

Manual de Contenido
del Participante

Transformadores



Propósito y Objetivos de este Manual

Este manual tendrá como propósito posibilitar el desarrollo de los conocimientos técnicos básicos requeridos sobre transformadores.

Los objetivos de este manual se orientan al cumplimiento de los siguientes puntos:



Explicar los principios de funcionamiento.



Identificar los distintos tipos de transformadores.



Diferenciar los distintos componentes de un transformador.



Describir las fallas y mantenimiento.

Es importante comprender las consecuencias que el desconocimiento de los conceptos y principios explicados en este manual puede ocasionar en la seguridad y calidad del producto final.

Cómo Utilizar este Manual

Este manual detalla los conceptos básicos relacionados con el funcionamiento de los transformadores.

En el manual Ud. podrá encontrar información detallada sobre los transformadores, sus características principales, aspectos relevantes de su funcionamiento, posibles fallas y acciones de mantenimiento a llevar a cabo. Contará, asimismo, con actividades para afianzar todos los conocimientos desarrollados a lo largo del manual.

	CAPÍTULO 1 Introducción	5		CAPÍTULO 7 Tipos de Transformadores	66
	CAPÍTULO 2 Dispositivos de Protección	16		CAPÍTULO 8 Análisis de Circuitos	85
	CAPÍTULO 3 Funcionamiento	28		CAPÍTULO 9 Mantenimiento	94
	CAPÍTULO 4 Pérdidas	33		CAPÍTULO 10 Fallas	102
	CAPÍTULO 5 Parámetros Principales	42		ANEXO Conceptos Generales Simbología	115
	CAPÍTULO 6 Características Principales	58			

El manual contiene pequeñas figuras que se repiten en todos los capítulos y que son una forma de organización de la información para hacer más fácil y dinámica la lectura. Estas figuras se denominan íconos.

A continuación hay una descripción de la utilización de cada ícono, es decir en qué oportunidad aparecen:



GLOSARIO

Explica términos y siglas.



RECUERDE

Refuerza un concepto ya mencionado en el texto del manual.



ANEXO

Profundiza conceptos.



MANTENIMIENTO

Resalta procedimientos necesarios de mantenimiento.



PREGUNTAS

Presenta preguntas disparadoras.



ATENCIÓN

Destaca conceptos importantes.



EJEMPLO

Ilustra con situaciones reales los temas tratados.



ACTIVIDAD

Señala el comienzo de un ejercicio que le permitirá reforzar lo aprendido.



EXAMEN FINAL

Señala el comienzo de la evaluación final.



FIN DE CAPÍTULO

Señala la finalización del capítulo.



FIN DE MANUAL

Señala la finalización del manual.

Introducción

TEMAS DEL CAPÍTULO 1

1.1 Usos del Transformador	6
1.2 Leyes Físicas para los Transformadores	8
1.3 Partes del Transformador	9

Este capítulo introduce los conceptos básicos de transformadores.



1.1 Usos del Transformador

¡ATENCIÓN!



En el siguiente manual se presentan características generales de elementos eléctricos y electrónicos. Sin embargo, al momento de aplicarlos, se deben tomar en cuenta las especificaciones y aplicaciones recomendadas por ingeniería, el fabricante y la aplicación de las reglas de seguridad.



El **transformador** es una de las máquinas eléctricas más utilizadas, aplicadas ampliamente para transmitir la energía necesaria en el lugar necesario. Se usa también para reducir voltaje para fuentes de alimentación de equipos electrónicos, acopladores de impedancias en sistemas de audio, producción de alto voltaje, alta frecuencia, etc.

¿Por qué es importante conocer acerca de los transformadores?

Prácticamente no hay equipo o maquinaria eléctrica o electrónica que no cuente con al menos un transformador. Así, el conocimiento claro de las bases de operación y de su funcionamiento nos facilitarán el uso de estos equipos que son necesarios para el suministro de energía en la industria.

¿Cuál es la principal aplicación de los transformadores?

La principal aplicación del transformador es la transmisión de energía eléctrica entre el lugar de producción (en plantas generadoras de energía) y los lugares de su consumo (lugares de población, industrias, etc.) y así poder realizar su distribución en una forma económica y eficiente.

GLOSARIO



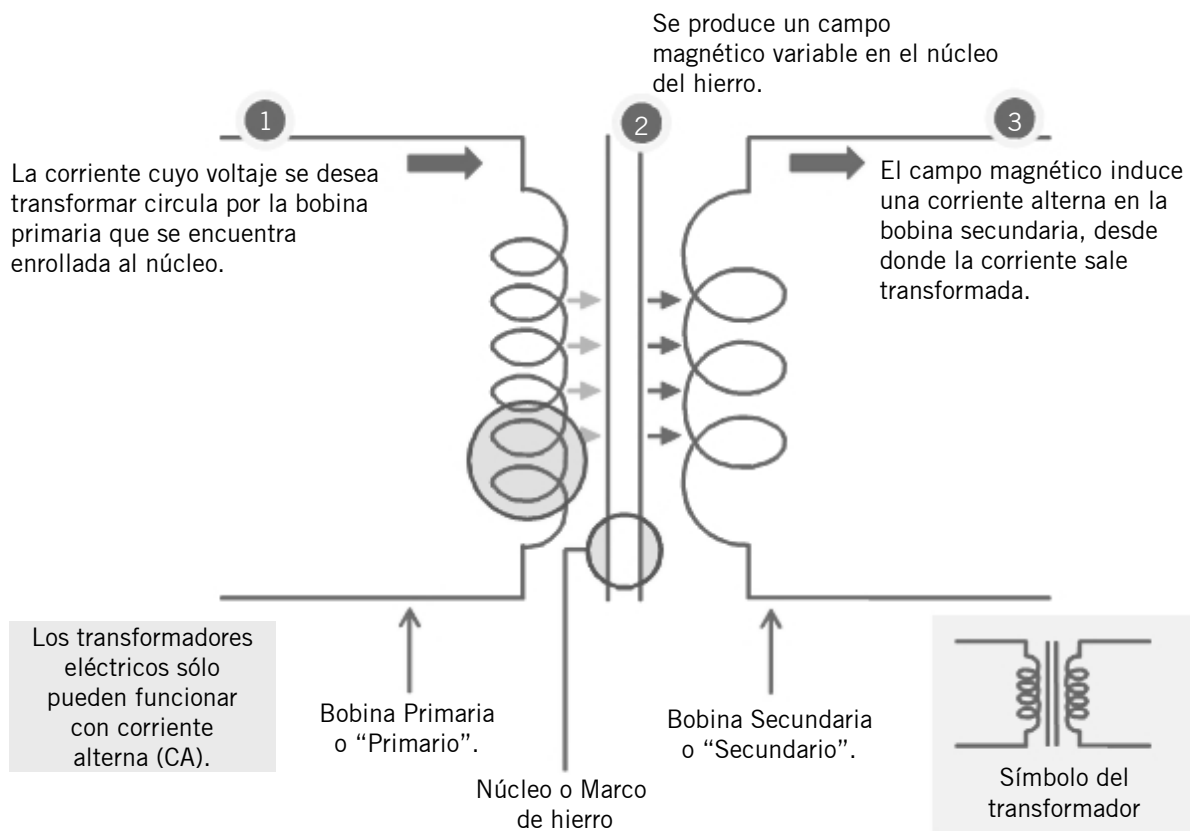
Transformador: Dispositivo estático que permite aumentar o disminuir el voltaje de una corriente alterna.

¿Cómo está formado un transformador?

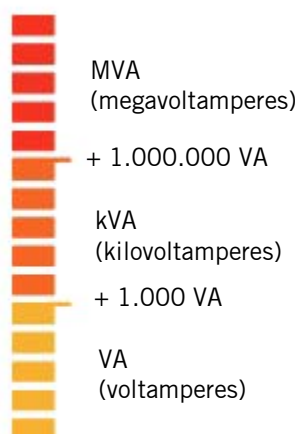
Está formado por dos bobinas enrolladas entorno a un núcleo o marco de hierro. Por la bobina, llamada primario, circula la corriente cuyo voltaje se desea transformar, produciendo un campo magnético variable en el núcleo del hierro. Esto induce una corriente alterna en la otra bobina, llamada secundario, desde donde la corriente sale transformada.

Si el número de espiras del primario es menor que el del secundario, el voltaje de la corriente aumenta, mientras que, si es superior, el voltaje disminuye. **Los transformadores eléctricos sólo pueden funcionar con corriente alterna (CA).**

¿Cómo funciona un transformador?

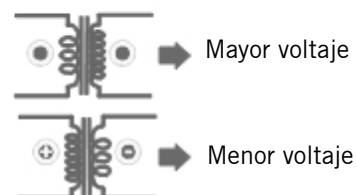


Capacidad de los transformadores



Espiras

La corriente recorre las espiras del transformador; así, el número de espiras en cada bobina determina el voltaje final: si las espiras del primario es menor que el del secundario, el voltaje de la corriente aumenta, mientras que, si es superior, el voltaje disminuye.



1.2 Leyes Físicas para los Transformadores



Es importante conocer el principio de funcionamiento del transformador. Las bases de operación del transformador se aplican a numerosas situaciones que relacionan variables eléctricas.

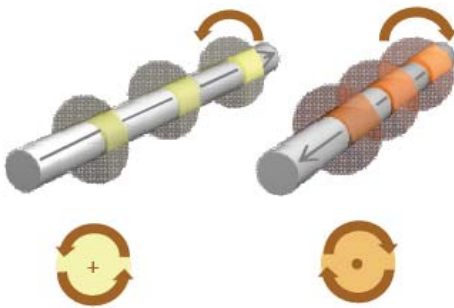
El transformador es una máquina eléctrica estática, es decir, que no tiene movimiento. Su principio de operación se basa en 2 leyes físicas fundamentales:

- La ley de **Oersted-Ampere**.
- La ley de inducción electromagnética de **Faraday**.

MANTENIMIENTO



Conocer sus fundamentos permitirá formar un criterio para tomar decisiones en situaciones particulares de mantenimiento.



LEY DE OERSTED-AMPERE

La ley de Oersted-Ampere establece que un conductor que lleva una corriente eléctrica produce un campo magnético alrededor de él. De esta forma se relaciona una cualidad eléctrica (corriente) con una magnética (campo magnético).

LEY DE INDUCCIÓN DE FARADAY

La ley de inducción electromagnética de Faraday es uno de los principios físicos más utilizados. Permite entender una gran cantidad de fenómenos relacionados con la electricidad y la operación de las máquinas eléctricas. La ley de la inducción electromagnética de Faraday dice que si se tiene un conductor en un campo magnético variable, éste produce un voltaje.



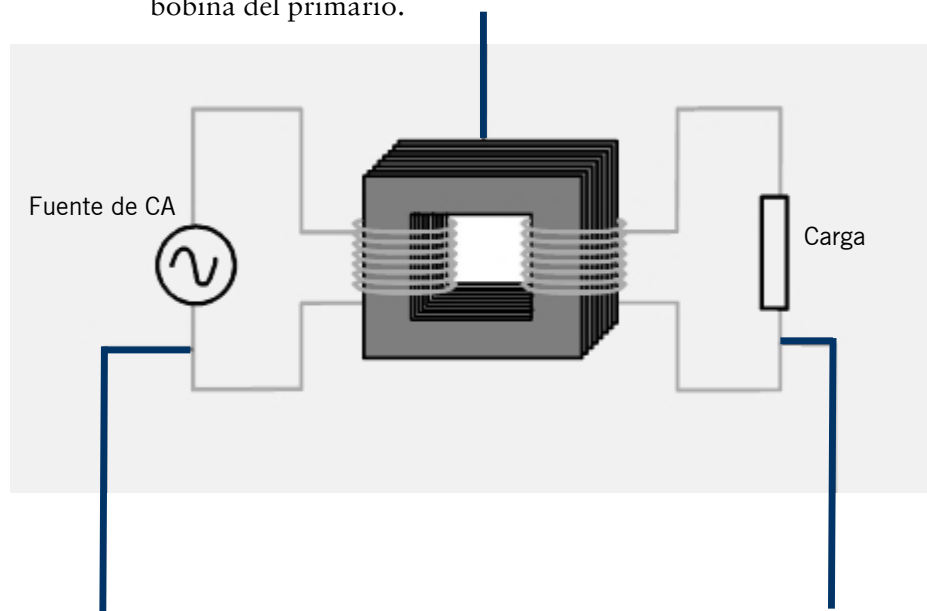
1.3 Partes del Transformador

El transformador consiste básicamente en dos o más bobinas (devanados) en torno a un núcleo de hierro laminado común, de modo tal que el acoplamiento entre las bobinas se acerca a la unidad.



Núcleo

Son laminaciones de material ferromagnético que enlaza las bobinas del primario y del secundario a través del campo magnético generado por la bobina del primario.



Bobina o devanado primario

Es el que recibe el suministro de corriente alterna y es en donde se determina el sentido de flujo de energía debido a que es la entrada del transformador.

Bobina o devanado secundario

Es donde se induce el voltaje y se conecta a la carga, así, el sentido de flujo de energía es la salida del transformador.

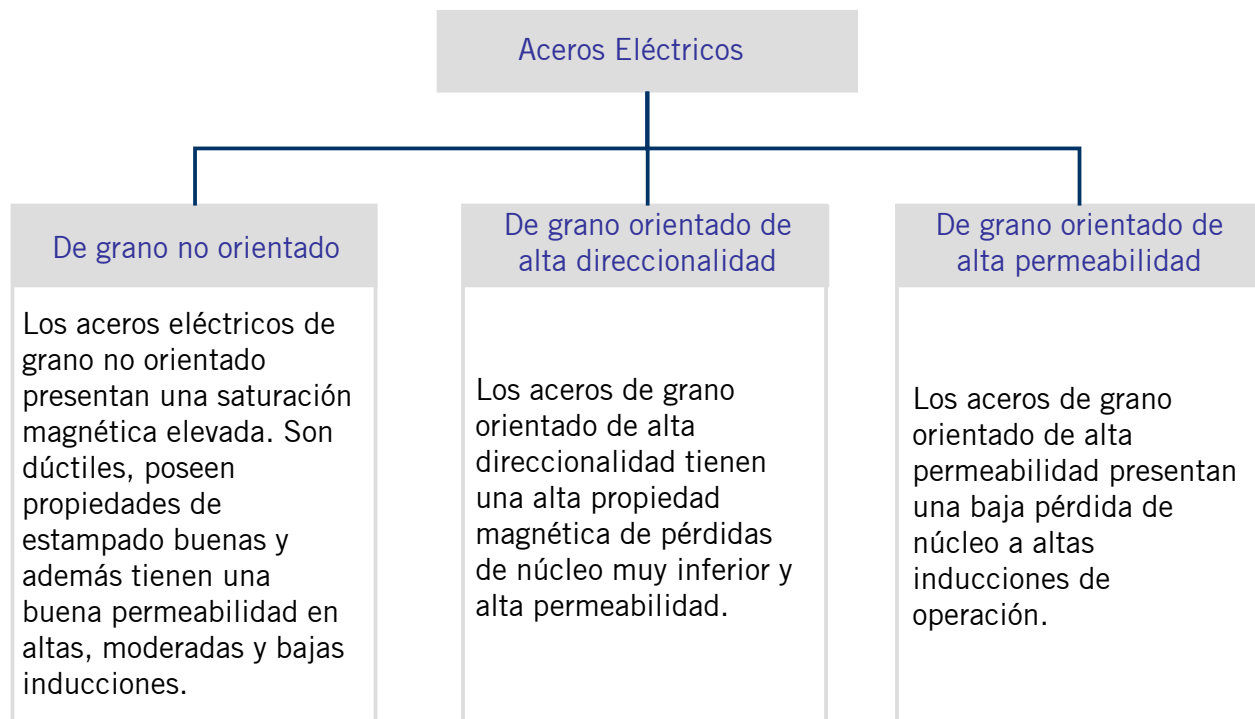
Clasificación de los aceros utilizados en el núcleo

Tabla 1. Clasificación de aceros eléctricos que se usan en la actualidad						
CLASE	CONT. NOM. (SILICIO + ALUMINIO) %	DENSIDAD PREVISTA g/cm ³	ESPESOR (mm)	Pérdidas máx. en el núcleo (W/kg)		RESISTIVIDAD μΩ * cm
				15 kg	17 kg	
Acero para laminación						
Al carbón	0	7.85	0.6	9.05	--	16
ASTM726 (AISI 2-S)						
Aceros eléctricos de grano no orientado						
AISI M-50	0.7	7.85	0.6	8.65	--	20
AISI M-47	1.05	7.8	0.47	7.98	--	23
AISI M-45	1.85	7.75	0.47	6.71	--	35
AISI M-43	2.35	7.7	0.47	5.06	--	39
AISI M-36	2.65	7.7	0.47	4.51	--	49
AISI M-27	2.8	7.7	0.47	4.12	--	49
AISI M-22	3.2	7.65	0.47	4.08	--	52
AISI M-19	3.3	7.65	0.47	3.83	--	52
AISI M-15	3.5	7.65	0.47	3.7	--	57
Aceros eléctricos de grano orientado de alta direccionalidad						
AISI M-6	3.15	7.65	0.35	1.46	2.07	48
AISI M-5	3.15	7.65	0.30	1.28	1.83	48
AISI M-4	3.15	7.65	0.28	1.17	1.68	48
AISI M-3	3.15	7.65	0.25	1.08	1.63	48
Aceros eléctricos de grano orientado de alta permeabilidad						
HI-B	2.9 - 3.15	7.65	0.30	1.04	1.54	45

Aceros

Las características que tiene el acero para laminación son:

- Se le agrega fósforo y manganeso para aumentar la resistividad.
- Se somete a un proceso especial para el crecimiento de grano al recocer. Usualmente es recocido por el fabricante.

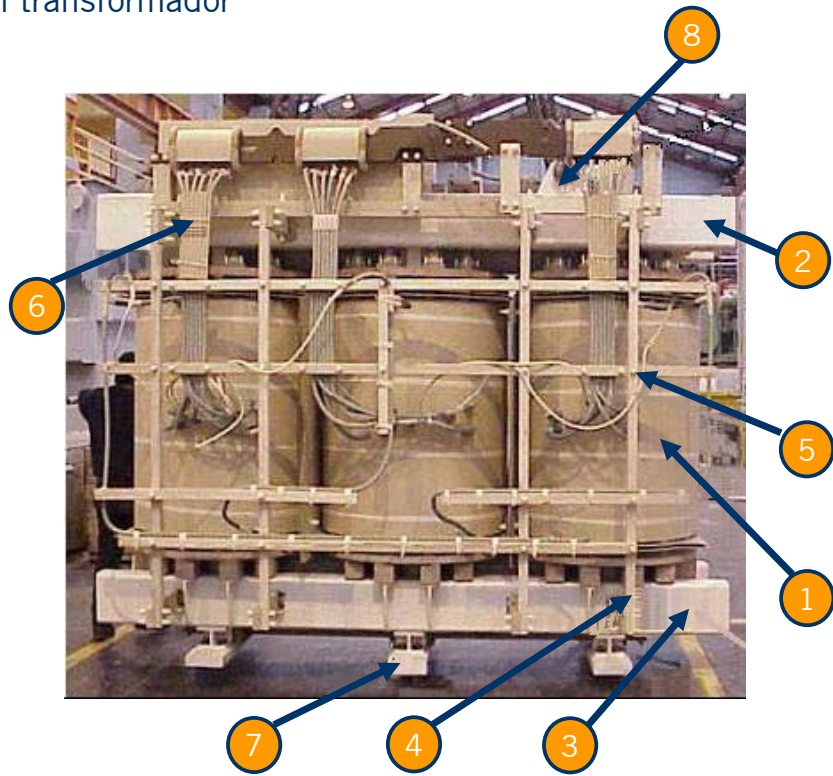


Principales tipos de transformadores y los aceros que se utilizan para la elaboración de su núcleo

TIPO	ESPESOR (mm)	MATERIAL
DISTRIBUCIÓN	0.27	M-3, M-4
	0.30	M-5
	0.35	M-6
POTENICA	0.30	M-5
	0.35	M-6
REGULADOR DE VOLTAJE	0.30	M-5
	0.35	M-15
	0.63	M-22
TRANSFORMADORES DE SOLDADORAS	0.30	M-5
	0.35	M-6
	0.36	M-43, M-36, M-27

Componentes internos de un transformador

1	Conjunto o paquetes de bobinas
2	Herrajes superiores
3	Herrajes inferiores
4	Soportes de madera de haya
5	Líneas de cables de alta tensión
6	Líneas de cables de regulación tensión S/N. Líneas de cables de baja tensión
7	Bases para izar la parte viva.
8	Orejas para izar la parte viva.



Conjunto o paquete de bobinas

Están compuestos generalmente por alambre de cobre barnizado y, en su caso, cuando son transformadores de gran tamaño, por pletinas de cobre; aquí es por donde se conduce la energía eléctrica y donde se genera el magnetismo que después es, de nueva cuenta, transformado a energía eléctrica.

Herrajes superiores e inferiores

Son estructuras de acero que, como su nombre lo indica, van arriba y abajo del conjunto de bobinas, y esto es con la finalidad de sujetar el conjunto de bobinas y, con este mismo herraje, afianzarlo a la caja del transformador.

Soportes de madera de haya

Estos son para cubrir la parte frontal del conjunto de bobinas y son para proteger la parte viva y que no golpee nada contra ellas. En la actualidad se utiliza también triplay de madera contrachapado.

Líneas de cables de alta, baja y regulación de tensión

Estos cables son los que hacen contacto con las boquillas y con las bobinas de la parte viva.

Bases y orejas para izar la parte viva

Esta estructura esta diseñada para afianzar y cargar la parte viva.

Componentes externos de un transformador



1	Boquillas de alta tensión	-
2	Boquillas de baja tensión	También llamados aisladores, estos casquillos sirven como acoplamiento para que entren los cables de alta o baja tensión según sea el caso y a la vez los aísla de algún corto o algún agente extraño que los pueda afectar.
3	Tapa superior	En el transformador es la tapa donde también se localizan las boquillas de alta tensión y sirve para soportar las mismas y además para cubrir la parte viva o generadora de la transformación.
4	Refuerzos principales de la tapa superior	Sirve para sujetar firmemente a la tapa superior y que no se tengan movimientos.
5	Paredes de lados largos	Las paredes, tanto de los lados largos como cortos, son estructuras de acero que sirven para completar la caja del transformador junto con las tapas superior e inferior. Estos lados sirven de igual manera para la protección de la parte viva y sus refuerzos son para asegurar unas con otras las paredes.
6	Refuerzos de pared de lados largos	
7	Paredes de lados cortos	
8	Refuerzos de pared de lados cortos	

9	Base deslizable y ruedas	El transformador cuenta con un sistema mecánico de movimiento para el rápido y fácil movimiento del transformador ya sea para pruebas o mantenimiento o incluso hasta para un cambio.
10	Tanque conservador	Es un segundo tanque de aceite en el transformador (ya que en donde se encuentra la parte viva del transformador también es). Es un depósito de repuesto que cumple la función de conservar las impurezas del aceite, liberar presiones y tener más espacio de alojamiento del aceite cuando se tengan grandes volúmenes. Se cuentan con 2 registros de presiones de aceites que uno es para los TAPs y el otro es para el contenido de aceite de la parte viva.
11	Banco de radiadores	Son los encargados de disipar el calor mediante el fluido (aceite) y con esto aumentar la eficiencia del transformador. El método que utiliza el radiador para enfriar es por el sistema de FOA (Aire Forzado) y es por medio de turbinas que hacen pasar aire para enfriar el aceite.
12	Orejas de izaje	-
13	Intercambiador de voltaje o TAPs	-

ACTIVIDAD 1.

Para finalizar el presente capítulo, le proponemos repasar los componentes externos de un transformador.



Indique en la tabla el número de cada uno de los componentes externos que reconozca en las imágenes.



#	Componente externo
	Refuerzos principales de la tapa superior
	Banco de radiadores
	Orejas para izar el transformador
	Base deslizable y ruedas
	Paredes de lados largos
	Refuerzos de pared de lados largos
	Tanque conservador
	Tapa superior
	Refuerzos de pared de lados cortos
	Intercambiador de voltaje o TAPs
	Boquillas de baja tensión
	Paredes de lados cortos
	Boquilla de alta tensión

¡Felicitaciones!

Usted ha finalizado el capítulo 1. A continuación se desarrollará el capítulo Dispositivos de Protección.

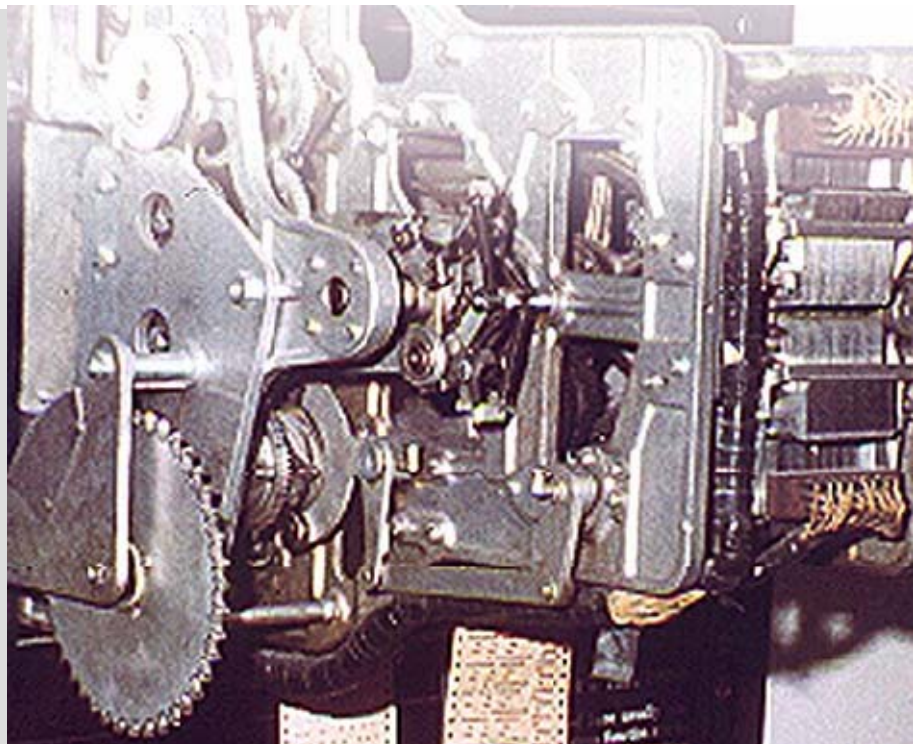


Dispositivos de Protección

TEMAS DEL CAPÍTULO 2

2.1 Dispositivos de Protección Mecánicos y Electromecánicos	17
2.2 Dispositivos de Protección Electrónicos	24

Este capítulo introduce los distintos dispositivos de protección, mecánicos, electromecánicos y electrónicos.



2.1 Dispositivos de Protección Mecánicos y Electromecánicos

Existe una gran cantidad de fallas o anomalías que pueden ocurrir en los transformadores. Éstas pueden ocasionar daños tanto al equipo (transformador) como a personas.

RECUERDE



Un dispositivo de protección de un transformador es un accesorio que se agrega a sus componentes básicos y cuya función es detectar una condición de falla, interrumpir (en ese caso) el suministro de alimentación eléctrica y evitar que se dañe el transformador.

Algunos de estos dispositivos de protección sólo generan una señal de alarma que en ciertos casos producen una acción de interrupción, si después de cierto tiempo se ha mantenido la condición de falla.

- 1 Relevador Buchholz
- 2 Medidor de nivel
- 3 Indicador de temperatura del aceite
- 4 Indicador de temperatura de devanados
- 5 Medidor/Indicador de flujo
- 6 Relevador de presión súbita
- 7 Relevador de sobrepresión
- 8 Dispositivos electrónicos

GLOSARIO



Devanado:

Componente de un circuito eléctrico formado por un alambre aislado que se arrolla en forma de hélice con un paso igual al diámetro del alambre.

1 Relevador Buchholz

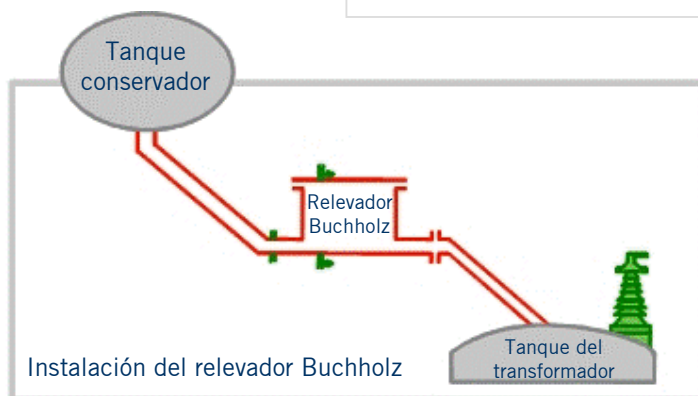
El relevador Buchholz es uno de los dispositivos de protección para transformadores de potencia más importantes. Sólo se instala en transformadores cuya importancia y costo lo justifiquen. Su función es detectar la acumulación de gas producida al presentarse un arco eléctrico o cortocircuito dentro del transformador.

El relevador Buchholz se instala en la tubería que conecta al cuerpo del transformador con su tanque conservador. Este relevador produce una señal de alarma o desconexión, es decir, desenergiza al transformador cuando se detecta producción de gases generados por condiciones anormales a la operación del transformador.

El relevador Buchholz generalmente cuenta con una mirilla de vidrio por donde se puede observar la generación de gases. Además cuenta con válvulas desde donde se pueden tomar muestras de los gases o probar si los gases son inflamables. La acción del relevador Buchholz se basa en el hecho de que cualquier accidente que sobrevenga a un transformador está precedido de una serie de fenómenos, que si bien muchas veces no revisten gravedad o son imperceptibles, a la larga conducen al deterioro del equipo.

MANTENIMIENTO

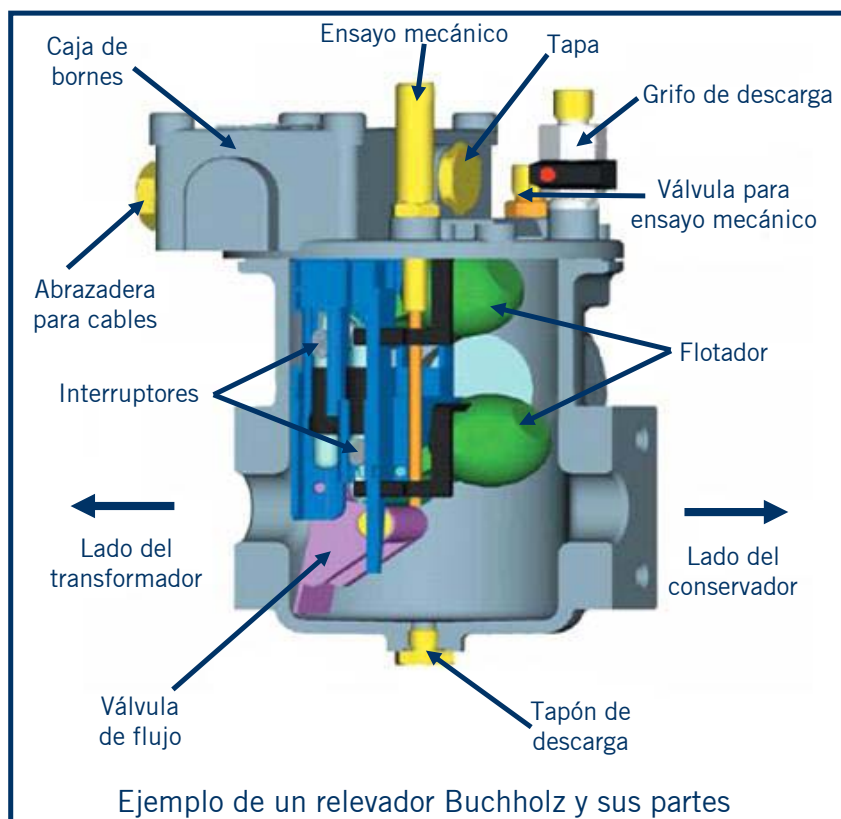
Cuando hay detección de burbujas en el aceite, es necesario atender inmediatamente al transformador para efectuar las pruebas adecuadas y poner fuera de servicio al transformador en caso de requerirse.



Relevador Buchholz



Funcionamiento del relevador Buchholz



El receptáculo, normalmente lleno de aceite, contiene dos flotadores móviles alrededor de ejes fijos. Si a consecuencia de un defecto poco importante, se introducen pequeñas burbujas de gas, éstas se elevan en el tanque principal del transformador y se dirigen hacia el tanque conservador de aceite.

Las burbujas son captadas por el aparato y almacenadas en el receptáculo, donde el nivel de aceite baja progresivamente a medida que las burbujas llenan el espacio superior del receptáculo.

Como consecuencia, el flotador superior se inclina y cuando la cantidad de gas es suficiente, cierra sus contactos que son los que alimentan el circuito de alarma. Si continúa el desprendimiento de gas, el nivel de aceite en el receptáculo baja hasta que los gases alcanzan la tubería que lo lleva hasta el tanque conservador.

Este flujo de aceite encuentra al segundo flotador y lo acciona, lo que provoca el cierre de sus contactos. Estos accionan a su vez el mecanismo de desconexión de los interruptores de los lados de alta y baja tensión del transformador, poniendo a éste fuera de servicio.

Si el defecto se acentúa, el desprendimiento se hace violento y se producen grandes burbujas de tal manera que, a consecuencia del choque, el aceite fluye bruscamente a través de la tubería hacia el tanque conservador.

2 Medidor de nivel



Los transformadores de potencia están normalmente equipados con indicadores visuales de nivel de aceite. En estos mismos indicadores se tienen contactos (para alarma o desconexión) que indican niveles anormales del aceite.

El indicador muestra el nivel del líquido por medio de una aguja en una escala graduada, y la posición de la aguja en la carátula se encuentra directamente acoplada con la posición de un flotador. Cuando el nivel de aceite baja, el flotador cae y produce la rotación de la aguja hacia la indicación LOW (bajo). Cuando se alcanza la LOW, se cierran los contactos que activan el circuito de alarma.

Si bajo esta condición el nivel del aceite aumenta (agregándolo al tanque del transformador) el flotador subirá, sin embargo, el circuito de alarma no abrirá hasta que el indicador avance aproximadamente 10° sobre la marca de bajo nivel.

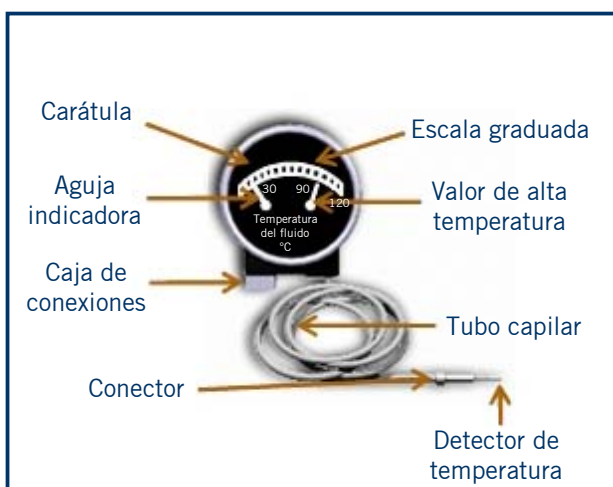
MANTENIMIENTO

En un transformador es muy importante mantener una supervisión cercana del nivel del aceite. Un bajo nivel de aceite puede ocasionar un aumento en la temperatura del transformador, produciendo una alarma o la desconexión del transformador.



2 Medidor de nivel

Este dispositivo indica, mediante una aguja en una escala graduada, la temperatura del aceite en la parte superior del transformador. Cuando pasa de un límite preestablecido, se puede optar por operar los ventiladores o dar una indicación de alarma.



Indicador de temperatura de flujo

El indicador de temperatura de líquido consiste en un detector de temperatura, un tubo capilar con líquido y una unidad indicadora resistente al ambiente. La instalación del detector de temperatura es muy sencilla, ya que normalmente se fija el detector en una base a un lado del transformador. Una variación de la temperatura en el detector cambia el volumen del líquido en el capilar lo cual acciona una bobina de expansión que gira el mecanismo del indicador y a un cierto nivel (alta temperatura) opera el interruptor de alarma o desconexión.

Generalmente el nivel de alarma se fija a 85°C (185 °F) y el nivel de desconexión en 90°C (194 °F). En esta situación, una operación buena del sistema de enfriamiento ejerce un papel fundamental en mantener la temperatura del aceite por debajo de los niveles de alarma y de desconexión. El refrigerante o sistema de enfriamiento puede consistir en aire, gas, aceite mineral o líquido sintético (Libre de PCBs) que son usualmente los más utilizados.

4 Indicador de temperatura de devanados

Durante el proceso de fabricación del transformador se agregan varios indicadores de temperatura que están prácticamente en contacto con los devanados del transformador. Estos generalmente vienen como equipo estándar en transformadores tipo seco e incluyen al menos un interruptor por devanado.

El indicador de temperatura (termostato) está precalibrado a un cierto nivel. Al llegar a este nivel generalmente opera una secuencia de desconexión para proteger al transformador de un deterioro en su aislamiento o un daño mayor.

En algunos casos se tiene un indicador con dos interruptores por devanado, uno calibrado a una temperatura ligeramente menor que el otro. En esta forma se puede tener una señal de alarma antes de operar la desconexión.

En transformadores de potencia en aceite, los interruptores de temperatura, además de ser utilizados para producir señales de alarma y desconexión, se aplican para operar un sistema de enfriamiento adicional que ayude a disminuir la razón de incremento de temperatura bajo condiciones de sobrecargas sostenidas.

El nivel de calibración de los interruptores de temperatura está relacionado con las características (tipo) de aislamiento de los devanados y sus propiedades para soportar temperatura sin deteriorarse.

5 Medidor / Indicador de flujo

El medidor/indicador de flujo es un dispositivo herméticamente sellado que indica el flujo de aceite en un transformador que opera con flujo forzado de aceite. El medidor/indicador se encuentra provisto de interruptores (contactos) para alarma que operan cuando el flujo cae aproximadamente un 50% del normal.



Medidor / Indicador de flujo de aceite

El flujo de aceite, a través del sistema de enfriamiento, ejerce una presión sobre una paleta instalada en una flecha. La paleta se mantiene en su posición mediante un resorte. Cuando hay flujo de aceite la flecha se mueve en contra del resorte, este movimiento es proporcional a la magnitud del flujo de aceite. El movimiento de la flecha es transmitido a la aguja de indicación a través de un acoplamiento magnético. En la aguja de indicación se cuenta con un contacto cuya función es operar la alarma de bajo nivel de flujo de aceite. Cuando el flujo se detiene, el resorte regresa la paleta y produce un regreso de la aguja de indicación hacia la posición de *pump off* (bomba detenida).

6

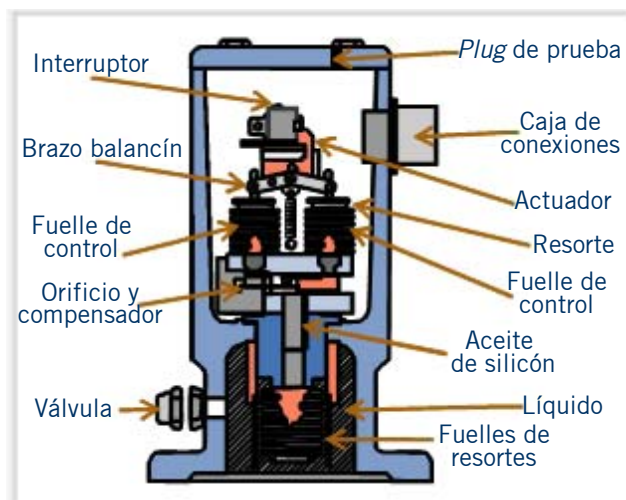
Relevador de presión súbita

El relevador de presión súbita es un dispositivo utilizado en transformadores para detectar cambios bruscos en la presión interna del tanque, las cuales pueden ser provocadas por un arqueo interno.

Una ventaja de este relevador es el hecho de que no es susceptible a disparo (activación) por vibración, impacto (golpe) mecánico o variaciones de presión debido a cambios de temperatura.

Este relevador normalmente está montado en las paredes del transformador. Un incremento en la presión del transformador causa una contracción de los fuelles sensores, así se fuerza una porción de su aceite de silicón dentro de los fuelles de control, produciendo su expansión.

El orificio limita el flujo de aceite dentro de los fuelles, de manera que para cambios de presión largos, variaciones normales de carga o cambios en la temperatura ambiente, los dos fuelles de control se expandirán a la misma velocidad y el relevador no actuará.



Relevador de presión súbita

Sin embargo, para altas velocidades de cambio de presión en el transformador, el orificio causará una velocidad de expansión más lenta en el fuelle izquierdo que en el fuelle derecho de la figura.

De esta forma, si ocurre una falla en el transformador, el incremento de presión producirá una expansión diferente entre los dos fuelles de control, lo que produce una diferencia de esfuerzos mecánicos y de esta manera se dispara el interruptor.

¡ATENCIÓN!

Después que el interruptor de presión actúa, es recomendable que sea identificada la causa del disparo antes de que el transformador sea energizado nuevamente, así como revisar si se produjo daño en el transformador.

Tenga en cuenta, también, que la apertura o cierre de la válvula mientras el relevador está conectado puede causar un disparo en falso del interruptor.

6

Relevador de presión súbita

El relevador de sobrepresión se instala por lo general en la cubierta del transformador, este relevador es del tipo de resorte y además se puede restablecer.



Relevador de sobrepresión

El relevador básicamente se forma de una cubierta protectora, sellos y una alarma visual (dispositivo indicador).

La presión normal de operación del relevador se encuentra indicada en su placa de datos. Si la presión a la que se encuentra el transformador es mayor a 10 psi (0.7 kg/cm^2), cuando la fuerza aplicada por la presión del aceite a los resortes del medidor es mayor que la fuerza de los resortes, se libera un gas o un líquido a través del espacio entre el diafragma y la tapa. Esto hace que el elemento se abra rápidamente y permanezca abierto hasta que sea restablecido manualmente, cuando la presión en el transformador lo permita.

La presión de disparo del relevador está en función de la presión máxima de operación del tanque del transformador, la cual generalmente se indica en la placa del transformador.

De acuerdo a lo estudiado, responda a las siguientes consignas:

- 1 Indique qué dispositivos de protección puede encontrar en un transformador doméstico (220/110V). Justifique su respuesta.

- 2 Si el relevador de Buchholz es tan eficiente en la detección de cortocircuitos, ¿por qué no se encuentra en todos los transformadores industriales?

ACTIVIDAD 2



2.2 Dispositivos de Protección Electrónicos

Existe una gran cantidad de fallas o anomalías que pueden ocurrir en los transformadores. Éstas pueden ocasionar daños tanto al equipo (transformador) como a personas.

Estos dispositivos tienen las siguientes características:

- Son específicamente diseñados para proteger líneas de transmisión, transformadores y motores. Cuentan con terminales de entrada para captar señales de corriente o voltaje. Las señales provienen de transformadores de corriente o voltaje instalados en los dispositivos que forman parte de un sistema eléctrico.
- Cuentan con terminales de salida, las cuales generalmente son conectadas a las bobinas de disparo de los interruptores de potencia o a una alarma o algún sistema de monitoreo.
- Las señales que reciben son procesadas por el dispositivo y se determina si existe una condición anormal o de falla.
- En caso de que exista una condición anormal o de falla, el dispositivo manda a energizar una salida correspondiente a una bobina de disparo o a una alarma. De tal manera que se comporta como un relevador.
- Su operación se realiza en base a un procesador digital, su ajuste se realiza mediante la introducción de parámetros, usando un teclado y un display digital o la conexión a una computadora, y con la correcta selección de las curvas de operación que den los tiempos adecuados para una correcta coordinación de las protecciones.

Existe una gran variedad de marcas para estos dispositivos de protección, que cuentan con alto prestigio y calidad. En la página siguiente se mencionará un ejemplo con el MULTILIN.

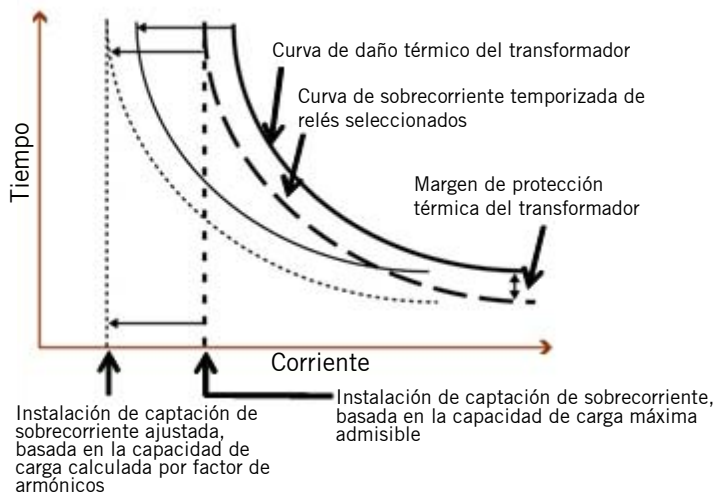
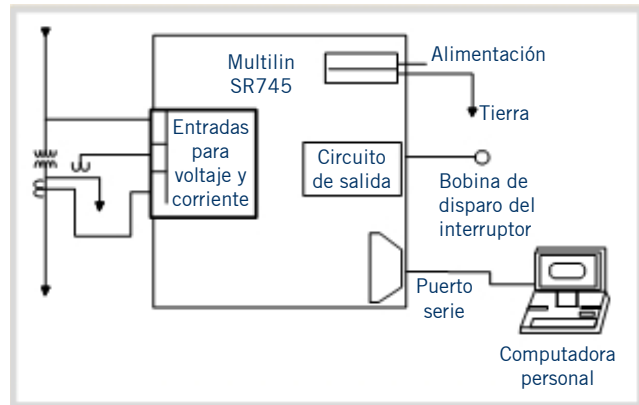
EJEMPLO



Multilin SR745

En la figura se puede observar lo siguiente:

- Las conexiones entre la línea y el MULTILIN mediante transformadores de corriente. Estas sirven para sensar (chechar) la corriente en la línea.
- La conexión entre un circuito de salida y la bobina de disparo de un interruptor.
- Los puntos de alimentación para el MULTILIN.
- El puerto serie para la comunicación entre el MULTILIN y una computadora personal.



PANTALLA GRANDE

Pantalla de cuarenta caracteres que permite visualizar los valores de consigna y los mensajes de valores reales. Los mensajes de diagnóstico aparecen cuando se presenta un obstáculo o una alarma. Después de un periodo de inactividad, la pantalla muestra mensajes predeterminados.

INDICADORES DE ESTADO 745

- Estado 745;
- Estado del transformador;
- Relé de salida.

TECLADO NUMÉRICO

Las teclas numéricas facilitan el ingreso de los valores de consigna. Las teclas de control hacen que sea posible navegar fácilmente por los distintos valores de consigna y estructuras de mensaje de valor reales. La tecla de ayuda proporciona mensajes de ayuda según el contexto.

TECLAS DE VALOR

Las teclas Subir y Bajar sirven para modificar los valores de consigna.

PALANCA DE CONTROL DE EXTRACCIÓN

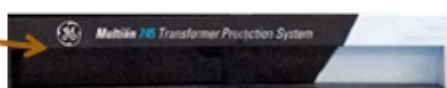
Permite utilizar un alambre para precinto de plomo a fin de evitar que se extraiga sin la autorización correspondiente.

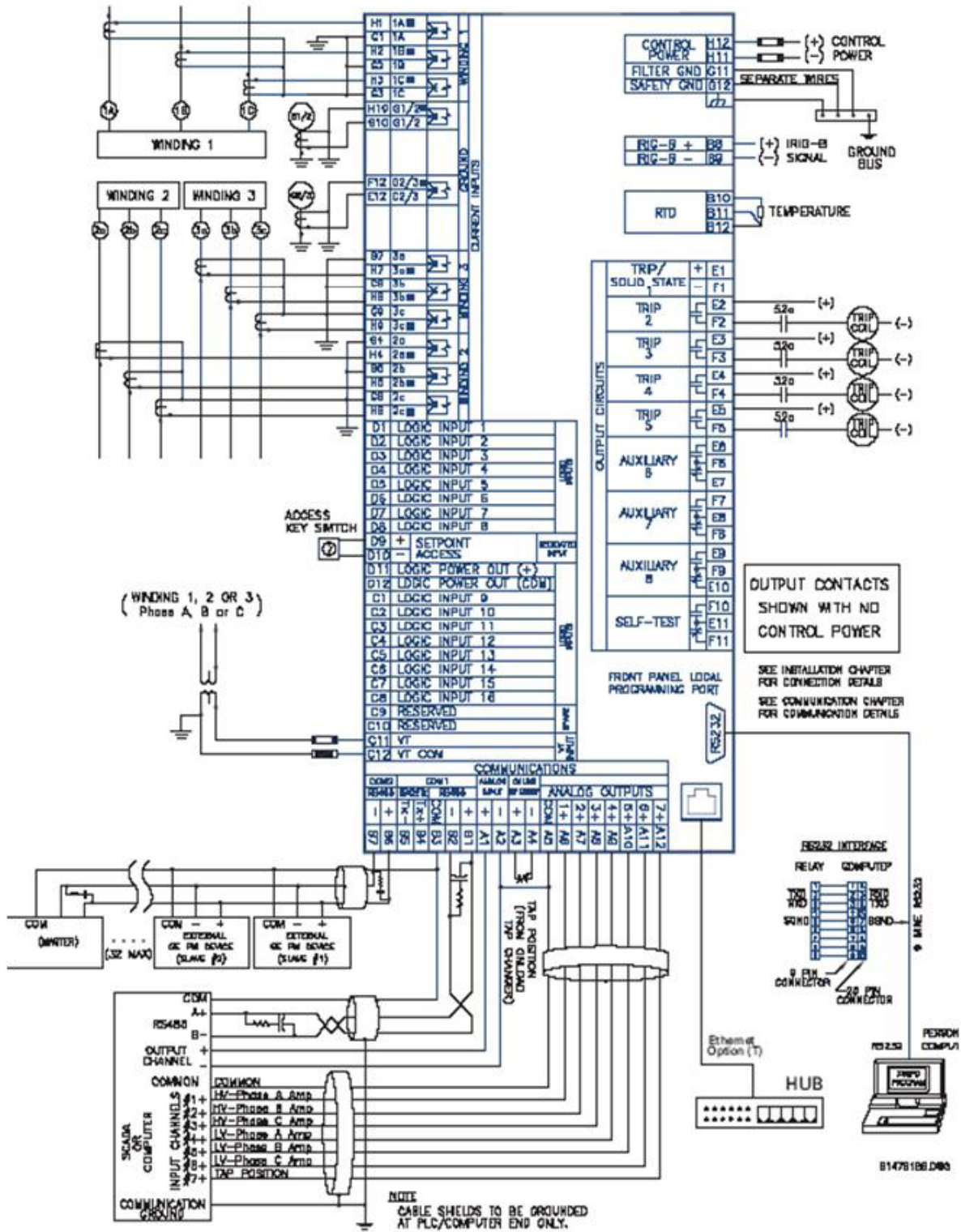


TECLAS DE CONTROL Y PROGRAMACIÓN

Las teclas Menú, Salir, Restaurar, Intro, Subir menú y Bajar menú brindan pleno acceso sin necesidad de utilizar una computadora.

INTERFAZ DEL PUERTO DEL PROGRAMA RS232 permite conectarse a una computadora, 9600 baudios.





+ Ventajas	- Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Rangos muy amplios, para casi cualquier aplicación en un mismo dispositivo. • Las curvas de protección se diseñan de acuerdo a la necesidad. • Todas las conexiones en tablillas. • Operación segura. • Un mismo espacio para todos los dispositivos de control. • Programación de las características de protección según características de carga. • La centralización del equipo de protecciones. • Medición de temperatura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Algunas de las múltiples opciones de este equipo no se usan, lo que se podría interpretar como sobrado. • El costo inicial puede ser mayor al costo inicial de los relevadores de protección convencionales. • Se requiere mayor capacitación del personal de operación y mantenimiento para la calibración y mantenimiento de este equipo. • La normal conducta de rechazo a un equipo innovador.

ACTIVIDAD 3

De acuerdo a lo estudiado, responda a las siguientes consignas:

Enuncie las características principales de los dispositivos mecánicos/electromecánicos y los dispositivos electrónicos en un cuadro comparativo.

Mecánicos / Electromecánicos	Electrónicos

¡Felicitaciones!

Usted ha finalizado el capítulo 2.
A continuación se desarrollará el capítulo *Funcionamiento*.



Funcionamiento

TEMAS DEL CAPÍTULO 3

3.1 Construcción de un transformador	29
3.2 Principio de funcionamiento	30

En este capítulo se verá la construcción y funcionamiento de un transformador.



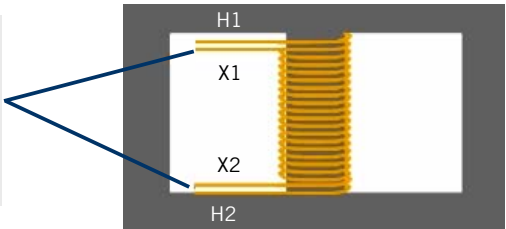
3.1 Construcción de un transformador

En ocasiones, los devanados de los transformadores comerciales no se colocan en piernas o columnas metálicas separadas (como se observa en los diagramas esquemáticos) pues existe un método más eficiente, que reduce la fuga o dispersión de líneas de flujo (magnético). El método consiste en colocar los devanados primario y secundario uno sobre otro tal como se muestra en el gráfico.

¡ATENCIÓN!

Si se enrollan los devanados del transformador en piernas separadas, gran parte del flujo producido por la corriente del primario no puede alcanzar al devanado secundario.

Transformador con los devanados uno sobre otro
 En este caso las terminales H1 y H2 son para el devanado del primario y las terminales del secundario que van a la carga son X1 y X2.



Para la formación de bobinas en los transformadores existen dos métodos: el cilíndrico y el de bobinas planas.

<p>Vista transversal de un transformador con devanados hechos mediante el método cilíndrico</p>	<p>Método cilíndrico</p> <p>Generalmente los devanados se hacen en forma cilíndrica y se colocan uno dentro de otro, como se muestra en la figura. En este método, el devanado de bajo voltaje se coloca junto al núcleo y el de alto voltaje en la parte de afuera o externa. Este arreglo requiere sólo de una capa de aislante de alto voltaje entre ambos devanados.</p>
---	---

<p>Método de bobinas planas</p> <p>En el método de bobinas planas se construyen secciones planas y delgadas llamadas bobinas planas. Estas secciones se colocan entre capas de material aislante.</p>	<p>Vista transversal de un transformador con devanados hechos mediante el método de bobinas planas</p>
--	--

3.2 Principio de funcionamiento

¿Cómo trabaja un transformador?

La energía eléctrica de corriente alterna se introduce por la bobina de entrada —o primaria— del transformador, ahí se convierte en energía magnética. La energía magnética fluye por el núcleo laminado de hierro a la salida o bobina secundaria. En la bobina secundaria se convierte de energía magnética a eléctrica por inducción electromagnética.

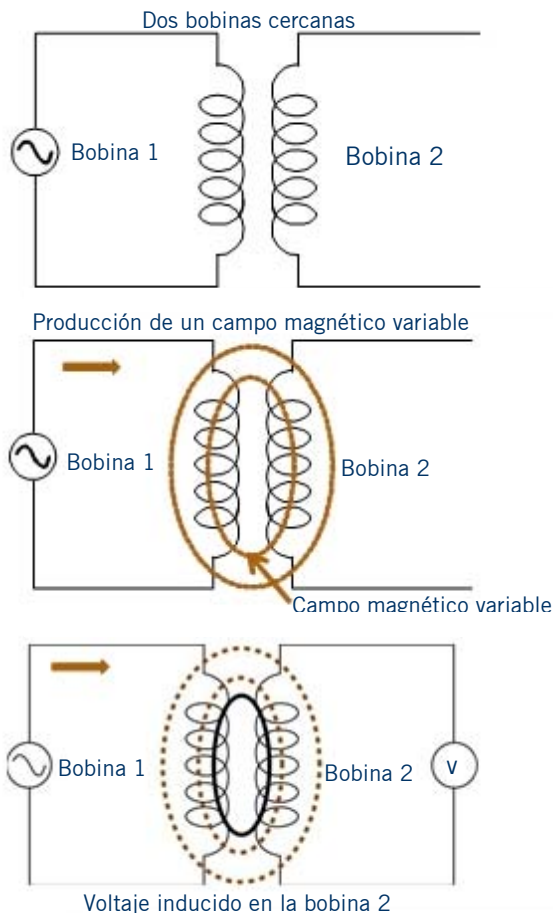
Siempre se pierde algo de energía en el proceso de transformación.

Aumenta voltaje

Disminuye corriente

Reduce voltaje

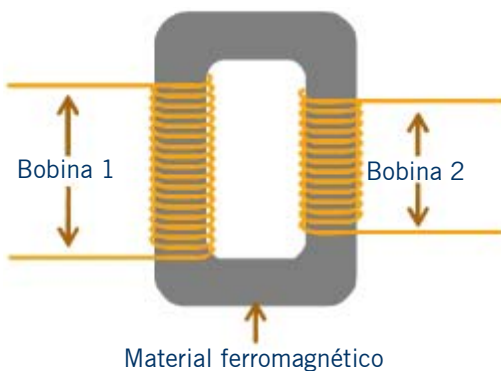
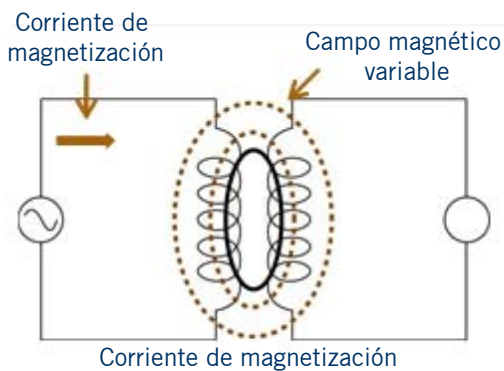
Aumenta corriente



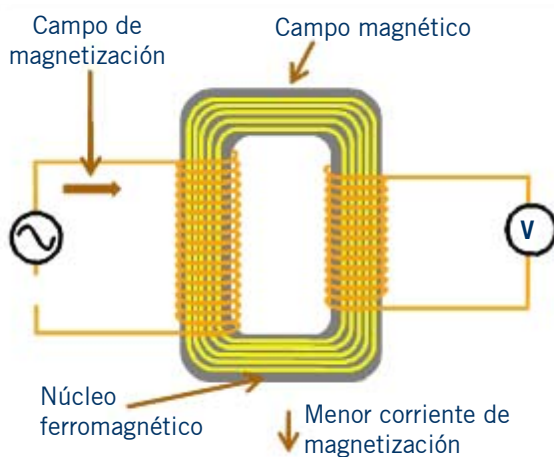
Considere dos bobinas que se encuentran muy cercanas, donde a la bobina 1 se le aplica un voltaje de corriente alterna.

Ésta generará un campo magnético variable.

Si este campo magnético variable interactúa con la bobina 2, en ella se inducirá un voltaje de corriente alterna. Bajo esta condición se tiene un voltaje en la bobina 2, el cual se obtiene sin tener conexión eléctrica entre las bobinas, ya que entre ellas se tiene únicamente un enlace magnético. A este efecto se denomina **inducción**.



Núcleo para producir un campo magnético amplio (robusto)



El núcleo reduce la corriente de magnetización

Si la bobina 2 no tiene carga (su corriente es cero), la corriente en la bobina 1 (corriente de magnetización) es la necesaria para generar el campo magnético.

En el interior de las bobinas se coloca un material ferromagnético para producir un amplio campo magnético que entrelaza ambas bobinas.

Con este arreglo se obtiene una menor corriente de magnetización que cuando no se tiene un núcleo de material ferromagnético. Esto se debe a que el material ferromagnético es mejor conductor (menor reluctancia) del campo magnético que el aire.

RECUERDE

Definimos al **transformador** como una máquina eléctrica estática, sin partes en movimiento, que mediante inducción electromagnética transforma la energía eléctrica en magnética y viceversa.

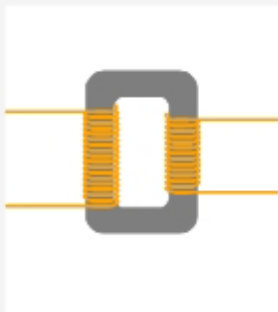


ACTIVIDAD 4



De acuerdo a lo estudiado, responda a las siguientes consignas:

1 Complete los espacios en blanco, aplicando el principio de operación del transformador:



Una bobina que se alimenta con corriente alterna genera _____
 _____ el cual esta principalmente en el núcleo de
 _____.
 Al entrelazarlo con la bobina 2, se inducirá en ella _____
 _____.

2 Enuncie dos ventajas y desventajas de los devanados cilíndricos y planos.

3 ¿Se puede fabricar un transformador sobre un núcleo de un material de altísima reluctancia? Y si utilizamos aire como núcleo, ¿funcionará como transformador?

4 Defina el concepto de “corriente de magnetización”.

¡Felicitaciones!

Usted ha finalizado el capítulo 3.
 A continuación se desarrollará el capítulo *Pérdidas*.



Pérdidas

TEMAS DEL CAPÍTULO 4

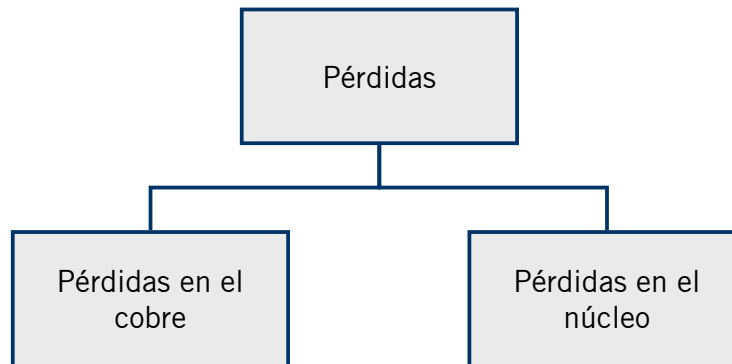
4.1 Pérdidas	34
4.2 Métodos de Enfriamiento	39

En este capítulo veremos las distintas pérdidas en los transformadores y sus efectos.



4.1 Pérdidas

Las pérdidas en los transformadores pueden clasificarse en dos grupos:



a. Pérdidas en el cobre

Se producen por el flujo de corriente a través de la resistencia de los conductores del devanado primario y secundario. Estas pérdidas son menores a medida que se utiliza cable con una mayor área transversal en los devanados, ya que esto disminuye la resistencia de los mismos. Sin embargo, esta práctica incrementa el costo y tamaño del transformador. También la resistencia de los devanados aumenta con la temperatura, así, operar un transformador a mayor temperatura no sólo deteriora el aislamiento de los devanados, también incrementa sus pérdidas.

Menor área transversal

Mayor pérdida

Mayor área transversal

Mayor tamaño
Mayor costo

Mayor temperatura

Mayor deterioro
Mayor costo

b. Pérdidas en el núcleo

1 Pérdidas por corrientes parásitas (corrientes de Eddy)

2 Pérdidas por histéresis

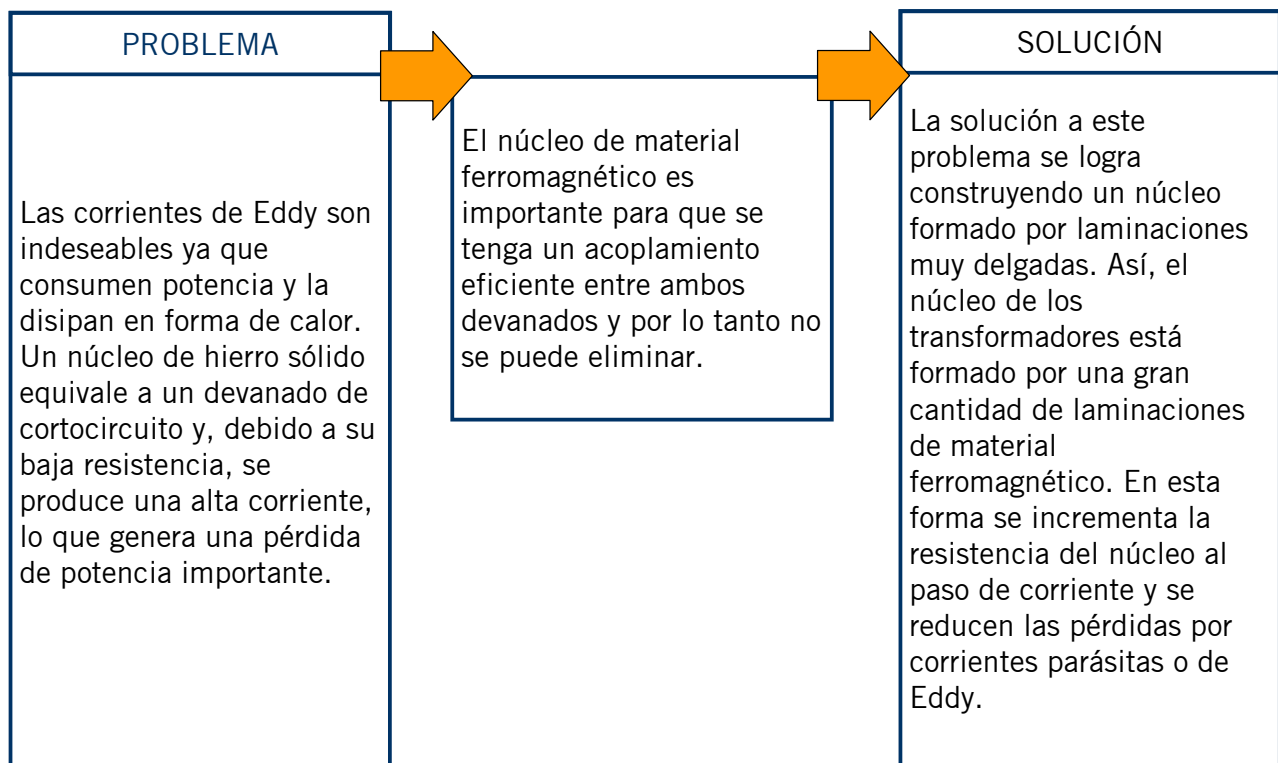
3 Pérdidas de fuga de flujo magnético

4 Pérdidas por saturación del núcleo

1 Pérdidas por corrientes parásitas (corrientes de Eddy)

El hecho de que el núcleo sea de un material conductor que forme un circuito cerrado (como una espira) y que esté en un campo magnético variable, hace que se induzca en él un voltaje. Como es un material conductor el voltaje inducido produce una corriente.

Así, las corrientes parásitas son aquellas que se generan por inducción en el núcleo de hierro del transformador, a estas corrientes también se les conoce con el nombre de corrientes de Eddy.



2

Pérdidas por histéresis

La teoría del magnetismo establece que en un material cada molécula tiene un polo norte y un polo sur. Cuando un material no está magnetizado, o bajo la acción de un campo magnético, sus moléculas están desordenadas (con los polos apuntando en todas direcciones). Esto hace que los campos magnéticos se cancelen haciendo que el material no presente un campo magnético resultante.



Cuando una bobina con un núcleo es conectada a un suministro de corriente alterna, la dirección de la corriente cambia constantemente produciendo una alternancia en la dirección del flujo magnético. En este caso las moléculas del núcleo están constantemente en movimiento tratando de alinearse con el campo magnético alterno.

Esta constante de alineación molecular muestra un retraso con el flujo de corriente alterna y el proceso de realineación de las moléculas consume energía. Las moléculas mantienen su alineación en tanto no se les aplique energía que las haga cambiar de dirección.

Las pérdidas por histéresis se deben a la agitación magnética de las moléculas en el núcleo y a su **resistencia o inercia a ser movidas**, lo cual origina la producción de calor por fricción y pérdidas de energía.

Las pérdidas por histéresis se incrementan con la frecuencia y son también mayores en materiales de alta remanencia.

GLOSARIO

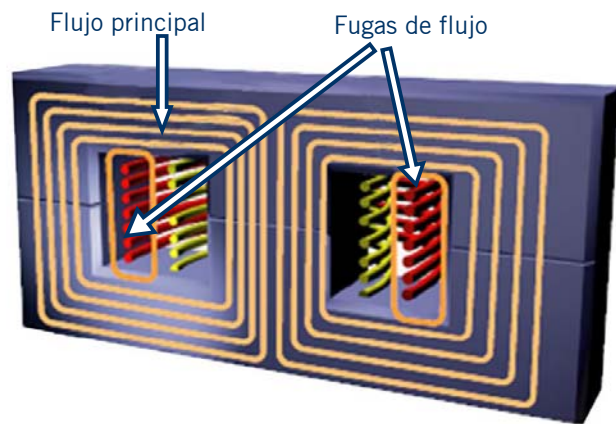


Remanencia: Es la propiedad de ciertos materiales a retener su magnetismo después de haber sido expuestos a un campo magnético y por lo tanto requieren de mayor energía para cambiar la dirección de sus moléculas.

3 Pérdidas de fuga de flujo magnético

Así como en el caso de la corriente eléctrica, en donde la mayor parte de la corriente fluye por el camino que ofrece una menor resistencia, en el magnetismo la mayor parte de las líneas de flujo siguen la trayectoria de menor reluctancia, que es el núcleo. Sin embargo, existen algunas líneas de flujo que siguen otra trayectoria.

Como las líneas de flujo en una misma dirección se repelen entre sí, parte de las líneas de flujo son forzadas hacia el espacio abierto y no pasan por dentro de los conductores del devanado secundario del transformador. Esto se considera como una fuga de líneas de flujo magnético. Debido a que se consume energía en la generación de estas líneas, y que al no pasar por el devanado secundario no reditúan ninguna utilidad, se consideran como una pérdida de energía.

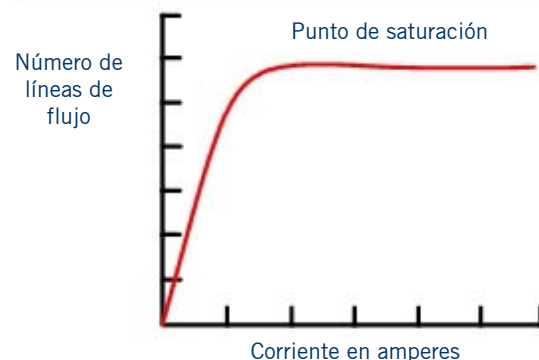


4 Pérdidas por saturación del núcleo

Las pérdidas por saturación ocurren generalmente cuando los transformadores son operados con voltajes mayores a los nominales.

El núcleo del transformador se considera un camino para el paso de líneas de flujo. A medida que se incrementa la corriente, el número de líneas de flujo es mayor, hasta que el núcleo se llena y no permite el paso de más líneas de flujo magnético.

Cuando el núcleo no permite más líneas de flujo, se dice que está saturado. Así, cuando se incrementa la corriente no sucede nada o sólo se convierte en un incremento muy reducido de líneas de flujo, aumentando, significativamente, las pérdidas en el cobre.



Relación entre la corriente y número de líneas de fuerza, mostrando la región de saturación

¡ATENCIÓN!

Las pérdidas por corrientes de Eddy y por histéresis tienen relación directa con la magnitud y frecuencia del voltaje de alimentación. Un buen material para un núcleo deberá tener una baja reluctancia y remanencia. Las pérdidas por corrientes de Eddy pueden minimizarse construyendo un núcleo formado por laminaciones.

Indique para cada uno de los tipos de pérdidas en el transformador una acción posible para disminuir la pérdida.

Pérdidas en el cobre

Corrientes Eddy

Histéresis

Fuga de flujo magnético

Saturación del núcleo

ACTIVIDAD 5



4.2 Métodos de Enfriamiento

Transformadores y Calor

El calor se genera en los transformadores como resultado de:

- La corriente que fluye por la resistencia de los devanados
- Las corrientes de Eddy
- Las pérdidas por histéresis

Para tener una buena capacidad de carga se debe usar un equipo de enfriamiento eficiente para reducir la temperatura de operación del transformador ya que la temperatura es el principal factor de degradación (desgaste) del nivel de aislamiento del aceite y de deterioro en el aislamiento de los devanados. Los transformadores con capacidad de hasta 5 kVA's son generalmente enfriados por aire. El calor producido es disipado en los alrededores a través de radiación natural. Los transformadores de distribución de pequeña y mediana potencia son enfriados mediante tanques de aceite o con un líquido aislante sintético no inflamable. Este tipo de material enfriador tiene dos propósitos. Primero, transporta el calor desde los devanados hasta la superficie del tanque, en donde se disipa en el aire y segundo, sirve como aislante entre los devanados.

TIPOS DE ENFRIAMIENTO EN TRANSFORMADORES

	Designación antigua	Designación nueva	Descripción
Altas capacidades	OA/FOA	ONAN/OFAO	Aceite-aire, convección natural, aceite-aire, convección forzada
	FOW	OFWF	Aceite-agua, convección forzada
Medianas y bajas capacidades	OA	ONAN	Aceite-aire, convección natural
	OA/FA	ONAN/ONAF	Aceite-aire, convección natural y convección forzada de aire

¡ATENCIÓN!

Para la nueva designación se utiliza un par de grupos de 2 letras donde:

- La primer letra determina el material O: *Oil* (aceite) A: *Air* (aire) W: *Water* (agua).
- La segunda letra determina la forma N: Natural, F: Forzada.



Enfriamiento aceite-agua y convección forzada

Los transformadores de potencia de alta capacidad son frecuentemente equipados con enfriadores del tipo agua-aceite con circulación forzada.

1. Enfriamiento agua / aceite

Este sistema de enfriamiento cuenta con un intercambiador de calor, a través del cual se fuerza el flujo de agua y de aceite del transformador por medio de una bomba. El aceite del transformador circula alrededor de tubos por los cuales circula agua fresca: el agua no tiene contacto directo con el aceite, sin embargo, realiza el objetivo de atrapar el calor del aceite logrando su enfriamiento.

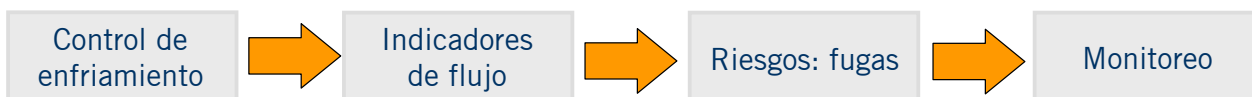
Los tubos de enfriamiento son construidos de cobre con la finalidad de mejorar la transferencia de calor en el sistema. Los enfriadores (intercambiadores) son diseñados con una capacidad sobrada de entre un 20 y un 30%, para compensar la disminución de flujo causado por la suciedad en las tuberías.

MANTENIMIENTO



Un punto importante que hay que cuidar en relación a la tubería por donde circula el agua es su limpieza, ya que cuando los tubos se encuentran sucios, se reduce el flujo de agua disminuyendo la capacidad de enfriamiento.

Algunos transformadores requieren radiadores externos, ya que por ejemplo, cuando se tienen transformadores de gran capacidad (20,000 kVA's o más), el aceite no puede transportar el calor tan rápidamente.



- Es importante supervisar el flujo de agua y aceite en un sistema de enfriamiento OFWF, dado a que una reducción o falla en la circulación afecta al proceso de enfriamiento.
- Se emplean indicadores de flujo para monitorear tanto el circuito de aire como el de aceite. Los indicadores de flujo están provistos con contactos para operar una alarma si el flujo cae de un nivel determinado.
- Un riesgo que se corre en los sistemas de enfriamiento con agua es la presencia de una fuga, ya que ésta puede contaminar el aceite con agua.

¿Cómo reducir la posibilidad de contaminar el aceite con agua cuando se presenta una fuga?

- Asegurar que la presión del agua sea menor que la del aceite.
- Usar enfriadores (intercambiadores) de doble pared con respiradero para fugas de agua a la atmósfera.

Las presiones del agua y la del aceite son monitoreadas por manómetros o interruptores de presión con contactos para alarma. Por otra parte, las temperaturas de los fluidos a través del enfriador son monitoreadas mediante termómetros que se encuentran instalados en las entradas y salidas del enfriador.

1. Enfriamiento convección forzada

Los transformadores a veces son enfriados con aire forzado hacia arriba desde abajo. El aire circula alrededor del núcleo y los devanados y elimina el exceso de calor por la parte superior.

Estos transformadores son más ligeros que los enfriados por agua, ocupan menos espacio y son menos costosos. Su principal desventaja es la necesidad de aire seco y limpio. Al utilizar aire forzado se incrementa la capacidad del transformador por cerca del 33% sobre el autoenfriado (convección natural) rápidamente.

ACTIVIDAD 6



De acuerdo a lo estudiado en este capítulo sobre las pérdidas, por favor responda a las siguientes consignas:

1

¿Qué significa una refrigeración OFWF? ¿y una ONAN? ¿Cuál utilizaría en un transformador de 10 MVA?

2

Supongamos que usted debe verificar que el transformador de un equipo no recaliente más de lo aceptable, ¿A qué parámetros cree necesario prestar atención?

¡Felicitaciones!

Usted ha finalizado el capítulo 4.

A continuación se desarrollará el capítulo *Parámetros Principales*.



Parámetros Principales

TEMAS DEL CAPÍTULO 5

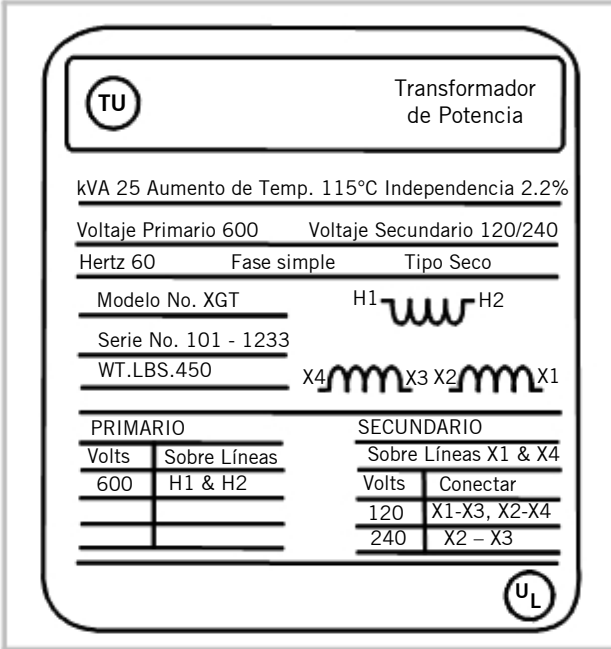
5.1 Relación entre Parámetros Principales	43
5.2 Impedancia	50
5.3 Caso Práctico: Especificaciones en Placa	52

Este capítulo veremos las características principales que diferencian un transformador de otro, analizando sus parámetros característicos.



5.1 Relación entre Parámetros Principales

Ya comprendido el principio del funcionamiento del transformador, profundizar en su conocimiento implica conocer sus parámetros más importantes, que son los que en definitiva diferencian a un transformador de otro.




Transformador de Potencia

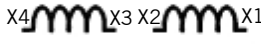
kVA 25 Aumento de Temp. 115°C Independencia 2.2%

Voltaje Primario 600 Voltaje Secundario 120/240

Hertz 60 Fase simple Tipo Seco

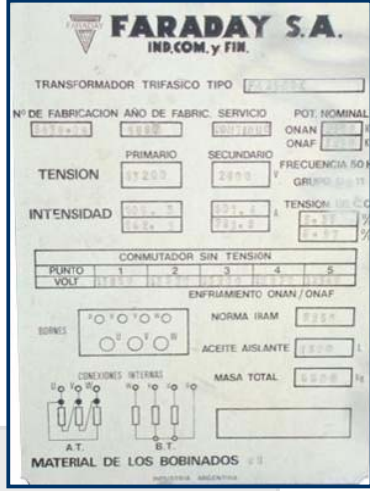
Modelo No. XGT H1  H2

Serie No. 101 - 1233

WT.LBS.450 X4  X3 X2 X1

PRIMARIO		SECUNDARIO	
Volts	Sobre Líneas	Sobre Líneas X1 & X4	
600	H1 & H2	Volts	Conectar
		120	X1-X3, X2-X4
		240	X2 - X3

Placa de datos de un transformador



FARADAY S.A.
IND.COM. y FIN.

TRANSFORMADOR TRIFASICO TIPO

Nº DE FABRICACION AÑO DE FABRIC. SERVICIO POT. NOMINAL

ONAN ONAF

PRIMARIO SECUNDARIO FRECUENCIA 50

TENSION 1200 2400 GRUPO

INTENSIDAD 100 200 TENSION UN. C.C.

COMUTADOR SIN TENSION

PUNTO VOLT 1 2 3 4 5

ENFRIAMIENTO ONAN / ONAF

NORMA ISAM

ACEITE AISLANTE

MASA TOTAL

CONEXIONES INTERNAS

A.T. B.T.

MATERIAL DE LOS BOBINADOS

Los parámetros principales del transformador se muestran en su placa y permiten asegurar que su aplicación se llevará a cabo en forma adecuada. Se indican las conexiones de los devanados primario y secundario, voltajes de alimentación y salida, impedancia, etc.

ANEXO

Dentro del anexo encontrará las simbologías más utilizadas y sus referencias.

¡ATENCIÓN!

En este manual se pueden presentar características generales de elementos eléctricos – electrónicos. Sin embargo, al momento de aplicarlos, se deben tomar en cuenta las especificaciones y aplicaciones recomendadas por ingeniería, el fabricante y la aplicación de las reglas de seguridad.

Especificaciones

Cuando se hace una revisión, se compra o se hace el mantenimiento a un transformador, se necesita conocerlo o disponer de documentación, tanto de todas sus características de operación como de construcción y la forma de operar.

A continuación, se listan algunas de las especificaciones más comunes aunque pueden variar según el fabricante:

- Capacidad del transformador en kVA o potencia aparente;
- Número de fases: 1 a 3 según la construcción del transformador;
- Frecuencia en ciclos por segundos (Hz);
- Voltaje del bobinado primario;
- Voltaje del bobinado secundario;
- Conexión en el primario (estrella, delta, delta abierta, etc.);
- Conexión en el secundario;
- Número de derivaciones arriba y abajo del voltaje nominal y el porcentaje de cada una;
- Sobreelevación de temperatura permitida en grados centígrados;
- Altura a nivel del mar de la que se va a operar el transformador.

También hay otro tipo de especificaciones que dependen de la instalación, tipo de cargas conectadas, equipo y marcas que se manejan, etc.

- Ductos y tuberías de alta y baja tensión;
- Sumersión en líquido especial no inflamable;
- Equipo de ventilación forzada como radiadores;
- Impedancia especial;
- Cualquier accesorio o arreglo que no estén dentro de las normas del transformador o que se acoplen en la empresa.

Analizaremos los siguientes parámetros de los transformadores:

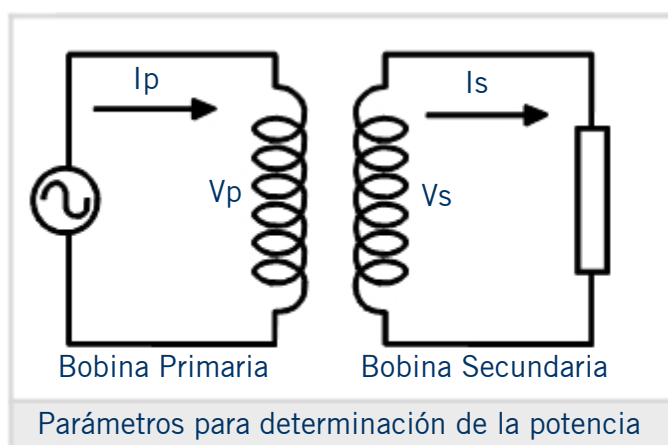
- 1 Relación de potencia entre los devanados
- 2 Razón de transformación
- 3 Relación de voltaje entre devanados
- 4 Relación de corriente entre devanados

1 Relación de potencia entre los devanados

La potencia o capacidad de un transformador, determina el voltaje y la corriente que el transformador es capaz de suministrar a la carga, sin que se presente un sobrecalentamiento.

Un transformador no genera potencia eléctrica, simplemente la transfiere o convierte de una bobina a otra por inducción electromagnética. Considerando que las pérdidas son insignificantes en un transformador (suposición que se hace frecuentemente para obtener valores aproximados), la potencia que entra a su devanado primario es igual a la potencia que sale por su devanado secundario.

Potencia del primario = Potencia del secundario



La potencia de los transformadores se especifica en volt-amperes (VA), y es el producto del voltaje por la corriente que circula en sus devanados.

$$VA = V_p * I_p = V_s * I_s$$

donde:

V_p : Voltaje bobina del primario

V_s : Voltaje bobina del secundario

I_p : Corriente bobina del primario

I_s : Corriente bobina del secundario

Esta ecuación es válida sólo para calcular la potencia de un transformador monofásico.

Para el cálculo de la potencia en un transformador trifásico se utiliza la siguiente ecuación:

$$P = \sqrt{3}VI$$

donde:

V = Voltaje de línea

I = Corriente de línea

EJEMPLO

En el transformador de la figura se aplican 220 VCA en la bobina del primario y se tiene una corriente nominal de 10 amperes, el voltaje en la bobina del secundario es de 110 VCA.

A) Para obtener los volt-amperes del transformador simplemente se multiplica el voltaje y la corriente del devanado primario, así se obtiene la potencia:

$$VA = V_p * I_p = 220 \text{ V} * 10 \text{ A} = 2200 \text{ VA}$$

Cuando la potencia es mayor a 1000 VA se cambian las unidades a kilovolt-amperes (kVA). Así, la potencia del transformador es de 2.2 kVA.

B) ¿Qué corriente circula en la bobina del secundario? Utilizando la consideración de cero pérdidas, la potencia en el secundario es igual a la del primario, así:

$$VA = V_p * I_p = V_s * I_s$$

Despejando para la corriente del secundario I_s , tenemos: $I_s = \left(\frac{(V_p)(I_p)}{V_s} \right)$

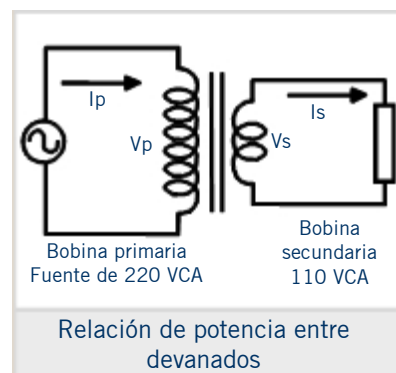
Sustituyendo los datos en la ecuación: $I_s = \left(\frac{(220\text{V})(10\text{V})}{110\text{V}} \right) = 20\text{A}$

C) Si ahora en la bobina del secundario circularan 2 A, ¿cuál sería la corriente en el primario? Una vez más, considerando la igualdad de potencia entre primario y secundario:

$$VA = V_p * I_p = V_s * I_s$$

Despejando para la corriente del primario I_p , tenemos: $I_p = \left(\frac{(V_s)(I_s)}{V_p} \right)$

Sustituyendo los datos en la ecuación, **$I_p = 1 \text{ A}$**



En el caso de un transformador con varios devanados secundarios, la potencia de entrada al primario deberá ser aproximadamente igual a la suma de las potencias en los devanados secundarios.

La potencia de los transformadores se expresan en volt-amperes (VA) y en el caso de potencias altas (mayores a 1000 VA) en kilovolt-amperes ó kVA (miles de volt-amperes) o en megavolt-amperes ó MVA (millones de volt-amperes).

¡ATENCIÓN!

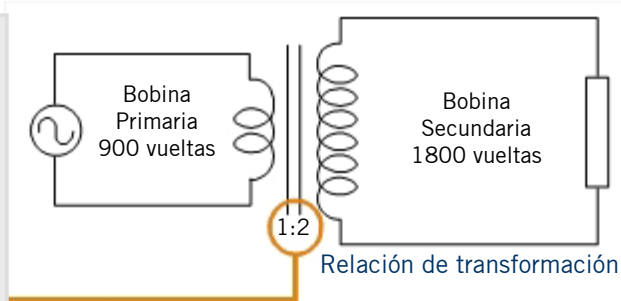
En caso de tener una diferencia significativa en potencias se puede asegurar que existe algún daño en el transformador.

2 Razón de transformación

Un parámetro muy importante y ampliamente utilizado es la razón o relación de transformación, que es la relación de espiras entre las bobinas del primario y secundario de un transformador.

La razón de transformación generalmente se expresa como una proporción: por ejemplo 15:1, 50:1, 1:25, 1:2.

Esta proporción indica una relación de 1:2 porque la bobina del secundario tiene el doble de espiras que la bobina del primario.



La relación de transformación permite obtener la relación de voltaje y corriente entre los devanados del transformador.

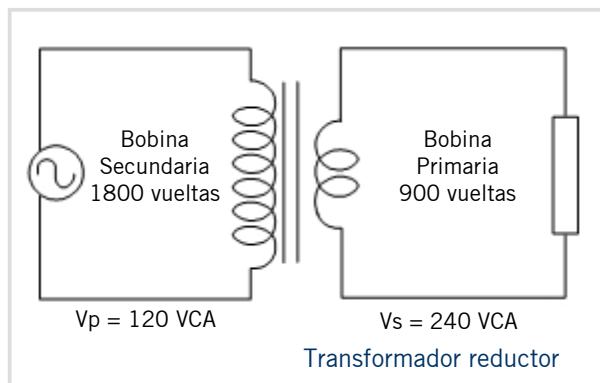
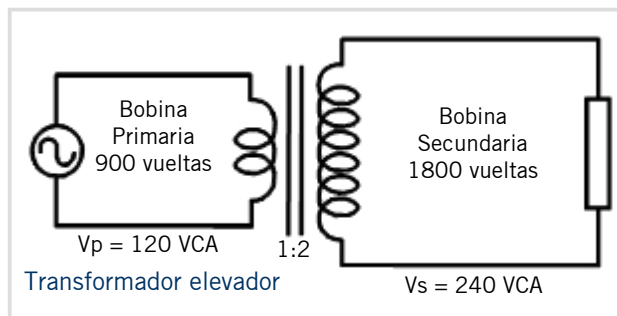
3 Relación de voltaje entre devanados

La relación de transformación o relación de espiras define cuánto va a ser el voltaje en el secundario cuando se le aplica un voltaje en el primario. En el transformador, el voltaje por espira es constante tanto en primario como en el secundario, así, el devanado que tenga más espiras será el que presente un voltaje más alto en sus terminales.

Así cuando la bobina del secundario tiene más espiras que la bobina del primario, su voltaje será mayor que el del primario. En este caso, cuando el secundario presenta un voltaje mayor que el primario, al transformador se le llama elevador.

Transformador elevador

Voltaje en el secundario > Voltaje en el primario



Si la bobina del secundario tiene menos espiras que la bobina del primario, el voltaje en el secundario será menor que el del primario y al transformador se le denominará reductor.

Transformador reductor

Voltaje en el primario > Voltaje en el secundario

La relación entre el voltaje del primario, el voltaje en el secundario y el número de espiras en cada devanado se determina con la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{V_p}{N_p}\right) = \left(\frac{V_s}{N_s}\right)$$

donde:

V_p: Voltaje en el primario

V_s: Voltaje del secundario

N_p: Número de espiras del primario

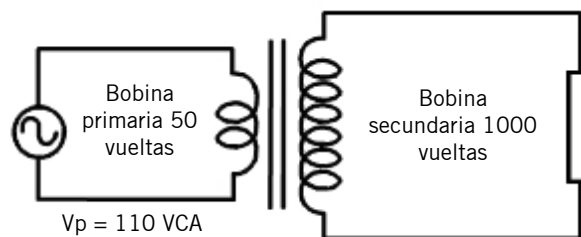
N_s: Número de espiras del secundario

EJEMPLO

Considere un transformador con 50 espiras en la bobina del primario y 1000 espiras en la bobina del secundario, si se aplica un voltaje de 110 VCA a la bobina del primario ¿Qué voltaje se tendrá en terminales de la bobina del secundario?

Sustituyendo los valores en la ecuación:

En este caso se tiene un transformador elevador



Cálculo de voltaje en el secundario

4 Relación de corriente entre devanados

Ya que la relación de espiras fija, la relación entre los voltajes del primario y del secundario, considerando además, que la potencia de la bobina del primario es igual a la potencia de la bobina del secundario:

$$V_p * I_p = V_s * I_s$$

Entonces la relación de espiras también debe establecer una relación entre la corriente del primario y del secundario.

Así, la bobina que tiene más voltaje, tiene mayor número de espiras y por consiguiente tendrá una corriente más baja. En forma similar, la bobina de voltaje más bajo, con menor número de espiras, tendrá la corriente más alta. La relación entre el número de espiras y la corriente en las bobinas es:

$$I_p * N_p = I_s * N_s$$

donde:

I_p: Corriente en la bobina del primario

I_s: Corriente en la bobina del secundario

N_p: Número de espiras del primario

N_s: Número de espiras del secundario

EJEMPLO



Considere un transformador con 500 espiras en la bobina del primario, donde se le aplican 110 VCA. Se tiene también un devanado secundario con 1000 espiras que al conectarse a la carga, circula una corriente de 1 A.

A) ¿Cuál es la corriente en la bobina del primario?

De la ecuación: $\left(\frac{I_s}{I_p}\right) = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)$

Despejando: $I_p = I_s \left(\frac{N_s}{N_p}\right)$

Sustituyendo: $I_p = (1A) \left(\frac{1000}{500}\right) = 2A$

B) ¿Cuál es el voltaje en la bobina del secundario?

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right) = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)$$

Despejando: $V_s = (V_p) \left(\frac{N_p}{N_s}\right)$

Sustituyendo: $V_s = (110V) \left(\frac{1000}{500}\right) = 220VCA$

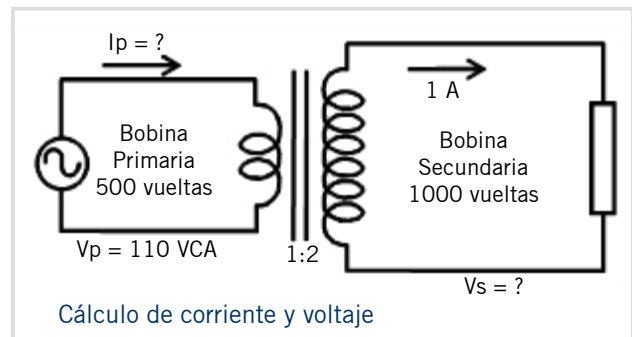
C) Con los valores obtenidos, verificar que la potencia en el primario sea igual a la del secundario.

Usando la ecuación de potencia: $P = VI$

Para el Primario : $P_p = (110VCA)(2) = 220VA$

Para el Secundario: $P_s = (220VCA)(1^a) = 220VCA$

El transformador tiene una potencia de 220 VA. Los resultados son correctos pues la potencia del primario es igual a la del secundario.



5.2 Impedancia

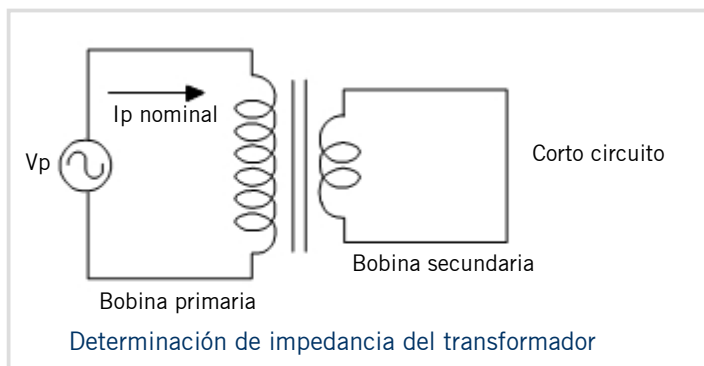
Otro parámetro importante del transformador es su impedancia. La **impedancia** de un transformador se define como **su oposición total al flujo de corriente**. En el devanado de un transformador la impedancia depende del calibre del conductor y de su número de vueltas. En ambientes industriales, aun cuando el devanado primario y el secundario tienen cada uno una impedancia característica, se considera a la impedancia del transformador como una impedancia equivalente, donde se agrupan las características de ambos devanados del transformador.

Entre otras aplicaciones, la impedancia del transformador se utiliza para:

- Determinar la **corriente de cortocircuito**, en la selección de las protecciones de sobrecarga y cortocircuito.
- Obtener la característica de **regulación de voltaje** del transformador. La regulación de voltaje establece su variación de voltaje ante variaciones de sin carga a plena carga.
- Conectar transformadores en paralelo. Si son de la misma potencia y de diferente impedancia, el de menor impedancia tomará más corriente y no habrá una buena distribución de carga.

Procedimiento para el cálculo de la impedancia equivalente

1. Se conecta la bobina del secundario en cortocircuito.
2. Se aplica el voltaje necesario en la bobina del primario para tener la corriente nominal en la bobina del primario.



Con esto se obtiene la impedancia en porcentaje, que es un parámetro que también define al transformador.

$$Z_e\% = \left(\frac{V_{pcc}}{V_p} \right) (100)$$

donde:

V_{pcc} : Voltaje en el primario con el secundario en corto

V_p : Voltaje nominal del primario

$Z_e\%$: Impedancia equivalente en porcentaje



EJEMPLO

Se tienen dos transformadores con los siguientes datos de placa:

Transformador 1

Potencia: 200 kVA V_p: 13,800 V

Impedancia del 2% V_s: 440 V

Transformador 2

Potencia: 200 kVA V_p: 13,800 V

Impedancia del 0.2% V_s: 440 V

¿Cuál es el voltaje del secundario de estos transformadores cuando se encuentran operando a su capacidad nominal?

Para el transformador 1 se tiene una caída de voltaje de:

$$\frac{(440\text{VCA})(2\%)}{100\%} = \frac{(440\text{VCA})(0.02)}{1} = 8.8\text{VCA}$$

Para obtener el voltaje real en el secundario se resta voltaje obtenido al voltaje nominal.

$$440\text{VCA} - 8.8\text{VCA} = 431.2\text{VCA}$$

Para el transformador 2 se tiene una caída de voltaje de:

$$\frac{(440\text{VCA})(0.2\%)}{100\%} = \frac{(440\text{VCA})(0.002)}{1} = 0.88\text{VCA}$$

De igual forma, se resta voltaje obtenido al voltaje nominal.

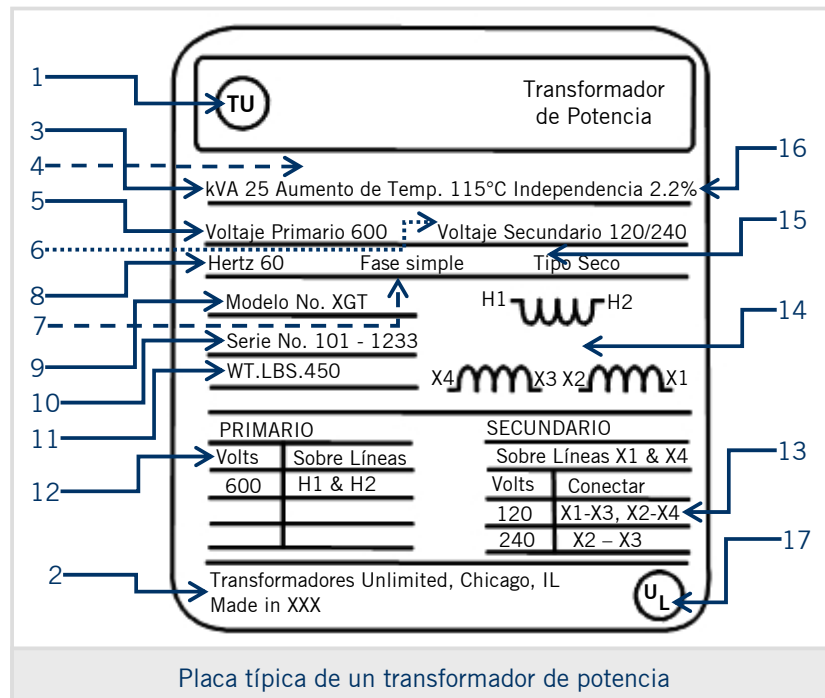
$$440\text{VCA} - 0.88\text{VCA} = 439.12\text{VCA}$$

En base al ejemplo, se concluye que el transformador que tiene mayor impedancia tiene una mayor caída de voltaje en el secundario cuando está a la carga nominal. Debido a esto, los transformadores con una baja impedancia muestran una mejor regulación de voltaje. Esto significa una menor variación en su voltaje de salida cuando cambian de una condición sin carga a una a plena carga.

5.3

Caso práctico: Especificaciones en Placa

La placa de datos de un transformador muestra sus especificaciones más importantes



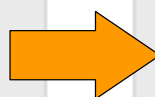
#	Referencia
1	Nombre del fabricante y tipo de transformador (en este caso de potencia).
2	Lugar donde se fabricó el transformador y se localiza la compañía.
3	Especifica la potencia del transformador en kVA. La cantidad de corriente en el secundario se calcula dividiendo los volt-amperes por el voltaje del secundario $I_s = KVA/V_s$.
4	Incremento de temperatura permitido en los devanados. Este valor usualmente se basa para una temperatura ambiente de 40 grados centígrados (104 °F). La suma de la temperatura ambiente y el incremento de temperatura da como resultado la temperatura máxima de operación. En este caso, una temperatura ambiente de 40 °C y un incremento de 115 °C (239 °F), dando como resultado un valor de temperatura máxima de 155 °C (311 °F). El valor de la temperatura máxima de operación de un transformador depende del tipo de aislamiento con que cuentan los devanados, ya que cada tipo de aislamiento soporta una máxima temperatura sin sufrir deterioro.

#	Referencia
5	Es el voltaje nominal para la bobina del primario.
6	Es el voltaje nominal para la bobina del secundario.
7	Es el número de fases del transformador. Este valor es uno si el transformador es monofásico o tres si el transformador es trifásico.
8	Es la frecuencia a la que opera el transformador.
9	
10	Número de modelo, número de serie y peso del transformador. El modelo normalmente está dado en forma de código y depende del fabricante.
11	
12	Dan información acerca de las posibles conexiones de los devanados del primario y secundario. (Ver ejemplo Posibles conexiones de los devanados del primario y secundario.
13	
14	Diagrama esquemático del transformador que sirve como referencia para el técnico de instalación.
15	Define el tipo de transformador. En este caso es del tipo seco, también puede ser en aceite (se especifica el tipo de aceite y la cantidad de aceite que necesita el transformador).
16	Es la impedancia equivalente del transformador. Este valor se expresa en porcentaje.
17	Se refiere a una norma que depende de cada país.

Otra información que suele aparecer en la placa del transformador es lo relacionado con sus TAPs o derivaciones.

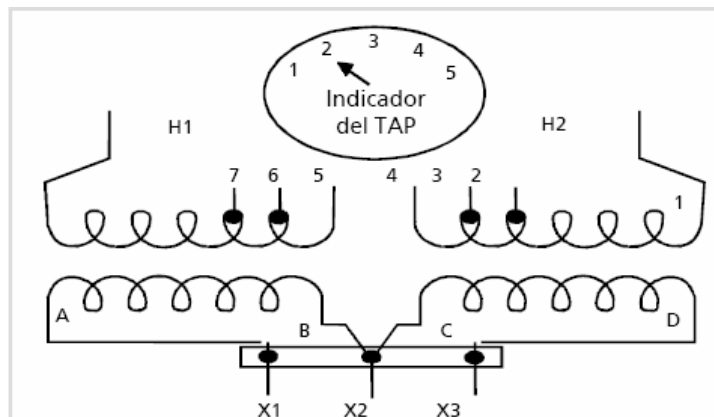
En un transformador con un valor fijo de espiras en primario y secundario, se tendrá un valor fijo también para la relación de voltajes.

Si el voltaje que alimenta al transformador es más alto o más bajo que el especificado, el voltaje en el secundario también será mayor o menor y no se podrá hacer nada para cambiarlo.



Para poder corregir este problema se utilizan los TAPs o derivaciones, los cuales son terminales que se sacan de puntos intermedios de los devanados del transformador.

La función del TAP es permitir seleccionar (agregando o quitando) las vueltas de la bobina del **primario**. Con esto se logra alterar la relación de espiras o transformación y se puede compensar (en un limitado rango) la variación que se tiene en el voltaje de alimentación del transformador.



% Alto voltaje	Indicador del TAP	
	Posición	Conectar
100.0	1	4 a 5
97.5	2	3 a 5
95.0	3	3 a 6
92.5	4	2 a 6
90.0	5	2 a 7
Indicación de los TAPs		

En la placa del transformador se tiene una relación entre la posición del TAP y cada caso de voltaje en la fuente de alimentación. En otros casos se puede indicar el porcentaje de cambio al voltaje del primario para cada TAP.

En caso que la indicación sea un porcentaje, para seleccionar el TAP adecuado se usa la ecuación:

$$\% = \left(\frac{V_f}{V_p} \right) (100)$$

donde:

V_f: Voltaje de la fuente (a aplicar en el primario) en volts.

V_p: Voltaje nominal o de placa de la bobina del primario.

%: Porcentaje de variación respecto al voltaje del primario.

EJEMPLO



Sea un transformador cuyos datos de placa son:

Potencia: 25 kVA
 Voltaje del primario: 600 V
 Voltaje del secundario: 120 V
 Impedancia del 2%

% Alto voltaje	Indicador del TAP	
	Posición	Conectar
100.0	1	4 a 5
97.5	2	3 a 5
95.0	3	3 a 6
92.5	4	2 a 6
90.0	5	2 a 7

Indicación de los TAPs

El transformador es alimentado por un suministro cuyo voltaje es:

$$V_f = 570 \text{ VCA}$$

Dado que el porcentaje de variación del voltaje de la fuente respecto al primario se determina mediante la ecuación:

$$\% = \left(\frac{V_f}{V_p} \right) (100)$$

Se tiene que: $\% = \left(\frac{570}{600} \right) (100) = 95\%$

El indicador de TAPs se deberá colocar en la posición 3 o bien, conectar el terminal 3 con el terminal 6.

¡ATENCIÓN!



Para hacer el ajuste del TAP o derivación en un transformador se debe tener el transformador desenergizado, esto es, debe estar desconectado de la fuente de alimentación.

EJEMPLO



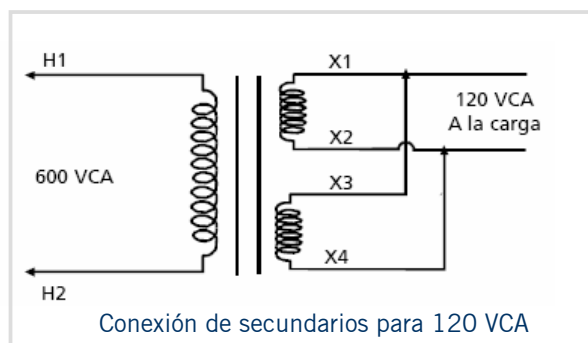
Posibles conexiones de los devanados del primario y secundario.

Primario		Secundario	
Volts	Sobre líneas	Sobre líneas X1 & X2	
600	H1 & H2	Volts	Conectar
		120	X1-X3, X2-X4
		240	X2-X3

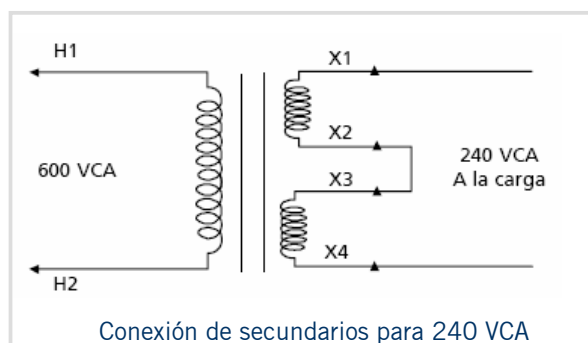
En el caso del ejemplo:

- Las terminales H1 y H2 son para el devanado del primario y su alimentación es de 600 V.
- Las terminales del secundario que van a la carga son X1 y X4, el devanado del secundario puede operar en dos voltajes de 120 V y/o 240 V.

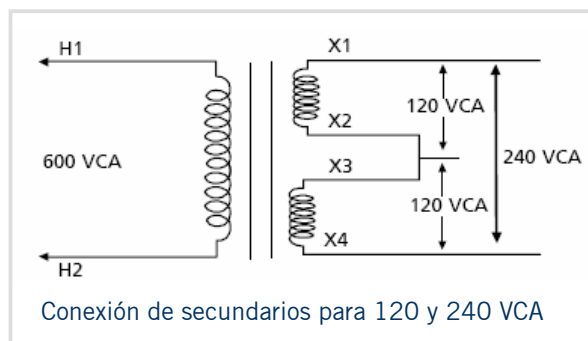
Si se requieren únicamente 120 V se unen las terminales X1 con X3 y X2 con X4.



Si se necesitan únicamente 240 V se unen las terminales X2 y X3 y las terminales X1 y X4 se conectan a la carga.



Si se requiere tener ambos voltajes se une X2 con X3, así tenemos 240 V entre X1 y X4, 120V entre X1 y la unión entre X2, X3 o X4 y la unión X2 y X3.



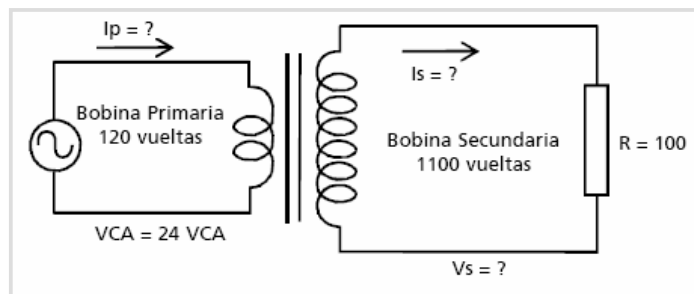
ACTIVIDAD 7

Para finalizar el presente capítulo, le proponemos una última actividad con el fin de aplicar lo aprendido.



Resuelva el siguiente ejercicio:

Dado un transformador cuya bobina primaria tiene 120 vueltas y la secundaria 110 vueltas, se le conecta una fuente de tensión alterna de 24V a la bobina primaria y una resistencia de 100 Ω en el circuito secundario.



- 1 Considerando que la impedancia es cero, calcular:
 - a) Voltaje en la bobina secundaria.
 - b) Corriente I_s .
 - c) Corriente I_p .
 - d) Potencia en el circuito primaria y secundaria.

- 2 Volver a realizar esos cálculos considerando que la impedancia es 2.5%. ¿Qué puede sacar como conclusión comparando los valores?

¡Felicitaciones!

Usted ha finalizado el capítulo 5.
A continuación se desarrollará el capítulo *Características Principales*.



Características Principales

TEMAS DEL CAPÍTULO 6

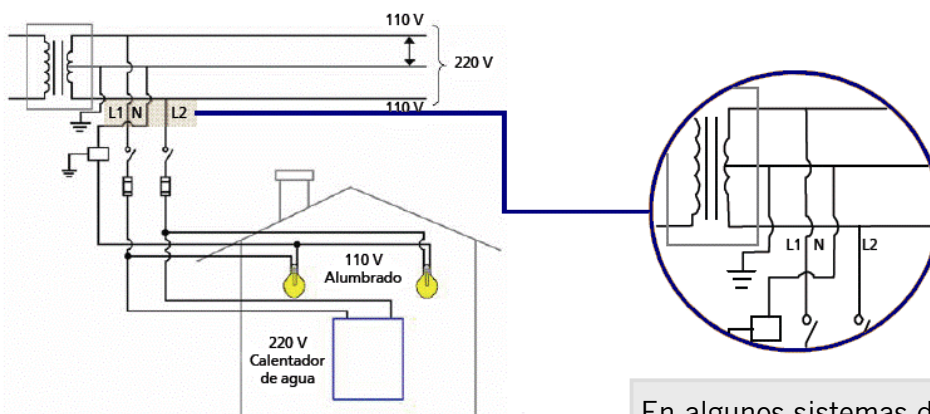
6.1 Sistemas Monofásicos y Trifásicos	59
6.2 Conexiones	60
6.3 Polaridad	62

En este capítulo se detallarán los sistemas monofásicos y trifásicos así como las conexiones y la polaridad.



6.1 Sistemas Monofásicos y Trifásicos

Existen algunas cargas que, por sus características, requieren de un sistema de alimentación monofásico, éste es el caso de algunos de los sistemas de alimentación de uso doméstico.



Representación de un sistema eléctrico doméstico

En algunos sistemas domésticos, se tienen tres cables conductores, dos líneas (L1 y L2) y un neutro (N).

Existen otros casos en donde las características de las cargas requieren de un sistema de alimentación trifásico. Estos tipos de sistemas emplean tres cables conductores que llevan energía hacia la carga y que, además, no cuentan con cable de retorno.

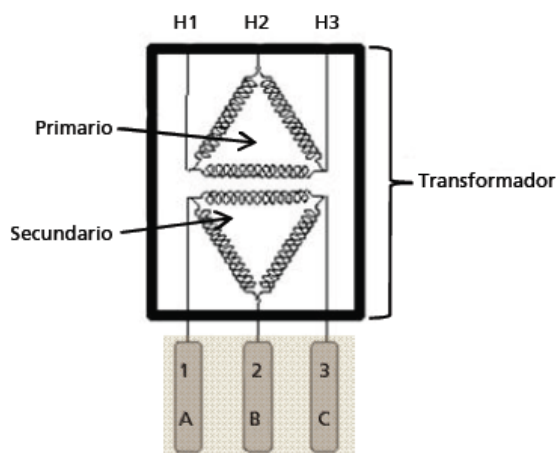


Diagrama de un transformador trifásico

Por lo general, las fases se denominan como A, B, C ó 1, 2, 3 o de acuerdo a su ubicación. En la figura se muestra un diagrama en el que se representa a los bobinados y a un tipo de distribución de fases.

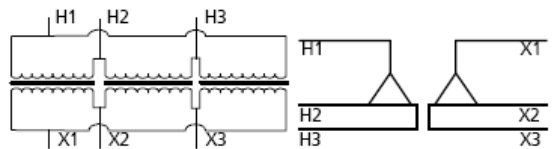
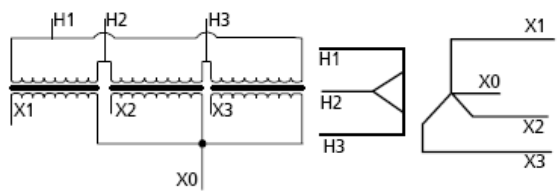
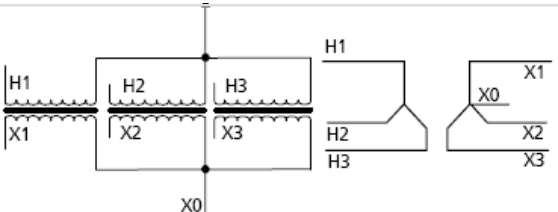
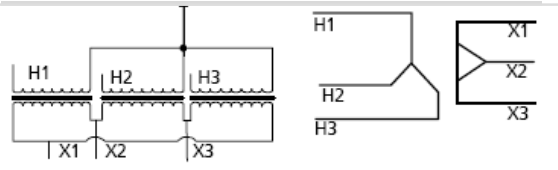
RECUERDE

La expresión **fase eléctrica** se refiere a un solo conductor en un circuito múltiple de conductores.



6.2 Conexiones

Para tener un determinado voltaje o rango de corriente se debe conocer el tipo de conexión que hay que realizar en las bobinas del transformador. Lo primero que hay que conocer es cuáles son las líneas del transformador del lado primario y cuáles son las del secundario, para tal caso, el fabricante especifica las bobinas del lado primario con la letra H y las del lado secundario con la letra X.

Conexión	Uso	Diagrama
Delta – Delta $\Delta - \Delta$	Esta conexión se utiliza en transformadores trifásicos. Esta conexión es empleada para alimentarlo con tensiones bajas y poder así obtener tensiones altas de distribución. Tiene un solo rango de voltaje ya que no tiene hilo de derivación.	 <p>Conexión Delta - Delta</p>
Delta – Estrella $\Delta - Y$	Se aplica con gran frecuencia en la industria debido a que la estrella en el secundario presenta dos rangos de voltajes y con esto se puede alimentar a diferentes maquinarias. Es muy utilizado como transformador de distribución reductor y en las subestaciones elevadoras de voltaje.	 <p>Conexión Delta-Estrella</p>
Estrella – Estrella $Y - Y$	Es empleada para tensiones muy elevadas ya que reduce la cantidad de aislamiento. Posee un hilo de derivación para tener dos rangos de voltajes. Una de las desventajas que tiene es que se presentan armónicas con facilidad.	 <p>Conexión Estrella-Estrella</p>
Estrella – Delta $Y - \Delta$	Se utiliza como receptora en los sistemas que contienen subestaciones y cuyo objetivo es reducir el voltaje.	 <p>Conexión Estrella-Delta</p>

¡ATENCIÓN!

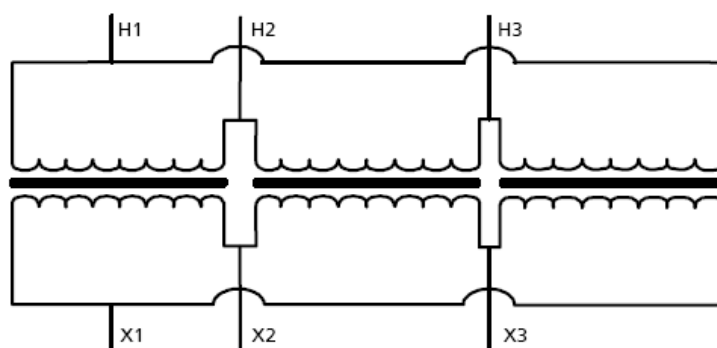
Es posible conectar tres transformadores monofásicos con el objetivo de formar un banco de transformador trifásico de cualquiera de los cuatro tipos.

Conexión Delta abierta – Delta abierta

La conexión Delta-Delta presenta la ventaja de poder eliminar un transformador para reparación o mantenimiento, mientras que los otros dos restantes continúan funcionando como un banco trifásico con una capacidad reducida a 58% con respecto al banco original. A esta conexión se le denomina conexión Delta abierta-Delta abierta o conexión en V.

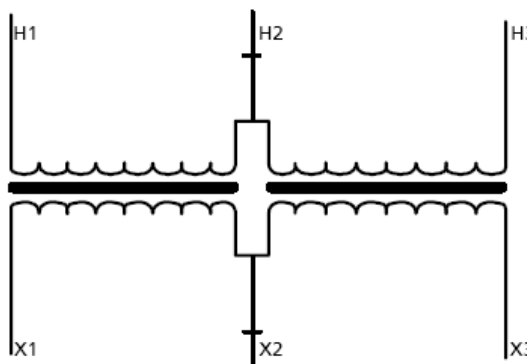
EJEMPLO

La conexión se origina con los 3 transformadores monofásicos funcionando.



Conexión Delta – Delta

Uno de los transformadores sale de línea.



Conexión Delta abierta – Delta abierta

ANEXO

Hay conceptos generales que se manejan en todos los transformadores, en este apartado encontrará algunas de las definiciones básicas para comprender el funcionamiento de los mismos.

PARA PENSAR...

Para economizar en equipamiento, ¿podríamos pensar en instalar transformadores trifásicos Delta abierta – Delta abierta?

Para contestar esta pregunta tenga en cuenta que una disminución del 33% en equipamiento nos genera una reducción del 42% en potencia.

6.3 Polaridad

Para asegurarse que las conexiones de las terminales de un transformador son correctas, se ha desarrollado un método estándar para marcar las terminales. Es decir, se usa para designar la dirección que tiene la corriente en un instante dado en un embobinado respecto a la dirección que tiene la corriente en el otro embobinado en ese mismo instante.

Esta expresión es válida solo refiriéndose a corrientes instantáneas.

Cuando las corrientes circulan en sentido contrario en ambos embobinados, su acción electromagnética se contrarresta, se trata de un...

**TRANSFORMADOR DE
POLARIDAD
SUSTRATIVA**

Cuando el efecto electromagnético de las corrientes se suman se trata de un...

**TRANSFORMADOR DE
POLARIDAD ADITIVA**

Este concepto de polaridad se aplica solamente a transformadores monofásicos o bien al primario y secundario de cada fase, en un transformador trifásico.

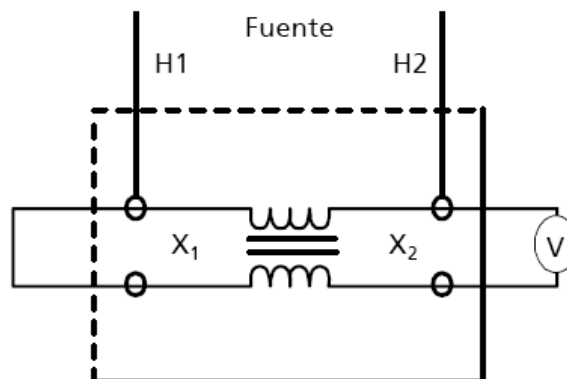
Las terminales del devanado de alto voltaje se marcan con H1, H2, etc. La terminal marcada con H1 siempre debe estar localizada en el lado izquierdo viendo al transformador a través del cual se han sacado las terminales de bajo voltaje. Las terminales de bajo voltaje están marcadas con X1, X2 y así sucesivamente.

¿Cómo determinar la polaridad?

1 Conectar un extremo del devanado de alto voltaje con un extremo del devanado de bajo voltaje.

2 Conectar un voltímetro entre ambos extremos abiertos. El voltímetro tiene que poder medir hasta la suma de la tensión del primario más la del secundario.

3 Aplicar un voltaje no mayor que el voltaje permitido del devanado, ya sea el devanado de alto voltaje o el de bajo voltaje como se muestra en la figura.

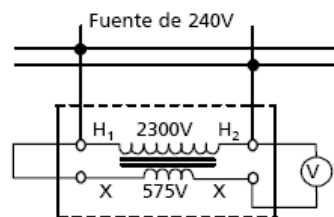


Conexiones para la prueba de polaridad

¡ATENCIÓN!

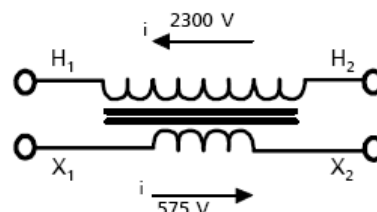
Para evitar condiciones de trabajo peligrosas o por falta de disponibilidad, se utilizan voltajes menores a los nominales del transformador.

En la figura del ejemplo, en vez de utilizar 2300V utilizamos 240V. En este caso la tensión del secundario será 60V y el voltímetro deberá poder medir hasta $240V+60V=300V$.



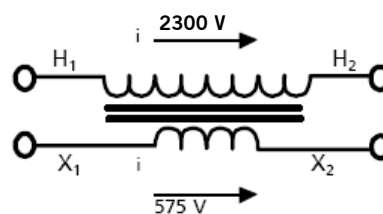
Determinación de la polaridad de un transformador utilizando un voltímetro

Si el voltímetro indica la **suma** de ambos voltajes, el transformador es **aditivo** (que añade o agrega) y debe estar marcado con H1 en el lado izquierdo y X1 en el lado derecho.



Transformador de distribución de polaridad aditiva

Si el voltímetro indica la **diferencia** entre ambos voltajes, el transformador es **substractivo** (resta o disminuye). Por lo tanto, las terminales deben ser marcadas con H1 en el lado izquierdo y X1 en el lado izquierdo.



Transformador de distribución de polaridad substractiva

¡ATENCIÓN!

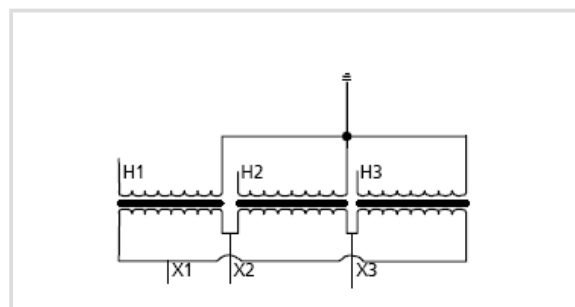
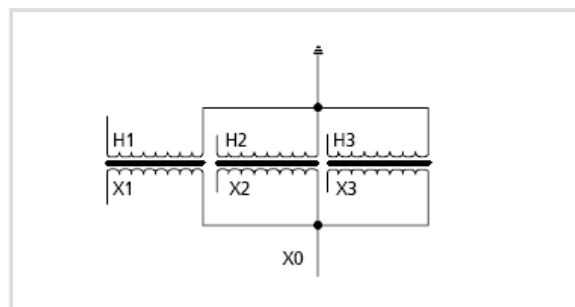
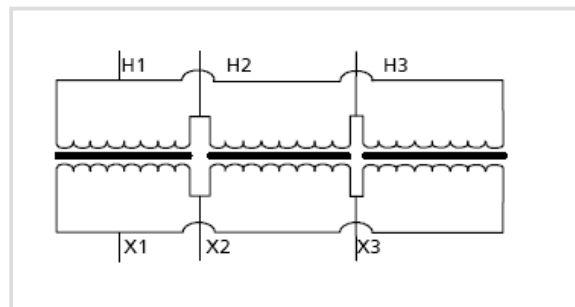
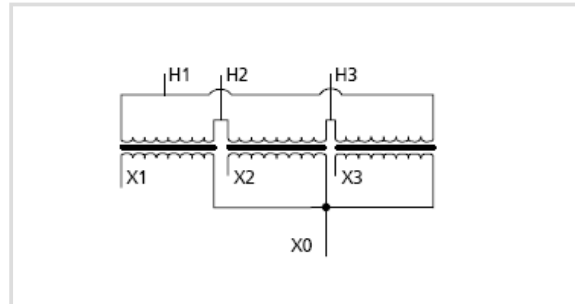
La polaridad del transformador puede cambiarse intercambiando las terminales de bajo voltaje.

ACTIVIDAD 8

Para finalizar el presente capítulo, le proponemos las siguientes actividades con el fin de aplicar lo aprendido.



Una con flechas los distintos tipos de conexión:



ACTIVIDAD 9



Responda a las siguientes preguntas:

1

Si en una conexión Estrella - Estrella compuesta por un banco de transformadores monofásicos, uno de los transformadores sale de línea:

a. ¿Qué pasa con la tensión en cada una de las fases de la salida de baja tensión?

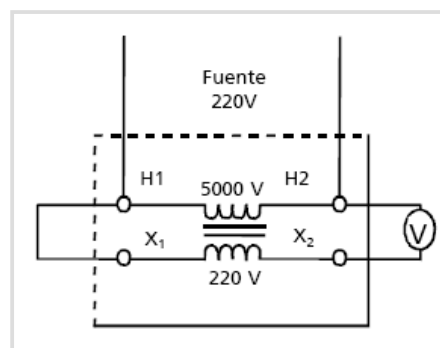
b. ¿Y si la conexión es Delta-Delta?

2

En el transformador de la figura se aplica una fuente de 220V:

a. ¿Qué medirá el voltímetro si el transformador es aditivo?

b. ¿Y si es substractivo?



¡Felicitaciones!

Usted ha finalizado el capítulo 6.

A continuación se desarrollará el capítulo *Tipos de Transformadores*.



Tipos de Transformadores

TEMAS DEL CAPÍTULO 7

7.1 Clasificación de los Transformadores	67
7.2 Transformadores con Derivaciones o TAPs	69
7.3 Autotransformadores	72
7.4 Transformadores para Instrumentos	74
7.5 Transformadores Buck-Boost	80
7.6 Transformadores de Control	81
7.7 Transformadores de Distribución	82
7.8 Transformadores según su Núcleo	83

En este capítulo explicaremos cómo se clasifican los distintos tipos de transformadores de acuerdo a varios criterios, de éstos se derivan los tipos que se detallarán



7.1 Clasificación de los Transformadores

El nombre o clasificación que recibe cada transformador depende de sus características.

Para ello se tendrá en cuenta si el transformador es reductor o elevador, si tiene conexión monofásica o trifásica, si es seco o húmedo. Además, hay otros componentes con los que puede contar el transformador como boquillas, sistemas de refrigeración o embobinados, entre otros.

Los transformadores **principales o básicos** son:

- Transformadores con derivaciones o TAPs
- Autotransformadores
- Transformadores para instrumentos
- Transformadores Buck-Boost
- Transformadores de control
- Transformadores de distribución

Los transformadores también se pueden clasificar de acuerdo a sus características:

Por la construcción de su núcleo

- Disminuye corriente
- Acorazado
- Distribuido

Por su polaridad

- Sustractiva
- Auditiva

Por su utilización

- De corriente
- De potencial
- De control
- Buck - Boost

Por su potencia

- Fuerza > 500 kVA
- Distribución < 500 kVA

Por el Sistema de Alimentación

- Monofásico
- Bifásico
- Trifásico
- Hexafásico
- Dodecafásico

Aislamiento - Refrigeración

- Seco (aire o gas)
- Aceite mineral
- Encapsulados

Localización

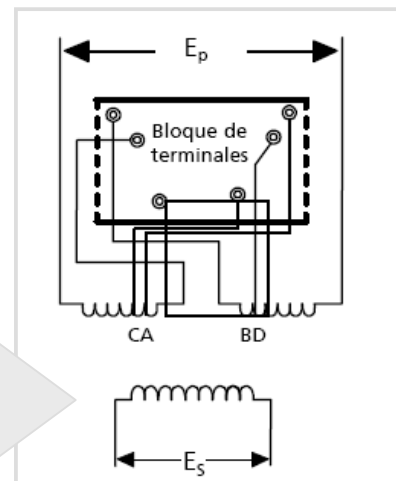
- En postes
- Subterráneo (sumergible)
- Exterior (a prueba de agua)

7.2 Transformadores con Derivaciones o TAPs

Con frecuencia se extraen conexiones en partes intermedias de los devanados primario y/o secundario del transformador, estas conexiones salen del devanado y se conectan a una tablilla o borne de conexiones.

Las derivaciones, también llamadas TAPs, se pueden o no conectar. Las opciones de conexión que ofrece el TAP permiten modificar el número de espiras a utilizar. Esto, como hemos visto antes en este curso, modifica la relación de transformación del transformador y así su voltaje de salida. Al modificar la relación de transformación se puede elevar o bajar el voltaje de salida según sea el voltaje en el primario, manteniendo el voltaje de salida en el valor deseado. En la mayoría de los casos los cambios de derivación (TAP) son poco frecuentes y se realizan manualmente.

La figura muestra un diagrama esquemático de un transformador con derivaciones (TAPs) en su primario.



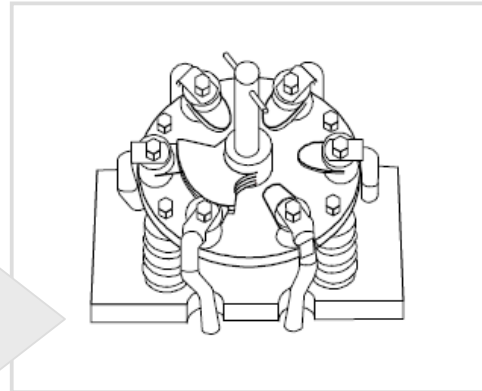
En los transformadores de aceite de bajas tensiones, los TAPs o barras de conexiones se encuentran dentro del tanque. Para realizar el cambio se requiere quitar la cubierta y hacer los cambios en las barras de conexiones sumergidas en el aceite.

Esto presenta ciertos inconvenientes, tales como que las conexiones pueden ser hechas en forma incorrecta, el aceite se puede contaminar y durante la conexión se pueden caer dentro del tanque piezas como tornillos, tuercas, etc. A pesar de tales desventajas, el transformador con este tipo de derivaciones (TAPs) resulta más económico, por lo cual se utiliza frecuentemente.

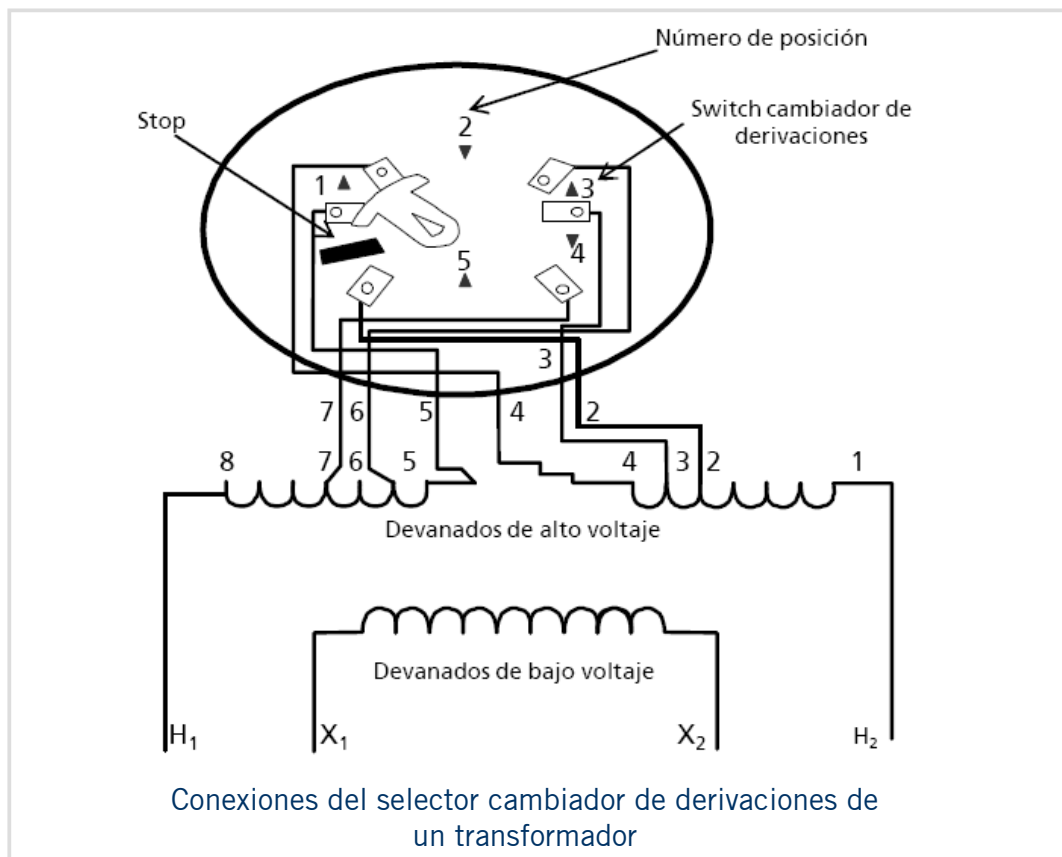
Para cambiar de derivación, hay que proceder así:

1. Desconectar el transformador de las líneas de alimentación,
 2. Hacer el cambio de derivaciones,
 3. Energizar el transformador nuevamente.
- El interruptor instalado en las líneas de alimentación al primario facilita y proporciona seguridad a esta operación.

Un método más práctico y seguro para cambiar las conexiones de los TAPs es utilizando un selector cambiador de derivaciones (TAPs).



Si se usa un selector cambiador de derivaciones, el mecanismo permite operar el selector sin necesidad de abrir el tanque. Sin embargo, sigue siendo requisito desenergizar el transformador antes de cambiar de derivaciones.



Físicamente el selector se monta sobre un bloque de terminales, generalmente localizado en la parte superior del núcleo del transformador.

Se opera desde la parte de afuera del tanque mediante una palanca o eje, el cual acciona al selector desde la cubierta o tapa del tanque del transformador.

En la parte exterior del selector y conectado al eje, se instala una perilla y una placa indicadora para identificar, por la posición de la perilla, qué derivación está siendo utilizada.

POSICIÓN	EFEECTO
1	Se tienen todas las vueltas del devanado del primario (alto voltaje) conectadas a la alimentación. En esta posición la relación de transformación es mínima y el transformador entrega el voltaje más bajo en el secundario.
2	En esta posición se elimina la sección 5 del devanado del primario y el voltaje del secundario se incrementa.
3, 4, 5	Estas posiciones eliminan más vueltas del devanado del primario incrementando así el voltaje en el secundario. Este incremento se establece en base a las relaciones de espiras ($E_p / E_s = N_p / N_s$) también conocida como relación de transformación.

Algunos procesos requieren estar haciendo ajustes en el voltaje sin parar. En estos casos el cambio de derivación se lleva a cabo mientras el transformador se encuentra operando con carga: se requiere un mecanismo conocido como cambiador de derivaciones con carga.

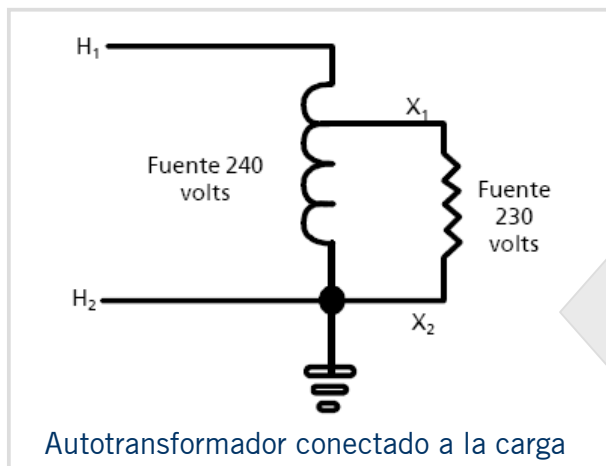
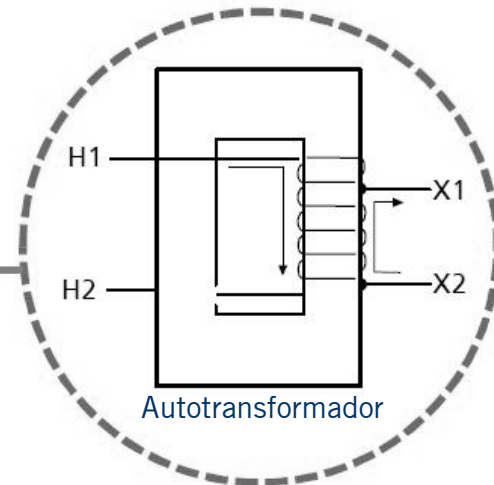


El cambiador de derivación con carga es más robusto que el de sin carga debido a que cortocircuita (momentáneamente y durante la transferencia) al devanado existente entre las derivaciones involucradas en el cambio.

Esto se hace para evitar una apertura o desconexión del circuito durante la transferencia.

7.3 Autotransformadores

El autotransformador difiere del transformador en que sólo tiene un devanado. En este devanado, una parte sirve tanto para el primario como para el secundario.



La figura muestra un autotransformador conectado a una carga. Este autotransformador se utiliza para reducir el voltaje. Las espiras entre H1 y H2 constituyen el devanado primario y las espiras entre X1 y X2 componen el devanado secundario.

El autotransformador se utiliza para elevar (elevador) o reducir (reductor) el voltaje en la carga. Esto depende del número de vueltas o espiras que tenga el primario y el secundario.

Si el autotransformador se utiliza para **aumentar** el voltaje,



El devanado secundario tendrá **más** vueltas que el primario, entonces...



El primario será parte del devanado secundario.

Si el autotransformador se utiliza para **reducir** el voltaje,



El devanado secundario tendrá **menos** vueltas que las del primario, entonces...



El secundario será parte del devanado primario.

En el autotransformador, la relación del voltaje, como en un transformador, es igual a la relación entre las espiras del primario y las del secundario (N_p / N_s).

Si se desprecia la corriente de excitación, las espiras por amper del primario y del secundario en un autotransformador son iguales. Así, la ecuación de la relación de transformación o vueltas ($E_p / E_s = N_p / N_s$) también se aplica a los autotransformadores.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Operan únicamente con un devanado, requieren, POR LO TANTO, menos cobre y por lo tanto son menos costosos que los transformadores.• Operan con mayor eficiencia y son más pequeños en tamaño físico que los transformadores de igual capacidad (kVA's).• Adicionalmente presentan menores niveles de ruido para el caso de misma carga y frecuencia.	<ul style="list-style-type: none">• No aísla el circuito primario del secundario. Esto hace que haya una conexión eléctrica entre primario y secundario. En algunas situaciones de falla en el primario o en el circuito que alimenta al primario, su efecto pasa directamente a los equipos que alimenta al secundario.• Potencial riesgo en los casos en que se hace un cambio grande de voltaje entre primario y secundario. Por ejemplo, si un autotransformador se utiliza para reducir el voltaje de alimentación de 480V a 120V para conexión de equipos, la diferencia entre los dos voltajes es 480V menos 120V dando por resultado 360V.

RECUERDE



En un transformador no hay conexión eléctrica entre primario y secundario. Los circuitos están aislados. El acoplamiento y cambio de potencia en un transformador es mediante flujo magnético.

Aplicación

Los autotransformadores se utilizan frecuentemente para:

- Reducir el voltaje, durante el período de arranque, en motores de CA.
- Compensar pequeñas caídas de voltaje en líneas de suministro eléctrico.
- Producir pequeños cambios de la amplitud del voltaje por requerimiento de carga.
- Adaptar el voltaje de alimentación de equipos especiales a voltajes de suministro estándar (por ejemplo: 440 a 380 VCA, 230 a 208 VCA, etc.).
- Equipos de potencia limitada con requerimientos de salida de voltaje variable (VARIAC's).

7.4 Transformadores para Instrumentos

Ciertos instrumentos de medición y relevadores de protección para sistemas de CA, no pueden conectarse directamente a los circuitos de alto voltaje. Para realizar esta adaptación se utilizan los transformadores para instrumentos.

La principal función del transformador para instrumento es aislar al instrumento o relevador del alto voltaje. Además hace posible estandarizar las señales para la mayoría de los instrumentos eléctricos y en esta forma operar en valores bajos de voltaje y corriente, como 120V y 5A.

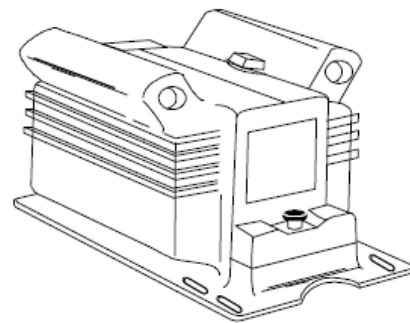
Los transformadores para instrumentos se dividen en:

- Transformador de Potencial (TP).
- Transformador de Corriente (TC).

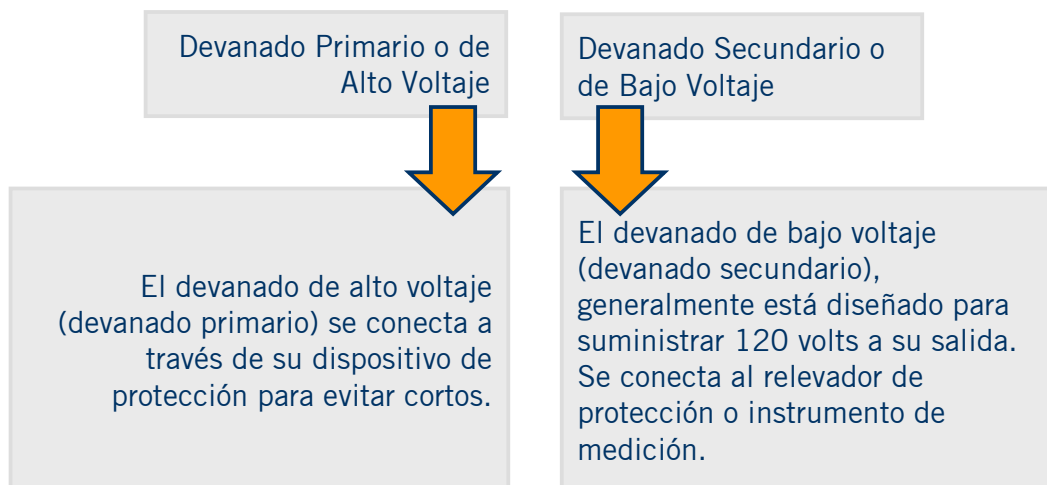
Transformador de Potencial (TP)

Transformador de Corriente (TC)

Los transformadores de voltaje, también llamados transformadores de potencial (TP) están diseñados para hacer grandes cambios de tensión, tanto de alta como de baja. Por lo tanto, este tipo de transformadores maneja un potencial de voltaje muy alto que también es denominado alta tensión y sus voltajes pueden variar de acuerdo a las necesidades. Son similares a los transformadores estándares de dos devanados, sólo que de menor capacidad.



Transformadores de Potencial



Al conectar el transformador de potencial, es importante poner a tierra su carcasa para propósitos de seguridad.

Los transformadores de potencial, debido a su uso, tienen una razón de transformación o voltaje muy precisa.

El porcentaje de error en un transformador de potencial, dependerá de la aplicación. En la mayoría, el porcentaje de error es menor al 0.5% (en Ternium México el porcentaje de error que se maneja es del 0.2%). Un porcentaje mayor de error podría producir una variación inaceptable en la medición de voltaje u ocasionar un mal funcionamiento en los relevadores de protección.



EJEMPLO



Como ejemplo, se utilizará un transformador de potencial que se utiliza para reducir el voltaje de una línea de alta tensión de 2,400 volts a 120 volts (relación 20 a 1).

Se conecta un voltímetro al devanado de secundario o de bajo voltaje 120 volts. La lectura que se lea en el voltímetro se multiplica por 20 para obtener el voltaje en alta tensión.

Si existiera un error del 4% en la relación de transformación o voltaje, el voltímetro indicaría 115.2 volts, así $20 \times 115.2 = 2,304$ volts, (produciendo un resultado con un error de 96 volts) cuando en realidad se tiene 2400 volts.

En este tipo de transformadores de potencial se tienen 2 grandes clases: los monofásicos y los trifásicos. Ya dentro de cada clasificación, hay varias características para cada transformador: tipo de enfriamiento, tipo de conexión de los devanados, elementos principales y auxiliares, etc.

Errores en los transformadores de potencial

En los transformadores de potencial existen 2 tipos de errores que afectan a la precisión de las medidas:

- **Error de relación:** Es la diferencia entre la relación verdadera entre la tensión del primario y secundario y la relación indicada en la placa característica.
- **Error de ángulo:** Es la diferencia en la posición de la tensión aplicada a la carga secundaria y la tensión aplicada al devanado primario. El error de ángulo se representa con el símbolo (θ). Se expresa en minutos y se define como positivo cuando la tensión aplicada a la carga, desde la terminal secundaria marcada a la no marcada, está adelantada respecto a la tensión aplicada al primario desde la terminal marcada a la no marcada.

Clasificación de los errores

En el transformador de potencial interesa que los errores en la relación de transformación y los errores de ángulo entre tensión primaria y secundaria se mantengan dentro de ciertos límites. Esto se obtiene sobredimensionando tanto el núcleo magnético como la sección de los conductores de los bobinados.

La magnitud de los errores depende de la característica de la carga secundaria que se conecta al transformador de potencial.

Para su clasificación desde el punto de vista de la precisión (error máximo en la relación de transformación) las diversas normas sobre transformador de potencial exigen que los errores se mantengan dentro de ciertos valores para determinadas características de la carga.

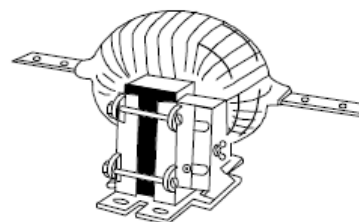
a) Norma Americana ASA	b) Norma Alemana VDE
Estas normas han clasificado las características de precisión de los transformadores para el servicio con aparatos de medición.	Esta norma VDE, normaliza para cada clase de precisión, la capacidad de los enrollados del transformador de potencial en VA.
La clase y límites de precisión definidas por norma ASA son: Precisión para transformadores de potencial 1,2 ($\pm 1.2\%$)- 0,6 ($\pm 0.6\%$)- 0,3 ($\pm 0.3\%$).	Las clases de precisión son 3-1-0,5-0,2-0,1 y ella debe mantenerse para cuando el voltaje primario no varíe más allá del 20% sobre su tensión nominal, excepto en los de clase 3 en que se garantiza solo para su tensión nominal. Precisión para transformadores de potencial 0,1 ($\pm 0.1\%$)- 0,20 ($\pm 0.2\%$) - 0,5 ($\pm 0,3\%$)- 1 ($\pm 1\%$)- 3 ($\pm 3\%$).

Transformador de Potencia (TP)

Transformador de Corriente (TC)

Para medir niveles de corriente en CA generalmente se utiliza un transformador para instrumento conocido como transformador de corriente (TC)

En un transformador de corriente, como el que se muestra en la figura, el devanado primario consiste de una o más espiras de alambre grueso enrollado en un núcleo de hierro/acero y conectado en serie con la línea donde se desea medir la corriente. En algunas ocasiones es un cable o una barra de cobre que pasa por el centro del núcleo, operando como devanado primario.



Transformadores de Corriente

El devanado secundario tiene muchas espiras de alambre delgado. A este devanado secundario se conectan normalmente las bobinas de corriente de los instrumentos de medición o relevadores de protección, operando como carga del transformador.

Los transformadores de corriente difieren de los transformadores de potencial en que la corriente del devanado secundario depende de la corriente que está pasando por el primario.

Los instrumentos de medición o bobinas de relevadores de protección están estandarizados para 5A a plena escala o rango nominal. Así, el devanado secundario de un transformador de corriente generalmente tiene una capacidad nominal de 5A.

Si un transformador de corriente tiene una relación de 100 a 5, esto significará que cuando hay 100A fluyendo en el primario, se producirán 5A en el secundario.

Esta relación de corrientes permanece constante mientras la carga conectada al secundario no ocasione que el transformador exceda su capacidad en voltamperes (VA). Si se excede de este rango, el núcleo se saturará y la corriente del secundario no se incrementará en la misma proporción que la corriente del primario.

Una vez más, en los transformadores de corriente la corriente del devanado secundario depende de la corriente que está pasando por el primario y no del voltaje.

Por lo tanto, si se abre el secundario de un transformador de corriente cuando circula corriente por el primario, se inducirá un alto voltaje en el devanado secundario, lo cual dañará el aislamiento de sus conductores y destruirá al transformador. Debido a esto, el circuito secundario de un transformador de corriente nunca debe ser abierto cuando el primario esté energizado.

Los instrumentos o relevadores de protección que utilizan para su operación los transformadores de corriente tienen la tablilla de terminales en una forma y función especial, cuya función es poner un puente en el secundario para poder trabajar con los otros instrumentos.



Tipo de Construcción

Los tipos de transformadores de corriente son:

1 Tipo primario devanado

Consta de dos devanados primarios y secundarios totalmente aislados y montados permanentemente sobre el circuito magnético.

2 Tipo barra

Es similar al tipo primario devanado, excepto en que el primario es un solo conductor recto de tipo barra.

3 Tipo toroidal (ventana)

Tiene un devanado secundario totalmente aislado y montado permanentemente sobre el circuito magnético y una ventana a través de la cual puede hacerse pasar un conductor que proporciona el devanado primario.

4 Tipo para bornes

Es un tipo especial toroidal proyectado para colocarse en los bornes aislados de los aparatos, actuando el conductor del borne como devanado primario.

Clasificación de los errores

Los errores en un transformador de corriente varían con la tensión para la carga conectada en bornes de los terminales secundarios y el valor de la corriente secundaria. A continuación se enuncian dos tipos de normas que especifican la precisión de los transformadores de corriente:

a) Norma Americana ASA	b) Norma Alemana VDE
<p>Esta norma hace una diferencia en la clase de precisión de los transformadores de corriente para el servicio de medición y protección.</p>	<p>A diferencia de las normas ASA, en estas normas no se hace un tratamiento diferenciado entre transformadores de corriente para medida y protección. La única diferencia entre ellos es la clase de precisión y el índice de sobrecorriente.</p>
<p>Las clases de precisión para el servicio de medición están definidas por los límites de error, en porcentaje de los factores de corrección del transformador para una corriente nominal secundaria del 100%. Los límites en porcentaje se doblan al 10% de corriente nominal, los límites de corriente del 100% se aplican también a la corriente secundaria correspondiente al valor de corriente térmica continua máxima del transformador de corriente.</p> <p>En la clase de precisión normalizada para protecciones, las normas ASA han establecido las clasificaciones de precisión de los transformadores de corriente para el servicio de protecciones, que consta de 3 factores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Límite de error porcentual: Los porcentajes máximos de error en la relación de transformación son de 2.5 y 10%. Ésta es la clase de precisión normalizada. • Valor nominal de tensión en bornes del secundario: Los valores establecidos de tensión en el secundario son: 10, 20, 50, 100, 400, y 800, correspondiente a cargas normalizadas USA de 100 A. • Clase de funcionamiento: Se designa con la letra L (baja impedancia) o H (alta impedancia). 	<p>Las clases de precisión para protecciones son 1 y 3 para transformadores de hasta 45 KV y 1 para 60 KV hacia arriba.</p> <p>En la clase 1 se garantiza esta precisión para corrientes entre 1 y 1,2 veces la corriente nominal, y para cargas secundarias entre el 25% y 100% la nominal con F.P 0,80. En la clase 3 se garantiza esta precisión para corrientes entre 0,5 y 1 veces la nominal, y para cargas entre el 50 y 100% la nominal con F.P 0,8.</p> <p>Finalmente, el índice de sobrecorriente, se define como el múltiplo de la corriente primaria para el cual el error de transformación se hace igual a 10% con la carga nominal.</p>

L (baja impedancia): Indica un transformador de corriente que es capaz de funcionar con cualquier tipo de carga conectada, incluso una carga que produzca la clase de precisión de la tensión de bornes del secundario a 20 veces la corriente nominal secundaria, para una gama de corrientes que van desde la nominal hasta 20 veces la corriente secundaria nominal, sin exceder la clase de precisión del límite de error porcentual.

H (alta impedancia): Indica un transformador de corriente que es capaz de producir cualquier tensión de bornes del secundario hasta, inclusive, la clase de precisión de la tensión con cualquier corriente secundaria para la gama de 5 a 20 veces la corriente nominal secundaria, sin exceder la clase de precisión del límite de error porcentual.

Por lo anterior para especificar completamente un transformador de corriente para el servicio de protección, se debe designar por su clase de precisión, tipo y tensión máxima secundaria. Estos valores definen completamente su comportamiento.

EJEMPLO

Un transformador de corriente 2.5H800, indica un transformador con clase de precisión de 2.5%, clase de funcionamiento H y tensión máxima secundaria en bornes secundarios de 800 V.



Causa de errores

Los errores en un transformador de corriente son debidos a la energía necesaria para producir el flujo en el núcleo que induce la tensión en el devanado secundario que suministra la corriente a través del circuito secundario. Los ampere-vueltas totales disponibles para proporcionar la corriente al secundario son iguales a los ampere-vueltas del primario menos los ampere-vueltas para producir el flujo del núcleo.

Un cambio en la carga secundaria altera el flujo requerido en el núcleo y varía los ampere-vueltas de excitación del núcleo; el flujo de dispersión en el núcleo cambia las características magnéticas del mismo y afecta a los ampere-vueltas de excitación.

Precauciones de seguridad

El devanado secundario siempre debe estar cortocircuitado antes de desconectar la carga. Si se abre el circuito secundario con circulación de corriente por el primario, todos los ampere-vueltas primarios son ampere-vueltas magnetizantes y normalmente producirán una tensión secundaria excesivamente elevada en bornes del circuito abierto.

¡ATENCIÓN!

Todos los circuitos secundarios de los transformadores de medida deben estar puestos a tierra. Cuando los secundarios del transformador de medida están interconectados; sólo debe ponerse a tierra un punto. Si el circuito secundario no está puesto a tierra, el secundario se convierte en la placa de media de un condensador, actuando el devanado de alta tensión y tierra como las otras dos placas.

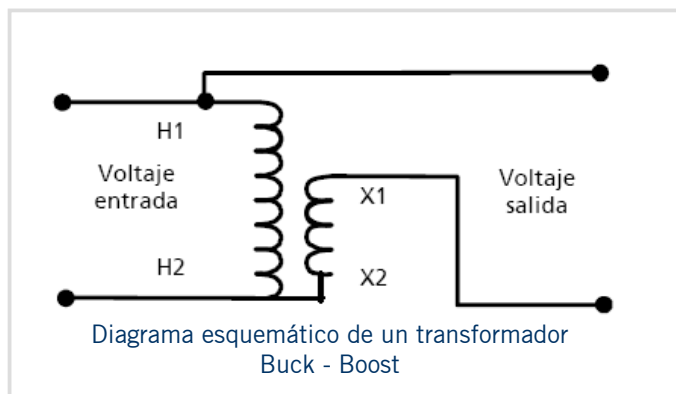


7.5 Transformadores Buck - Boost

Un transformador Buck-Boost es un transformador con dos devanados en donde ambos se conectan para operar como un autotransformador.

En la figura se muestra un diagrama esquemático de una de sus conexiones más comunes.

El transformador Buck-Boost se utiliza para incrementar o disminuir el voltaje de alimentación en pequeñas cantidades.



EJEMPLO

El transformador Buck - Boost se puede utilizar para incrementar el voltaje de 208 volts a 240 volts. Otros cambios de voltaje comunes son de 440 volts a 480 volts y viceversa y de 240 volts a 277 volts.

Debido a que se diseñan para pequeños cambios de voltaje, los transformadores Buck- Boost son más pequeños en tamaño que los transformadores de dos devanados estándares de la misma capacidad.

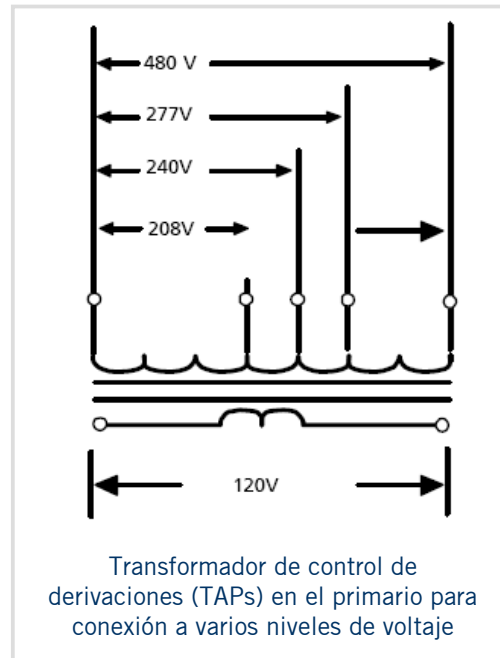
Por otra parte, el transformador Buck-Boost es más eficiente, produce menos ruido y es menos costoso.

7.6 Transformadores de Control

Un transformador de control es un transformador de dos devanados que provee una fuente de bajo voltaje para circuitos de control (generalmente 120VCA).

Los transformadores de control se utilizan en instalaciones industriales para proporcionar voltaje a los circuitos de control tales como relevación, fuentes de poder, bobinas de arrancadores y controladores de motores.

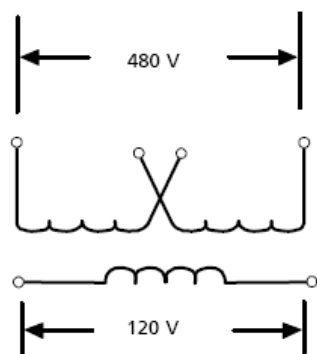
Los niveles de suministro de voltaje más comunes (en instalaciones industriales) son 208, 240, 277, 480 y 575 volts.



La mayoría de los circuitos de control, tales como arrancadores industriales, se fabrican para operar con 120 volts, ya que la mayoría de los dispositivos manejan este voltaje y además sus componentes son más económicos que los que operan con voltajes más elevados.

El transformador de control puede tener un devanado primario con derivaciones o TAPs para diversas opciones de voltaje de alimentación. Otra configuración común es un transformador con dos devanados en el primario. Esto permite operar sólo con 2 voltajes estándares diferentes de suministro.

EJEMPLO



Transformador de control con dos devanados de 240 volts, que al ser conectados en serie permiten un voltaje de alimentación de 480 volts.

En la figura se muestra un transformador con dos devanados en el primario, lo cual permite operarlo tanto con un voltaje de alimentación de 240 volts (en caso de conectarse en paralelo) como de 480 volts (conectándose en serie).

7.7 Transformadores de Distribución

En esta clasificación se engloban a los transformadores que manejan voltajes de media y baja tensión. Sus rangos de operación están entre 34.5 kV como máximo y desde ese voltaje hasta voltajes comerciales y residenciales.

Este tipo de transformadores son utilizados para reducir o aumentar voltajes y corrientes para poder utilizar la energía después de que se hizo la generación y la potencia de la energía eléctrica. Estos transformadores no son de gran tamaño comparados con los de potencia, ya que no manejan tanto voltaje.

Los transformadores de distribución son de dos tipos:

Tipo pedestal o estante



Tipo poste



Transformadores tipo poste: El nombre de estos transformadores se saca de la forma física en que se instalan para hacer la distribución con estos transformadores.

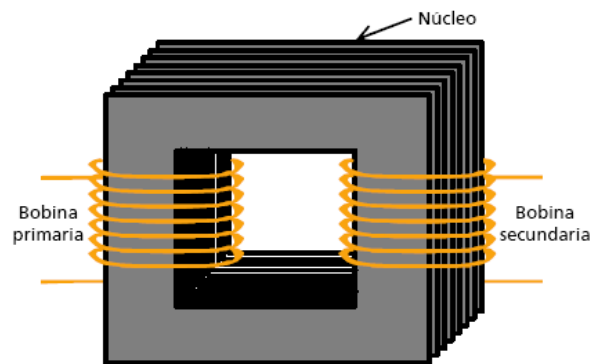
Para los transformadores de distribución tipo poste o pedestal existen variedades. Normalmente no se colocan en postes transformadores muy grandes debido al débil soporte que pudiera proporcionarles.

7.8 Transformadores según su Núcleo

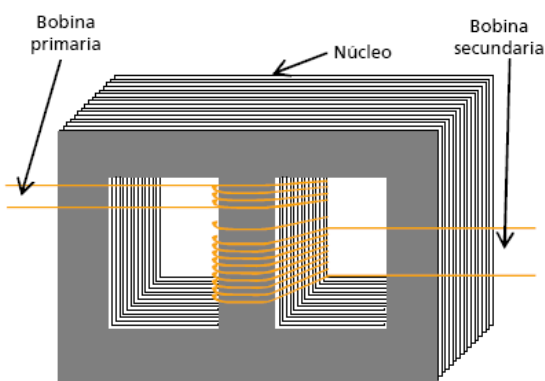
Básicamente, en relación con el tipo de núcleo, existen dos tipos de transformadores:

Tipo núcleo (core)

Si el núcleo tiene forma de rectángulo, como se muestra en la figura, con la bobina del primario enrollado a un extremo y la bobina del secundario en el otro, se le llama transformador tipo núcleo (core).



Transformador tipo núcleo (core)



Transformador tipo acorazado (shell)

Tipo acorazado (shell)

Si el núcleo forma una figura de un ocho rectangular, como se muestra en la figura, con las bobinas del primario y secundario enrolladas en forma concéntrica, es decir, que comparten el mismo centro, sobre la rama del medio se le denomina transformador acorazado (shell).

ACTIVIDAD 10

A lo largo de este capítulo hemos estudiado los distintos tipos de transformadores



Por favor, responda a las siguientes consignas:

1

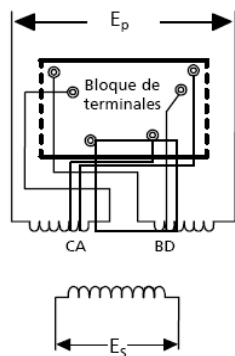
¿Para qué se utiliza el autotransformador?

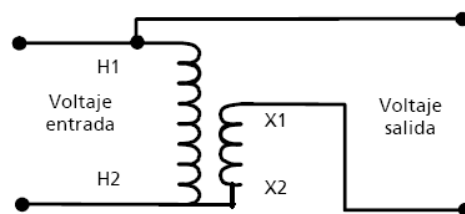
2

¿Con qué fin se utilizan los transformadores de control?

3

Indique el tipo de transformador que representan los siguientes diagramas:





¡Felicitaciones!

Usted ha finalizado el capítulo 7.

A continuación se desarrollará el capítulo *Análisis de Circuitos*.

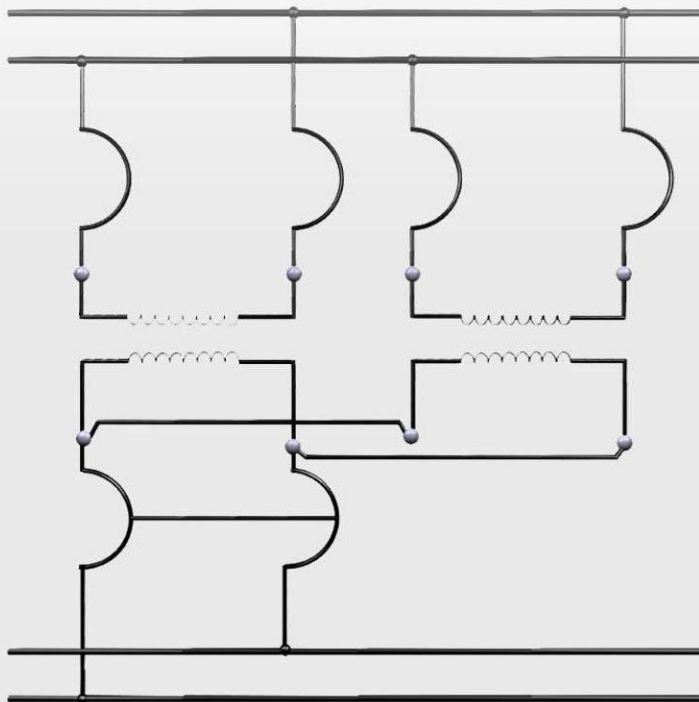


Análisis de Circuitos

TEMAS DEL CAPÍTULO 8

8.1 Circuitos Equivalentes	86
8.2 Diagrama Fasorial	88
8.3 Ensayos de Transformadores Trifásicos	89
8.4 Paralelo de Transformadores	91

En este capítulo se analizarán los circuitos que sirven para modelizar o modelar el comportamiento de los transformadores y distintas configuraciones posibles.

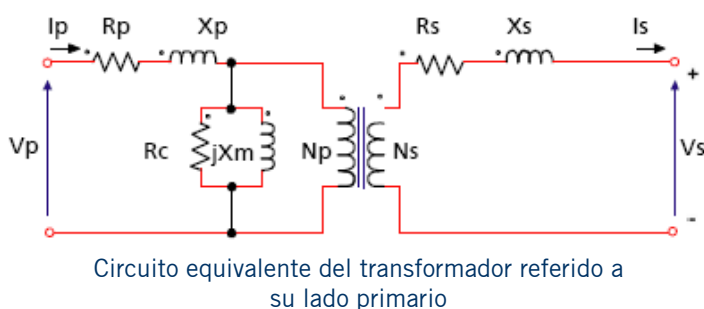


8.1 Circuitos Equivalentes

Las pérdidas que ocurren en los transformadores reales tienen que explicarse en un modelo que refleje el comportamiento de los transformadores. Los principales detalles que deben tenerse en cuenta para la construcción de tal modelo son:

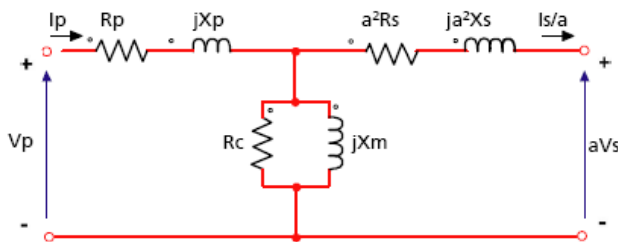
Pérdida	Característica
Pérdidas (FR) en el cobre	Las pérdidas en el cobre son pérdidas por resistencias en las bobinas primaria y secundaria del transformador. Son proporcionales al cuadrado de la corriente en dichas bobinas.
Pérdidas de corrientes parásitas	Las pérdidas por corrientes parásitas son pérdidas por resistencia en el núcleo del transformador. Son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado al transformador.
Pérdidas por histéresis	Las pérdidas por histéresis están asociadas con los reajustes, cada medio ciclo, de los dominios magnéticos en el núcleo. Son una función compleja, no lineal, del voltaje aplicado al transformador.
Flujo de dispersión	Los flujos ϕ_{LP} y ϕ_{LS} que salen del núcleo y pasan solamente a través de una de las bobinas de transformador son flujos de dispersión. Estos flujos, producen una autoinductancia en las bobinas primarias y secundarias. Sus efectos deben tenerse en cuenta.

El modelo que representa estas pérdidas es:



Aunque la figura muestra un modelo exacto de un transformador, no es de mucha utilidad. Para analizar circuitos prácticos que contengan transformadores, normalmente es necesario convertir el circuito entero en un circuito equivalente, con un nivel de voltaje único. Por tanto, el circuito equivalente se debe referir, bien a su lado primario o bien al secundario en la solución de problemas.

El circuito referido a las tensiones del primario es:



Circuitos equivalentes aproximados de un transformador

Los modelos de transformadores de las figuras anteriores, a menudo, son más complejos de lo necesario con el objeto de lograr buenos resultados en aplicaciones prácticas de ingeniería. Una de las principales quejas sobre ellos es que la rama de excitación de los modelos añade otro nodo al circuito que se esté analizando, haciendo la solución del circuito más compleja de lo necesario. La rama de excitación tiene muy poca corriente en comparación con la corriente de carga de los transformadores; de hecho es tan pequeña, que bajo circunstancias normales causa una caída completamente desechable de voltaje en R_p y X_p .

Desde esto último, se puede producir un **circuito equivalente simplificado** que trabaje casi tan bien como el modelo original. La rama de excitación simplemente se mueve hacia la entrada del transformador y las impedancias primaria y secundaria se dejan en serie entre sí. Estas impedancias sólo se adicionan, creando los circuitos equivalentes aproximados, como se ve en las siguientes figuras a y b.

En algunas aplicaciones, la rama de excitación puede desecharse totalmente sin causar ningún error serio. En estos casos, el circuito equivalente del transformador se reduce a los circuitos sencillos de las figuras c y d.

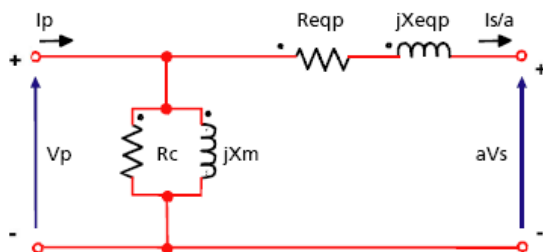


Figura a:
 $Reqp = R_p + a^2R_s$
 $Xeqp = X_p + a^2X_s$

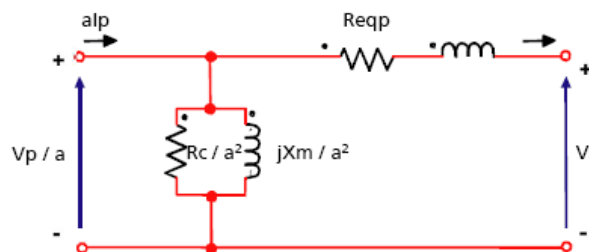


Figura b:
 $Reqs = R_p/a^2 + R_s$
 $Xeqs = X_p/a^2 + X_s$

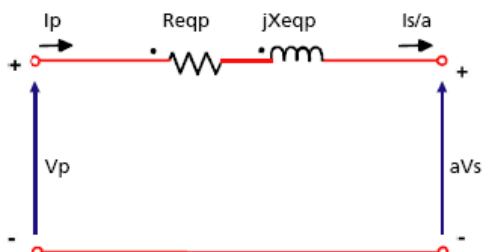


Figura c

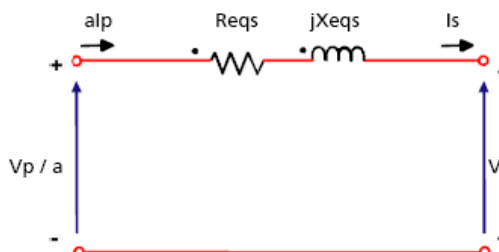
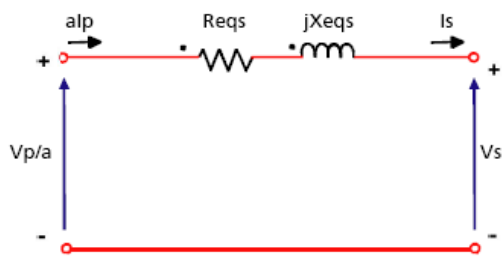


Figura d

8.2 Diagrama Fasorial

Para obtener la regulación de voltaje en un transformador se requiere entender las caídas de voltaje que se producen en su interior.



Consideremos el circuito equivalente del transformador simplificado de la figura. Los efectos de la rama de excitación en la regulación de voltaje del transformador pueden ignorarse, por lo tanto solamente las impedancias en serie deben tomarse en cuenta. La regulación de voltaje de un transformador depende tanto de la magnitud de estas impedancias como del ángulo fase de la corriente que circula por el transformador.

La forma más fácil de determinar el efecto de la impedancia y de los ángulos de fase de la corriente circulante en la regulación de voltaje del transformador es analizar el **Diagrama Fasorial**, el cual constituye un esquema de los voltajes y corrientes fasoriales del transformador.

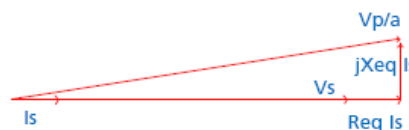
En los siguientes diagramas, el voltaje fasorial V_s se supone con un ángulo de 0° y todos los demás voltajes y corrientes se comparan con dicha suposición. Si se aplica la ley de voltajes de Kirchhoff al circuito equivalente de la primer figura, el voltaje primario se halla:

$$V_{p/a} = V_s + R_{eqs} \cdot I_s + j X_{eqs} \cdot I_s$$

Un diagrama fasorial de un transformador es una representación visual de esta ecuación. La **primer** figura nos muestra un diagrama fasorial de un transformador que trabaja con un factor de potencia atrasado. Es muy fácil ver que $V_{p/a} > V_s$ para cargas en atraso, así que la regulación de voltaje de un transformador con tales cargas debe ser mayor que cero.



En la **segunda** figura puede verse un diagrama fasorial con un factor de potencia igual a uno. Aquí nuevamente se ve que el voltaje secundario es menor que el primario, de donde $VR=0$. Sin embargo, en esta oportunidad la regulación de voltaje es menor que tenía con una corriente en atraso.



Si la corriente secundaria está adelantada, el voltaje secundario puede ser realmente mayor que el voltaje primario referido. Si esto sucede, el transformador tiene realmente una regulación negativa como se ilustra en la última figura.



8.3 Ensayos de Transformadores Trifásicos

Hay pocas diferencias entre los transformadores trifásicos y monofásicos en lo que respecta a los ensayos a realizar. Por lo pronto, las especificaciones sobre temperatura, aislamiento, etc., no pueden ser diferentes, pues las normas no hacen distinción sobre el número de fases. Las caídas de tensión y regulación también pueden estudiarse como si se trataran de un transformador monofásico, con sólo considerar separadamente cada fase. Ya sabemos como se combinan los resultados para hacer un diagrama único, trifásico. De modo que la característica de carga interna o externa, que da la tensión en los bornes secundarios al variar la carga, se tomará para una fase, pues es prácticamente igual para las otras.

Cuando se considera el rendimiento, aparece la primera diferencia. En efecto, cuando el núcleo es asimétrico, las pérdidas en el hierro son distintas para las tres fases lo cual es común. Como para calcular el rendimiento hay que medir las pérdidas en el hierro y en el cobre, por lo que habrá alguna diferencia con respecto a los transformadores monofásicos. Se realizarán, por tanto, los ensayos en vacío y cortocircuito.

Se utiliza para encontrar las pérdidas en el **hierro** en un transformador.

En el primario se aplica la tensión nominal y el secundario se deja en circuito abierto. La corriente que circula en el primario se denomina corriente de excitación y es del orden de 1 al 10% de la nominal.

Como la corriente de excitación es mucho menor que la nominal, podemos despreciar la caída de tensión en R_p y X_p .

Podemos obtener la relación de transformación:

$$m = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{V_1}{V_2}$$

Podemos conocer las pérdidas en el hierro asumiendo que la pérdida en R_c es despreciable, entonces la potencia leída será la pérdida en el hierro:

$$W = P_1 \approx P_{Fc}$$

Y el factor de potencia será:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{V_1 \cdot I_1}$$

La impedancia equivalente Z_0 (R_c , jX_m):

$$Z_0 = \frac{V_1}{I_0}$$

ENSAYO EN VACÍO

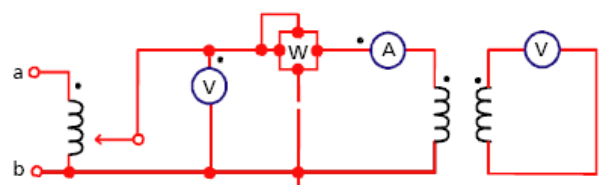
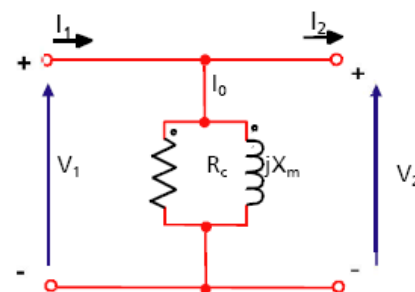


Diagrama de ensayo en vacío



Circuito equivalente

Se utiliza para determinar las pérdidas en el **cobre**. En este caso no es menester medir las pérdidas en las tres fases. Dado que son iguales en todas, basta con medir una fase y multiplicarla por tres. Se emplea el esquema que se muestra en la siguiente figura.

Se aplica una tensión reducida denominada tensión de cortocircuito U_{cc} (2 al 15% de la tensión nominal), tal que la corriente en el primario sea igual a la corriente nominal.

Como la tensión de cortocircuito U_{cc} es pequeña, la corriente de excitación puede despreciarse y simplificar el circuito equivalente. Si la corriente de cortocircuito I_{1n} es pequeña podemos considerar que la única pérdida es la del cobre P_{Cu} .

Entonces la potencia W que mide el vatímetro es la potencia de corto circuito.

$$W = P_{cc} \approx P_{Cu}$$

Podemos calcular el factor de potencia en cortocircuito.

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{Cu}}{V_{cc} \cdot I_{1n}}$$

La impedancia equivalente de cortocircuito será:

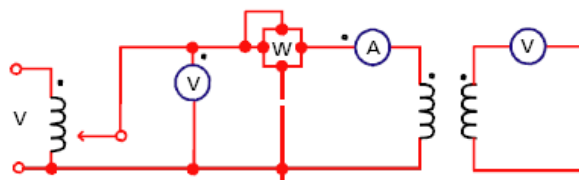
$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{1n}}$$

Podemos obtener los dos componentes de Z_{cc} :

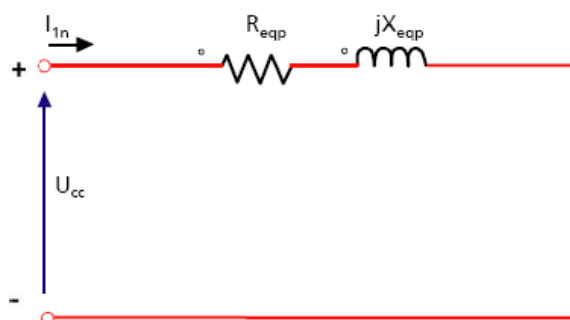
$$R = Z_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc}$$

$$X = Z_{cc} \cdot \sin \varphi_{cc}$$

ENSAYO EN CORTOCIRCUITO



Medición en el ensayo en cortocircuito



Circuito equivalente para el ensayo en cortocircuito

8.4 Paralelo de Transformadores

El paralelo de transformadores se utiliza cuando dos transformadores de igual capacidad deben operar al doble de capacidad en kVA de cualquiera de ellos en forma individual. En otras palabras, la capacidad en kilovolt-ampers (kVA) de transformadores conectados en paralelo es igual a la suma de sus capacidades individuales.

Al instalar en una planta una carga adicional, es algunas veces más práctico el agregar otro transformador que cambiar el existente. Para dividir la carga de acuerdo con la capacidad de los transformadores y evitar corrientes circulantes, es necesario cumplir con los siguientes requerimientos:

- Sus rangos de voltaje deben ser iguales.
- Sus impedancias (porcentaje de impedancia) también deben ser iguales.

Antes de hacer las conexiones finales, se debe realizar una prueba de polaridad, de tal forma que su conexión sea hecha en la polaridad adecuada. Esto se puede llevar a cabo sin desconectar el transformador original. El segundo transformador se conecta como se muestra en la figura.

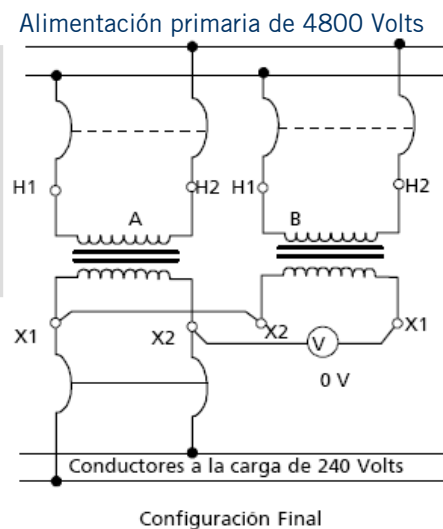
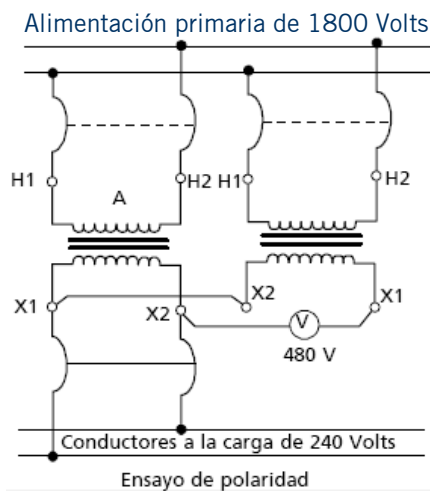
Observe que las terminales del secundario del segundo transformador no están marcadas, pero el voltímetro indica 480 volts. La suma de ambos voltajes del secundario es de 480 volts, así, los secundarios están conectados en serie en vez de paralelo (polaridad invertida).

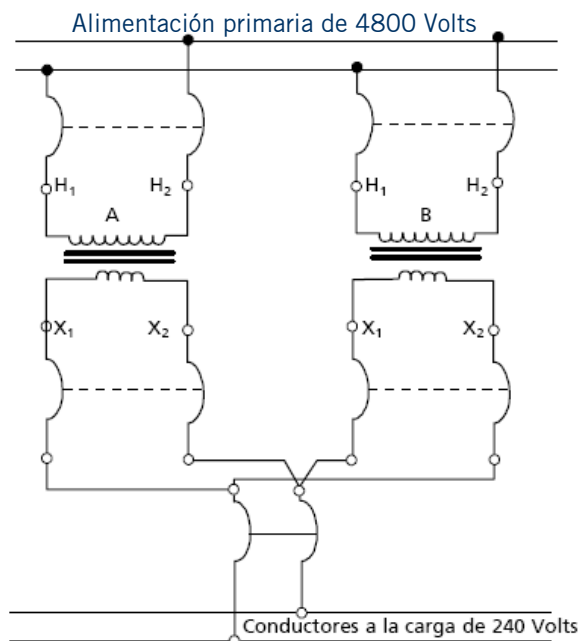


De los resultados de esta prueba se puede asumir que las conexiones del secundario deben ser cambiadas como se muestra en la figura. El voltímetro ahora indica 0 volts. Para terminar, se debe quitar el voltímetro y conectar los transformadores como se muestra en la figura.

¡ATENCIÓN!

Nunca (en ningún tipo de conexión) se deben unir terminales que tengan una diferencia de potencial entre ellas.





Conexiones finales para dos transformadores en paralelo

MANTENIMIENTO

La operación en paralelo de los transformadores ofrece la ventaja de poder quitar un transformador de servicio para reemplazarlo o para darle mantenimiento sin interrumpir la operación completamente en la carga o proceso que alimenta.

¡ATENCIÓN!

- Cuando se requiera retirar un transformador que se encuentre en operación, se debe asegurar que los interruptores que conectan tanto al devanado primario como al secundario estén abiertos antes de desconectarlo.
- Si sólo se abre el primario, el secundario seguirá energizado a través de su conexión con otros transformadores, esto es que el voltaje y corriente presentes en el secundario inducirán un voltaje en el devanado primario.
- Se recomienda, por seguridad, desconectar primeramente el devanado de bajo voltaje, para así asegurar que cuando el devanado de alto voltaje esté desconectado, no haya un voltaje inducido en él.
- En el caso de los transformadores reductores en paralelo, se puede presentar una condición muy peligrosa debido a la posibilidad de esta retroalimentación. Si se abre el fusible o interruptor del primario, el secundario induce voltaje primario. Así los transformadores conectados, por ejemplo, a una alimentación de 13200 volts, pueden tener este voltaje inducido nuevamente en el primario, después de haber sido desconectado.

ACTIVIDAD 11

Para finalizar el presente capítulo, le proponemos una última actividad con el fin de aplicar lo aprendido.



Responda a las siguientes consignas:

1

Imagine que se ha logrado construir un transformador con un conductor cuya resistencia es cero. Dibuje el circuito equivalente de ese transformador:

2

¿Qué significa que un transformador funciona con un factor de potencia atrasado?

3

Defina los conceptos de *Tensión de cortocircuito* y *Corriente de excitación*.

4

¿Cuál es la principal ventaja de la operación en paralelo de los transformadores?

¡Felicitaciones!

Usted ha finalizado el capítulo 8.

A continuación se desarrollará el capítulo *Mantenimiento*.



Mantenimiento

TEMAS DEL CAPÍTULO 9

9.1 Transformadores Tipo Secos	95
9.2 Transformadores en Aceite	99

Este capítulo presenta los lineamientos para el mantenimiento de los distintos tipos de transformadores.



9.1 Transformadores Tipo Secos

Aún cuando los transformadores requieren de menos atención que la mayoría de los aparatos eléctricos, necesitan igualmente de cierto mantenimiento rutinario. En algunos casos, el daño en los transformadores se debe a la **falta de mantenimiento**.

MANTENIMIENTO



Haciendo mantenimiento predictivo y/o preventivo en los transformadores pueden descubrirse y corregirse los problemas menores antes de que estos se conviertan en problemas serios e interfieran con el funcionamiento de los mismos.

Los transformadores **tipo seco**, como su nombre lo indica, no están inmersos en aceite y están diseñados para instalarse en lugares secos. Dadas sus características, debe evitarse el contacto accidental con agua (a través de accesos tales como ventanas) y líneas de vapor (deben instalarse lejos de estos mismos).

Factores a considerar para el funcionamiento y mantenimiento de los transformadores tipo secos

Humedad ambiente

Pueden operar correctamente en lugares donde la humedad relativa es alta, pero se deben tomar precauciones para mantenerlos secos cuando no se encuentren energizados durante cierto tiempo (cuando se da mantenimiento a los equipos, etc.).

Circulación del aire

En la instalación de transformadores tipo seco se requiere, como mínimo, una distancia de 12” (30.48 cm) de separación a la pared más cercana. De esta forma se permite la circulación de aire (enfriamiento) alrededor y a través del transformador. La ventilación es vital para un adecuado enfriamiento de los transformadores.

Presencia de polvo en el aire

El aire debe ser preferentemente limpio y de no ser así, se recomienda filtrarlo para reducir la presencia de partículas y/o gases. De esta forma se protege al transformador del polvo y contaminantes químicos.

El polvo que se acumula en los devanados, núcleo y cubierta protectora del transformador reduce su capacidad de disipar el calor, lo cual provoca su sobrecalentamiento.

Precauciones

Se deben llevar a cabo inspecciones periódicas a los devanados y núcleo por lo menos una vez al año. Al realizar la inspección se debe desconectar el transformador de su alimentación. Se debe tener especial atención si el transformador está conectado en paralelo con otros transformadores, en este caso hay que desconectar también el devanado secundario. Si éste se mantiene energizado, por el mismo efecto de inducción, se tendrá presente un voltaje en terminales del devanado primario.

Cuando por accidente o condensación se humedecen los devanados del transformador, bajo ningún motivo hay que energizarlo pues existe un riesgo alto de una falla mayor. En estos casos hay que seguir algún método de secado de los devanados del transformador.

Revisión

Cuando se quitan las cubiertas, se revisa si existe acumulación de polvo (especialmente en la superficie de los devanados), conexiones sueltas (especialmente en las terminales), decoloración debido a exceso de calor o partes carbonizadas (producidos por malos contactos o terminales en mal estado) y corrosión.

Limpieza

Los devanados se pueden limpiar con una aspiradora o soplador con aire comprimido seco o nitrógeno. La presión no debe exceder los 25 psi (1.75 kg/cm²).

Se recomienda, como primer paso de la limpieza, usar la aspiradora y después el aire comprimido o nitrógeno. Con esto se logra limpiar los conductos de flujo de aire que tienen los devanados.

Todas las superficies, como soportes, cambiador de TAPs, conexiones de tipo terminal, *bushings* y otras superficies aislantes se deben limpiar con una tela seca. Se debe evitar el uso de solventes dado que pueden tener un efecto destructivo sobre el aislamiento del transformador.

Procedimiento de secado

Cuando el transformador está energizado, el calor producido por el flujo de corriente eléctrica a través de los devanados del transformador (y su resistencia) evitan la condensación de la humedad y mantienen secos los devanados.

En el caso de paros prolongados por mantenimiento, se deben utilizar calentadores o secadores para evitar condensación de humedad en los devanados. Si no se tomó en cuenta lo anterior se recomienda hacer una prueba de resistencia de aislamiento.

Si las pruebas de resistencia de aislamiento indican que los devanados han adquirido humedad o si estos han estado sujetos a condiciones de humedad no usuales, se deben someter a un proceso de secado.



1 Mediante la aplicación de calor externo

2 Mediante la aplicación de calor interno

3 Mediante la aplicación de una combinación de calor externo e interno

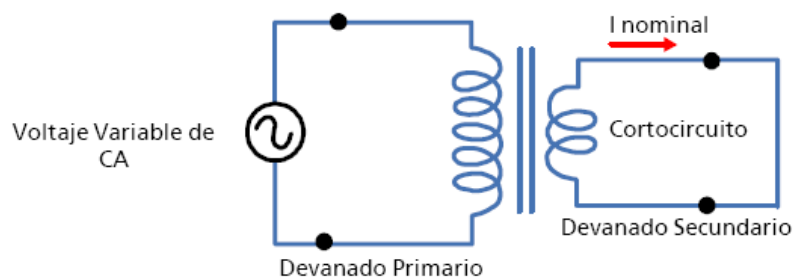
1 Mediante la aplicación de calor externo

Es el procedimiento de secado más común. Se lleva a cabo aplicando aire caliente en los conductos presentes entre los devanados.

El aire caliente se puede obtener usando resistencias o calentadores. Otra forma de calentamiento externo es introduciendo al transformador en un horno. En éste horno la temperatura de secado no debe exceder los 110°C (230°F).

2 Mediante la aplicación de calor interno

Este proceso de secado es más lento. El calentamiento interno se logra cortocircuitando un devanado y aplicando un voltaje reducido al otro devanado para obtener aproximadamente la corriente nominal del transformador, como se aprecia en el siguiente diagrama.



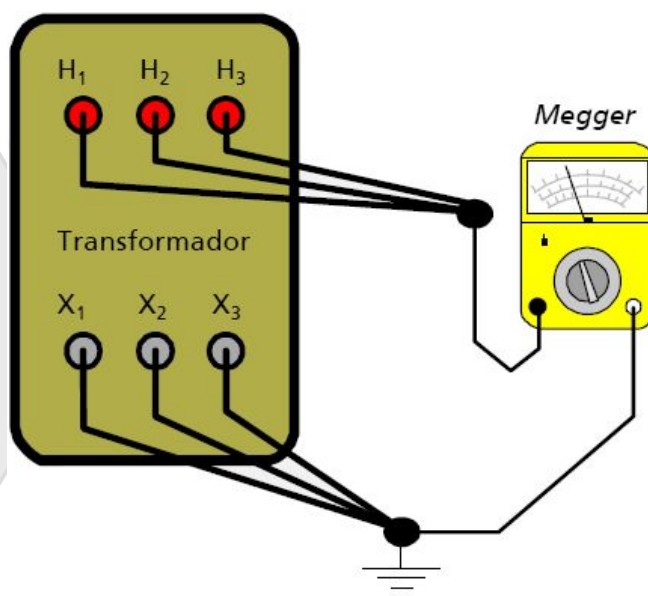
Conexión para secado por calentamiento interno

3 Mediante la aplicación de una combinación de calor externo e interno

Constituye una forma rápida de sacado de los devanados.

La temperatura del devanado no debe exceder los 100°C (230°F) y se debe medir en los conductos que se tienen entre los devanados. Para la medición de la temperatura no se deben utilizar termómetros de mercurio, debido a que se inducen corrientes en el mismo causando lecturas erróneas.

Durante el proceso de secado, el transformador debe estar bajo vigilancia constante para realizar alguna acción de emergencia en caso de incendio. En este caso, se debe tener disponible un extinguidor de CO₂. Se deben hacer las mediciones de resistencia de aislamiento para cada devanado con respecto a tierra, conectando los demás devanados también a tierra, como se muestra en la figura.



Medición de resistencia de aislamiento, conexión del Megger y los devanados del transformador

¡ATENCIÓN!

Antes de hacer las mediciones de resistencia de aislamiento, en caso de utilizar secado interno, interrumpa el suministro de corriente y provoque un corto circuito a los devanados entre sus terminales y tierra durante un minuto, esto último con la finalidad de drenar toda carga estática.

RECUERDE

Recuerde que para poder ser comparativas, todas las lecturas de resistencia de aislamiento deben ser hechas al mismo nivel de voltaje y referirlas a la misma temperatura.

9.2 Transformadores en Aceite

Los transformadores en aceite requieren más atención que los de tipo seco. El líquido que se utiliza como aislante es **aceite mineral** o un **líquido sintético**.

La acumulación de sedimentos en los serpentines y conductos de enfriamiento del transformador reducen la capacidad de transferencia de calor, ocasionando un incremento en la temperatura de operación.

Los devanados se deben inspeccionar según sea la necesidad.

Para prevenir la absorción de humedad, se debe evitar realizar la inspección en días con alta humedad y la expansión de bobinas de aire durante el menor tiempo posible.

MANTENIMIENTO



Estos líquidos deben revisarse por lo menos una vez al año para prevenir humedad o formación de sedimentos.

MANTENIMIENTO



Es recomendable desenergizar el transformador, quitar la cubierta y drenar la cantidad suficiente de aceite aislante para exponer la parte superior del núcleo y bobinas.

Los transformadores en aceite, generalmente tienen dos tipos de enfriamiento:



1

Autoenfriado

2

Enfriado por agua

1

Autoenfriado

Este tipo de enfriamiento depende de la circulación del aire alrededor del tanque y de que sus disipadores se encuentren limpios.

2

Enfriado por agua

El transformador enfriado con agua utiliza conductos o serpentines de enfriamiento a través de los cuales circula el agua.

MANTENIMIENTO



La acumulación de óxido en los serpentines de enfriamiento reduce el flujo de agua produciendo sobrecalentamiento. Para eliminar el óxido, primeramente se deberá dejar al transformador fuera de servicio al transformador y se deberá retirar el serpentín para luego drenar el agua mediante un compresor de aire. Posteriormente, se deberán llenar los tubos con una solución de ácido muriático (sulfúrico) y agua.

- La tubería no se debe tapar cuando se llena con la solución de ácido, ya que hay una reacción química que puede producir un incremento de presión.
- La solución consiste en una mezcla de partes iguales de ácido muriático puro y agua. Esta solución se deja en el radiador de enfriamiento del transformador por un período de 1 hora, después se enjuaga con agua limpia y, por último, con aceite que tenía el transformador.
- Mientras se realiza esta operación, las tuberías de entrada y salida de la bobina de enfriamiento se deben desconectar del sistema de agua y dirigir lejos del transformador. Haciendo esto, se reduce la posibilidad de que entre ácido o agua en el transformador.
- Las fugas en las uniones del sistema de enfriamiento se pueden eliminar utilizando una soldadura. La aplicación de la misma se debe hacer sin eliminar el aceite, ya que al drenar el aceite se produce una mezcla explosiva de vapor de aceite y aire, la cual puede iniciar durante la soldadura.
- Las fugas en el hierro vaciado se pueden reparar taladrando e insertando una conexión tapón. Las fugas en los empaques se pueden eliminar instalando nuevos empaques.

ANEXO



En este apartado encontrará un ejemplo de programa de mantenimiento de transformadores.

ACTIVIDAD 12



De acuerdo a lo estudiado con anterioridad, responda a las siguientes preguntas:

1

¿Cuál es la mayor precaución a tener en cuenta para los transformadores tipo seco?

2

¿Cuándo es necesario el procedimiento de secado?

3

¿Qué precaución debe tomarse en cuenta en un proceso de secado por combinación de calor externo e interno?

4

¿Qué función cumple el líquido en los transformadores en aceite?

¡Felicitaciones!

Usted ha finalizado el capítulo 9.

A continuación se desarrollará el capítulo *Fallas*.



Fallas

TEMAS DEL CAPÍTULO 10

10.1 Fallas en el Aceite Aislante	103
10.2 Fallas en el Equipo Auxiliar	107
10.3 Fallas en los Devanados	108
10.4 Detección de Fallas mediante Análisis de Gases	112

A continuación se presenta cómo se producen las fallas en los transformadores, cómo detectarlas, prevenirlas y qué procedimientos se pueden seguir para evitarlas.



10.1 Fallas en el Aceite Aislante

El aceite en el transformador se deteriora por la acción de la **humedad**, el **oxígeno**, la **presencia de catalizadores (cobre)** y el incremento de su **temperatura**. La combinación de estos elementos tiene una acción química en el aceite, que da como resultado la generación de ácidos que atacan a los aislamientos y a las partes mecánicas del transformador, entre otros efectos.

De esta acción química resultan los lodos que se precipitan en el transformador y que impiden la correcta disipación del calor, acelerando por lo tanto el envejecimiento de los aislamientos.

<p>La humedad en el aceite se puede originar por:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El aire que entra al tanque del transformador durante su operación; • Fallas en sus juntas y empaques, fugas en general; • Descomposición propia del aceite y de los aislamientos. <p>La humedad en el aceite se puede detectar mediante pruebas de laboratorio y con la ayuda de instrumentos de medición.</p>	<p>Consecuencias</p> <p>Si se detecta humedad, se deben revisar todos los empaques y terminales de conexión (bushings) para determinar el acceso de la humedad.</p>
<p>La formación de sedimentos es ocasionada por la oxidación del aceite al tener contacto con el aire.</p>	<p>Consecuencias</p> <p>Si se encuentra demasiado sedimento, se debe drenar el aceite así como limpiar a presión la parte interior del tanque y devanados. Posteriormente, se regresa el aceite antiguo al tanque a través de un filtro.</p>

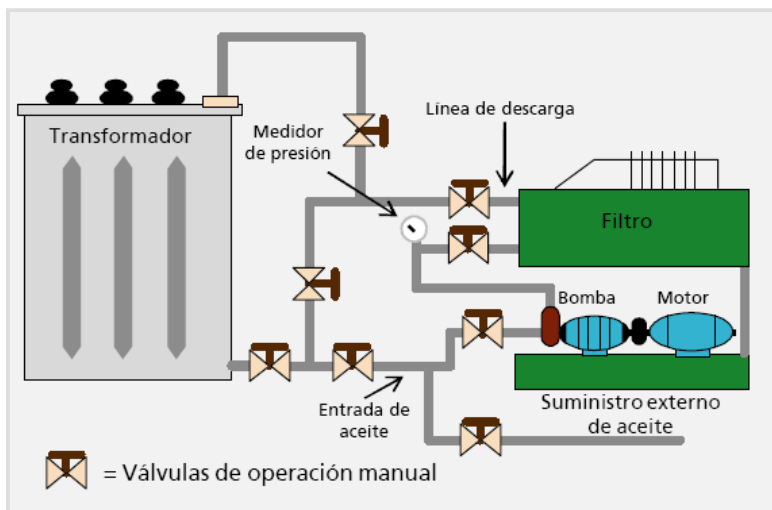
MANTENIMIENTO

Los transformadores en aceite, en los cuales ha entrado agua o se han inundado, se deben secar. Para realizar el secado se debe drenar el aceite en otro contenedor y seguir el procedimiento indicado para los transformadores tipo seco, en relación con las bobinas y el núcleo.

El aceite debe secarse con un filtro a presión. Al terminar se hace una prueba para determinar su rigidez dieléctrica, antes de que se bombee de nuevo dentro del tanque del transformador.



En la figura se muestra la forma en que se seca el aceite de un transformador, utilizando un circuito externo y haciendo pasar al aceite a través de un filtro.



¡ATENCIÓN!

El contenido de agua en el aceite, se define en partes por millón, donde 1000 partes por millón (ppm) = 0.1% humedad ($1000/1000000 = 0.001 \times 100 = 0.1\%$). Se dice que un aceite está en equilibrio, cuando su contenido de humedad es igual a 40 ppm (0.004% de humedad). Bajo esta condición, ni el aceite cede su humedad a los aislamientos, ni estos la ceden al aceite.

Circuito hidráulico que se utiliza en transformadores pequeños en los cuales re circula el aceite mediante una bomba y, al pasarlo a través de un filtro, reduce su contenido de humedad.

Para transformadores grandes se diseñan diagramas de flujo mas complejos pues es mayor el contenido de aceite que almacenan, y por lo tanto es necesario un proceso de purificación del aceite mas detallado. En la figura se muestra la forma en que se seca el aceite de un transformador, utilizando un circuito externo y haciendo pasar al aceite a través de un filtro.

EJEMPLO

En la figura se muestra un ejemplo de este tipo de diagrama utilizado por una máquina llamada desgasificadora para purificar el aceite.

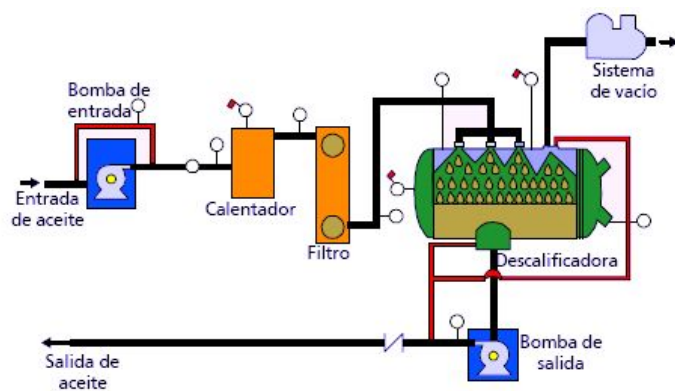


Diagrama de flujo que muestra el proceso de purificación de aceite en transformadores grandes

¿Qué sucede al romperse la condición de equilibrio?

Al romperse la condición de equilibrio, es decir, al aumentar el valor de contenido de humedad en el aceite, resultan los siguientes problemas:

1 El aceite cede su humedad a los aislamientos, lo cual da por resultado que el aislamiento envejezca más rápido y, por tanto, falle y se dañe.

2 El incremento de humedad del aceite, se manifiesta en una disminución en el valor de voltaje de ruptura o rigidez dieléctrica. Por ejemplo, un valor de contenido de agua de 60ppm reduce el valor de rigidez dieléctrica en un 13%.

El aceite se satura cuando su contenido de humedad es de 100 ppm (0.01%). Bajo esta condición, cualquier adición será absorbida por los materiales fibrosos del transformador, como son: cartón, papel aislante y madera.



De lo antes expuesto, se concluye que la inspección del aceite aislante debe comprender:

1. Contenido de humedad
2. Acidez
3. Rigidez dieléctrica
4. Presencia de lodos
5. Tensión interfacial
6. Resistividad
7. Factor de potencia, etc.

¡ATENCIÓN!

Un aceite muy contaminado presenta las siguientes características:

- Contenido de humedad igual o mayor que 80 ppm
- Rigidez dieléctrica menor o igual a 22 kV
- Se reporta presencia de lodos

MANTENIMIENTO

Bajo estas condiciones de contaminación, en transformadores pequeños (y hasta donde es práctico realizarlo) es recomendable sustituir el aceite, para lo cual se debe hacer lo siguiente:

1. Sacar el núcleo y los devanados;
2. Sacar y desechar el aceite;
3. Limpiar el interior del tanque;
4. Limpiar el núcleo y los devanados y secarlos;
5. Introducir el núcleo y los devanados en el tanque;
6. Sellar y llenar a vacío con aceite nuevo.

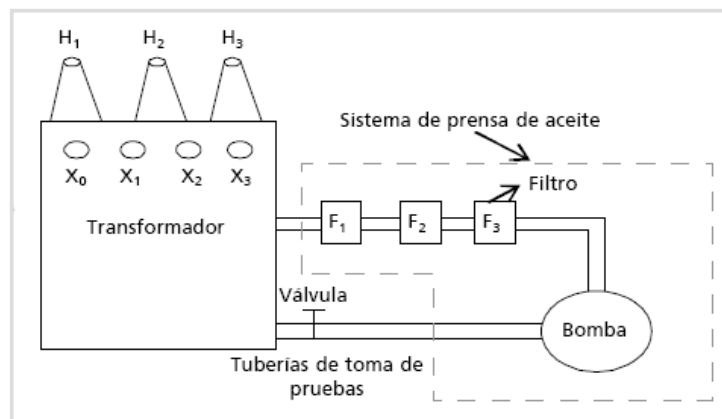
Prensa de filtrar

La prensa de filtrar es un dispositivo que puede usarse para reacondicionar el aceite del transformador.

Una prensa de filtrar esta compuesta por una bomba y una serie de filtros. Se usa una manguera para conectar la prensa de filtrar a la válvula de muestreo de aceite en el transformador. La bomba fuerza al aceite del transformador a través de los filtros. A medida que el aceite circula, se va eliminando la suciedad, la humedad y otros contaminantes de los filtros. Este tratamiento se realiza estando el transformador desenergizado.

La prensa de filtrar también puede usarse cuando se añade aceite nuevo a un transformador. Esto asegura que el aceite no esté contaminado y ayuda a evitar que se formen burbujas de aire en el aceite.

Prensa de filtrar



ACTIVIDAD 13

Hemos visto las fallas en el aceite de los transformadores.



Por favor, conteste a las siguientes preguntas:

1

¿Qué acción hay que realizar una vez que en los transformadores en aceite ha entrado agua?

2

¿Qué elementos debe comprender la inspección de aislante?

10.2 Fallas en el Equipo Auxiliar

¿Cómo evitar una falla en el equipo auxiliar?

- 1 Se debe tener la certeza que el equipo auxiliar, de protección y medición funcione correctamente.
- 2 Debe revisarse y apretarse la tornillería en cuanto haya oportunidad, dado que la vibración natural del transformador en operación también favorece que se aflojen las conexiones.
- 3 Los aisladores o bushings deben estar limpios y, al menor signo de deterioro, deben reemplazarse.
- 4 El tanque debe estar limpio, no debe presentar signos de envejecimiento y se debe corregir de inmediato cualquier fuga.
- 5 Es conveniente insistir en que, en operación normal, el aceite se dilate o se contraiga según la carga del transformador y la temperatura ambiente.
- 6 Se debe revisar que no existan rastros de carbonización en la superficie del tanque y que tampoco presente señales de abombamiento.
- 7 Si se observan rastros de carbón o señales de abombamiento, se debe desconectar el transformador y determinar las causas que lo han generado.

ANEXO

Dentro del anexo podrá encontrar el programa de inspección de equipos.



10.3 Fallas en los Devanados

Este tipo de fallas pueden ser ocasionadas por:

- Falsos contactos
- Corto circuito externo
- Corto circuito entre espiras
- Sobretensiones por descargas atmosféricas
- Sobretensiones por transitorios
- Sobrecargas
- Vibración que provoca desplazamiento en las bobinas

Falsos contactos

Como los falsos contactos se originan por terminales sueltas, es recomendable apretar las terminales externas e internas del transformador periódicamente y en oportunidad. Esta falla, como su nombre lo indica, es producida por un cortocircuito externo al transformador. La posibilidad de producir un daño al transformador dependerá de su intensidad y de su tiempo de duración.

Esta falla se manifiesta con la presencia de carbón en las terminales, terminales carcomidas y un cambio a una coloración oscura en aislamientos y conductores. La corriente alta que circula durante el cortocircuito externo produce altas fuerzas en los devanados, los cuales se mueven y, en ocasiones, hasta se salen de su lugar. Si el cortocircuito es intenso y prolongado, su efecto se reflejará en una degradación del aceite, sobrepresión, arcos y abombamiento del tanque.

¡ATENCIÓN!

De no detectarse y corregirse a tiempo, este tipo de falla deteriora el aislamiento y contamina el aceite produciendo gasificación, carbono y abombamiento del transformador.

MANTENIMIENTO

Después de una falla de este tipo y antes de poner en servicio nuevamente al transformador, se debe tener la certeza de que se ha eliminado el cortocircuito y se debe revisar exhaustivamente el transformador para determinar si está, o no, dañado.

Cortocircuito entre espiras

Este tipo de fallas son el resultado de aislamientos que pierden sus características por exceso de humedad, sobrecalentamiento constante, exceso de voltaje, etc.

Estas fallas tardan tiempo en poner fuera de servicio al transformador y se manifiestan por un devanado regular excepto en el punto de falla. Su ionización degrada al aceite y debe de producir rastros de carbonización en el tanque y posiblemente abombamiento.

Sobretensiones por descargas atmosféricas

La manifestación de este tipo de fallas son bobinas deterioradas en la parte más cercana del transformador, o sea, en las conexiones o herrajes.

En caso de que la sobretensión causada por la descarga atmosférica exceda el límite de aislamiento del transformador, el devanado sujeto a este esfuerzo fallará. Como el tiempo de duración de las descargas atmosféricas es mucho más corto, no se produce deterioro en el aceite, ni gasificación del mismo y por lo tanto, por regla general, no se observan fallas o abombamientos en el tanque.

ANEXO



En este apartado, encontrará un programa de pruebas de mantenimiento de transformadores.

MANTENIMIENTO



Para prevenir este tipo de falla se recomienda el uso de pararrayos lo más cerca posible del transformador.

Sobretensiones por transitorios

Este tipo de sobretensiones son producidas por operaciones de switcheo (conexión y desconexión de cargas importantes), por puesta de servicio y desconexión de bancos de capacitores, etc. Los sobrevoltajes que se producen por estas causas pueden ser del orden de hasta dos veces el voltaje de operación, su resultado de daño es a largo plazo y se presenta frecuentemente como un cortocircuito entre espiras.

Si el aislamiento estaba deteriorado, la ionización generada contamina el aceite, lo gasifica y se produce un abombamiento en el tanque.

Sobrecargas

Si las sobrecargas a que se somete el transformador no han sido tomadas en cuenta durante el diseño del aparato, éste tendrá un envejecimiento acelerado que destruirá sus aislamientos y su falla se presentará como un cortocircuito entre espiras.

Del análisis de fallas en transformadores podemos determinar que, salvo en el caso de sobretensiones ocasionadas por rayos, todas las demás fallas se pueden prevenir con **un buen mantenimiento del transformador**. Por otra parte, un buen registro de mantenimiento y su estudio podrán detectar los primeros síntomas de una falla y así evitarla.



MANTENIMIENTO

Se recomienda que las rutinas de mantenimiento preventivo se realicen cada seis meses y en gran parte el éxito del mantenimiento dependerá de si se lleva o no un registro de actividades y resultados.

Entre las actividades de mantenimiento se deben verificar:

- Relación de transformación.
- Resistencia de aislamiento.
- Resistencia óhmica de los devanados.
- Operación del termómetro.
- Nivel de aceite.
- Limpieza del tanque y bushings.
- Inexistencia de fugas.
- Buen sellado y estado de juntas.
- Apriete general de tornillería y conexiones.
- Buena ventilación del cuarto en el que se aloja el transformador.
- Inexistencia de rastros de carbonización, y de producción de gases o humos.
- Toma de una muestra adecuada de aceite para verificar sus características.
- Verificación del sistema de enfriamiento cuando exista en el transformador.
- Mantenimiento al tablero de control.

Por supuesto que la labor de mantenimiento predictivo y/o preventivo, basada en una periodicidad adecuada y del análisis de sus resultados, contribuirá a lograr que el transformador alargue su vida útil y se prevengan posibles fallas.

Esto último es muy importante, pues tener un transformador fuera de servicio se traduce, al menos, en una paralización parcial del proceso y por lo tanto, en pérdidas de producción.

De acuerdo a lo estudiado sobre las fallas en los devanados, por favor marque la opción correcta.

1

¿A qué tipo de falla corresponde la que se manifiesta con la presencia de carbón en las terminales, terminales carcomidas y un cambio a una coloración oscura en aislamientos y conductores?

- A) Corto circuito entre espiras
- B) Falsos contactos
- C) Sobrecarga

2

¿Cuál es la única falla que no cumple con esta regla?:
“Las fallas de un transformador se pueden prevenir con un buen mantenimiento”.

- A) Vibración que provoca desplazamiento en las bobinas
- B) Corto circuito externo
- C) Sobretensiones ocasionadas por rayos

ACTIVIDAD 14



ACTIVIDAD 15

De acuerdo a lo estudiado en torno a las fallas en los devanados, complete la siguiente actividad.



Responda a las siguientes consignas:

1

¿Cuál es la principal consecuencia de un cortocircuito prolongado?

2

¿Cómo se puede prevenir las sobretensiones por descargas atmosféricas?

3

¿Por qué es importante la realización del mantenimiento preventivo?

4

Las sobretensiones por descarga atmosférica son producidas por operaciones de switcheo.

- A) Verdadero
- B) Falso

5

El mantenimiento preventivo se realiza cada seis meses y su éxito dependerá de si se lleva o no un registro de actividades y resultados.

- A) Verdadero
- B) Falso

10.4

Detección de Fallas mediante Análisis de Gases

El diagnóstico de fallas, a partir de los gases presentes en el aceite aislante después de una falla en transformadores de potencia, se desarrolló en 1956.

Este diagnóstico está basado principalmente en el análisis de los gases muestreados en el relevador Buchholz.

Esto es, cuando un transformador de potencia es sometido a condiciones de cortocircuito, arcos eléctricos y sobrecalentamiento, se generan ciertos gases combustibles debido a la degradación del aceite y los materiales aislantes.

El tipo y las concentraciones de gases generados son importantes, ya que el envejecimiento normal produce cantidades extremadamente pequeñas de gases mientras que las condiciones de falla generan grandes cantidades de los mismos.

La mayoría de las situaciones de inicio de una condición de falla (arcos eléctricos entre devanados con aislamiento deteriorado) generan evidencias (gases) y, por lo tanto, pueden detectarse cuando se hacen análisis periódicos del aceite del transformador.

¡ATENCIÓN!

Se utiliza la técnica de cromatografía de gases para identificar los gases combustibles, ya que determina tanto el tipo como la concentración (cantidad) de los gases disueltos en el aceite del transformador.



Gases típicos generados por fallas en transformadores de potencia

Gas	Símbolo
Hidrógeno	H ₂
Oxígeno	O ₂
Nitrógeno	N ₂
Metano	CH ₄
Monóxido de carbono	CO
Etano	C ₂ H ₆
Dióxido de carbono	CO ₂
Etileno	C ₂ H ₄
Acetileno	C ₂ H ₂

En proporciones muy reducidas también se encuentra propileno (C₃H₆), propano (C₃H₈), y butano (C₄H₁₀).

Las fallas más comunes son arcos, descargas, sobrecalentamiento y puntos calientes. Cada una de estas fallas pueden presentarse en forma individual o combinada. Al final producen una degradación de los materiales aislantes, así como la formación de gases combustibles y no combustibles.

En una **operación normal** también se tiene producción de algunos gases. En un transformador, los gases generados se encuentran disueltos en el aceite aislante, en el espacio existente encima del aceite o en los dispositivos de colección de gases como el relevador Buchholz.

La **detección de una condición anormal** requiere un análisis de la concentración del gas generado y de la tendencia de su producción. Así, la cantidad de cada gas con respecto al volumen total de la muestra indica el tipo de falla que está en proceso.



Así, la presencia y concentración de los gases producidos depende del **tipo**, **localización** y **temperatura** de la falla. Cuando se produce una señal de alarma o disparo debido a la acumulación de gases en el relevador, es importante determinar si el gas es inflamable o no, ya que con ello se puede determinar la naturaleza de la falla. Se sabe que los cortocircuitos y arcos entre devanados o conductores generan gases inflamables, por otra parte, si el gas no es inflamable lo más probable es que sea aire que entró al transformador a través de un empaque defectuoso o dañado.

¡ATENCIÓN!

No se debe perder de vista que la aplicación de técnicas de diagnóstico a transformadores de potencia tiene como objetivo principal el incremento de la confiabilidad del sistema a través de la reducción del índice de fallas y el incremento de su vida útil.



ACTIVIDAD 16



Responda si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas:

		VERDADERO	FALSO
1	En condiciones de falla se generan grandes concentraciones de gas.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	La aplicación de técnicas de diagnóstico a transformadores de potencia tiene como objetivo el incremento de la confiabilidad del sistema.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Las fallas como los arcos, descargas, sobrecalentamiento y puntos calientes sólo se presentan en forma combinada.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

ACTIVIDAD 17



Responda a las siguientes interrogantes

1

¿Qué es la cromatografía?

2

¿Qué requiere la detección de una condición anormal?

- A) Un análisis de la concentración del gas generado y de la tendencia de su producción.
- B) La producción de una señal de alarma o disparo debido a la acumulación de gases.

3

¿Cuál es la utilidad de las técnicas diagnóstico?

- A) El incremento de la confiabilidad del sistema a través de la reducción del índice de fallas y el incremento de su vida útil.
- B) La reducción de los problemas causados por los gases en la producción.
- C) La disminución de los gases disueltos en el aceite aislante.






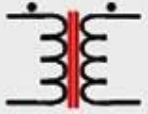



En este punto finaliza la explicación sobre *Fallas*.








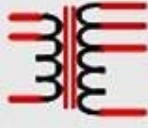


¡Felicitaciones! Ha finalizado el curso *Transformadores*.



CAPÍTULO 5: Parámetros Principales

Simbología

Símbolo	Nombre
	Bobina o inductancia
	Bobina o inductancia con núcleo ferromagnético
	Bobina o inductor con derivaciones o TAPs
	Bobina o inductor variable
	Transformador con núcleo de aire
	Transformador con núcleo ferromagnético (el punto indica la polaridad)
	Transformador variable o ajustable (VARIAC)
	Transformador de dos devanados
	Transformador con opción de alimentación en dos voltajes.

Símbolo	Nombre
	Devanado trifásico de transformador conectado en T o "Scott" (para tener un suministro trifásico a partir de un monofásico).
	Devanado conectado en Delta.
	Devanado conectado en Delta abierta.
	Devanado no aterrizado conectado en Estrella.
	Devanado aterrizado conectado en estrella con tierra.
	Transformador de corriente (TC).
	Autotransformador monofásico.
	Transformador con derivaciones o TAPs en primario y secundario.
	Transformador regulador de voltaje por saturación magnética.
	Transformador de potencia (TP).

Simbología

Hay conceptos generales que se manejan en todos los transformadores y es importante su comprensión para poder entender los parámetros y funcionamiento de los mismos. A continuación se detallan estos conceptos:

Concepto	Definición
Arrollamiento	Es el conjunto de espiras que forman un circuito eléctrico asociado a una de las tensiones, para un transformador polifásico. Esta palabra indica el conjunto de fases (también el arrollamiento es conocido como la bobina). Existen transformadores con un arrollamiento destinado a ser conectado en serie en un circuito con la finalidad de modificar la tensión, el otro arrollamiento es de excitación. Estos aparatos se denominan reguladores .
Autotransformador	Es el transformador en el cual al menos dos arrollamientos tienen una parte común. Los transformadores pueden estar sumergidos en aceite mineral o sintético o ser de tipo seco.
Tensión nominal o voltaje nominal de un arrollamiento	Es la tensión aplicada u obtenida en vacío entre bornes de línea de un arrollamiento de un transformador polifásico o entre bornes de un arrollamiento de un transformador monofásico.
Relación de transformación nominal	Es la que existe entre las tensiones nominales de los distintos arrollamientos.
Frecuencia nominal	Es aquella frecuencia a la cual el transformador está destinado a funcionar.
Potencia nominal	Es el valor convencional de la potencia aparente en el que se basa el diseño, la construcción y las garantías del transformador.
Corriente nominal	Es el valor que se obtiene dividiendo la potencia nominal de un arrollamiento sobre la tensión nominal del mismo por el factor de fase apropiado (raíz de tres en los transformadores trifásicos).
Nivel de aislamiento	Es el conjunto de valores que caracterizan la aptitud de los arrollamientos para soportar sollicitaciones dieléctricas.

Concepto	Definición
Armónicos o armónicas	Son distorsiones en la onda senoidal que imprime la carga y que afectan la señal de manera que disminuyen la eficiencia de las máquinas eléctricas. Además, la señal de voltaje se obtiene de mala calidad, por lo cual debe eliminarse mediante ciertas conexiones o arreglo en las máquinas de generación de voltaje.
Conexiones	Las conexiones de los arrollamientos pueden ser en estrella (símbolo Y) y en triángulo o Delta (símbolo D ó Δ), en triángulo abierto o en zig - zag (símbolo Z, z).
TAPs	Son dispositivos encargados de conectar o hacer el puente entre derivaciones de voltaje y así obtener lo que se necesita. Estos dispositivos normalmente son de acero y actúan como si fueran unos switches. Cuando se manejan altos voltajes como por ejemplo, en las subestaciones eléctricas, se tienen que enfriar por medio de aceite, de lo contrario pueden hacer corto o arquear por sobrecalentamiento. Hay TAPs que pueden ser removibles con carga (sin desconectar el transformador) como el del horno de fusión y hay otros más como el de la subestación que se tiene que desconectar para hacer cambio en las variaciones de TAPs.

CAPÍTULO 9: Mantenimiento

Programa de Pruebas de Mantenimiento

Es recomendable hacer periódicamente pruebas al transformador para detectar oportunamente una situación anormal y asegurar un plan de contingencia contra cualquier eventualidad. El **programa de mantenimiento predictivo y/o preventivo** deberá ser puesto en operación una vez que el transformador ha sido instalado y puesto en servicio. La frecuencia de las inspecciones puede ser determinada mejor mediante registros históricos.

Los fabricantes de transformadores deben de suministrar una guía de prácticas de mantenimiento requeridas y con los intervalos de tiempo para ciertos tipos de inspección.

A continuación se presentan una serie de pruebas que permitirán detectar condiciones anormales en el transformador.

¡ATENCIÓN!

Es importante mencionar, que los transformadores de potencia y/o distribución raramente se desenergizan. Debido a esto, es importante estar preparados para que, ante un paro y desenergización del transformador, se realicen procedimientos de inspección y mantenimiento.

Programa de Pruebas de Mantenimiento		
Número	Prueba de Mantenimiento	Programa
1	Líquido aislante: a) Resistencia dieléctrica b) Acidez c) Color	Anual
2	Resistencia de aislamiento: índice de polarización y absorción	Anual
3	Factor de potencia	Anual
4	Prueba de relación	Anual

Es importante la rigurosidad con la que se lleva a cabo este programa, sobre todo al principio, pues la garantía del equipo depende de los registros del mantenimiento e inspecciones. De no tenerlos, el fabricante no dará ninguna garantía ni de mala operación, ni de materiales defectuosos. A través del tiempo, el personal de mantenimiento determinará mejor, de acuerdo a sus necesidades, si los intervalos de tiempo de inspección y mantenimiento deberán ser más cortos. Esto se hará dependiendo del tamaño e importancia del servicio, la localización en el sistema y las condiciones de operación, como pueden ser la temperatura ambiente y las condiciones atmosféricas.

CAPÍTULO 10: Fallas

10. 2 Fallas en el Equipo Auxiliar Programa de Inspección para Equipos Auxiliares

Los equipos o accesorios del transformador también deben inspeccionarse regularmente. A continuación se presenta un programa de inspección para accesorios y equipos auxiliares indicando actividad y frecuencia. Antes de iniciar el programa se requiere que el transformador sea desconectado.

Programa de Inspección para Equipos Auxiliares		
Número	Inspeccionar	Programa recomendado
1	Tanque, accesorios y empaques por fugas, etc.	Semestral
2	Dispositivos de liberación de presión	Trimestral
3	Boquillas	Semestral
4	Apartarrayos	Semestral
5	Cambiadores de derivación (TAP)	Semestral
6	Equipo de control, relevadores y circuitos	Mensual
7	Conexiones a tierra	Semestral
8	Alarmas de protección	Mensual
9	Análisis de gas	Semestral
10	Prueba de presión de bobinas de enfriamiento o intercambiador de calor externo	Anual

10. 3 Fallas en los Devanados

Programa de Inspección para Transformadores con Falla Incipiente

A continuación en la tabla se presenta un programa de inspección (actividad y frecuencia) para un transformador que muestra un comportamiento anormal o de falla no franca.

Programa de Inspección para Transformadores con Falla Incipiente		
Número	Inspeccionar	Programa recomendado
1	Corriente de carga (A)	Cada hora uso del registrador
2	Voltaje	Cada hora
3	Temperatura ambiente	Cada hora
4	Temperatura de los devanados	Cada hora
5	Temperatura del aceite	Cada hora
6	Presión de gas (tanque)	Cada hora
7	Nivel del aceite	Diario
8	Equipo de sellado automático de gas: a) Indicador de presión de gas transformador	Diario
9	Transformadores tipo seco (enfriados con aire forzado) a temperatura del aire entrando y saliendo.	Cada hora