efectuar el desarrollo de la práctica.

#### **5.2.1.4 Procedimiento Experimental**

Son los pasos secuencialmente a seguir durante el desarrollo de las guías de prácticas.

Esto incluye a las especificaciones que se debe tener en cuenta para la correcta conexión de los diversos esquemas que se muestran en cada guía de práctica, los cuidados que se deben de tener en cuenta durante el armado de los mismos para luego proceder con la anotación de los datos obtenidos en los ensayos u otros.

#### **5.2.1.5 Informe**

El alumno deberá de entregar un informe después del haber realizado la práctica en el tiempo que el profesor lo determine.

Dicho informe deberá presentarse con limpieza, junto con una descripción de la práctica, el esquema del montaje realizado, los cálculos gráficos o tablas que sean convenientes, anotaciones que se crea interesante resaltar, las conclusiones, recomendaciones y por último la bibliografía.

### 5.3 MODELOS DE GUÍAS DE PRÁCTICAS:

A continuación, presento cinco guías de prácticas que será de gran utilidad a los estudiantes de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica en el nivel de pre grado, específicamente en el área de las maquinas eléctricas y también a estudiantes de otras escuelas Profesionales que deseen efectuar practicas especializadas.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y**  
**FORMALES**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA**  
**ELECTRICA Y MECATRONICA**



**Guías de prácticas de laboratorio del curso:**

**MAQUINAS ELÉCTRICAS II**

**Guía N° 1**

**Arequipa – Perú**

**2017**

## CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. INTRODUCCIÓN
3. MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS
4. PROCEDIMIENTO
5. CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS
6. INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA
7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES
8. BIBLIOGRAFÍA

APENDICE

ANEXO

## GUÍA DE LABORATORIO No. 1

### TEMA: ENSAYO DE CONEXIONES TRIFÁSICAS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

#### OBJETIVOS

- Realizar y determinar las conexiones trifásicas desde una unidad trifásica y de un banco de tres transformadores monofásico.
- Determinar las relaciones de valores máximo, eficaz, período, desfase de tensiones entre fase a fase y fase a neutro y las relaciones de valores máximo, eficaz, período, desfase de corrientes de línea y de fase en las conexiones trifásicas.
- Verificar experimentalmente el desfase entre la tensión primaria secundaria y el grupo de conexión más utilizados en sistemas eléctricos de potencia.
- Desarrollar habilidades para elaborar diagramas fasoriales a partir de datos de placa.

#### INTRODUCCIÓN

Habiéndose estudiado el transformador monofásico en forma simplificada, ahora se estudiará en forma más compleja, es decir, en un arreglo trifásico, o banco de transformadores monofásicos, como se muestra en la Figura 50. Aunque esto no siempre es de esta forma en la realidad, ya que existen transformadores trifásicos individuales, construidos en la misma carcasa figura 4, y donde su aplicación depende de la tensión de trabajo y la capacidad en voltamperios de diseño; que generalmente son altas en estos casos [1].

El circuito equivalente del transformador trifásico es igual al equivalente monofásico, excepto que ahora existen tres arreglos por cada fase idénticos, y siempre se tendrá simplicidad para su análisis. Al igual que los transformadores monofásicos, es recomendable conocer la polaridad cuando se desean conectar en paralelo, evitando los desastres por cortocircuitos. En la vida real generalmente se debe especificar si es aditivo ó sustractivo, además de todos los arreglos posibles a voltaje nominal [2].

La relación de tensiones nominales está dada en función de los voltajes de línea (o de fase a fase) y está íntimamente ligado a las configuraciones de sus devanados en el lado primario y secundario y no necesariamente representa la relación de transformación de transformador por fase.

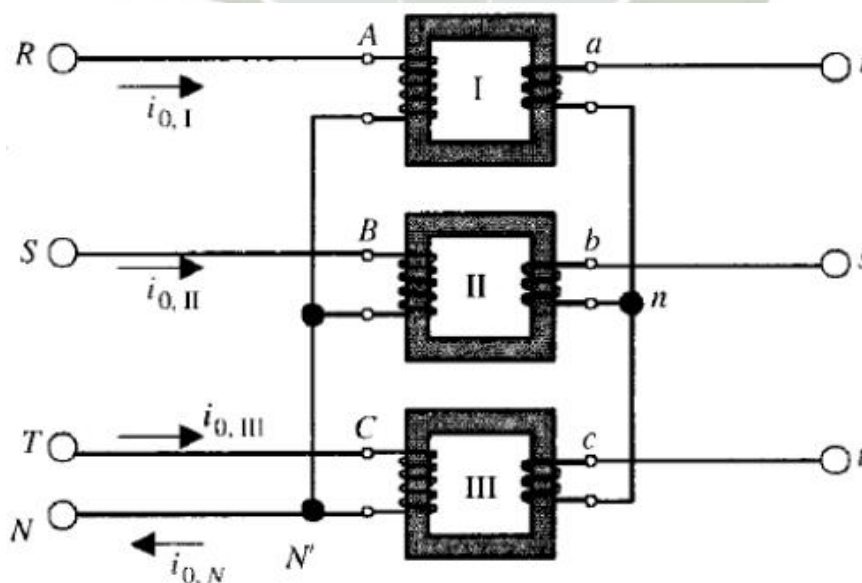


Figura 50. Conexión Yy-0 de banco de transformadores monofásicos

<i>Estrella:</i>	Y ( en el lado de A.T.),	y ( en el lado de B.T.).
<i>Triángulo:</i>	D ( " ),	d ( " ).
<i>Zig-zag:</i>	Z ( " ),	z ( " ).

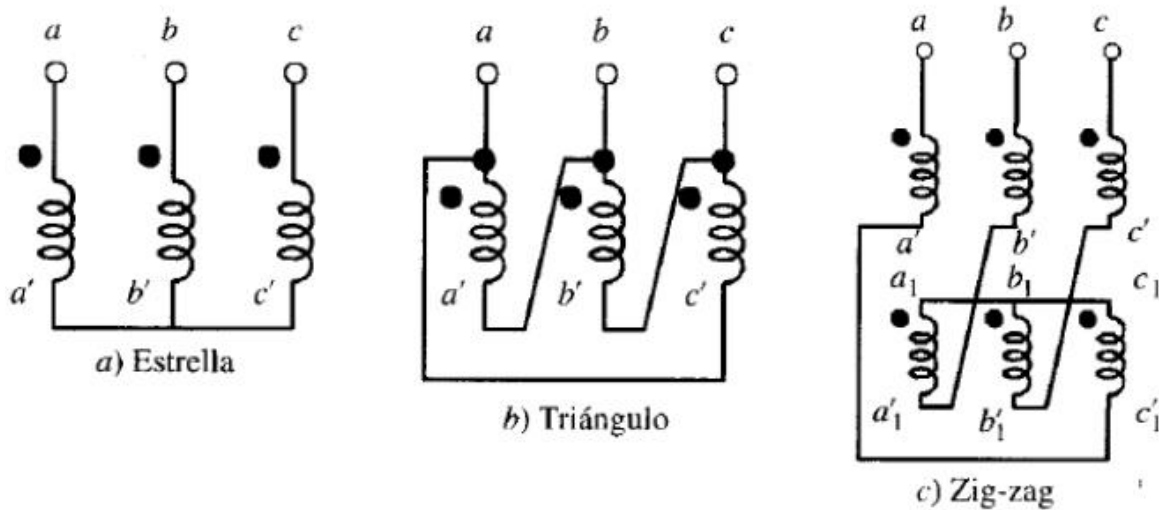


Figura 51. Configuraciones típicas de los devanados trifásicos.

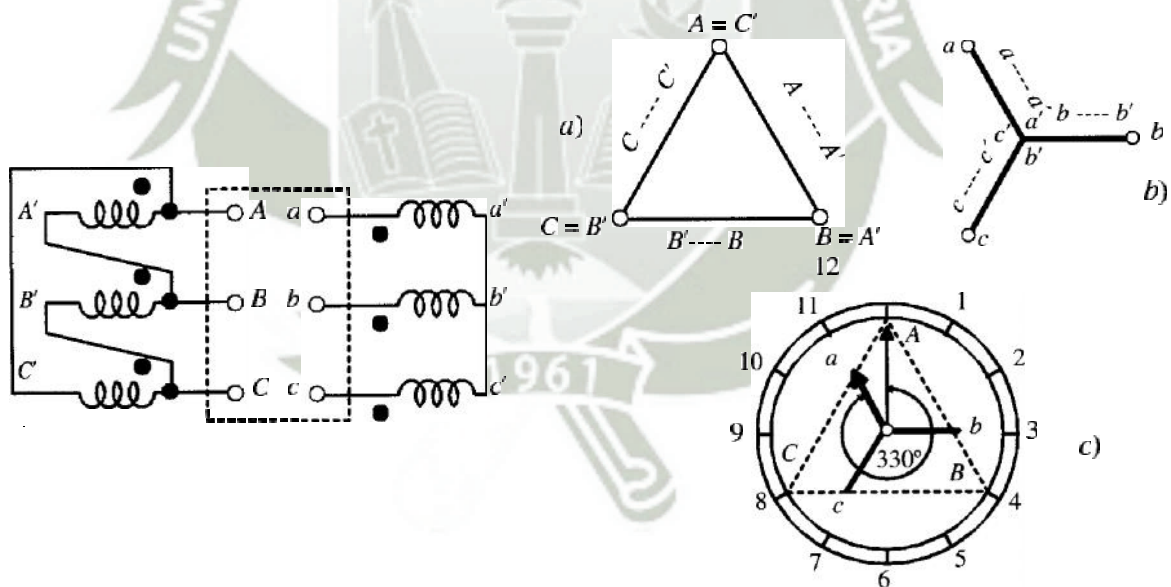


Figura 52. Determinación de grupo de conexión por el método del Índice Horario.

*\*complementar el fundamento teórico de transformadores trifásico con las referencias básicas.  
++Traer un resumen de la información revisada del procedimiento de pruebas en vacío y corto circuito de transformadores trifásicos y sus respectivas normas nacionales e internacionales para determinar los datos de placa.*

Tabla 10. Grupo de conexión de transformadores.

INDICE DE DESFAJAJE	SÍMBOLO DE ACOPLAMIENTO	DIAGRAMA FASORIAL		ESQUEMA DE CONEXIONES	RELACION DE TRANSFORMACION
		ALTA TENSION	BAJA TENSION		
0 (0°)	Dd0				$\frac{N_1}{N_2}$
	Yy0				$\frac{N_1}{N_2}$
	Dz0				$\frac{2 N_1}{3 N_2}$
5 (150°)	Dy5				$\frac{1 N_1}{\sqrt{3} N_2}$
	Yd5				$\sqrt{3} \frac{N_1}{N_2}$
	Yz5				$\frac{2 N_1}{\sqrt{3} N_2}$

$$v_1(\theta) = V_p \text{sen}(\theta)$$

$$v_2(\theta) = V_p \text{sen}(\theta - 120^\circ)$$

$$v_3(\theta) = V_p \text{sen}(\theta + 120^\circ)$$

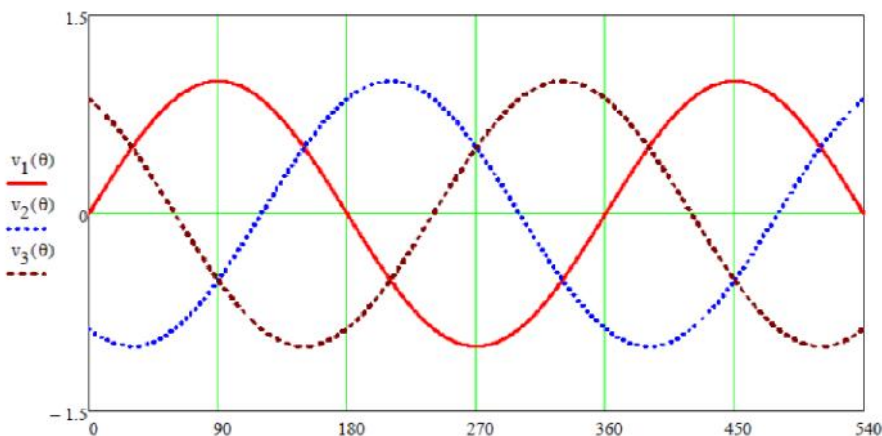


Figura 53. La forma de ondas de las tensiones trifásicas2.1. PRE-LABORATORIO

Sobre el formato de la Figura 63 realizar los respectivos conexiones y trazar los diagramas vectoriales de tensiones que determina el grupo de conexión correspondiente. Presentar los diagramas y la forma de conexonado de las siguientes configuraciones en hojas separadas:

- a) Y/y-0;      b) D/yn-5;      c) Y/d-1;      d) D/y-11;      e) Y/d -1.

CONEXION Y GRUPO: .....

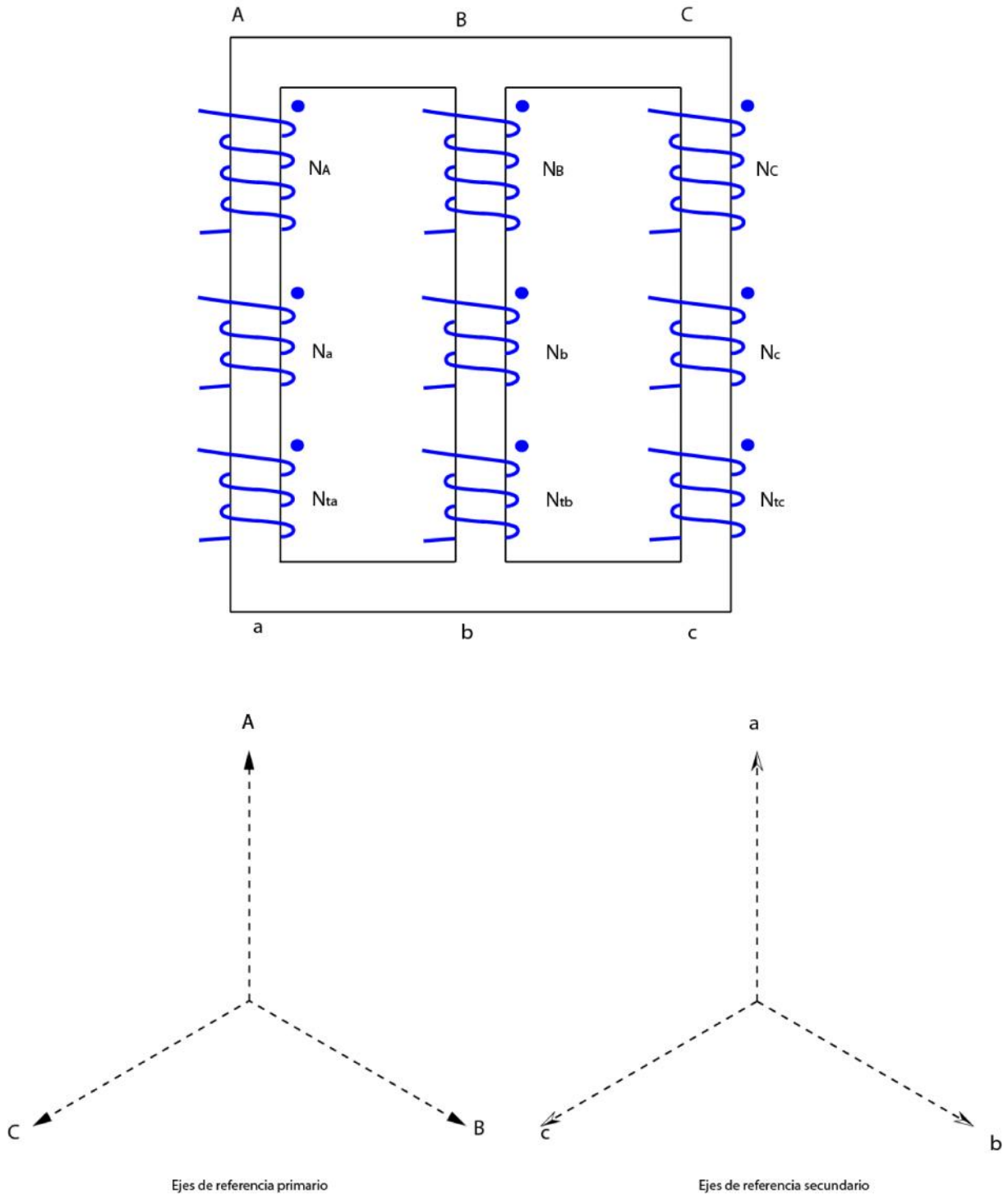


Figura 54. Formato para la realización de conexonado y diagrama vectorial del transformador trifásico.

## MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS

Los siguientes equipos, instrumentos y materiales serán necesarios para la realización de la práctica:

Ítem	Descripción	Cantidad	Código
1	Regulador de tensión trifásica (variac) 380 V, 20 A, 10 kW.	1	
2	Transformador de potencia monofásico: 220 V, 110 V, 60Hz. ó 500 VA ó 1000 VA.	3	
3	Vatímetro trifásico digital o módulo de medición trifásica de potencia, intensidad y tensión de c.a, 20 A. 600 V.	1	
4	Amperímetro de c.a. 25 A, 1 A	2	
5	Voltímetro de c.a. de 150 V, 300 V, 750V	2	
6	Microohmímetro MPK5 (o puente Wheastone)	1	
7	Reóstato o resistencia variable de 11 - 8 A; 42 -5 A; 110 -2.5 A; Según cálculo de carga.	Según la carga	
8	Multitester para verificación de circuitos	1	
9	Kit de cables flexibles blindados unipolares, tripolares y tetrapolares de 2.5 mm <sup>2</sup> (ó 14xAWG) de 600 V.	3	
10	Osciloscopio digital de dos canales con su respectivo transformador de aislamiento y 2 sondas de tensión.	1	
11	Unidad de transformador trifásico 1500 VA, 380/220 V, 60Hz.	1	
12	Lámparas incandescentes de 220 V, 50 W.	3	

## PROCEDIMIENTO

a) Usando el esquema de la Figura 55, determinar experimentalmente las fases, la polaridad de cada uno los devanados del transformador trifásico de potencia tipo columna; luego proceder a marcar las bobinas con las letras el A-X, B-Y, C-Z/a-x, b-y, c-x. Discutir con sus compañeros y explicar el fenómeno que se observa cuando se cierra el interruptor S.

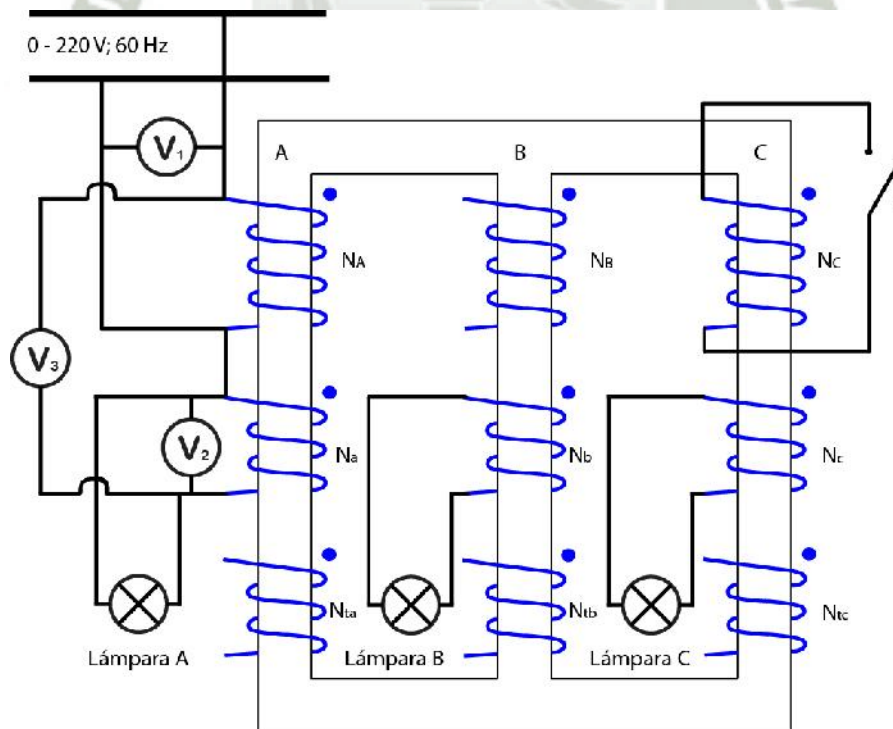


Figura 55. Esquemas de montaje para verificar la fase y polaridad de los devanados de transformador trifásico tipo columna. b) Completar la Tabla 10 de valores nominales de

transformadores con diferentes grupos de conexión. Armar el esquema eléctrico de la Figura 56 y verificar el ángulo de desfase entre las tensiones del primario y secundario y su relación de transformación experimentalmente con ayuda del osciloscopio. Con los datos experimentales completar la Tabla 12.

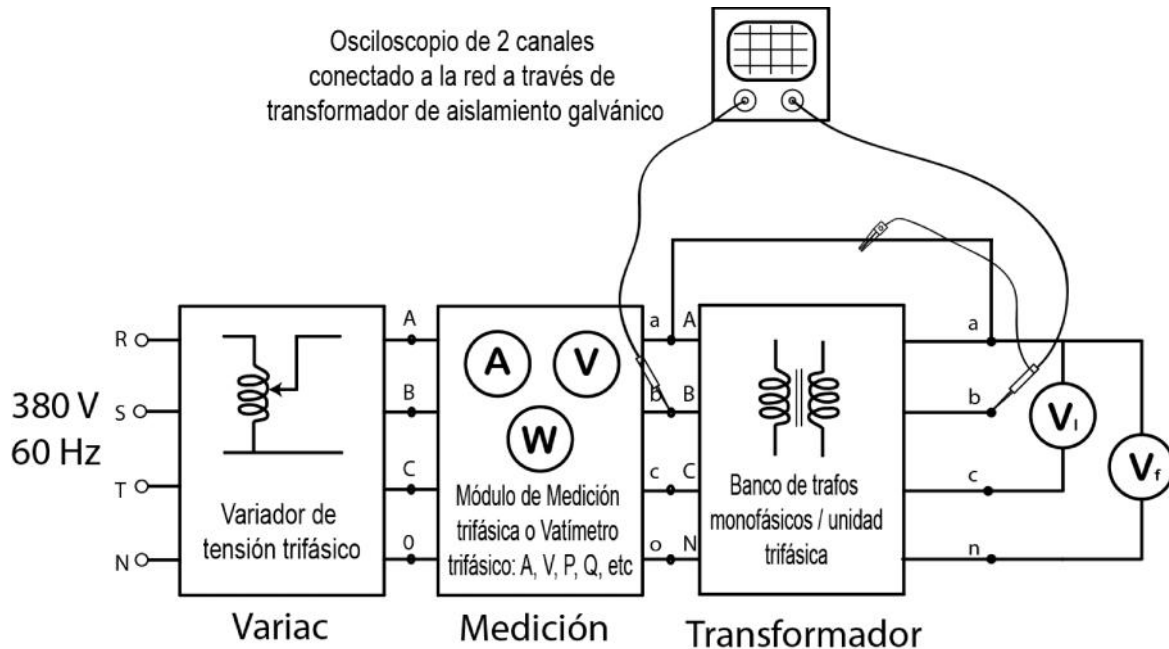


Figura 56. Esquema de montaje eléctrico para la verificación experimental del grupo de conexión para transformadores trifásicos de potencia.

Tabla 11. Cuadro de potencia y tensiones de línea y de fase nominales del transformador trifásico a usar.

#	conexión	$S_n$ [VA]	$V_{1n}$ [V]	$V_{2n}$ [V]	$V_{1fn}$ [V]	$V_{2fn}$ [V] <sub>3φ</sub>	$a = \frac{V_{1n}}{V}$	$\alpha = \frac{N_1}{N_2}$
1								
2								
3								
4								
5								

c) Con ayuda del osciloscopio de 2 canales y conectado de acuerdo a la Figura 56, verificar experimentalmente el ángulo de desfase entre tensiones del primario y secundario en grados eléctricos. Complete la tabla con datos experimentales obtenidos del osciloscopio.

Tabla 12. Datos experimentales de tensiones líneas, frecuencia, periodo y ángulo de desfase.

#	conexión	$V_{1max}$ [V]	$V_{1ms}$ [V]	$V_{2max}$ [V]	$V_{2ms}$ [V]	T [ms]	f, [Hz]	$\alpha_v$ [ms]	$\alpha_v$ [°]
1									
2									
3									
4									

5									
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--

## CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 5.1. Dibujar y trazar los diagramas vectoriales de tensiones y corrientes para las conexiones realizadas experimentalmente indicando las configuraciones y grupo de conexión al que pertenecen de acuerdo a la Índice Horario.
- 5.2. Dibujar y trazar los diagramas vectoriales de corrientes de línea y de fase para las conexiones realizadas en punto 5.1.
- 5.3. Determine las relaciones de espiras de transformación y la relación de tensiones nominales del transformador trifásica para cada configuración.
- 5.4. Cuáles son las configuraciones más utilizadas y porque?
- 5.5. Haga una lista de ventajas y desventajas del banco trifásico de transformadores monofásicos.
- 5.6. Porque en el transformador trifásico tipo columna la corriente de vacío por fase no son iguales.
- 5.7. Qué ocurre si una de las dos fases de conexión trifásica se intercambian al alimentar un motor trifásico.
- 5.8. Enumere algunas de las aplicaciones de transformador en conexión zigzag y hexafásico en sistemas de potencia.

## INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA

- 6.1. Verifique a través de un programa de simulación (MATLAB/SIMULINK, PSPICE, PSIM) las conexiones trifásicas experimentadas y determine el grupos de conexión.
- 6.2. Investigue sobre el transformador trifásico de aislamiento para rectificador de CA/CC de 6, 12, 18 y 24 pulsos. Presente los resultados de simulación de la tensión rectificada con las pulsaciones respectivas.

## CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Plantee en forma personal y clara un mínimo de cinco (5) conclusiones producto de la participación y de los resultados obtenidos en la experimentación y en la elaboración del informe.

Plantee en forma personal y clara un mínimo de tres (3) observaciones para la mejora de la experiencia de las prácticas de este tema.

## Bibliografía

- 1] J. Fraile Mora, Máquinas Eléctricas, McGraw Hill, 3ra. Edición., 2008.
- 2] A. E. Fitzgerald, Máquinas Ekéctricas, McGraw Hill, 6ta Edición., 2003.

Al final de todo documento o informe técnico se hace referencias numeradas de la bibliografía empleada y la normalización respectiva. Dar las referencias bibliográficas enumeradas y citadas de su informe de la práctica [2], por ejemplo:

- [1] Jesús Fraile Mora, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ta. Edición, 2008.
- [2] Fitzgerald A. E. Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ta. Edición, 2003.

## APENDICE

Temas resueltos y explícitos como complemento para la mejor comprensión del marco referencial del informe.

## ANEXO

Adjunte todo material relacionado con la ejecución de la práctica y de la simulación que ayude a elaborar y comprender el informe presentado.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y**  
**FORMALES**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA**  
**ELECTRICA Y MECATRONICA**



**Guías de prácticas de laboratorio del curso:**

**MAQUINAS ELECTRICAS II**

**Guía N° 2**

**Arequipa – Perú**

2017

**CONTENIDO**

1. OBJETIVOS
2. INTRODUCCIÓN
3. MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS
4. PROCEDIMIENTO
5. CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS
6. INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA
7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES
8. BIBLIOGRAFÍA

APENDICE

ANEXO

## GUÍA DE LABORATORIO No. 2

### TEMA: ENSAYO DE VACÍO Y CORTO CIRCUITO DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA TRIFÁSICO.

#### 1. OBJETIVOS

- Determinar experimentalmente la relación de espiras y la relación de tensiones nominales del transformador trifásico.
- Determinar experimentalmente las pérdidas totales en el núcleo y estimar los parámetros de vacío por fase del transformador trifásico.
- Determinar experimentalmente la tensión de corto circuito, las pérdidas totales de los devanados y calcular los parámetros de los devanados por fase del transformador trifásico.
- Determinar los parámetros del circuito equivalente por fase del transformador trifásico.

#### INTRODUCCIÓN

La verificación del correcto funcionamiento de cualquier equipo eléctrico es de suma importancia, en particular cuando se trata de unidades grandes y altísimo costo. Este es el caso de transformadores de potencia triásicos. La experiencia de muchos años ha permitido determinar las cosas más importantes que se deben verificar para garantizar el correcto funcionamiento de los transformadores durante una larga vida útil. Por otro lado es necesario verificar que el transformador cumple con las características solicitadas.

Para hacer las respectivas verificaciones y evitar diversidad de opiniones, las partes se deben ajustar a las Normas Nacionales e Internacionales, generalmente establecidas de antemano por el comprador u organismos especializados. Las Normas son documentos que establecen, por consenso y aprobados por un organismo reconocido, reglas y criterios para usos comunes y repetidos. Es decir, establece las condiciones mínimas que deben reunir un producto o servicio para que sirva al uso al que está destinado. Las Normas son el producto de la experiencia de los fabricantes, usuarios, investigadores y otras partes interesadas que permiten garantizar la calidad de un producto al menor costo.

A continuación se hace un análisis de los principales ensayos desde un punto de vista didáctico, si el lector desea obtener los detalles necesarios para realizar los ensayos ajustados a las normas, deberá inevitablemente consultarlas. Una forma de clasificar los ensayos puede ser la siguiente:

- A. Ensayos en carga
- B. Ensayos para la determinación de pérdidas y parámetros
  - Medición de resistencias de los devanados
  - Medición de la relación de transformación
  - Determinación de la polaridad
  - Determinación del grupo de conexión
  - Ensayo en vacío
  - Ensayo en cortocircuito
- C. Ensayo de calentamiento
- D. Ensayo de cortocircuito de falla
- E. Ensayos para la verificación de la aislación
  - Medición de resistencia de aislación e índice de polarización
  - Ensayo de tensión aplicada
  - Ensayo de tensión inducida
  - Ensayo de tensión de impulso
- F. Otros ensayos
  - Ensayo de factor de potencia de aislamiento y pérdidas de aislamiento (tangente delta).
  - Respuesta en frecuencia
  - Medición de ruido audible

- Ensayo de aceite aislante de transformador
- Control del equipamiento auxiliar

*\*complementar el fundamento teórico de transformadores trifásico con las referencias básicas.  
++Traer un resumen de la información revisada del procedimiento de pruebas en vacío y corto circuito de transformadores trifásicos y sus respectivas normas nacionales e internacionales para determinar los datos de placa.*

## 2.1. PRE-LABORATORIO

Elabore un programa de cálculo y gráfico para observar y analizar el desempeño del transformador trifásico bajo condiciones de carga con ayuda de herramientas computacionales (MATHCAD, MATLAB). Presentar los resultados en hoja impresa para discutir en clases antes de realizar la parte experimental.

A partir de los ensayos básicos del transformador trifásico de potencia determinar los parámetros del circuito equivalente por fase y trazar las curvas características de desempeño bajo las siguientes condiciones de carga (FP: 1.0, 0.8 atraso, 0.8 en adelante) tanto para la eficiencia y la regulación. Los datos de ensayo son:

- a)  $S_n$ : 400 kVA, 10000/400 V, 60 Hz. conexión D/yn-5, ONAN, altitud 2400 msnm.
- b) Ensayo de vacío:  $P_o=940$  W,  $I_0=1.34\%$ ,  $V_o=V_n$
- c) Ensayo de corto circuito:  $P_{cc}=5930$  W a  $78^\circ\text{C}$ ;  $V_{cc}=4.58\%$ ,  $I_{cc}=I_n$ .

## MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS

Los siguientes equipos, instrumentos y materiales serán necesarios para la realización de la práctica:

Ítem	Descripción	Cantidad	Código
1	Regulador de tensión trifásica (variac) 380 V, 20 A, 10 kW.	1	
2	Transformador de potencia monofásico: 220 V, 110 V, 60Hz. ó 500 VA ó 1000 VA.	3	
3	Vatímetro trifásico digital o módulo de medición trifásica de potencia, intensidad y tensión de c.a, 20 A. 600 V.	1	
4	Amperímetro de c.a. 25 A, 1 A	2	
5	Voltímetro de c.a. de 150 V, 300 V, 750V	2	
6	Microohmímetro MPK5 (o puente Wheastone)	1	
7	Reóstato o resistencia variable de 11 - 8 A; 42 -5 A; 110 -2.5 A; Según cálculo de carga.	Según la carga	
8	Multitester para verificación de circuitos	1	
9	Kit de cables flexibles blindados unipolares, tripolares y tetrapolares de 2.5 mm <sup>2</sup> (ó 14xAWG) de 600 V.	3	
10	Osciloscopio digital de dos canales con su respectivo transformador de aislamiento y 2 sondas de tensión.	1	
11	Unidad de transformador trifásico 1500 VA, 380/220 V, 60Hz.	1	
12	Lámparas incandescentes de 220 V, 50 W.	3	

## PROCEDIMIENTO

- a) Registrar los datos nominales de transformador trifásico tipo columna en la tabla adjunta.

$S_n$	$V_{n1}$ [V]	$V_{n2f}$ [V]	$I_{n1}$ [A]	$I_{n2f}$ [A]	Conexión	Grupo.
AT:						
BT:						
BT:						

- b) **Medición de la resistencia de los devanados en frío (a temperatura ambiente):**  
Verificar las configuraciones del lado primario, secundario (terciario) del transformador trifásico a experimentar. De acuerdo a los manuales del micrómetro realizar las mediciones

de la resistencia en corriente continua de los bobinados, teniendo en cuenta la temperatura ambiente y que el transformador a ensayar no haya sido utilizado antes de la práctica. Considere la resistencia equivalente medida de las conexiones como se indica en la Figura 57.

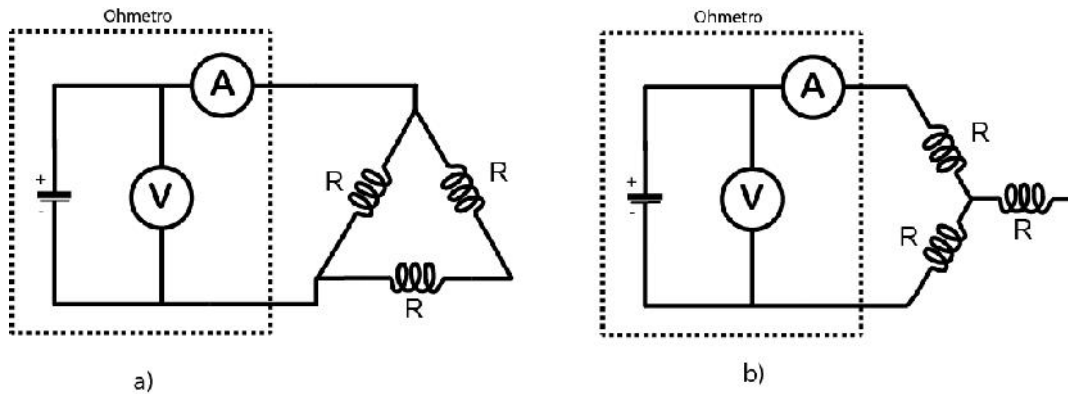


Figura 57. Resistencia activa equivalentes obtenidas en la mediación con el Ohmímetro

- c) Ensayo de Vacío: montar el circuito de la Figura 58 para la prueba de circuito abierto alimentando por el lado de Baja Tensión dejando en circuito abierto el lado de Alta Tensión. Tener cuidado de utilizar instrumentos de medición que tengan y soporten la capacidad de tensión y corriente del ensayo de vacío.

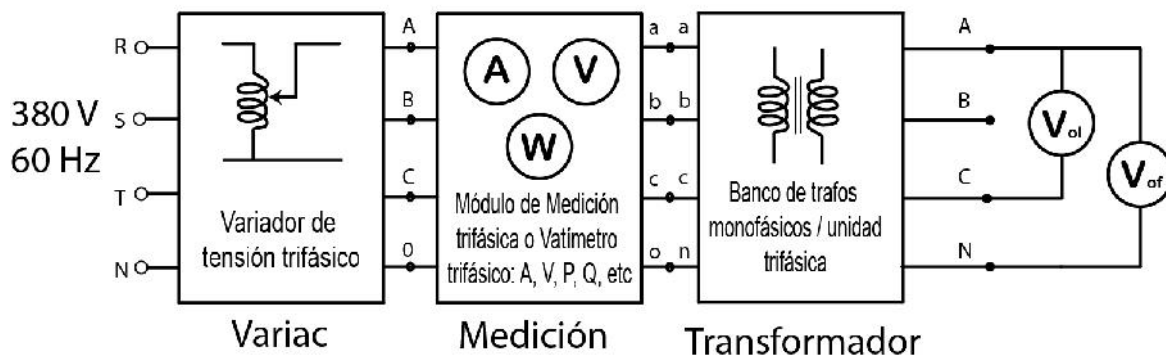


Figura 58. Montaje eléctrico para el ensayo de circuito abierto del transformador trifásico

- d) Una vez verificado el montaje del circuito de ensayo de vacío por el instructor, energizar el circuito con el regulador trifásico de tensión c.a. ajustando la tensión hasta llegar al valor nominal de tensión del lado de BT; luego reducir este valor hasta llegar a 0 V. Medir y registrar un juego de 8 lecturas de los instrumentos de mediación de c.a. en las siguiente tablas 1 y 2.

Tabla 13. Datos del ensayo de vacío del lado de alimentación

#	Amperímetro 1				Vatímetro 1				Voltímetro 1						
	A[div]	B[div]	B[div]	C <sub>i</sub>	I <sub>0</sub> [A]	A[div]	B[div]	B[div]	C <sub>w</sub>	P <sub>0</sub> [W]	A[div]	B[div]	B[div]	C <sub>v</sub>	V <sub>0</sub> [V]
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															

Tabla 14. Datos del ensayo de vacío del lado de circuito abierto.

#	Amperímetro 2					Vatímetro 2					Voltímetro 2				
	A[div]	B[div]	C[div]	C	Io[A]	A[div]	B[div]	C[div]	C <sub>w</sub>	Po[W]	A[div]	B[div]	C[div]	C <sub>v</sub>	Vo[V]
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															

- e) Ensayo de corto circuito: montar el circuito de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para la prueba de corto circuito alimentando por el lado de Alta Tensión dejando en corto circuito el lado de Baja Tensión. Tener cuidado de utilizar instrumentos de medición que tengan y soporten la capacidad de tensión y corriente del ensayo de corto circuito.

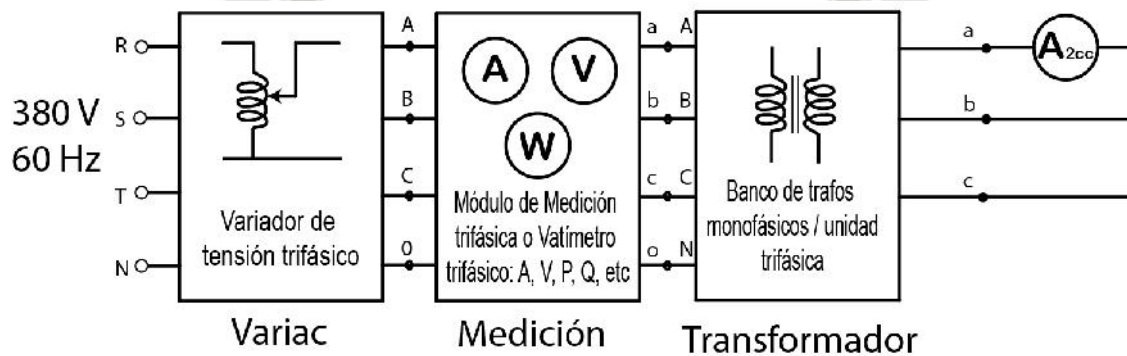


Figura 59. Esquema de montaje eléctrico para el ensayo de corto circuito del transformador trifásico.

- f) Una vez verificado el montaje del circuito por el instructor, energizar el circuito con el Variac trifásico ajustando el regulador para subir el valor de la corriente desde 0 hasta el valor nominal de corriente del lado de AT; luego reducir este valor hasta llegar a 0 A. Medir y registrar un juego de 8 lecturas de los instrumentos de mediación de la prueba de corto circuito en las siguientes tablas 3 y 4.

Tabla 15. Datos obtenidos del ensayo de corto circuito lado de alimentación AT.

#	Amperímetro 1					Vatímetro 1					Voltímetro 1				
	A[div]	B[div]	B[div]	C	Io[A]	A[div]	B[div]	B[div]	C <sub>w</sub>	Pcc[W]	A[div]	B[div]	B[div]	C <sub>v</sub>	Vcc[V]
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															

Tabla 16. Datos obtenidos del ensayo de corto circuito del lado de corto circuito BT.

#	Amperímetro 2					Vatímetro 2					Voltímetro 2				
	A[div]	B[div]	C[div]	C	Io[A]	A[div]	B[div]	C[div]	C <sub>w</sub>	Pcc[W]	A[div]	B[div]	C[div]	C <sub>v</sub>	Vcc[V]
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															

- g) Temperatura de la resistencia de los devanados después del ensayo de corto circuito: de acuerdo a los manuales del micrómetro realizar y registrar las mediciones de la resistencia de los devanados en corriente continua de cada lado AT y BT, inmediatamente después del ensayo; para determinar la temperatura de las bobinas del ensayo de corto circuito. Considere las conexiones trifásicas de cada lado según la Figura 57.

Conexión	1ra med. [m ]	2da. med. [m ]	3ra. med. [m ]	Promedio [m ]	R [m ]	$\theta_{cc}$ [°C]
AT:						
BT:						

- h) Cálculo del circuito equivalente exacto por fase de transformador trifásico y las características de desempeño. Con ayuda del programa de cálculo determinar el circuito equivalente exacto por fase del transformador trifásico y estimar el rendimiento y la regulación de tensión del transformador bajo condiciones de carga con FP=0.8 en atraso y completar la Tabla 17.

Tabla 17. Datos de desempeño en condiciones de de carga.

#	Potencia nominal	$P_{Fe}$ [W]	$P_{cc}$ [W]	$P_1$ [W]	$c = \frac{I_2}{I_{2n}}$	$V_1$ [V]	$\eta$ [%]	Reg [%]
1	100%							
2	80%							
3	60%							
4	40%							
5	20%							

## CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- En forma tabulada presentar los datos promedio y totales de los ensayos de vacío y corto circuito. Realizar en un programa de cálculo las operaciones necesarias para obtener los parámetros del circuito equivalente exacto por fase de acuerdo a normas de ensayo, cálculo del rendimiento y cálculo de la regulación de tensión.
- Presente y dibuje el circuito equivalente exacto por fase con sus respectivos parámetros del transformador corregidos a la temperatura de normalizada de 75° C, referidos al lado de alta tensión a partir de los datos de los ensayos de vacío y corto circuito.
- Presente gráficamente el desempeño del rendimiento en función de las variaciones de carga para tres tipos de carga: FP=1.0, FP=0.85 en atraso y FP=0.8 en adelante ( vs  $P_2$ ).
- En las curvas de rendimiento determine el índice de carga (o factor de carga) en cual se produce la máxima eficiencia del transformador trifásico.
- Presente gráficamente el desempeño de la regulación de tensión función de las variaciones de carga para tres tipos de carga: FP=1.0, FP=0.85 en atraso y FP=0.8 en adelante (reg vs  $P_2$ )
- Con los datos de ensayo elabore un protocolo de pruebas y determine los datos de características que se debe colocar en la placa de datos del transformador trifásico.

## INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA

- 6.1. Pesquisar sobre el conmutador o regulador de tensión bajo condiciones de carga de los subestaciones generadoras, de transmisión, esquematice el sistema eléctrico de conmutación automática.
- 6.2. Verifique a través de un programa de simulación (MATLAB/SIMULINK, DSIGLENT, PSIM, etc) el rendimiento y regulación de tensión bajo condiciones de carga del transformador trifásico.

## CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Plantee en forma personal y clara un mínimo de cinco (5) conclusiones producto de la participación y de los resultados obtenidos en la experimentación y en la elaboración del informe.

Plantee en forma personal y clara un mínimo de tres (3) observaciones para la mejora de la experiencia de las prácticas de este tema.

## Bibliografía

1] J. Fraile Mora, Máquinas Eléctricas, McGraw Hill, 3ra. Edición., 2008.

2] A. E. Fitzgerald, Máquinas Eléctricas, McGraw Hill, 6ta Edición., 2003.

Al final de todo documento o informe técnico se hace referencias numeradas de la bibliografía empleada y la normalización respectiva. Dar las referencias bibliográficas enumeradas y citadas de su informe de la práctica [2], por ejemplo:

[1] Jesús Fraile Mora, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ta. Edición, 2008.

[2] Fitzgerald A. E. Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ta. Edición, 2003.

## APENDICE

Temas resueltos y explícitos como complemento para la mejor comprensión del marco referencial del informe.

## ANEXO

Adjunte todo material relacionado con la ejecución de la práctica y de la simulación que ayude a elaborar y comprender el informe presentado.

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y**  
**FORMALES**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECANICA, MECANICA  
ELECTRICA Y MECATRONICA**



**Guías de prácticas de laboratorio del curso:**

**MAQUINAS ELECTRICAS II**

**Guía N° 3**

**Arequipa – Perú**

**2017**

## CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. INTRODUCCIÓN
3. MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS
4. PROCEDIMIENTO
5. CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS
6. INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA
7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES
8. BIBLIOGRAFÍA

APENDICE

ANEXO

### GUIA DE LABORATORIO No. 3

#### TEMA: ENSAYO DEL TRANSFORMADORES DE POTENCIA TRIFÁSICO ZIG ZAG Y HEXAFÁSICO.

#### 1. OBJETIVOS

- Realizar y determinar las conexiones trifásicas desde una unidad trifásica y de un banco de tres transformadores monofásico.
- Determinar las relaciones de valores máximo, eficaz, período, desfase de tensiones entre fase a fase y fase a neutro y las relaciones de valores máximo, eficaz, período, desfase de corrientes de línea y de fase en las conexiones trifásicas.
- Verificar experimentalmente el desfase entre la tensión primaria secundaria y el grupo de conexión más utilizados en sistemas eléctricos de potencia.
- Desarrollar habilidades para elaborar diagramas fasoriales a partir de datos de placa.

#### INTRODUCCIÓN

Habiéndose estudiado las conexiones del transformador trifásico en forma simplificada, ahora se estudiará los arreglos especiales como las conexiones zigzag y la conversión a un sistema hexafásico como se muestra.

La conexión zigzag es de aplicación especial para transformadores trifásicos de aterramiento cuya función es asegurar la tierra de la red de alta tensión frente a fallas monofásicas y alta impedancia en condiciones normales. La forma de configurar la conexión zigzag se puede observar en la Figura 60.

Muchos sistemas eléctricos trifásico prefieren operan totalmente aislados de tierra o puestos a tierra a través de una impedancia. A pesar de las ventajas que esto proporciona, hay una desventaja que es su insensibilidad a las fallas monofásicas a tierra. Las fallas monofásicas a tierra se caracterizan por un corto circuito de una fase a tierra, como está aislado el sistema no es posible adecuar una protección de este tipo. En un sistema no puesto a tierra, el conductor puede caer a tierra sin que actúe la protección.

Para aprovechar las ventajas del sistema no puesto a tierra y también aprovechar la ventaja principal de un sistema puesto a tierra; es decir, alta sensibilidad a las fallas a tierra, hace la necesidad de utilizar un transformador de puesta a tierra. Un transformador de puesta a tierra, es un transformador que opera en vacío y está configurado en zigzag con las siguientes características:

- Tiene una impedancia infinita en operación normal del sistema trifásico, por tanto es una característica del sistema no puesto a tierra.
- Tiene una impedancia pequeña bajo condiciones de fallas monofásicas; es decir, tiene la característica de sistema puesto a tierra.

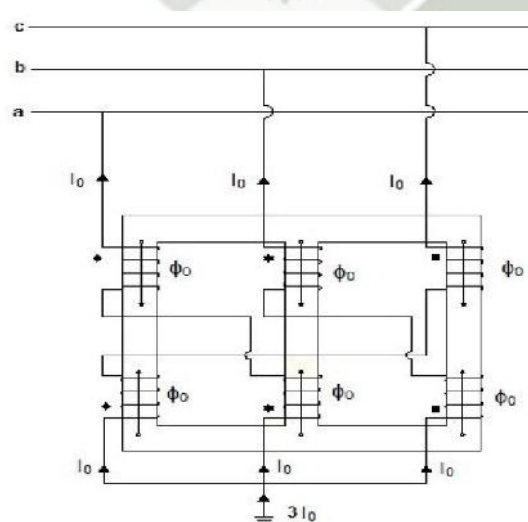


Figura 60. Un transformador trifásico de puesta a tierra

El transformador de puesta a tierra puede estar conectado en estrella-delta o Zig-Zag Figura 60. El transformador de puesta a tierra en zig zag provee una impedancia homopolar de secuencia cero en su punto de instalación; de forma tal, que cuando se ocurra una falla monofásica la corriente es limitada permitiéndose la detección por el sistema de protección.

El transformador de aterramiento en zig zag tiene una relación transformación de 1:1, conectado especialmente como autotransformador; cuyas bobinas de fases distintas comparten un mismo flujo magnético. Este es un dispositivo con sus seis devanados pero conectados de una manera conveniente en configuración Zig-Zag.

Las corrientes de secuencias positivas y negativas están bloqueadas por el transformador conectado en Zig-Zag. En una falla monofásica a tierra, las corrientes de secuencia cero están en fase a través de la conexión a tierra del transformador en Zig-Zag. Como las bobinas del transformador están conectados en Zig-Zag, las corrientes de vacío indicadas en la Figura 61 producen flujos magnéticos compensados por un flujo magnético idéntico, pero en sentido contrario. Por tanto, en cada lado del transformador los flujos se anulan, posibilitando solo el paso de las corrientes de secuencia cero. Así, este transformador aterrera el sistema aislado a través de una impedancia de secuencia cero, que es muy pequeña. El transformador de puesta a tierra en Zig-Zag presenta una reactancia de secuencia cero  $X_0$  muy pequeña, por tanto se consideran aptos para su uso en los sistemas eléctricos aislados. La conexión presentada en la figura anterior puede ser representada esquemáticamente en la Figura 61.

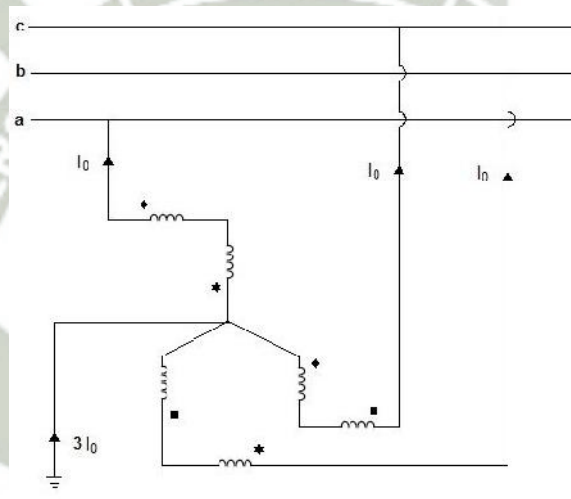


Figura 61. Esquematización de la corriente de vacío de transformador trifásico zig zag

El Transformador de aislamiento galvánico para rectificadores controlados y no controlados o también conocidos como transformador de fase modificada es un dispositivo indispensable para los rectificadores en base a diodos y/o tiristores. Este dispositivo proporciona las siguientes funciones: a) permite el desplazamiento del ángulo de desfase de las tensiones de línea a línea entre el lado primario y secundario para la cancelación de armónicos; b) proporcionar una tensión secundaria adecuada; y c) obtener aislamiento eléctrico entre el rectificador y la fuente de alimentación. Según la configuración de los devanados, el transformador puede ser clasificado en Y/z y D/z, donde el primario puede ser configurado en Y o D y el secundario normalmente en configuración zig-zag (z). Ambas configuraciones pueden ser utilizado en rectificadores multipulsos. Ejemplo de conexionado Figura 62 y diagrama vectorial Figura 63 del transformador Y/z-1 ó Y/z, +30°.

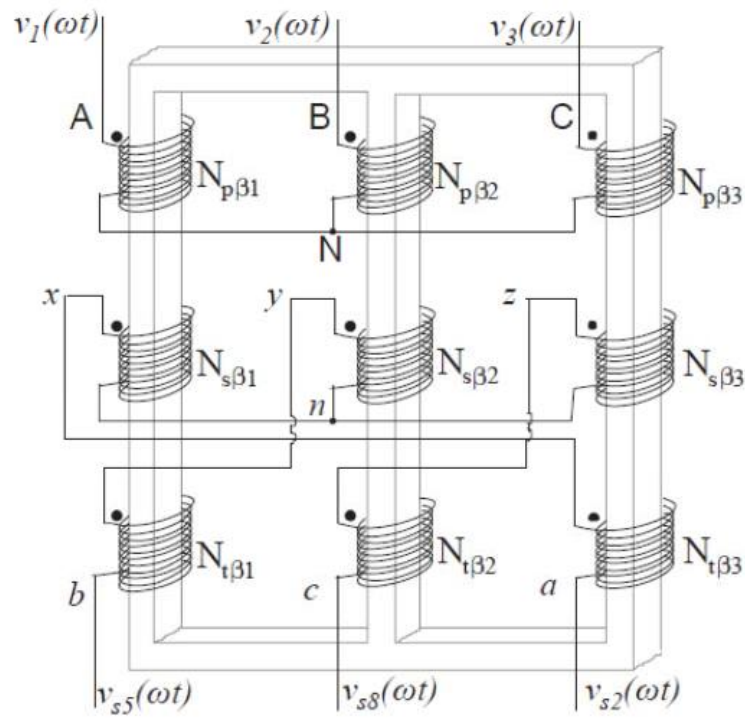


Figura 62. Conexión trifásica Y/z-1

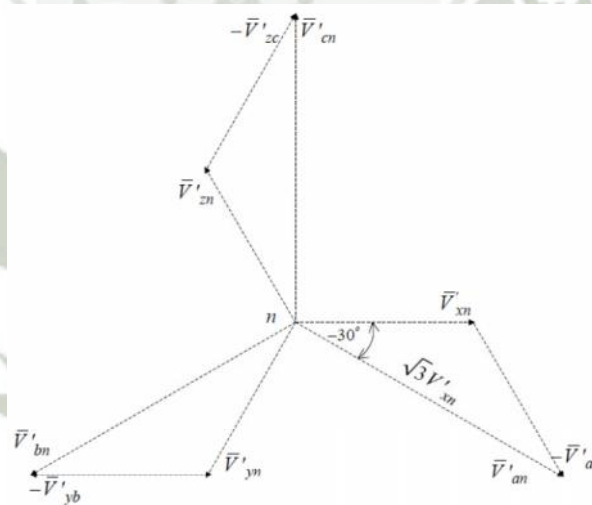


Figura 63. Diagrama vectorial de la conexión zig-zag.

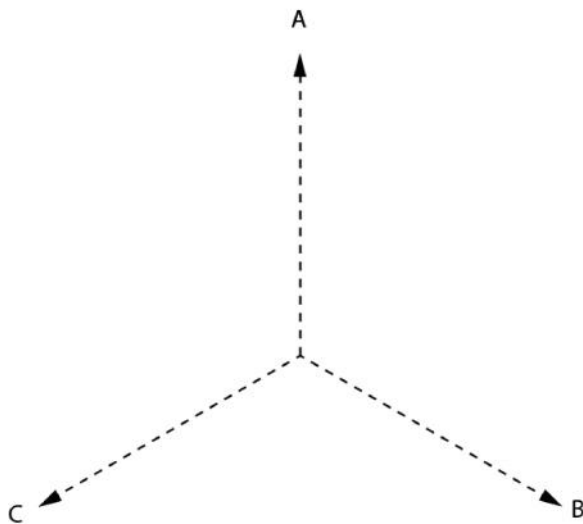
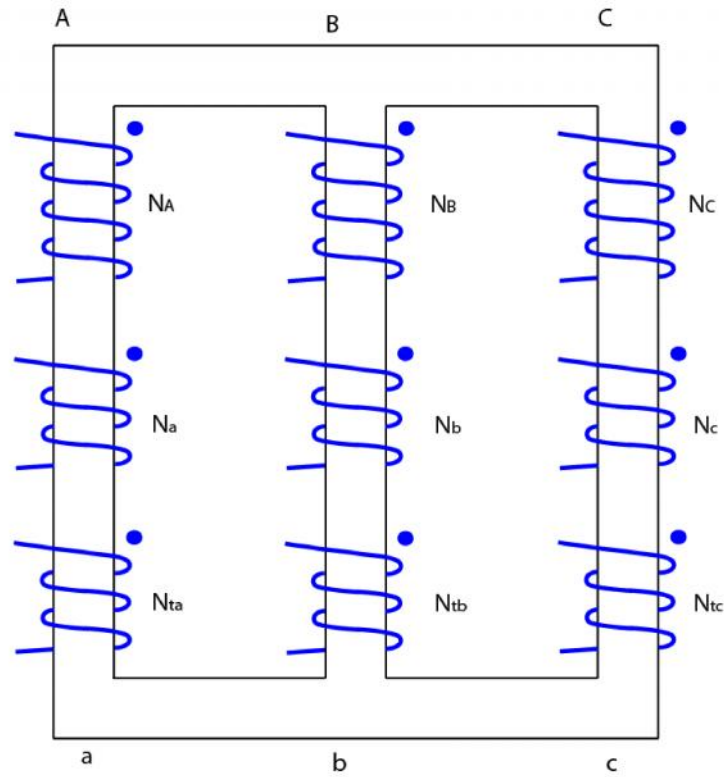
\*complementar el fundamento teórico de transformadores trifásico con las referencias básicas.  
++Traer un resumen de la información revisada del procedimiento de pruebas en vacío y corto circuito de transformadores trifásicos y sus respectivas normas nacionales e internacionales para determinar los datos de placa.

## 2.1. PRE-LABORATORIO

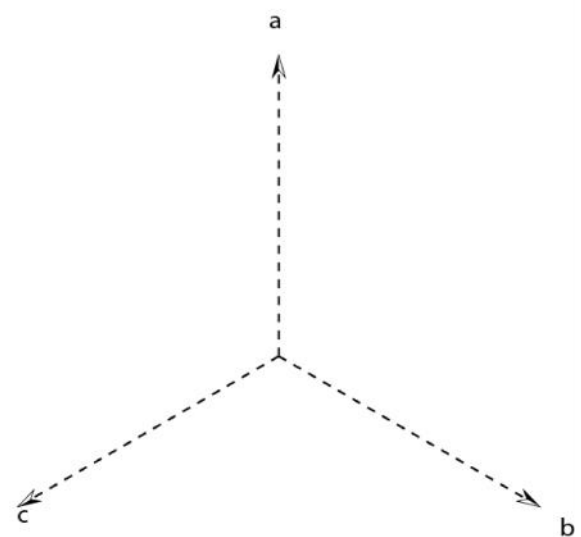
Sobre el formato de la Figura 63 realizar los respectivos conexionados y trazar los diagramas vectoriales de tensiones que determina el grupo de conexión correspondiente. Presentar los diagramas y la forma de conexionado de las siguientes configuraciones en hojas separadas:

- a) D/z-0;      b) Y/z-1;      c) Y/z-11;      d) D/z-6;      e) Y/\*- Hexafásico.

CONEXION Y GRUPO: .....



Ejes de referencia primario



Ejes de referencia secundario

**Figura 64. Formato para la realización de conexionado y diagrama vectorial del transformador trifásico. MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS**

Los siguientes equipos, instrumentos y materiales serán necesarios para la realización de la práctica:

Ítem	Descripción	Cantidad	Código
1	Regulador de tensión trifásica (variac) 380 V, 20 A, 10 kW.	1	
2	Transformador de potencia monofásico: 220 V, 110 V, 60Hz. ó 500 VA ó 1000 VA (optional).	3	
3	Vatímetro trifásico digital o módulo de medición trifásica de potencia, intensidad y tensión de c.a, 20 A. 600 V.	1	
4	Amperímetro de c.a. 25 A, 1 A	2	
5	Voltímetro de c.a. de 150 V, 300 V, 750V	2	
6	Microohmímetro MPK5 (o puente Wheastone)	1	
7	Reóstato o resistencia variable de 11 - 8 A; 42 -5 A; 110 -2.5 A; Según cálculo de carga.	Según la carga	
8	Multitester para verificación de circuitos	1	
9	Kit de cables flexibles blindados unipolares, tripolares y tetrapolares de 2.5 mm <sup>2</sup> (ó 14xAWG) de 600 V.	3	
10	Osciloscopio digital de dos canales con su respectivo transformador de aislamiento y 2 sondas de tensión.	1	
11	Unidad de transformador trifásico 1500 VA, 380/220 V, 60Hz.	3	
12	Lámparas incandescentes de 220 V, 50 W.	3	

**PROCEDIMIENTO**

a) Usando el formato de la **Figura 64**, realizar las conexiones físicas del transformador trifásico en zigzag indicado por el instructor; para luego verificar experimentalmente dichas conexión. Discutir con sus compañeros y trazar los diagramas vectoriales.

b) Completar la Tabla 10 de valores nominales del transformador trifásico con respectivo grupo de conexión o desfase de tensiones entre primario y secundario. Posteriormente armar el esquema eléctrico de la Figura 56 y verificar el ángulo de desfase entre las tensiones del primario y secundario y su relación de transformación experimentalmente con ayuda del osciloscopio. Con los datos experimentales obtenidos del osciloscopio completar la Tabla 12.

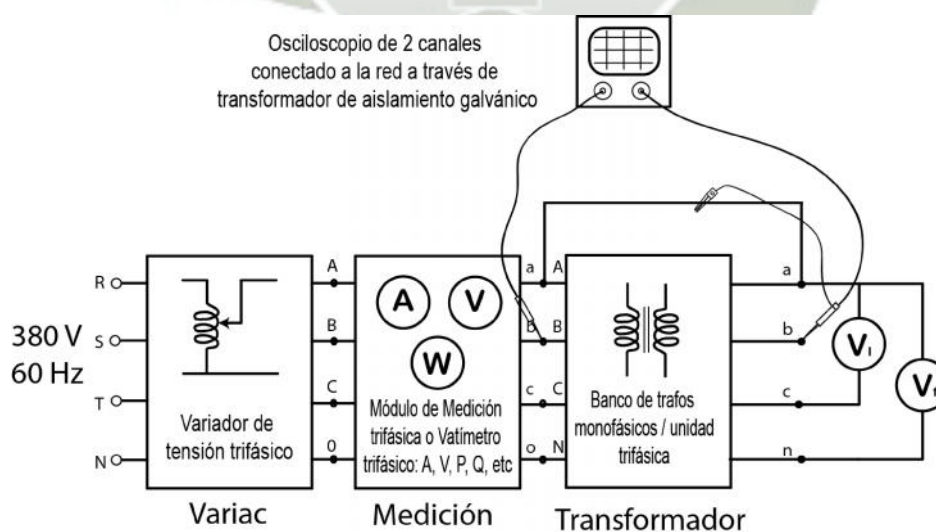


Figura 65. Esquema de montaje eléctrico para la verificación experimental del ángulo de desfase del transformador trifásico zig zag.

Tabla 18. Cuadro de potencia y tensiones de línea y de fase nominales del transformador trifásico zigzag.

#	conexión	$S_n$ [VA]	$V_{1n}$ [V]	$V_{2n}$ [V]	$V_{1fn}$ [V]	$V_{2fn}$ [V] <sub>3φ</sub>	$a = \frac{V_{1n}}{V}$	$a = \frac{N_1}{N_2}$
1								
2								
3								
4								
5								

c) Con ayuda del osciloscopio de 2 canales y conectado de acuerdo a la Figura 56, verificar experimentalmente el ángulo de desfase entre tensiones del primario y secundario en grados eléctricos. Complete la tabla con datos experimentales obtenidos del osciloscopio.

Tabla 19. Datos experimentales de tensiones líneas, frecuencia, periodo y ángulo de desfase.

#	conexión	$V_{1max}$ [V]	$V_{1ms}$ [V]	$V_{2max}$ [V]	$V_{2ms}$ [V]	T [ms]	f, [Hz]	$\alpha_v$ [ms]	$\alpha_v$ [°]
1									
2									
3									
4									
5									

c) Con ayuda del osciloscopio de 2 canales y conectado de acuerdo a la Figura 56, verificar experimentalmente el ángulo de desfase entre tensiones del primario y secundario en grados eléctricos. Complete la tabla con datos experimentales obtenidos del osciloscopio.

Tabla 20. Datos experimentales de tensiones líneas, frecuencia, periodo y ángulo de desfase.

#	conexión	$V_{1max}$ [V]	$V_{1ms}$ [V]	$V_{2max}$ [V]	$V_{2ms}$ [V]	T [ms]	f, [Hz]	$\alpha_v$ [ms]	$\alpha_v$ [°]
1									
2									
3									
4									
5									

### CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 5.1. Dibujar y trazar los diagramas vectoriales de tensiones para las conexiones realizadas experimentalmente indicando el desfase entre las tensiones de línea en grados eléctricos.
- 5.2. Dibujar y trazar los diagramas vectoriales de corrientes de línea y de fase para las conexiones realizadas en punto 5.1.
- 5.3. Determine las relaciones de espiras de transformación y la relación de tensiones nominales del transformador trifásica en zigzag para cada configuración.
- 5.4. Cuáles son las aplicaciones del transformador en zigzag, de ejemplos y nombre las instalaciones eléctricas donde operan este tipo de transformadores.

- 5.5. Haga una lista de ventajas y desventajas del sistemas trifásico aislados del tierra.  
5.6. Porque en el transformador trifásico de puesta a tierra funciona en vacío.

## INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA

- 6.1. Verifique el funcionamiento del transformador de aterramiento zigzag a través de un programa de simulación (MATLAB/SIMULINK, PSPICE, PSIM) y demuestre el ángulo de desfase.  
6.2. Investigue sobre el transformador trifásico de aislamiento para rectificador de CA/CC de 18 pulsos. Presente los resultados de simulación de la tensión rectificada con las pulsaciones respectivas.

## CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Plantee en forma personal y clara un mínimo de cinco (5) conclusiones producto de la participación y de los resultados obtenidos en la experimentación y en la elaboración del informe.

Plantee en forma personal y clara un mínimo de tres (3) observaciones para la mejora de la experiencia de las prácticas de este tema.

## Bibliografía

- 1] J. Fraile Mora, Máquinas Eléctricas, McGraw Hill, 3ra. Edición., 2008.  
2] A. E. Fitzgerald, Máquinas Ekéctricas, McGraw Hill, 6ta Edición., 2003.

Al final de todo documento o informe técnico se hace referencias numeradas de la bibliografía empleada y la normalización respectiva. Dar las referencias bibliográficas enumeradas y citadas de su informe de la práctica [2], por ejemplo:

- [1] Jesús Fraile Mora, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ta. Edición, 2008.  
[2] Fitzgerald A. E. Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ta. Edición, 2003.

## APENDICE

Temas resueltos y explícitos como complemento para la mejor comprensión del marco referencial del informe.

## ANEXO

Adjunte todo material relacionado con la ejecución de la práctica y de la simulación que ayude a elaborar y comprender el informe presentado.

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y**  
**FORMALES**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECANICA, MECANICA  
ELECTRICA Y MECATRONICA**



**Guías de prácticas de laboratorio del curso:**

**MAQUINAS ELECTRICAS II**

**Guía N° 4**

**Arequipa – Perú**

**2017**

## CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. INTRODUCCIÓN
3. MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS
4. PROCEDIMIENTO
5. CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS
6. INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA
7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES
8. BIBLIOGRAFÍA

APENDICE

ANEXO

## GUIA DE LABORATORIO No. 4

### TEMA: ENSAYO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA TRIFÁSICO ESTRELLA ZIG ZAG CON DESFASE DE $+40^\circ$ y $-40^\circ$

#### 1. OBJETIVOS

- Realizar y determinar las conexiones trifásicas desde una unidad trifásica en zigzag.
- Determinar las relaciones de valores máximo, eficaz, período, ángulo de desfase de tensiones entre fase a fase y fase a neutro, las relaciones de espiras entre secundario/primario y terciario/primario conexiones trifásicas zigzag.
- Verificar experimentalmente el ángulo de desfase entre la tensión primaria secundaria en sistemas diferente de  $30^\circ$  grados eléctricos en conexiones zigzag.
- Desarrollar habilidades para elaborar diagramas fasoriales, interpretar y desarrollar programas de simulación a partir de datos de placa.

#### INTRODUCCIÓN

Habiéndose estudiado las conexiones del transformador trifásico en forma simplificada, ahora se estudiará los arreglos especiales como las conexiones zigzag.

#### El transformador y en conexión estrella/zigzag $+40^\circ$ .

La obtención del transformador Y/Z  $+40^\circ$  es semejante al transformador estrella zigzag, con la diferencia de que existe una desfase de  $40^\circ$  en adelante obtenida a una adecuada relación de espiras y las conexiones de las bobinas en serie (polaridad encontradas) del secundario de una columna con el terciario de la columna siguiente en secuencia directa; permitiendo obtener la configuración zigzag; es decir, la conexión en serie de los devanados secundario de la columna "1" con el terciario de la columna "2". Como se representa en la Figura 1 y la Figura 2.

Considerando conocidas las tensiones de fase del primario, logramos las expresiones de las tensiones inducidas en los devanados secundarios serán las mismas y las relaciones de transformación de los devanados secundarios son:

$$\begin{aligned}\vec{V}_{xn} &= -\vec{V}_{nx} = a_{sx1} \vec{V}_1 = a_{sx1} \cdot V_p \quad 0^\circ \\ \vec{V}_{yn} &= -\vec{V}_{ny} = a_{sx2} \vec{V}_2 = a_{sx2} \cdot V_p \quad -120^\circ \quad (1.1) \\ \vec{V}_{zn} &= -\vec{V}_{nz} = a_{sx3} \vec{V}_3 = a_{sx3} \cdot V_p \quad +120^\circ\end{aligned}$$

Las tensiones de los devanados de terciarios podemos representar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\vec{V}_{zc} &= -\vec{V}_{cz} = a_{tx1} \vec{V}_1 = a_{tx1} \cdot V_p \quad 0^\circ \\ \vec{V}_{xa} &= -\vec{V}_{ax} = a_{tx2} \vec{V}_2 = a_{tx2} \cdot V_p \quad -120^\circ \\ \vec{V}_{yb} &= -\vec{V}_{by} = a_{tx3} \vec{V}_3 = a_{tx3} \cdot V_p \quad +120^\circ\end{aligned} \quad (1.2)$$

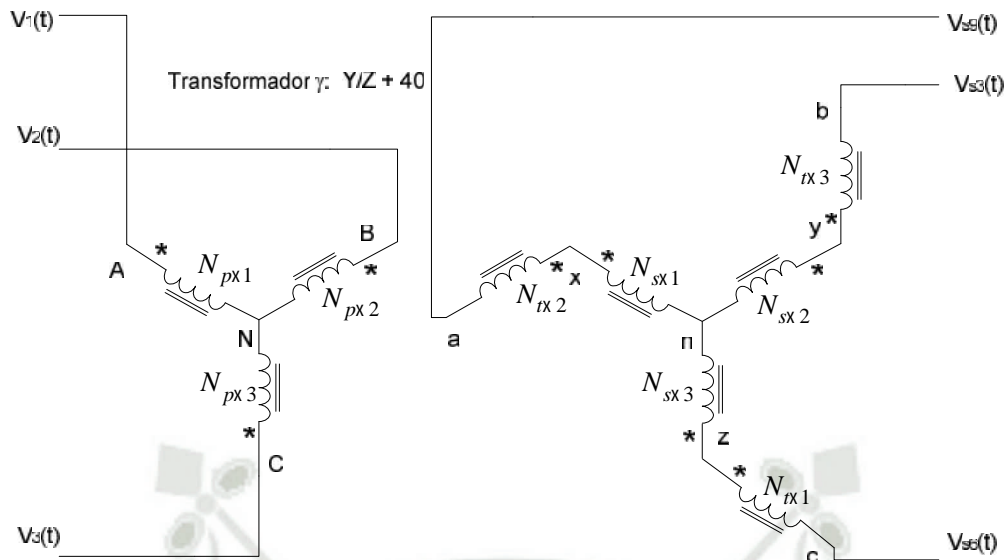


Figura 66. Configuración de la bobinas del transformador y estrella / zigzag + 40°

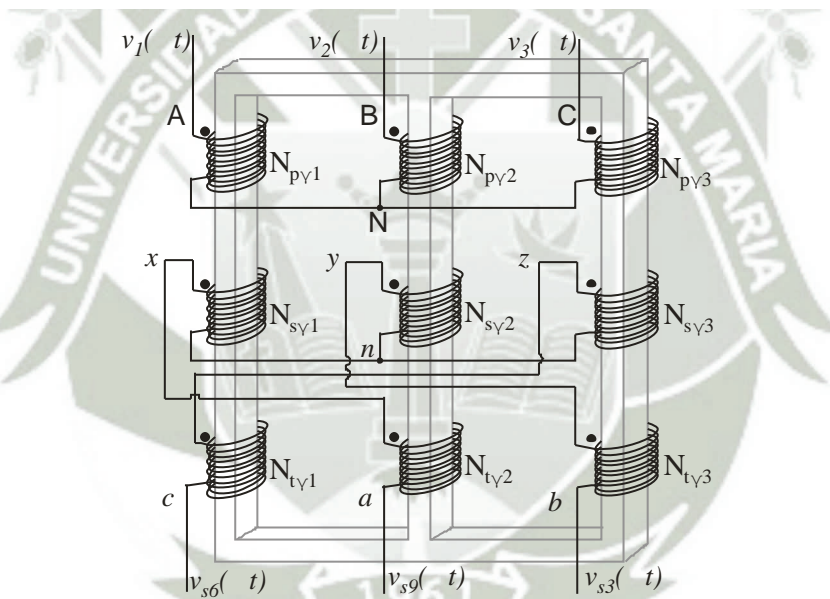


Figura 67. Las conexiones físicas de las bobinas del transformador y: Y/Z +40°

Las relaciones de transformación de los devanados secundarios e terciarios están dadas en (1.22) y (1.23)..

$$a_{sx1} = \frac{N_{sx1}}{N_{px1}} = \frac{N_{sx2}}{N_{px2}} = \frac{N_{sx3}}{N_{px3}} \quad (1.3)$$

$$a_{tx1} = \frac{N_{tx1}}{N_{px1}} = \frac{N_{tx2}}{N_{px2}} = \frac{N_{tx3}}{N_{px3}} \quad (1.4)$$

Considerando el diagrama fasorial de la Figura 3 del triángulo de tensiones secundarias de fase “a”, podemos establecer la ley los senos de (1.5) para determinar el desfase de  $+40^\circ$  y la relación de transformación de los devanados secundarios y terciarios para el módulo de tensión deseada de fase a neutro en (1.6) y (1.7).

$$\frac{|V_{an}|}{\text{sen}120^\circ} = \frac{|V_{xn}|}{\text{sen}20^\circ} = \frac{|V_{ax}|}{\text{sen}40^\circ} \quad (1.5)$$

$$a_{sx1} = \frac{N_{sx1}}{N_{px1}} = \frac{|V_{xn}|}{|V_{an}|} = \frac{\text{sen}20^\circ}{\text{sen}120^\circ} = 0,3949 \quad (1.6)$$

$$a_{rx1} = \frac{N_{rx1}}{N_{px1}} = \frac{|V_{ax}|}{|V_{an}|} = \frac{\text{sen}40^\circ}{\text{sen}120^\circ} = 0,7422 \quad (1.7)$$

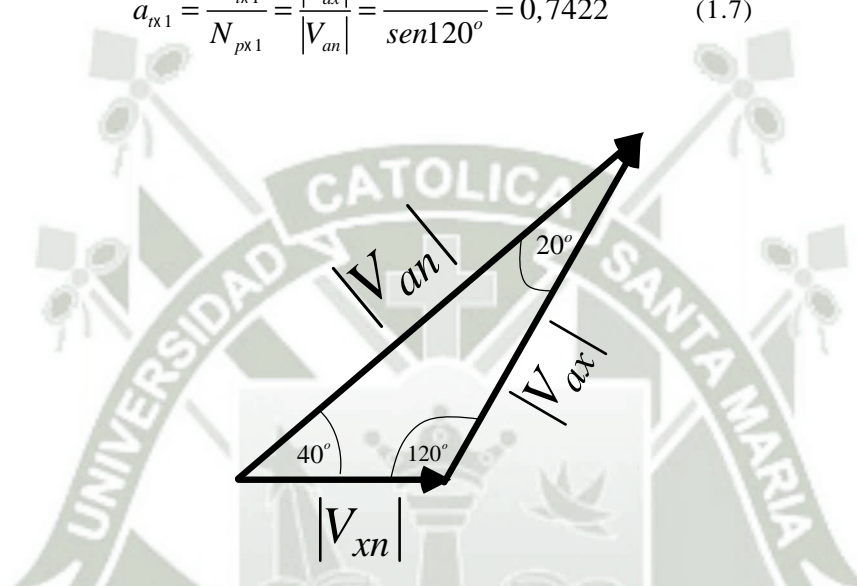


Figura 68. Triángulo del diagrama vectorial de las tensiones de fase a neutro de las conexiones zigzag.

Establecidas las relaciones de transformación y del desfase positivo de  $40^\circ$  con respecto a la tensión del primario de la fase “A”, luego podemos obtener el otro nuevo sistema trifásico de tensiones con desfases de  $+40^\circ$ ,  $-80^\circ$  e  $+160^\circ$  como se representa en la Figura 15, lo que corresponde a las fases Vs9, Vs3 y Vs6 respectivamente del sistema de nonafásico dado en (1.27).

$$\begin{aligned} \bar{V}_{an} &= \bar{V}_{xn} - \bar{V}_{ax} = a_{sS1} \cdot V_P \ 0^\circ - a_{tS2} \cdot V_P \ -120^\circ \\ \bar{V}_{bn} &= \bar{V}_{yn} - \bar{V}_{by} = a_{sS2} \cdot V_P \ -120^\circ - a_{tS3} \cdot V_P \ 120^\circ \\ \bar{V}_{cn} &= \bar{V}_{zn} - \bar{V}_{cz} = a_{sS3} \cdot V_P \ 120^\circ - a_{tS1} \cdot V_P \ 0^\circ \end{aligned} \quad (1.8)$$

Considerando las relaciones de transformación en las operaciones de fasores, las tensiones de fase resultante en el secundario del zigzag  $+40^\circ$  se aprecia en (1.28).

$$\begin{aligned} \bar{V}_{an} &= \bar{V}_{xn} - \bar{V}_{ax} = 0,3949 \cdot V_P \ 0^\circ - 0,7422 \cdot V_P \ -120^\circ \\ \bar{V}_{bn} &= \bar{V}_{yn} - \bar{V}_{by} = 0,3949 \cdot V_P \ -120^\circ - 0,7422 \cdot V_P \ +120^\circ \\ \bar{V}_{cn} &= \bar{V}_{zn} - \bar{V}_{cz} = 0,3949 \cdot V_P \ 120^\circ - 0,7422 \cdot V_P \ 0^\circ \end{aligned} \quad (1.9)$$

Así. las resultantes de las tensiones del sistema de 9 fases s3, s6 y s9 se da en (1.29).

$$\begin{aligned}\bar{V}_{an} = \bar{V}_{s9} = V_P & 40^\circ \\ \bar{V}_{bn} = \bar{V}_{s3} = V_P & -80^\circ \\ \bar{V}_{cn} = \bar{V}_{s6} = V_P & 160^\circ\end{aligned}\quad (1.10)$$

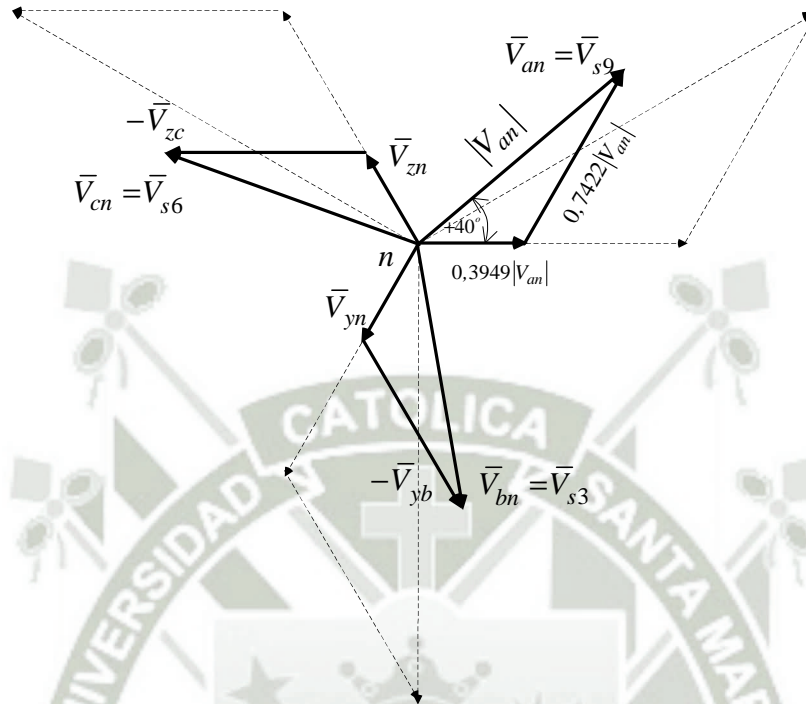


Figura 69. Diagramas vectoriales de las tensiones secundarias do transformador y Y/Z +40°

*\*complementar el fundamento teórico de transformadores trifásico con las referencias básicas.  
++Traer un resumen de la información revisada del procedimiento de pruebas en vacío y corto circuito de transformadores trifásicos y sus respectivas normas nacionales e internacionales para determinar los datos de placa.*

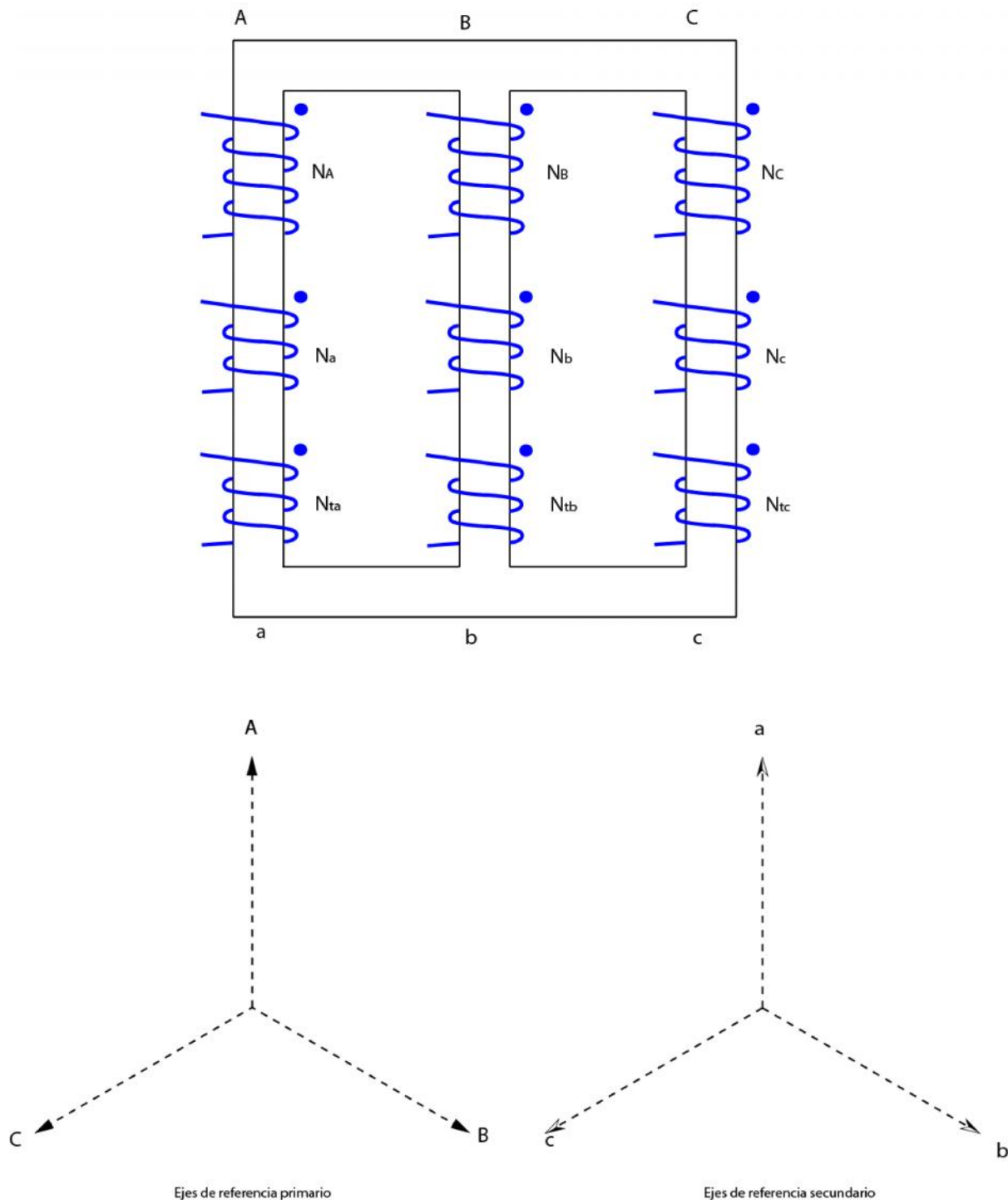
## 2.1. PRE-LABORATORIO

Sobre el formato de la figura 5 Figura 63 realizar los respectivos conexiones y trazar los diagramas vectoriales de tensiones que determina el grupo de conexión correspondiente. Presentar los diagramas y la forma de conexionado de las siguientes configuraciones en hojas separadas:

- a) D/z 0°;      b) Y/z 30;      c) Y/z 330°;      d) Y/z +40;      e) Y/z -40°;

Finalmente, verificar cada una de las configuraciones y grupos de conexión del transformador mediante programa de simulación (SIMULINK, PSIM, Scilab, etc) los respectivos ángulos de desfase de las tensiones de baja tensión (secundario) respecto alta tensión (primario). Presentar el conexionado y los resultados de simulación de las formas de ondas de las tensiones primarias y secundarias en un solo gráfico indicando el ángulo de desfase en ms, grados, y radianes.

CONEXION Y GRUPO: .....



**Figura 70. Formato para la realización de conexionado y diagrama vectorial del transformador trifásico. MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS**

Los siguientes equipos, instrumentos y materiales serán necesarios para la realización de la práctica:

Ítem	Descripción	Cantidad	Código
1	Regulador de tensión trifásica (variac) 380 V, 20 A, 10 kW.	1	
2	Vatímetro trifásico digital o módulo de medición trifásica de potencia, intensidad y tensión de c.a. 20 A. 600 V.	1	
3	Amperímetro de c.a. 25 A, 1 A	2	
4	Voltímetro de c.a. de 150 V, 300 V, 750V	2	
5	Microohmímetro MPK5 (o puente Wheastone)	1	
6	Reóstato o resistencia variable de 11 - 8 A; 42 -5 A; 110 -2.5 A; Según cálculo de carga.	Según la carga	
7	Multitester para verificación de circuitos	1	
8	Kit de cables flexibles blindados unipolares, tripolares y tetrapolares de 2.5 mm <sup>2</sup> (ó 14xAWG) de 600 V.	3	
9	Osciloscopio digital de dos canales con su respectivo transformador de aislamiento y 2 sondas de tensión.	1	
10	Unidad de transformador trifásico 1500 VA, 380/110/110 V, 60Hz.	1	
11	Carga en base reóstatos o lámparas incandescentes de 220 V, 1500 W.	3	

## PROCEDIMIENTO

a) Usando el formato de la **Figura 64**, realizar las conexiones físicas del transformador trifásico en zigzag indicado por el instructor; para luego verificar experimentalmente dicha conexión. Discutir con sus compañeros y trazar los diagramas vectoriales.

b) Completar la tabla 1 de valores nominales del transformador trifásico con respectivo grupo de conexión o ángulo de desfase de tensiones entre primario y secundario. Posteriormente armar el esquema eléctrico de la Figura 56 y verificar el ángulo de desfase entre las tensiones del primario y secundario y su relación de transformación experimentalmente con ayuda del osciloscopio. Con los datos experimentales obtenidos del osciloscopio completar la Tabla 12.

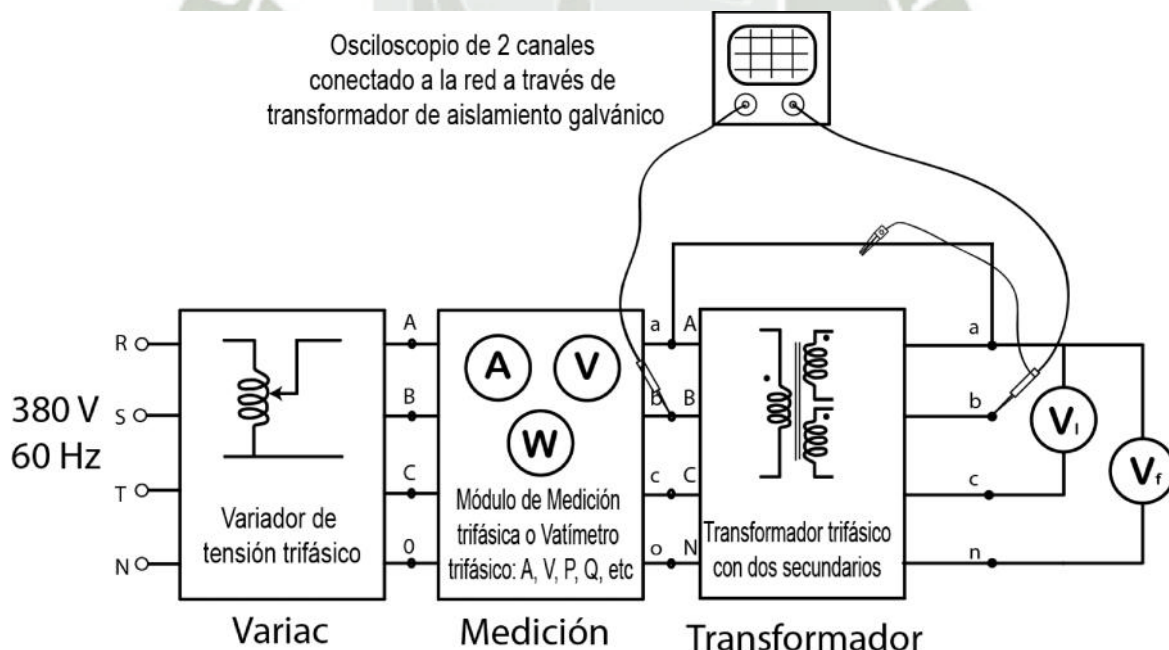


Figura 71. Esquema de montaje eléctrico para la verificación experimental del ángulo de desfase del transformador trifásico zigzag.

Tabla 21. Cuadro de potencia y tensiones de línea y de fase nominales del transformador trifásico zig

#	conexión	$S_n$ [VA]	$V_{1n}$ [V]	$V_{1fn}$ [V]	$V_{2n}$ [V]	$V_{2fn}$ [V]	$a_{3\Phi} = \frac{V_{2n}}{V_{1n}}$	$a_{sp} = \frac{N_s}{N_p}$	$a_{fp} = \frac{N_t}{N_p}$
1									
2									
3									
4									
5									

c) Con ayuda del osciloscopio de 2 canales y conectado de acuerdo a la Figura 56, verificar experimentalmente el ángulo de desfase entre tensiones del primario y secundario en grados eléctricos. Complete la tabla con datos experimentales obtenidos del osciloscopio.

Tabla 22. Datos experimentales de tensiones líneas, frecuencia, periodo y ángulo de desfase.

#	conexión	$V_{1max}$ [V]	$V_{1ms}$ [V]	$V_{2max}$ [V]	$V_{2ms}$ [V]	T [ms]	f, [Hz]	$\alpha_v$ [ms]	$\alpha_v$ [rad]
1									
2									
3									
4									
5									

## CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 5.1. Dibujar y trazar los diagramas vectoriales de tensiones a escala adecuada para las conexiones indicadas experimentalmente, indicando el desfase entre las tensiones de línea del primario y secundario en grados eléctricos.
- 5.2. Describir las conexiones hechas en cada grupo de bobinas del primario, secundario y terciario. Y además las secuencia de fases de los terminales.
- 5.3. Dibujar y trazar los diagramas vectoriales de corrientes de línea y de fase para las conexiones realizadas en punto 5.1.
- 5.4. Determine las relaciones de espiras de transformación y la relación de tensiones nominales del transformador trifásico en zigzag para cada configuración.
- 5.5. Cuáles son las aplicaciones del transformador en zigzag con desfase de ángulo específico, de algunos ejemplos prácticos de utilización y de las especificaciones del transformador donde operan este tipo de transformadores.
- 5.6. Porque en el transformador trifásico de puesta a tierra funciona en vacío?

## INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA

- 6.1. Verifique el funcionamiento, ángulo de desfase y la aplicación en un rectificador mediante el transformador en zigzag con ángulo de desfase específico a través de un programa de simulación (MATLAB/SIMULINK, PSPICE, PSIM) y demuestre el ángulo de desfase.
- 6.2. Investigue sobre el transformador trifásico de aislamiento para rectificador de CA/CC de 18 pulsos. Presente los resultados de simulación de la tensión rectificadora con las pulsaciones respectivas y las especificaciones en cuanto a valores nominales..

## CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Plantee en forma personal y clara un mínimo de cinco (5) conclusiones producto de la participación y de los resultados obtenidos en la experimentación y en la elaboración del informe.

Plantee en forma personal y clara un mínimo de tres (3) observaciones para la mejora de la experiencia de las prácticas de este tema.

## Bibliografía

- 1] A. E. Fitzgerald, Máquinas Eléctricas, McGraw Hill, 6ta Edición., 2003.
- 2] J. Fraile Mora, Máquinas Eléctricas, McGraw Hill, 3ra. Edición., 2008.

Al final de todo documento o informe técnico se hace referencias numeradas de la bibliografía empleada y la normalización respectiva. Dar las referencias bibliográficas enumeradas y citadas de su informe de la práctica [1], por ejemplo:

- [1] Jesús Fraile Mora, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ta. Edición, 2008.  
[2] Fitzgerald A. E. Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ta. Edición, 2003.

## APENDICE

Temas resueltos y explícitos como complemento para la mejor comprensión del marco referencial del informe.

## ANEXO

Adjunte todo material relacionado con la ejecución de la práctica y de la simulación que ayude a elaborar y comprender el informe presentado.

# **UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**

## **FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECANICA, MECANICA  
ELECTRICA Y MECATRONICA**



**Guías de prácticas de laboratorio del curso:**

**MAQUINAS ELECTRICAS II**

**Guía N° 5**

**Arequipa – Perú**

**2017**

## CONTENIDO

1. OBJETIVOS
2. INTRODUCCIÓN
3. MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS
4. PROCEDIMIENTO
5. CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS
6. INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA
7. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES
8. BIBLIOGRAFÍA

APENDICE

ANEXO

## GUIA DE LABORATORIO No. 5

### TEMA: ENSAYO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA TRIÁNGULO POLÍGONO CON DESFASE DE $+40^\circ$ y $-40^\circ$

#### 1. OBJETIVOS

- Realizar y determinar las nuevas conexiones trifásicas desde una unidad trifásica en POLIGONO.
- Determinar las relaciones de valores máximo, eficaz, período, ángulo de desfase de tensiones entre fase a fase, las relaciones de espiras entre secundario/primario y terciario/primario; y, la conexión trifásica especial Polígono.
- Determinar y verificar experimentalmente el ángulo de desfase entre la tensión primaria secundaria en sistemas diferente de  $30^\circ$  grados eléctricos en conexión especial polígono.
- Desarrollar habilidades para elaborar diagramas fasoriales, interpretar y desarrollar programas de simulación a partir de datos de placa.

#### INTRODUCCIÓN

Habiéndose estudiado la conexión del transformador trifásico en arreglo especial como las conexiones estrella, triángulo y zigzag. Existen otros tipos de conexiones especiales que tiene la finalidad de aplicar en rectificación de corriente alterna con alto factor de potencia.

#### El transformador en conexión especial triángulo/polígono $+40^\circ$ .

La obtención del transformador  $D/p +40^\circ$  se obtiene y se entiende a partir de la conexión del transformador estrella zigzag  $Y/z+40$ , con la diferencia de que la configuración en serie de las bobinas secundario y terciaria formando un zigzag por fase, se conecta las fases zigzag en serie formando una configuración polígono de seis lados.

El desfase de  $+40^\circ$  o  $-40^\circ$  se consigue con una adecuada relación de espiras del secundario y terciario tal como se pueden representar en la Figura 1 y la Figura 2.

Considerando conocidas las tensiones de fase del primario, logramos que las expresiones de las tensiones inducidas en el primer secundario son las mismas y están relacionadas por la expresión (1.1).

$$\begin{aligned}\bar{V}_{an1} &= -\bar{V}_{na1} = a_{sA} \bar{V}_A = a_{sA} \cdot V_P \quad 0^\circ \\ \bar{V}_{bn1} &= -\bar{V}_{nb1} = a_{sB} \bar{V}_B = a_{sB} \cdot V_P \quad -120^\circ \quad (1.1) \\ \bar{V}_{cn1} &= -\bar{V}_{nc1} = a_{sC} \bar{V}_C = a_{sC} \cdot V_P \quad +120^\circ\end{aligned}$$

Y las expresiones de las tensiones en los devanados del segundo secundario (o devanados de terciarios) podemos representar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\bar{V}_{an2} &= -\bar{V}_{na2} = a_{tA} \bar{V}_A = a_{tA} \cdot V_P \quad 0^\circ \\ \bar{V}_{bn2} &= -\bar{V}_{nb2} = a_{tB} \bar{V}_B = a_{tB} \cdot V_P \quad -120^\circ \\ \bar{V}_{cn2} &= -\bar{V}_{nc2} = a_{tC} \bar{V}_C = a_{tC} \cdot V_P \quad +120^\circ\end{aligned} \quad (1.2)$$

Las relaciones de transformación de los devanados primer y segundo secundarios (o terciarios) están dadas en (1.3) y 1.4).

$$a_{sA} = \frac{N_{a1}}{N_{pA}} = \frac{N_{b2}}{N_{pB}} = \frac{N_{c3}}{N_{pC}} \quad (1.3)$$

$$a_{tA} = \frac{N_{a2}}{N_{pA}} = \frac{N_{b2}}{N_{pB}} = \frac{N_{c2}}{N_{pC}} \quad (1.4)$$

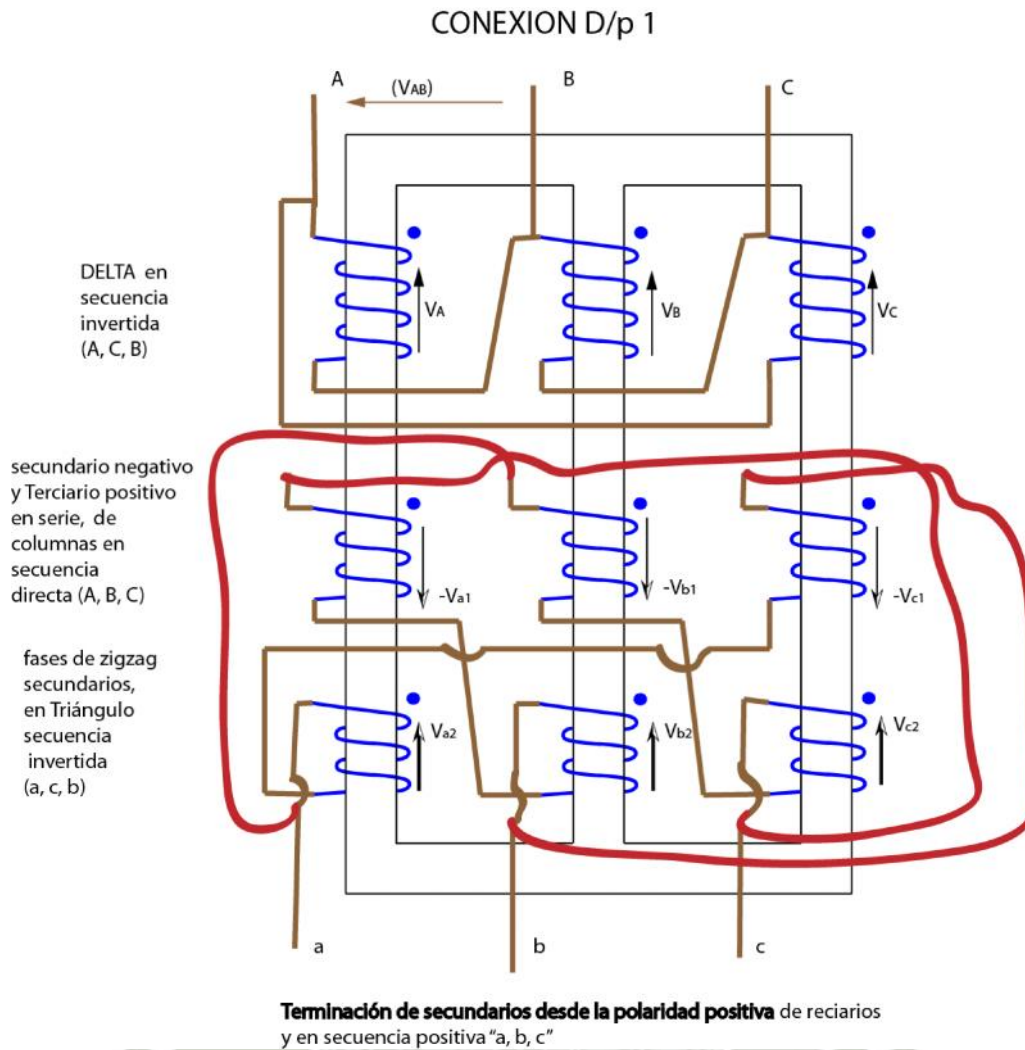


Figura 72. Configuración física de las bobinas del transformador triangulo/polígono 1.

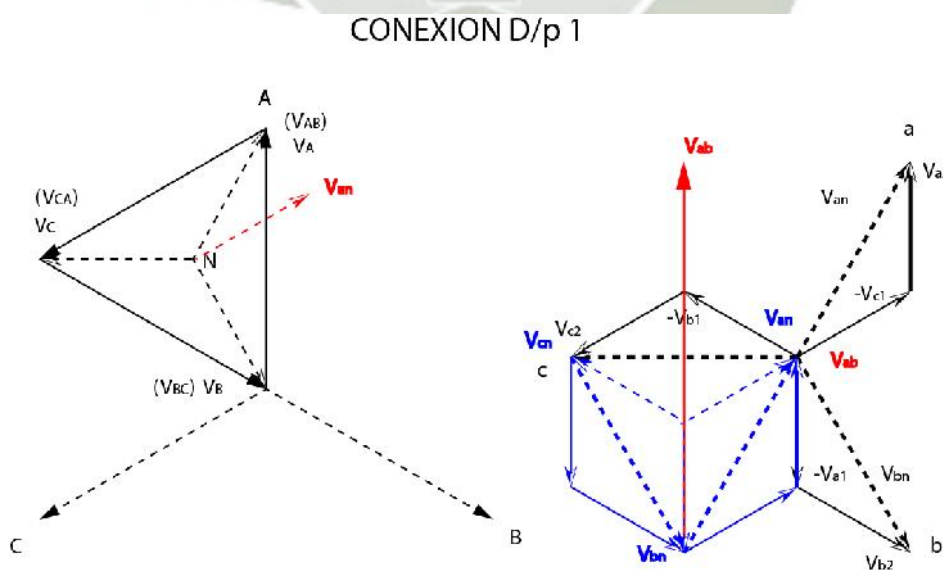


Figura 73. Diagrama fasorial de la conexión física de las bobinas del transformador D/p 1.

Considerando el diagrama fasorial de la Figura 3 del triángulo de las tensiones de los dos secundarios en zigzag de la fase “a”, se establece la ley los senos de (1.5) para determinar el desfase de  $+20^\circ$  (menor en  $10^\circ$  en relación a los  $30^\circ$  normalmente) y la relación de transformación de los devanados secundarios y terciarios para el módulo de tensión deseada de fase a neutro en (1.6) y (1.7).

$$\frac{|V_{an}|}{\text{sen}120^\circ} = \frac{|V_{a2}|}{\text{sen}20^\circ} = \frac{|-V_{c1}|}{\text{sen}40^\circ} \quad (1.5)$$

$$a_{sA} = \frac{N_{c1}}{N_{pA}} = \frac{|-V_{c1}|}{|V_{an}|} = \frac{\text{sen}40^\circ}{\text{sen}120^\circ} = 0,7422 \quad (1.6)$$

$$a_{tA} = \frac{N_{a2}}{N_{pA}} = \frac{|V_{a2}|}{|V_{an}|} = \frac{\text{sen}20^\circ}{\text{sen}120^\circ} = 0,3949 \quad (1.7)$$

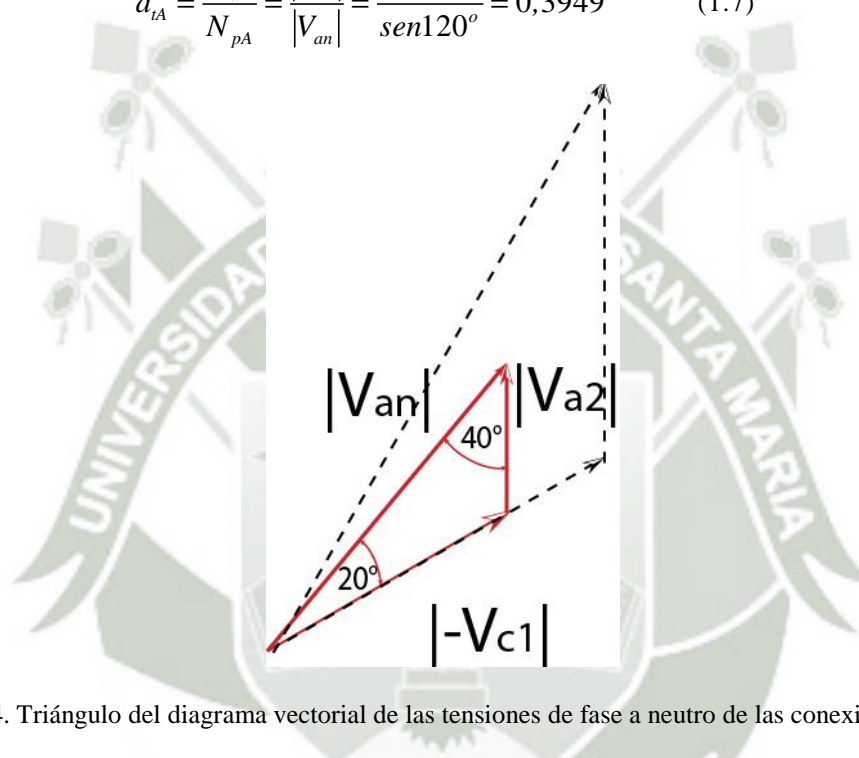


Figura 74. Triángulo del diagrama vectorial de las tensiones de fase a neutro de las conexiones zigzag.

Establecidas las relaciones de transformación y del desfase positivo de  $20^\circ$  con respecto a la tensión del primario de la fase “A”, luego podemos obtener el polígono de tensiones con desfases de  $+40^\circ$ . como se representa en la Figura 4, lo que corresponde a las terminaciones en secuencia directa (a, b, c) dado en (1.27).

$$\begin{aligned} \vec{V}_{an} &= \vec{V}_{a2} - \vec{V}_{c1} = a_{tA} \cdot V_P \quad 0^\circ \quad - \quad a_{sA} \cdot V_P \quad -120^\circ \\ \vec{V}_{bn} &= \vec{V}_{b2} - \vec{V}_{a1} = a_{tA} \cdot V_P \quad -120^\circ - \quad a_{sA} \cdot V_P \quad 120^\circ \\ \vec{V}_{cn} &= \vec{V}_{c2} - \vec{V}_{b1} = a_{tA} \cdot V_P \quad 120^\circ \quad - \quad a_{sA} \cdot V_P \quad 0^\circ \end{aligned} \quad (1.8)$$

Considerando las relaciones de espigas del transformador en los fasores, las tensiones de fase secundario resultante se da en (1.9), para luego configurarlo en polígono Figura 4.

$$\begin{aligned} \vec{V}_{an} &= \vec{V}_{a2} - \vec{V}_{c1} = 0,7422 \cdot V_P \quad 0^\circ \quad - \quad 0,3949 \cdot V_P \quad -120^\circ \\ \vec{V}_{bn} &= \vec{V}_{b2} - \vec{V}_{a1} = 0,7422 \cdot V_P \quad -120^\circ - \quad 0,3949 \cdot V_P \quad +120^\circ \\ \vec{V}_{cn} &= \vec{V}_{c2} - \vec{V}_{b1} = 0,7422 \cdot V_P \quad 120^\circ \quad - \quad 0,3949 \cdot V_P \quad 0^\circ \end{aligned} \quad (1.9)$$

## CONEXION D/p 40°

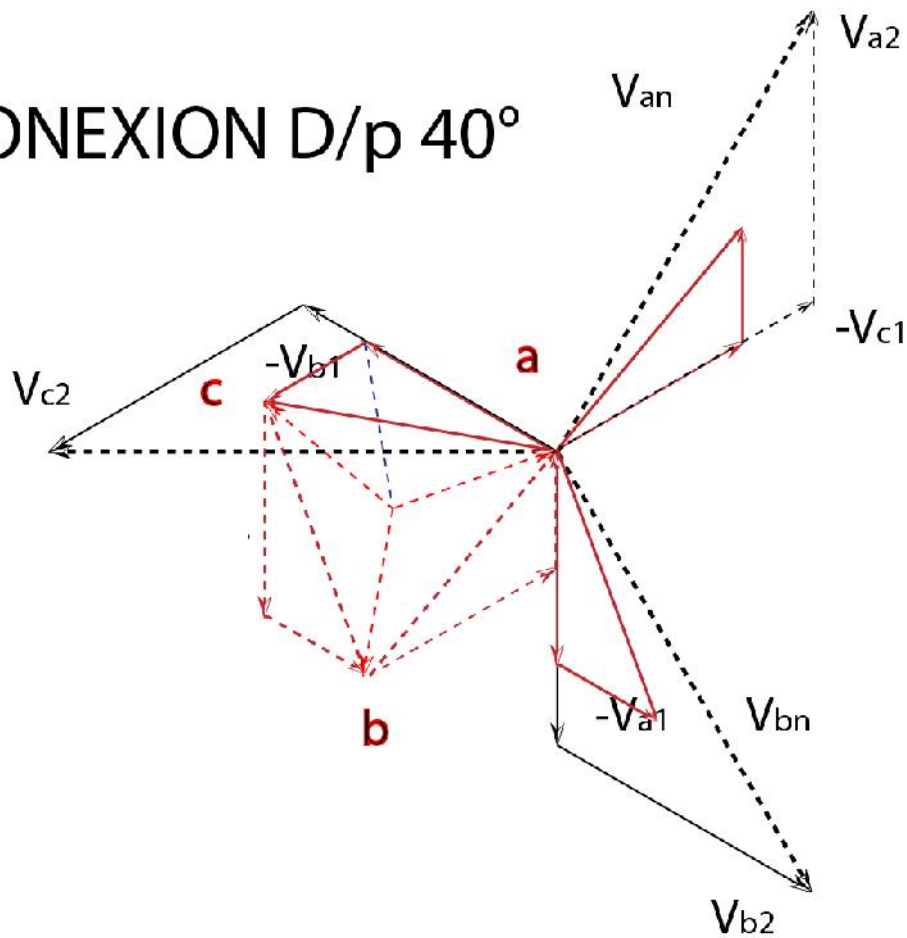


Figura 75. Diagramas vectoriales de las tensiones secundarias de transformador y Y/Z +40°

*\*complementar el fundamento teórico de transformadores trifásico con las referencias básicas.*

*++Traer un resumen de la información revisada del procedimiento de pruebas en vacío y corto circuito de transformadores trifásicos y sus respectivas normas nacionales e internacionales para determinar los datos de placa.*

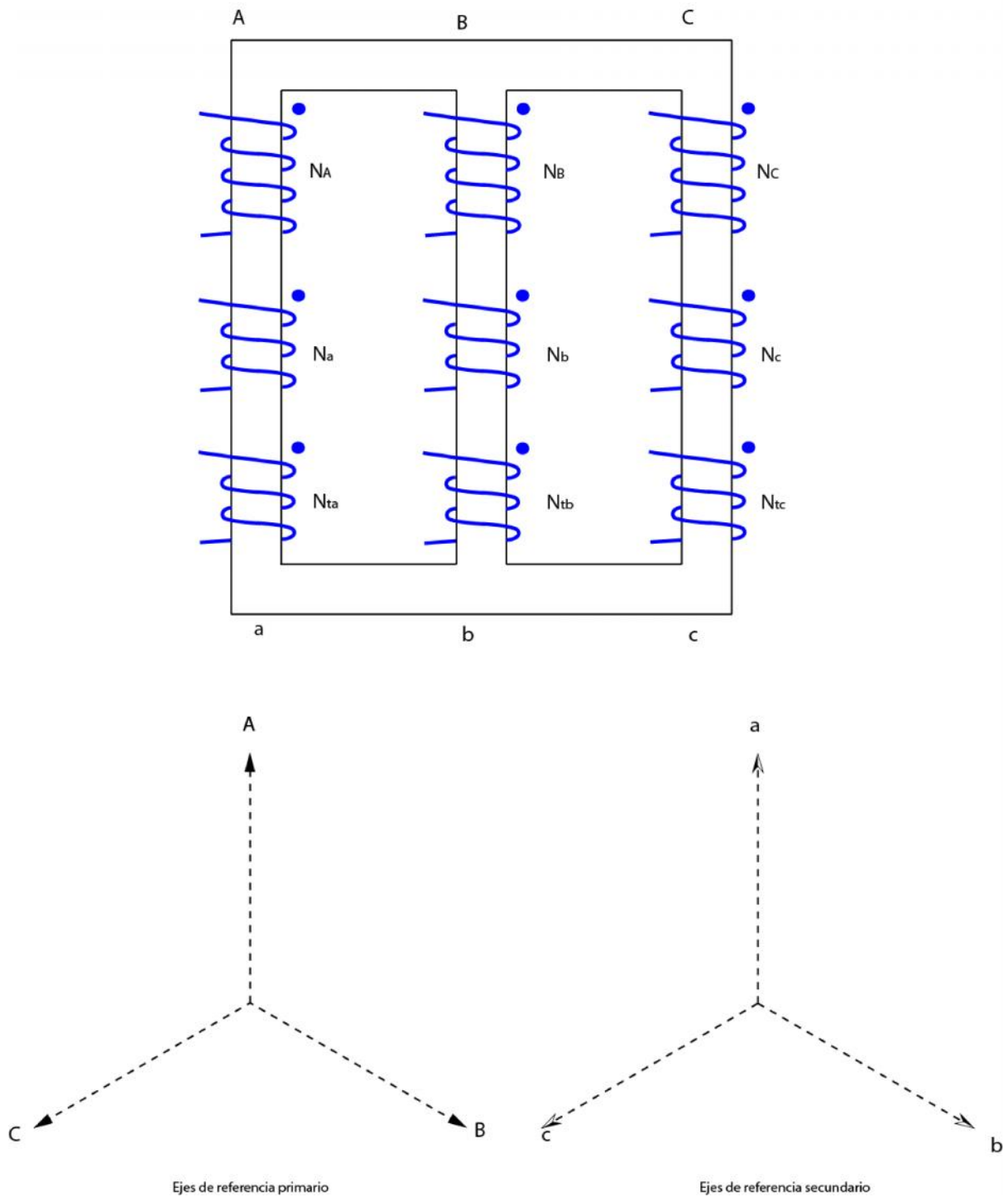
### 2.1. PRE-LABORATORIO

Sobre el formato de la figura 5 Figura 63 realizar los respectivos conexiones y trazar los diagramas vectoriales de tensiones que determina el grupo de conexión correspondiente a la configuración polígono. Presentar los diagramas y la forma de conexión de las siguientes configuraciones en hojas separadas:

- a) D/p 1;    b) D/p 11;    c) D/p -40°;    d) D/p +40°;    e) D/p -20°;

Finalmente, verificar cada una de las configuraciones y grupos de conexión del transformador mediante programa de simulación (SIMULINK, PSIM, Scilab, etc). Resaltar los respectivos ángulos de desfase de las tensiones de baja tensión (secundario) respecto alta tensión (primario) en los resultados de simulación. Presentar el conexionado y los resultados de simulación de las formas de ondas de las tensiones primarias y secundarias en un solo gráfico indicando el ángulo de desfase (en ms, grados y radianes).

CONEXION Y GRUPO: .....



**Figura 76. Formato para la realización de conexionado y diagrama vectorial del transformador trifásico. MATERIALES, INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS**

Los siguientes equipos, instrumentos y materiales serán necesarios para la realización de la práctica:

Ítem	Descripción	Cantidad	Código
1	Regulador de tensión trifásica (variac) 380 V, 20 A, 10 kW.	1	
2	Vatímetro trifásico digital o módulo de medición trifásica de potencia, intensidad y tensión de c.a. 20 A. 600 V.	1	
3	Amperímetro de c.a. 25 A, 1 A	2	
4	Voltímetro de c.a. de 150 V, 300 V, 750V	2	
5	Microohmímetro MPK5 (o puente Wheastone)	1	
6	Reóstato o resistencia variable de 11 - 8 A; 42 -5 A; 110 -2.5 A; Según cálculo de carga.	Según la carga	
7	Multitester para verificación de circuitos	1	
8	Kit de cables flexibles blindados unipolares, tripolares y tetrapolares de 2.5 mm <sup>2</sup> (ó 14xAWG) de 600 V.	3	
9	Osciloscopio digital de dos canales con su respectivo transformador de aislamiento y 2 sondas de tensión.	1	
10	Unidad de transformador trifásico 1500 VA, 380/110/110 V, 60Hz.	1	
11	Carga en base reóstatos o lámparas incandescentes de 220 V, 1500 W.	Según carga	

## PROCEDIMIENTO

a) Usando el formato de la **Figura 64**, realizar las conexiones físicas del transformador trifásico en polígono indicado por el instructor; para luego verificar experimentalmente dicha conexión. Discutir con sus compañeros y trazar los diagramas vectoriales.

b) Completar la tabla 1 de valores nominales del transformador trifásico con respectivo grupo de conexión o ángulo de desfase de tensiones entre primario y secundario. Posteriormente armar el esquema eléctrico de la Figura 56 y verificar el ángulo de desfase entre las tensiones del primario y secundario y su relación de transformación experimentalmente con ayuda del osciloscopio. Con los datos experimentales obtenidos del osciloscopio completar la Tabla 12.

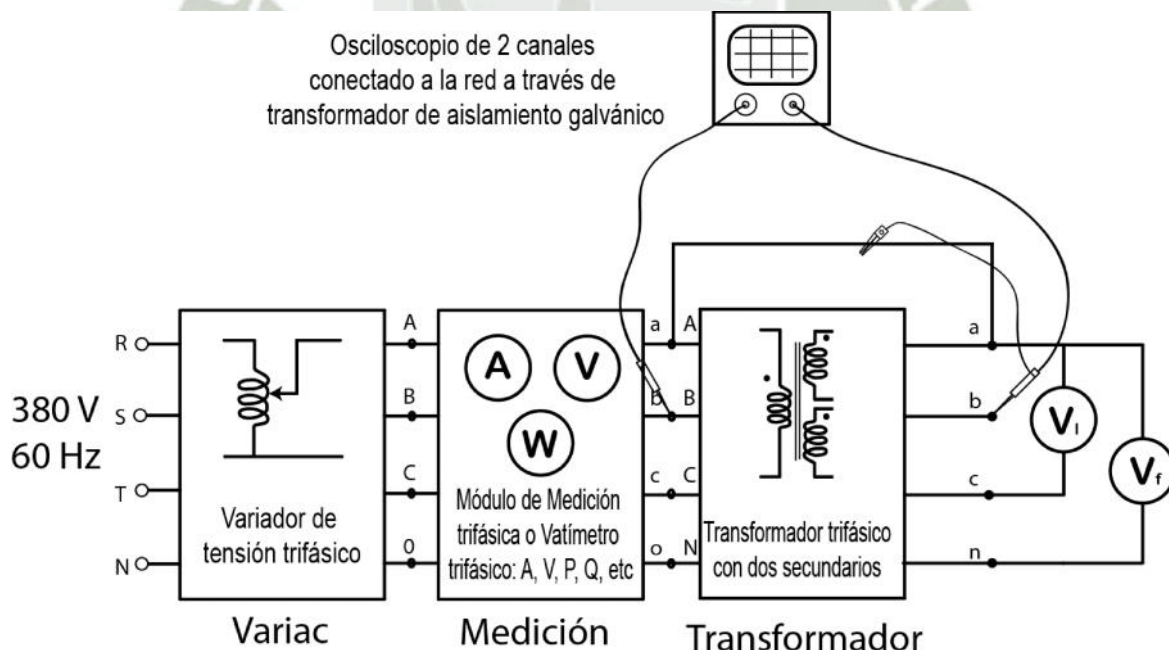


Figura 77. Esquema de montaje eléctrico para la verificación experimental del ángulo de desfase del transformador trifásico en conexión especial polígono.

Tabla 23. Cuadro de potencia y tensiones de línea y de fase nominales del transformador trifásico zig

#	conexión	$S_n$ [VA]	$V_{1n}$ [V]	$V_{1fn}$ [V]	$V_{2n}$ [V]	$V_{2fn}$ [V]	$a_{3\Phi} = \frac{V_{2n}}{V_{1n}}$	$a_{sp} = \frac{N_s}{N_p}$	$a_{fp} = \frac{N_t}{N_p}$
1									
2									
3									
4									
5									

c) Con ayuda del osciloscopio de 2 canales y conectado de acuerdo a la Figura 56, verificar experimentalmente el ángulo de desfase entre tensiones del primario y secundario en grados eléctricos. Complete la tabla con datos experimentales obtenidos del osciloscopio.

Tabla 24. Datos experimentales de tensiones líneas, frecuencia, periodo y ángulo de desfase.

#	conexión	$V_{1max}$ [V]	$V_{1ms}$ [V]	$V_{2max}$ [V]	$V_{2ms}$ [V]	T [ms]	f, [Hz]	$\alpha_v$ [ms]	$\alpha_v$ [rad]
1									
2									
3									
4									
5									

## CUESTIONARIO PARA LA DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- 5.1. Dibujar y trazar los diagramas vectoriales de tensiones a escala adecuada para las conexiones indicadas experimentalmente, indicando el desfase entre las tensiones de línea del primario y secundario en grados eléctricos.
- 5.2. Describir las conexiones hechas en cada grupo de bobinas del primario, secundario y terciario. Y además las secuencia de fases de los terminales.
- 5.3. Dibujar y trazar los diagramas vectoriales de corrientes de línea y de fase para las conexiones realizadas en punto 5.1.
- 5.4. Determine las relaciones de espiras de transformación y la relación de tensiones nominales del transformador trifásica en conexión especial polígono para cada configuración.
- 5.5. Cuáles son las aplicaciones del transformador en polígono con desfase de ángulo específico, de algunos ejemplos prácticos de utilización y de las especificaciones del transformador donde operan este tipo de transformadores.

## INVESTIGACIÓN COMPLEMENTARIA

- 6.1. Verifique el funcionamiento, ángulo de desfase y la aplicación en un rectificador mediante el transformador en conexión polígono ángulo de desfase específico a través de un programa de simulación (MATLAB/SIMULINK, PSPICE, PSIM) y demuestre el ángulo de desfase.
- 6.2. Investigue sobre el transformador trifásico de aislamiento para rectificador de CA/CC de 24 y 36 pulsos. Presente los resultados de simulación de la tensión rectificadora con las pulsaciones respectivas y las especificaciones en cuanto a valores nominales..

## CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Plantee en forma personal y clara un mínimo de cinco (5) conclusiones producto de la participación y de los resultados obtenidos en la experimentación y en la elaboración del informe.

Plantee en forma personal y clara un mínimo de tres (3) observaciones para la mejora de la experiencia de las prácticas de este tema.

## Bibliografía

- 1] A. E. Fitzgerald, Máquinas Eléctricas, McGraw Hill, 6ta Edición., 2003.
- 2] J. Fraile Mora, Máquinas Eléctricas, McGraw Hill, 3ra. Edición., 2008.

Al final de todo documento o informe técnico se hace referencias numeradas de la bibliografía empleada y la normalización respectiva. Dar las referencias bibliográficas enumeradas y citadas de su informe de la práctica [1], por ejemplo:

- [1] Jesús Fraile Mora, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ta. Edición, 2008.
- [2] Fitzgerald A. E. Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, “Máquinas Eléctricas”, McGraw Hill, 6ta. Edición, 2003.

## APENDICE

Temas resueltos y explícitos como complemento para la mejor comprensión del marco referencial del informe.

## ANEXO

Adjunte todo material relacionado con la ejecución de la práctica y de la simulación que ayude a elaborar y comprender el informe presentado.

## CONCLUSIONES

1. Se logró la implementación del módulo didáctico de transformadores trifásicos de 3KA. Para conexiones especiales, la cual guarda relación directa con la teoría de las maquinas eléctricas rotativas es decir con los transformadores de potencia.
2. Que el modulo que se logró implementar, debido a las grandes corrientes que este puede soportar servirá para efectuar diferentes tipos de ensayos en el laboratorio, coadyuvando así al conocimiento del comportamiento de las maquinas eléctricas tanto estáticas como rotativas.
3. El modulo implementado, debido a su versatilidad puede ser considerado como un módulo didáctico de enseñanza, el mismo que se puede utilizar incluso en las asignaturas donde se estudian los conceptos básicos de electromagnetismo, y así poder posteriormente comprender mejor la teoría que rige a las maquinas eléctricas en general.
4. Con el modulo implementado, como compromiso inicial se entrega al laboratorio de Electricidad y Maquinas Eléctricas de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica eléctrica y Mecatronica en calidad de donación, con lo cual se consigue incrementar el equipamiento del laboratorio.
5. Por las diversas consideraciones, será posible la realización de trabajos de investigación por parte de los alumnos de pre, postgrado como asi también de los docentes, relacionados con las disciplinas de las maquinas eléctricas.

## RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se incluyen, tienen la finalidad de facilitar la realización de prácticas de laboratorio, considerando los factores de seguridad a los equipos y personas, entre las cuales se pueden destacar:

1. Se deberá de tener en cuenta los valores nominales de funcionamiento de las maquinas, los dispositivos y equipos, considerando su voltaje y corriente principalmente.
2. Antes de energizar un circuito eléctrico en el laboratorio, donde se utilice el modulo, se recomienda realizarlos cálculos previos para poder asegurarse de no sobrepasar los valores nominales de los equipos e instrumentos que se están utilizando, como así también evitar cometer el menor número de errores en el desarrollo de las prácticas.
3. En referencia al número de alumnos en las mesas de trabajo, para que estos formen parte activa de las prácticas de laboratorio donde se utilice el modulo se recomienda que no exceda de 6 alumnos por mesa y para esto los docentes deberán de programar la realización de prácticas en forma alternada, es decir diferente practica por mesa, esto debido a la cantidad de equipos disponibles.

## BIBLIOGRAFÍA

- RAFAEL SANJURJO, Reverte. Circuitos magnéticos y transformadores  
JAVIER SANZ. , Prentice Hall. Máquinas Eléctricas.
- STEPHEN J. CHAPMAN., McGraw- Hill. Máquinas Eléctricas.  
A.E. FITZGERALD., McGraw- Hill. Máquinas Eléctricas.  
JESÚS FRAILE. Máquinas Eléctricas.  
IRVING L. KOSOW., Prentice Hall. Máquinas Eléctricas y Transformadores.  
ENRIQUE RAS. , Marcombo. Transformadores de potencia, de medida y de protección.
- B.S. GURU y H.R. HIZIROGLU., Oxford Máquinas eléctricas y transformadores
- E. HARPER. El ABC de Máquinas Eléctricas
- SYED A. NASAR. Máquinas Eléctricas I y Electromecánicas Ed. 1988
- Información electrónica en páginas web.





**ANEXO 1**  
**MATERIALES AISLANTES ELÉCTRICOS**



**S.E.G. ROYAL DIAMOND, S.A.**  
**Aislantes eléctricos**

**INFORMACION TECNICA**

Edición: 17.03.05

**THERNOMID K.R.G.**

**CLASE TERMICA 240°C**

**LAMINADO AISLANTE FLEXIBLE**

El aislante flexible THERNOMID K.R.G. está compuesto por un Film de Poliimida, por Tejido de Vidrio no alcalino y todo ello unido con adhesivo termoestable.

El THERNOMID K.R.G. posee alta resistencia a la temperatura (240°C), buena flexibilidad y adaptabilidad. Elevada resistencia a la rotura y al desgarre. Se emplea en máquinas sometidas a los más rigurosos esfuerzos térmicos (motores de tracción, electroimanes, etc).

**CARACTERISTICAS TECNICAS** (Espesor 0,22 mm)

Perforación dieléctrica NFC 26225 (KV).....	7.5
Temperatura de utilización continua NFC 26205 (°C).....	240
Temperatura de utilización discontinua NFC 26205 (°C).....	300
Temperatura mínima de utilización NFC 26205 (°C).....	-180 en N <sub>2</sub> líquido
Conductividad térmica NF PRG 62011 y ASTM C 518 (W/m °C).....	1.0
Resistencia a la tracción en sentido longitudinal NF 26143 (DaN/cm <sup>2</sup> ).....	1280
Resistencia a la tracción en sentido transversal NF 26143 (DaN/cm <sup>2</sup> ).....	670
Alargamiento a la rotura en sentido longitudinal NF 26143 (%).....	6
Alargamiento a la rotura en sentido transversal NF 26143 (%).....	42
Absorción al agua (%).....	<0.6

ESPEJOR TOTAL REF. (mm)	ESPEJOR POLIIMIDA (micras)	ESPEJOR VIDRIO (micras)	GRAMAJE (grs/m <sup>2</sup> )	AISLAMIENTO (V)
0.12 +- 10%	25	100	152 +- 10%	6500
0.12 +- 10%	75	30	142 +- 10%	12500
0.15 +- 10%	50	100	195 +- 10%	7500
0.22 +- 10%	25	180	260 +- 10%	7500
0.24 +- 10% (triplex)	50	100	310 +- 10%	11000

**PRESENTACION:** Bobinas de 100 ml x 1000 mm. ancho.

**CORTE**

Bajo demanda puede suministrarse en rollos, formatos o piezas troqueladas.

La tolerancia de corte es: +0.2 -0.2mm.

En el caso de que la suma total de los anchos de los rollos, sea inferior al ancho standard de la bobina, la merma superior a 20 mm., será bobinada y servida con los rollos.

El diámetro interior standard de los tubos de cartón es de 70 mm.

La información que le ofrecemos es de carácter orientativo y como resultado de nuestros ensayos, pero sin asumir ninguna responsabilidad derivada de su aplicación.

**S.E.G. ROYAL DIAMOND, S.A.**

Tel: 93 791 80 06

Fax: 93 791 91 25

Polígono Industrial S/N 08319 Dosrius (Barcelona) España

e mail: [royal.diamond@royal.diamond.es](mailto:royal.diamond@royal.diamond.es)

[www.royal.diamond.es](http://www.royal.diamond.es)

	<p><b>S.E.G. ROYAL DIAMOND,S.A.</b> <b>Aislantes eléctricos</b></p>	
---	---	--

**INFORMACION TECNICA**

Edición:17.03.05

**FILM POLIESTER**  
**AISLANTE FLEXIBLE**

**CLASE TERMICA B (130°C)**

El aislante flexible FILM POLIESTER es una lámina de Politereftalato de Etilenglicol (PETP), de excelentes propiedades físicas y dieléctricas. Muy resistente al frío y al calor (-70°C a 150°C).

**CAMPO DE APLICACION**

Se utiliza en el aislamiento eléctrico de motores y transformadores (ranura y entre-fase).

**CARACTERISTICAS TECNICAS**

	<b>23</b>	<b>36</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>190</b>	<b>250</b>	<b>350</b>
Esesor(micras)									
Gramaje (grs/m <sup>2</sup> )	32	50	70	105	142	174	265	349	480
Resistencia tracción (MPa) NF 26143 s.longitudinal	200	220	200	190	190	190	190	190	190
Alargamiento rotura (%) NF 26143 s. longitudinal	130	130	130	140	150	150	190	210	240
Contracción s. longi. (%) 30 min. 150 °C	1.5	2.0	1.5	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Perforación dieléctrica (KV) NFC 26225	6	7	8.5	11	13	15.5	20	22	23

**PRESENTACION**

En bobinas hasta 1010 mm de ancho, con diferentes longitudes según espesor del film.

Bajo demanda puede suministrarse en rollos, formatos o piezas troqueladas. La tolerancia de corte es: +0.2 - 0.2mm.

En el caso de que la suma total de los anchos de los rollos, sea inferior al ancho standard de la bobina, la merma superior a 20 mm, será bobinada y servida con los rollos. El diámetro interior standard de los tubos de cartón es de 70 mm.

La información que le ofrecemos es de carácter orientativo y como resultado de nuestros ensayos, pero sin asumir ninguna responsabilidad derivada de su aplicación.

**S.E.G. ROYAL DIAMOND,S.A.**

Tel- 93 791 80 06

Fax: 93 791 91 25

Polígono Industrial S/N 08319 Dosrius (Barcelona) España

e-mail: [royal-diamond@royal-diamond.es](mailto:royal-diamond@royal-diamond.es)

[www.royal-diamond.es](http://www.royal-diamond.es)

	<b>S.E.G. ROYAL DIAMOND,S.A.</b> <b>Aislantes eléctricos</b>	
<b>INFORMACION TECNICA</b>		<b>Edición:17.03.05</b>

**ROYAFLEX "F"**  
**TUBO AISLANTE FLEXIBLE**

**CLASE TERMICA F (155°C)**  
**-30°C +170°C**

El ROYAFLEX "F", es un tubo compuesto por un trenzado de Vidrio, recubierto con un barniz de Poliuretano.

**COLORES**

El color standard es Natural (Crudo). Bajo demanda podemos suministrar otros colores: Amarillo, Verde, Marrón, Rojo, Negro, Azul, Blanco, Naranja, Violeta, etc.

**CAMPO DE APLICACION**

Su empleo es adecuado en motores, aparatos y máquinas de la clase térmica "F" (155°C), como por ejemplo: transformadores, construcciones eléctricas y electrónicas, cableado de electrodomésticos y de calefacción, cableado de máquinas útiles y máquinas electrotérmicas para el trabajo con plásticos y caucho. En definitiva es apto para el aislamiento de componentes eléctricos a temperaturas inferiores a 170°C.

**CARACTERISTICAS TECNICAS (SEGUN NORMAS UNE 21375-93/DIN 40620)**

**TERMICAS**

Clase térmica ..... "F"  
 Temperatura de servicio..... 155°C  
 Temperatura máx. utilización..... 170°C  
 Aguanta el contacto del hierro al soldar.

**ELECTRICAS**

Tensión de perforación en seco..... 3000 V

**QUIMICAS**

Resistencia a los productos químicos.

Etolanol..... Muy buena  
 Toluoal ..... Buena  
 Aceite ..... Muy buena  
 Piraleno ..... Buena  
 Agua ..... Muy buena  
 Acido Sulfúrico ..... Regular

Buena compatibilidad con barnices de impregnación clase "F". Muy buena resistencia a la humedad y a los hongos.

**MECANICA**

Buena elasticidad / Buena resistencia al doblado / Buena resistencia al envejecimiento.  
 Resistencia a la tracción ..... 33.1 N/mm<sup>2</sup>  
 Alargamiento a la rotura..... 17.2 %

**FORMA DE SUMINISTRO**

Diámetro interior (mm)	Longitud rollo (ml).
0.5/1/1.5 .....	200
2/2.5/3/4.....	100
5/6/7/8/10/12/14/16.....	50

La información que le ofrecemos es de carácter orientativo y como resultado de nuestros ensaycs, pero sin asumir ninguna responsabilidad derivada de su aplicación.

**S.E.G. ROYAL DIAMOND,S.A.**

Tel- 93 791 80 06

Fax: 93 791 91 25

e-mail: [royal-diamond@royal-diamond.es](mailto:royal-diamond@royal-diamond.es)

Polígono Industrial S/N 08319 Dosrius (Barcelona) España

[www.royal-diamond.es](http://www.royal-diamond.es)



**S.E.G. ROYAL DIAMOND,S.A.**  
**Aislantes eléctricos**

**INFORMACION TECNICA**

Edición:17.03.05

**THERNOMID N.R.G.**

**CLASE TERMICA R (220°C)**

**LAMINADO AISLANTE FLEXIBLE**

El aislante flexible THERNOMID N.R.G. está compuesto por papel Poliamida no calandrado (NOMEX), por Tejido de Vidrio no alcalino y todo ello unido con adhesivo termoestable.

El THERNOMID N.R.G. se utiliza como aislante de entre-fase y en el encintado de pletinas. Debido a su superficie esponjosa, posee un alto poder de absorción de barnices/resinas en el proceso de impregnación. Se adapta perfectamente a la geometría de las cabezas de bobinas (motores de tracción).

**CARACTERISTICAS TECNICAS** (Espesor 0.22 mm)

Perforación dieléctrica NFC 26225 (KV).....	1.3
Constante dieléctrica 50 Hz 25°C ASTM 150-65 .....	nc
Factor de disipación tg 50 Hz 25°C NFC 26230.....	nc
Resistencia específica a 25°C NFC 26230 y NFC 26143.....	nc
Punto de fusión FISHER JONES (°C) .....	> 300
Punto de reblandecimiento ASTM D 876-65 (°C) .....	nc
Temperatura de utilización continua NFC 26205 (°C) .....	220
Temperatura de utilización discontinua NFC 26205 (°C).....	250
Temperatura mínima de utilización NFC 26205 (°C).....	-180 en N, líquido
Calor específico NF PRG 62011 y ASTM C 518 (cal/g °C).....	nc
Conductividad térmica NF PRG 62011 y ASTM C 518 (W/m °C).....	1.0
Coefficiente de dilatación lineal. 30 a 50°C ASTM D 696-44 (mm/°C).....	nc
Resistencia a la tracción en sentido longitudinal NF 26143 (DaN/cm <sup>2</sup> ) .....	>40
Resistencia a la tracción en sentido transversal NF 26143 (DaN/cm <sup>2</sup> ) .....	nc
Alargamiento a la rotura en sentido longitudinal NF 26143 (%) .....	nc
Alargamiento a la rotura en sentido transversal NF 26143 (%) .....	nc
Contracción 30 min. a 160°C (%) ... ..	nc
Absorción al agua (%) .....	nc

<b>ESPEJOR TOTAL</b>	<b>ESPEJOR NOMEX</b>	<b>GRAMAJE</b>	<b>AISLAMIENTO</b>	<b>PRESENTACION</b>
<b>REF. (mm)</b>	<b>(micras)</b>	<b>(grs/m<sup>2</sup>)</b>	<b>(V)</b>	
0.22 +- 10%	130	165 +- 10%	1300	105 ml x 950 mm

**CORTE**

Bajo demanda puede suministrarse en rollos, formatos o piezas troqueladas.

La tolerancia de corte es: +0.2 -0.2mm.

En el caso de que la suma total de los anchos de los rollos, sea inferior al ancho standard de la bobina, la merma superior a 20 mm., será bobinada y servida con los rollos.

El diámetro interior standard de los tubos de cartón es de 70 mm.

NOMEX: Marca registrada por DU PONT DE NEMOURS.

La información que le ofrecemos es de carácter orientativo y como resultado de nuestros ensayos, pero sin asumir ninguna responsabilidad derivada de su aplicación.

**S.E.G. ROYAL DIAMOND,S.A.**

Tel: 93 791 80 06

Fax: 93 791 91 25

Poigono Industrial S/N 08319 Dosrius (Barcelona) España

e-mail: [royal-diamond@royal-diamond.es](mailto:royal-diamond@royal-diamond.es)

[www.royal-diamond.es](http://www.royal-diamond.es)

	<p><b>S.E.G. ROYAL DIAMOND,S.A.</b> <b>Aislantes eléctricos</b></p>	
---	---	--

	<p><b>INFORMACION TECNICA</b></p>	<p><b>Edición:17.03.05</b></p>
--	-----------------------------------	--------------------------------

## THERNOPHASE

CLASE TERMICA F (155°C)

### LAMINADO AISLANTE FLEXIBLE

El aislante flexible THERNOPHASE está compuesto por un Film de Poliéster (PETP) , recubierto por ambas caras con fibras de Poliéster y un adhesivo termoestable. Se presenta en color amarillo. Posee alta resistencia térmica.

El THERNOPHASE se ha creado especialmente para el aislamiento de entre-fases. No se desliza en el proceso de bobinado y después de la impregnación de barniz/resina, queda totalmente adherido a los conductores.

#### CARACTERISTICAS TECNICAS REF. 0.40

Perforación dieléctrica NFC 26225 (KV) .....	14
Constante dieléctrica 50 Hz 25°C ASTM 150-65 .....	nc
Factor de disipación tg 50 Hz 25°C NFC 26230 .....	nc
Resistencia específica a 25°C NFC 26230 y NFC 26143 .....	nc
Punto de fusión FISHER JONES (°C) .....	>250
Punto de reblandecimiento ASTM D 876-65 (°C) .....	>245
Temperatura de utilización continua NFC 26205 (°C) .....	155
Temperatura de utilización discontinua NFC 26205 (°C) .....	190
Temperatura mínima de utilización NFC 26205 (°C) .....	nc
Calor específico NF PRG 62011 y ASTM C 518 (cal/g °C) .....	nc
Conductividad térmica NF PRG 62011 y ASTM C 518 (W/m °C) .....	nc
Coefficiente de dilatación lineal. 30 a 50°C ASTM D 696-44 (mm/°C) .....	3 .10 <sup>-5</sup>
Resistencia a la tracción en sentido longitudinal NF 26143 (DaN/cm <sup>2</sup> ) .....	1300
Resistencia a la tracción en sentido transversal NF 26143 (DaN/cm <sup>2</sup> ) .....	nc
Alargamiento a la rotura en sentido longitudinal NF 26143 (%) .....	120
Alargamiento a la rotura en sentido transversal NF 26143 (%) .....	nc
Contracción 30 min. a 160°C (%) .....	2
Absorción al agua (%) .....	nc

REFERENCIA	ESPESOR FILM (micras)	GRAMAJE (grs/m <sup>2</sup> )	AISLAMIENTO ( V)	PRESENTACION
0.30	50	150 +- 10%	6500	123 ml x 980 mm
0.40	125	250 +- 10%	14000	123 ml x 980 mm

#### CORTE

Bajo demanda puede suministrarse en rollos, formatos o piezas troqueladas.

La tolerancia de corte es: +0.2 -0.2mm.

En el caso de que la suma total de los anchos de los rollos, sea inferior al ancho standard de la bobina, la merma superior a 20 mm., será bobinada y servida con los rollos.

El diámetro interior standard de los tubos de cartón es de 70 mm.

La información que le ofrecemos es de carácter orientativo y como resultado de nuestros ensayos, pero sin asumir ninguna responsabilidad derivada de su aplicación.

**S.E.G. ROYAL DIAMOND,S.A.**

Tel: 93 791 80 06

Fax: 93 791 91 25

Polígono Industrial S/N 08319 Dosrius (Barcelona) España  
e-mail: [royal-diamond@royal-diamond.es](mailto:royal-diamond@royal-diamond.es)

[www.royal-diamond.es](http://www.royal-diamond.es)



**ANEXO 2  
BARNIZ DIELECTRICO**



**S.E.G. ROYAL DIAMOND, S.A.**  
**Aislantes eléctricos**

**INFORMACION TECNICA**

**Edición: 17.03.05**

**ROYALAC 240**  
**BARNIZ DIELECTRICO**

**CLASE TERMICA F (155°C)**  
**SECADO AL HORNO**

El barniz de impregnación ROYALAC 240, está elaborado a base de resinas sintéticas de tipo termoendureciente. Su secado se efectúa por polimerización y se obtienen bobinados muy compactos, con gran dureza e inmejorable adherencia y elasticidad. Presenta buena compatibilidad sobre hilos esmaltados y demás aislantes.

**CAMPO DE APLICACION**

Barniz muy apropiado para impregnar bobinados que requieran mucha cohesión y adherencia. Su campo de aplicación más específico son los transformadores. Debido a la gran dureza, elasticidad y adherencia del barniz ROYALAC 240, ha sido comprobado que elimina las vibraciones que se producen en las chapas del transformador, ocasionadas por el campo magnético que forma la bobina. Igualmente apropiado para la impregnación de inducidos que deban resistir los efectos de la fuerza centrífuga y temperatura de funcionamiento elevada.

**MODO DE EMPLEO**

Los métodos de aplicación del barniz Royalac 240 son los tradicionales. Al autoclave con vacío-presión o por inmersión. Recomendamos hacer las inmersiones de los bobinados a temperatura ambiente o máximo a 40°C, a fin de evitar fenómenos de aglutinación del barniz y defectos de impregnación. El tiempo de secado práctico de un pequeño transformador será de 3 horas aproximadamente y en un motor de 5 HP de 5 ó 6 horas aproximadamente. La temperatura de secado debe ser de 130-140°C.

**CARACTERISTICAS FISICAS**

Color ..... Dorado.  
Densidad a 20°C (grs/cm<sup>3</sup>) ..... 0.970  
Viscosidad Copa Ford Nº 4 a 20°C (seg) ..... 45+-5  
Materia fija (%) ..... 46+-2  
Clasificación Térmica ..... F (155°C)  
Tiempo de secado sobre placa a 135°C (min) ..... 55  
Película resultante ..... Brillante, adherente, flexible y dura.  
Estabilidad almacenaje a 20°C ..... 12 meses.

**CARACTERISTICAS DIELECTRICAS**

Perforación dieléctrica sobre placa de cobre por grueso de película 0.01 mm:  
ESTADO NATURAL ..... 1300 V  
Después de 24 horas en HCl 50% ..... 1100 V  
Después de 8 días al aire (90 % humedad) ..... 1200 V  
Después de 8 días en agua destilada ..... 1150 V  
Después de 8 días en aceite de transformadores ..... 1350 V

**DILUYENTE**

En caso que se desee reducir la viscosidad, debe emplearse nuestro DILUYENTE F-5 ó DILUYENTE F-O.

**FORMA DE SUMINISTRO**

En envases de hojalata litografiados y precintados de 5 y 25 litros.  
En bidones de plancha de hierro de 50, 100 y 200 litros.

La información que le ofrecemos es de carácter orientativo y como resultado de nuestros ensayos, pero sin asumir ninguna responsabilidad derivada de su aplicación

**S.E.G. ROYAL DIAMOND, S.A.**

Tel- 93 791 80 06

Fax: 93 791 91 25

Polígono Industrial S/N 08319 Dosrius (Barcelona) España

e-mail: [royal-diamond@royal-diamond.cs](mailto:royal-diamond@royal-diamond.cs)

[www.royal-diamond.cs](http://www.royal-diamond.cs)



**ANEXO 3**  
**CONDUCTORES ELÉCTRICOS**



**S.E.G. ROYAL DIAMOND, S.A.**  
**Aislantes eléctricos**

**INFORMACION TECNICA**

Edición: **17.03.05**

**ROYASIL CSP**  
**CABLE SILICONA POLIESTER**

**CLASE TERMICA H**  
**-60°C +180°C**

El cable ROYASIL CSP, se compone de un conductor de Cobre rojo Clase 5 NFC 32-013, Caucho de silicona y Trenza poliéster revestida. Los colores son BLANCO, AZUL, MARRÓN y ROJO.

**CARACTERISTICAS**

Temperaturas servicio continuo: - 60°C a + 180°C, puntas a 230°C. Buena resistencia a los choques térmicos y UV. Excelente envejecimiento. Buena resistencia a la humedad y a las atmósferas químicas usuales. Elevadísima resistencia mecánica. Compatibilidad con la mayoría de los barnices de impregnación. Tensión de empleo: 500 V Tensión de prueba: 2000 V. Tensión disruptiva: >6000 V. Intensidad maxi admisible para ambiente 1/0°C. Resistencias lineicas.

**CAMPO DE APLICACION**

Cableados de máquinas rotativas. Motores. Alternadores. Generadores y máquinas estáticas. Transformadores. Bobinas (clase H). La trenza poliéster siliconada es un refuerzo mecánico muy bueno.

NUCLEO		HILO O CABLE AISLADO		
SECCION NOMINAL mm <sup>2</sup>	COMPOSICION NOMINAL	DIAMETRO EXTERIOR mm	MASA LINEICA kg/km	RESISTENCIA LINEICA 20°C Ohm/Km
0.25	08 x 0.20	1.8	5.30	78.6
0.5	16 x 0.20	2.0	8.00	52.4
0.75	24 x 0.20	2.2	10.9	26.0
1.0	32 x 0.20	2.3	13.1	19.5
1.5	30 x 0.25	2.7	19.8	13.3
2.5	50 x 0.25	3.4	30.7	7.98
4.0	56 x 0.30	4.2	48.0	4.95
6.0	84 x 0.30	5.2	73.0	3.30
10	80 x 0.40	7.0	129	1.91
16	126x 0.40	8.6	198	1.21
25	196x 0.40	10.4	295	0.78
35	276x 0.40	11.9	399	0.554
50	396 x 0.40	14.1	562	0.386
70	360 x 0.50	15.9	759	0.272
95	485x 0.50	18.2	1021	0.206
120	608 x 0.50	20.3	1275	0.161
150	756x 0.50	22.8	1587	0.129
185	944x 0.50	24.8	1952	0.106
240	1221 x 0.50	28.8	2560	0.0801
300	1525 x 0.50	31.5	3095	0.0611
400	2037 x 0.50	35.4	5130	0.0486

**FORMA DE SUMINISTRO**

En coronas de 100 m según sección, en bobinas o carretes recuperables. Tolerancia de peso y diámetro: +- 5 %.

La información que le ofrecemos es de carácter orientativo y como resultado de nuestros ensayos, pero sin asumir ninguna responsabilidad derivada de su aplicación.

**S.E.G. ROYAL DIAMOND, S.A.**

Tel- 93 791 80 06

Fax: 93 791 91 25

Polígono Industrial S/N 08319 Dosrius (Barcelona) | España

e-mail: [royal-diamond@royal-diamond.es](mailto:royal-diamond@royal-diamond.es)

[www.royal-diamond.es](http://www.royal-diamond.es)