

# Transformador Trifásico

Autor: Andrés Murillo P.

amurillop@est.ups.edu.ec

**Resumen—** En el presente documento se desarrollara una breve explicación acerca de los diferentes parámetros que involucran a un transformador trifásico, a más de sus diversos tipos de conexión, aislantes, ventajas y desventajas de los mismos, formas de construcción y pérdidas que se producen en un transformador eléctrico, es decir todas las posibles causas que producen pérdidas y que afectan el rendimiento de la máquina, a más de tratar de explicar cómo disminuir al máximo dichas pérdidas.

**Palabras Clave—**Transformador

## I. INTRODUCCIÓN

Los transformadores trifásicos son utilizados para el suministro o el transporte de energía a grandes distancias de sistemas de potencias eléctricas. Lo que normalmente conocemos como la distribución eléctrica, pero a grandes distancias.

Los principales sistemas de generación y distribución de potencia en el mundo son sistemas trifásicos de corriente alterna (ca), debido a las grandes ventajas que presentan.

Los transformadores son una parte principal en sistemas trifásicos de ca. Por lo que para su utilización en estos sistemas, se pueden considerar dos configuraciones, la primera consiste en tomar tres transformadores monofásicos y conectarlos en un banco trifásico, es decir, tres transformadores por separados, unidos mediante algún tipo de conexión, esta configuración presenta la desventaja de ser más caro que utilizar un solo transformador trifásico, y tiene como ventaja que cualquier unidad del banco puede ser reemplazada individualmente.



Figura 1.- Transformador Trifásico

## II. BANCOS DE TRANSFORMADORES

Los bancos de transformadores monofásicos son utilizados en sistemas eléctricos trifásicos como sustitución de un transformador trifásico.

Por ejemplo, en el transporte a largas distancias de la energía eléctrica. Asimismo, el banco de transformadores monofásicos también sirve para poder cambiar el número de fases del sistema, es decir, un sistema trifásico lo podemos convertir en un sistema bifásico, de 6 fases, de doce fases, etc.

Por lo que respecta a las bobinas primarias y secundarias, las podemos conectar de varias formas, teniendo cuatro posibles casos:  $Y/Y$ ,  $Y/\Delta$ ,  $\Delta/Y$ ,  $\Delta/\Delta$ . Es decir, podemos conectar las bobinas primarias en estrella o en triángulo al igual que las bobinas secundarias. Dependiendo como lo hagamos tendremos unas características técnicas u otras.

De esta forma, la relación de las tensiones de entrada y de salida no solamente dependerá de la relación de vueltas (espiras) de las bobinas primarias y secundarias, sino que también dependerá de cómo estén conectadas las bobinas primarias y las bobinas secundarias



Figura 2.- Banco de transformadores monofásicos

## III. GRUPOS DE CONEXIÓN

Para relacionar las tensiones y las corrientes primarias con las secundarias, no basta en los sistemas trifásicos con la relación de transformación, sino que se debe indicar los desfases relativos entre las tensiones de una misma fase entre el lado de Alta Tensión y el de Baja Tensión.

Una manera de establecer estos desfases consiste en construir los diagramas fasoriales de tensiones y corrientes, conociendo: la conexión en baja y alta tensión (estrella, triángulo o zigzag), las polaridades de los enrollados en un mismo circuito magnético o fase, y las designaciones de los bornes.

Lo que se presentará a continuación son todos los tipos de conexiones para transformadores trifásicos: Delta-delta, delta-estrella, estrella-delta, estrella estrella; también se mostrará mediante gráficas el cambio que sufren los valores De corriente y voltaje a lo largo de las líneas y fases del circuito.

#### A. Conexión delta- delta

Se utiliza esta conexión cuando se desean mínimas interferencias en el sistema.

Además, si se tiene cargas desequilibradas, se compensa dicho equilibrio, ya que las corrientes de la carga se distribuyen uniformemente en cada uno de los devanados.

La conexión delta-delta de transformadores monofásicos se usa generalmente en sistemas cuyos voltajes no son muy elevados especialmente en aquellos en que se debe mantener la continuidad de unos sistemas. Esta conexión se emplea tanto para elevar la tensión como para reducirla.

En caso de falla o reparación de la conexión delta-delta se puede convertir en una conexión delta abierta-delta abierta.

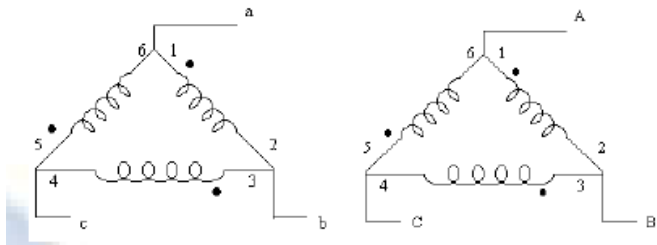


Figura 3.- Esquema de conexión delta-delta

#### B. Conexión estrella- delta

La conexión estrella-delta es contraria a la conexión delta-estrella; por ejemplo en sistema de potencia, la conexión delta-estrella se emplea para elevar voltajes y la conexión estrella-delta para reducirlos. En ambos casos, los devanados conectados en estrella se conectan al circuito de más alto voltaje, fundamentalmente por razones de aislamiento. En sistemas de distribución esta conexión es poco usual, salvo en algunas ocasiones para distribución a tres hilos.

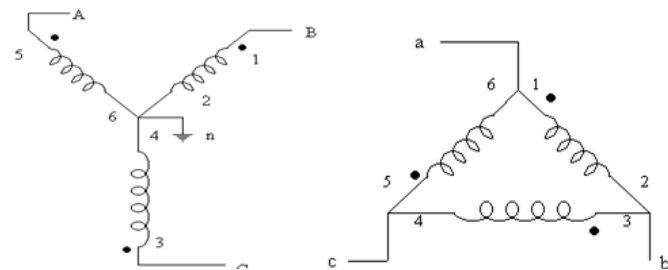


Figura 4.- Esquema de conexión estrella-delta

#### C. Conexión delta- estrella

La conexión delta-estrella, de las más empleadas, se utiliza en los sistemas de potencia para elevar voltajes de generación o de transmisión, en los sistemas de distribución (a 4 hilos) para alimentación de fuerza y alumbrado.

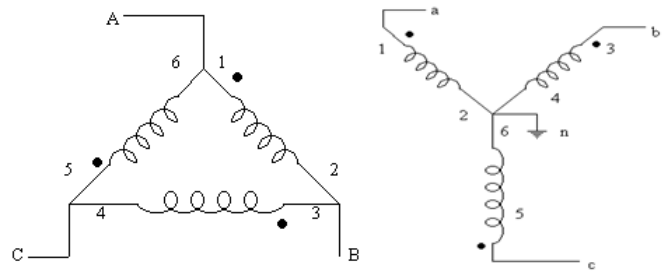


Figura 5.- Esquema de conexión delta-estrella

#### D. Conexión estrella- estrella

Las corrientes en los devanados en estrella son iguales a las corrientes en la línea. Si las tensiones entre línea y neutro están equilibradas y son sinuosidades, el valor eficaz de las tensiones respecto al neutro es igual al producto de  $1/\sqrt{3}$  por el valor eficaz de las tensiones entre línea y línea y existe un desfase de  $30^\circ$  entre las tensiones de línea a línea y de línea a neutro más próxima.

Las tensiones entre línea y línea de los primarios y secundarios correspondientes en un banco estrella-estrella, están casi en concordancia de fase. Por tanto, la conexión en estrella será particularmente adecuada para devanados de alta tensión, en los que el aislamiento es el problema principal, ya que para una tensión de línea determinada las tensiones de fase de la estrella sólo serían iguales al producto  $1/\sqrt{3}$  por las tensiones en el triángulo.

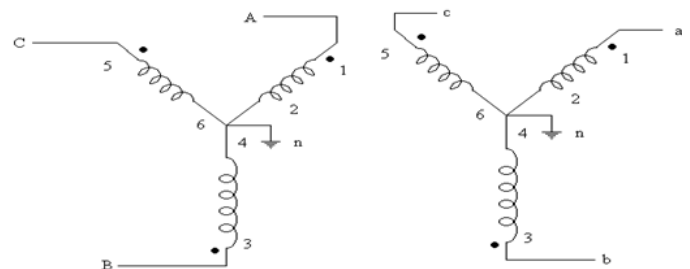


Figura 6.- Esquema de conexión estrella-estrella

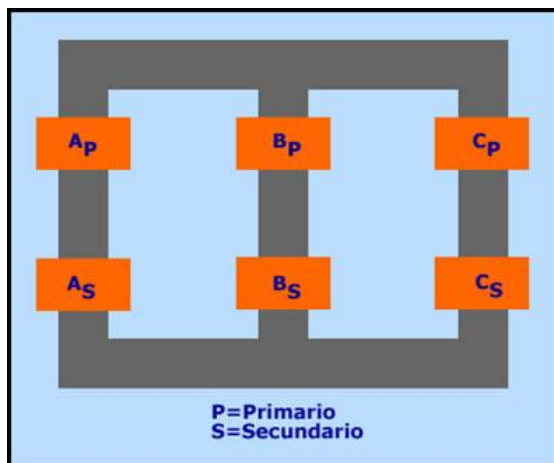
DESFASE (áng. de E.L. con Retraso)	DESIGNACION		DIAG. VECTORIAL	
	n°	L.E.C	V.D.E	ALTA TENSION      BAJA TENSION
0°		Dd 0	A1	
		Yy 0	A2	
		Dz 0	A3	
100°		Dd 6	B1	
		Yy 6	B2	
		Dz 6	B3	
150°		Dy 6	C1	
		Yd 6	C2	
		Yz 6	C3	
-30°		Dy 11	D1	
		Yd 11	D2	
		Yz 11	D3	

Figura 7.- Cuadro de conexiones normales

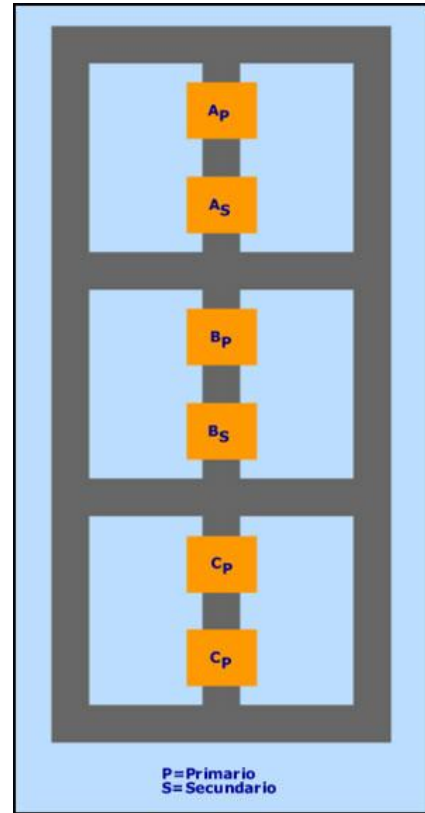
#### IV. NÚCLEOS TRIFÁSICOS

Tenemos que resaltar que existen dos tipos de transformadores trifásicos:

##### 1. Transformador trifásico de tipo núcleo:



##### 2. Transformador trifásico de tipo acorazado:



La diferencia de un transformador trifásico de tipo núcleo y de otro de tipo acorazado, está en que en un transformador trifásico de tipo acorazado las tensiones están menos distorsionadas en las salidas de las fases. Lo cual hace mejor al transformador trifásico de tipo acorazado.

#### V. ACEITES DIELECTRICOS

Los aceites dieléctricos se obtienen a partir de bases nafténicas de bajo punto de fluidez, libres de ceras y sometidas a proceso de refinación de extracción por solventes y de tratamiento con hidrógeno.

##### A. Propiedades de los aceites dieléctricos

Buenas propiedades como aislante, las cuales dependen en su totalidad de la ausencia de impurezas, tales como suciedad, materias extrañas y agua pues aun en pequeñas cantidades pueden disminuir operacionalmente la rigidez dieléctrica. Los aceites dieléctricos son cuidadosamente secados y filtrados, en el momento de su envasado.

Los aceites dieléctricos poseen una alta resistencia a la oxidación, lo que permite funcionar por largos períodos, tanto en transformadores de potencia y de distribución como en interruptores.

Poseen alta estabilidad química y buenas propiedades refrigerantes debido a su baja viscosidad, lo cual le facilita la transferencia del calor generado en el transformador.

### *B. Aceites para transformadores*

El Aceite Aislante cumple múltiples funciones en los transformadores eléctricos: mejora del aislamiento entre componentes del Transformador, homogenización de la temperatura interna y refrigeración, etc.

### *C. Degeneración del aceite aislante*

El Aceite Aislante va degenerándose dentro del Transformador Eléctrico durante el funcionamiento normal del mismo. La degeneración dependerá de muchos factores, como el tipo de transformador, ubicación, carga y temperatura de trabajo, etc.

La Contaminación de los Aceites Aislantes está básicamente relacionada con:

1. **Presencia de humedad en el Aceite (agua):** medida en PPM (partes por millón). El valor Max, según la norma IEC 296 para transformadores, no debe superar 30 PPM, aunque algunos fabricantes pueden recomendar máximos de 10 PPM de agua, para transformadores eléctricos de Alta Tensión >170 KV
2. **Partículas:** la fabricación de los transformadores implica la utilización de papales y celulosa, que pueden desprender pequeñas partes por vibración, etc. Además, los transformadores necesitan un respirador para poder compensar las dilataciones del aceite, siendo foco de entrada de polvo, etc. al interior del transformador, y por lo tanto al aceite.
3. **Oxidación:** Esfuerzos de trabajo, puntos calientes, degeneración de las partículas y suciedad y descompensaciones provocan la generación de gases disueltos y oxidación del Aceite Aislante del transformador.

### *D. Comprobación del aceite aislante*

La toma de muestras para el análisis del Aceite Aislante desde ser realizada de forma segura y cuidadosa, para conseguir resultados reales. Las pruebas básicas que pueden hacerse a los Aceites Aislantes para transformador son:

1. **Test de Rigidez Dieléctrica:** Consiste en la comprobación de la capacidad aislante del aceite del transformador, mediante la extracción de una muestra y el uso de un aparato Comprobador de Rigidez Dieléctrica (conocido vulgarmente como CHISPOMETRO).

2. **Agua disuelta en el Aceite:** Medida en PPM, partes por Millón, y de efecto directo en la pérdida de la Rigidez Dieléctrica de la muestra.
3. **Neutralización/Acidez:** Control de los niveles de ACIDO en el Aceite, como referencia del nivel de Oxidación del mismo.
4. **Turbiedad/Color:** Tanto la presencia de Agua como de otras partículas disueltas produce turbiedad en el Aceite Aislante.
5. **Partículas Disueltas:** contaminación por todo tipo de suciedad.
6. **Gases Disueltos:** El envejecimiento, junto con la degradación de las partículas por la temperatura y posibles descargas internas, generan diferentes gases dentro del transformador y en el aceite. El tipo y cantidad de ellos pueden dar importante información.
7. **Tensión Superficial:** Valor Físico del Aceite, con relación con la viscosidad.

### *E. Mantenimiento del aceite aislante*

Consejos para aumentar la duración de los Aceites Aislantes en los Transformadores. Aunque en algunas ocasiones donde la degradación y contaminación del Aceite haga más cara su regeneración que su sustitución, vamos a dar una serie de consejos que eviten llegar a esa situación:

- Equilibrar adecuadamente los Transformadores logrará que el aceite cubra la totalidad de las partes del interior de los mismos.
- Colocar filtros adecuados en los respiradores de los Transformadores, de forma que evite la entrada de la mayor cantidad posible de humedad, polvo y otras partículas.
- Comprobar el cierre de tapas, pasa cables, mirilla, etc., para evitar tanto el acceso de suciedad como la pérdida de aceite.
- Realizar pruebas, test y/o análisis periódicos para poder tomar acciones de mantenimiento antes de que, la excesiva degradación del aceite lo haga irrecuperable e incluso dañe de forma grave el interior del Transformador.
- El uso de Equipos de Purificación y Regeneración de Aceite Aislante permite devolver las características funcionales mínimas para continuar usándolo. Este tratamiento debe realizarse antes de que la contaminación del Aceite provoque depósitos en el fondo del Transformador.

## VI. REFRIGERACIÓN DE TRANSFORMADORES

El calor producido por las pérdidas se transmite a través de un medio al exterior, este medio puede ser aire o bien líquido. La transmisión de calor se hace por un medio en forma más o menos eficiente, dependiendo de los siguientes valores:

-La masa volumétrica.

- El coeficiente de dilatación térmica.
- La viscosidad.
- El calor específico.
- La conductividad térmica.

Los transformadores están por lo general enfriados por aire o aceite capaz de mantener una temperatura de operación suficiente baja y prevenir “puntos calientes” en cualquier parte del transformador.

El aceite se considera uno de los mejores medios de refrigeración que tiene además buenas propiedades dieléctricas y que cumple con las siguientes funciones:

Actúa como aislante eléctrico.

Actúa como refrigerante.

Protege a los aisladores sólidos contra la humedad y el aire. La transferencia de calor en un transformador son las siguientes:

- 1) Convección.
- 2) Radiación.
- 3) Conducción.

#### CONVECCION

La transferencia de calor por convección se puede hacer en dos formas:

- a) Por convección natural.
- b) Por convección forzada.

#### CONDUCCION

Es un proceso lento por el cual se transmite el calor a través de una sustancia por actividad molecular. La capacidad que tiene una sustancia para conducir calor se mide por su “conductividad térmica”.

#### RADIACION

Es la emisión o absorción de ondas electromagnéticas que se desplazan a la velocidad de la luz representan en temperaturas elevadas un mecanismo de pérdidas de calor. En el caso de los transformadores, la transferencia de calor a través del tanque y los tubos radiadores hacia la atmósfera es por radiación.

El enfriamiento de los transformadores se clasifica en los siguientes grupos:

#### TIPO OA

Sumergido en aceite, con enfriamiento natural. Este es el enfriamiento más comúnmente usado y el que frecuentemente resulta el más económico y adaptable a la generalidad de las aplicaciones. En estos transformadores, el aceite aislante circula por convección natural dentro de un tanque con paredes lisas, corrugadas o bien previstos de enfriadores tubulares o radiadores separables.

#### TIPO OA/FA

Sumergido en aceite con enfriamiento propio y con enfriamiento de aire forzado.

Este tipo de transformadores es básicamente una unidad OA a la cual se le han agregado ventiladores para aumentar la disipación del calor en las superficies de enfriamiento y por lo tanto, aumentar los KVA de salida.

#### TIPO OA/FOA/FOA

Sumergido en aceite con enfriamiento propio, con enfriamiento de aceite forzado-aire forzado, con enfriamiento aceite forzado-aire forzado.

El régimen del transformador tipo OA, sumergido en aceite puede ser aumentado por el empleo combinado de bombas y ventiladores. En la construcción se usan los radiadores desprendibles normales con la adición de ventiladores montados sobre dichos radiadores y bombas de aceite conectados a los cabezales de los radiadores.

El aumento de capacidad se hace en dos pasos: en el primero se usan la mitad de los radiadores y la mitad de las bombas para lograr un aumento de 1.333 veces sobre diseño OA; en el segundo se hace trabajar a la totalidad de los radiadores y bombas con lo que se consigue un aumento de 1.667 veces el régimen OA.

#### TIPO FOA

Sumergidos en aceite, con enfriamiento por aceite forzado con enfriadores de aire forzado.

El aceite de estos transformadores es enfriado al hacerlo pasar por cambiadores de calor o radiadores de aire y aceite colocados fuera del tanque. Su diseño está destinado a usarse únicamente con los ventiladores y las bombas de aceite trabajando continuamente.

#### TIPO OW

Sumergidos en aceite, con enfriamiento por agua. Este tipo de transformador está equipado con un cambiador de calor tubular colocado fuera del tanque, el agua de enfriamiento circula en el interior de los tubos y se drena por gravedad o

por medio de una bomba independiente. El aceite fluye, estando en contacto con la superficie exterior de los tubos.

#### TIPO FOW

Sumergido en aceite, con enfriamiento de aceite forzado con enfriadores de agua forzada.

El transformador es prácticamente igual que el FOA, excepto que el cambiador de calor es del modelo agua-aceite y por lo tanto el enfriamiento del aceite se hace por medio de agua sin tener ventiladores.

#### TIPO AA

Tipo seco, con enfriamiento propio. La característica primordial es que no contienen aceite u otro líquido para efectuar las funciones de aislamiento y enfriamiento, y es el aire el único medio aislante que rodea el núcleo y las bobinas menos de 15KV y hasta 2 000 KVA.

#### TIPO AFA

Tipo seco, con enfriamiento por aire forzado. Para aumentar la potencia del transformador AA, se usa el enfriamiento con aire forzado. El diseño comprende un ventilador que empuja el aire en un ducto colocado en la parte inferior del transformador.

#### TIPO AA/AFA

Tipo sedo, con enfriamiento natural con enfriamiento por aire forzado.

La denominación de estos transformadores indica que tienen dos régimen, uno por enfriamiento natural y el otro contando con la circulación forzada por medio de ventiladores, cuyo control es automático y opera mediante un relevador térmico.

TABLA . Descripción de los sistemas de refrigeración típicos de los transformadores empleados.

Denominación*	Función
ONAN (Oil Natural circulation Air Natural circulation)	Refrigeración mediante circulación natural del aceite y del aire en los radiadores.
ONAF (Oil Natural circulation Air Forced circulation)	Refrigeración mediante circulación natural del aceite y circulación forzada de aire a través de los radiadores.
OFAF (Oil Forced circulation Air Forced circulation)	Refrigeración mediante circulación forzada del aceite (bombas de aceite hacia los radiadores) y circulación forzada de aire a través de los radiadores.
ODAF (Oil forced circulation Directed Air Forced)	Circulación forzada y dirigida del aceite (bombas de aceite hacia los radiadores y elementos de direccionamiento en el interior del transformador hacia los canales de aceite) y circulación forzada de aire a través de los radiadores.

\* En el caso de que un transformador pueda funcionar con circulación natural o forzada debe designarse con los dos códigos separados por un trazo junto con las potencias correspondientes (ONAN/ONAF 300/500 MVA).

## VII. RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

Las tres fases de cada bobinado tanto del primario como del secundario pueden ser conectadas entre sí, en estrella, triángulo y zigzag, dando lugar a diferentes clases de transformadores.

En un transformador trifásico se conoce con el nombre de relación de transformador compuesta al cociente que resulta de dividir los valores de las tensiones de las líneas primarias y secundarias cuando el transformador trabaja en vacío.

$$mc = V1/V2$$

Recibe el nombre de transformación de un transformador el valor del cociente que resulta de dividir los números de espiras de los bobinados primarios y secundarios.

$$m = N1/N2$$

#### Transformador triángulo-triángulo, ( Dd.)

En esta clase de transformadores, el bobinado primario y secundario están conectados en triángulo, resultando las tensiones de línea y de fase iguales.

$$mc = V1/V2 = E1/E2 = m$$

expresión que indica que  $mc = m$ .

#### Transformador estrella-estrella, ( Yy )

En esta clase de transformadores, las tres fases de ambos bobinados están conectados en estrella, siendo la tensión de línea 3 veces mayor que la tensión de fase.

$$mc = V1 / V2 = \sqrt{3} * E1 / \sqrt{3} * E2 = m$$

expresión que indica que  $mc = m$ .

#### Transformador triángulo- estrella, ( Dy ):

En esta clase de transformadores, las tres fases del bobinado primario están conectadas en triángulo, mientras que las del bobinado secundario lo están en estrella.

$$mc = V1/V2 = E1 / E2 * \sqrt{3} = m / \sqrt{3}$$

expresión que se indica que la relación  $mc$  es  $\sqrt{3}$  menor que la relación  $m$ .

#### Transformador estrella- triángulo, ( Yd )



En esta clase de transformadores las tres fases del bobinado primario están conectados en estrella y las del secundario en triángulo.

$$m_c = V_1/V_2 = E_1 \cdot \sqrt{3} / E_2 = m \cdot \sqrt{3}$$

expresión que indica que la relación de transformación  $m_c$  es  $\sqrt{3}$  veces mayor que la relación de transformación  $m$ .

### Transformador estrella - zig- zag, ( Yz )

Se consigue la conexión zigzag descomponiendo cada fase del bobinado secundario en dos mitades, las cuales se colocan en columnas sucesivas del núcleo magnético y arrollada en sentido inverso y conectado los finales en estrella.

$$m_c = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_1}{\sqrt{3} \cdot E_2} = \frac{2 \cdot m}{1} = 1.15 \cdot m ; 0.86 \cdot \frac{V_1}{V_2}$$

$$V_2 \sqrt{3} \cdot E_2 \sqrt{3} \cdot E_2 \sqrt{3} \cdot V_2$$

## VIII. CONCLUSIONES

Al concluir el presente ensayo se pudieron obtener varios resultados los cuales nos han servido para tener en cuenta varios aspectos al momento de elegir un transformador o un tipo de conexión de acuerdo a la aplicación en la que se vaya a utilizar el elemento, se pudo también observar los diferentes tipos de núcleo con el que nos podemos encontrar en el medio, a más de conocer las diferentes características de los aceites dieléctricos utilizados en los transformadores de alta potencia.

Se pudo observar que los transformadores trifásicos presentan un grupo amplio de conexiones, las cuales presentan sus ventajas y desventajas, con lo que es decisión ya personal el tipo de conexión a utilizar, a más de saber las precauciones que se deben tener con cada una de estas conexiones.

Todos estos conocimientos adquiridos son de gran importancia ya que los podremos poner en práctica en algún momento y saber elegir de manera eficiente los elementos a utilizar.

## REFERENCIAS

- [1] Página web: <http://avaluos1.blogspot.com/2008/01/aceites-aislantes-para-transformadores.html>
- [2] Referencias bibliográficas: MONTILLA, Alexander, "Maquinas Eléctricas"  
MORA, Jesús, "Maquinas Eléctricas", quinta edición  
A.E.FitzGerald, "Teoría y análisis de las Maquina Eléctricas"
- [3] Página web: [www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448141784.pdf](http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448141784.pdf)
- [4] Página web:  
<http://www.mitecnologico.com/iem/Main/TiposDeEnfriamientoEnTransformadores>
- [5] Página web:

<http://www.juntadeandalucia.es/averroes/~41001719/electricos/2fp2/t2fp205.html>

### BIOGRAFÍA



Nombre: Andrés Francisco Murillo Peñafiel  
Email: and1ec@hotmail.com  
Carrera: Ingeniería Electrónica  
Lugar de estudio: Universidad Politécnica Salesiana  
Títulos: Bachiller Técnico en Instalaciones, Equipos y Maquinas Eléctricas.  
Residencia: Cuenca-Ecuador