



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

PRUEBAS DE ACEPTACIÓN EN FÁBRICA PARA
TRANSFORMADORES Y PROPUESTA DE
PRÁCTICAS PARA EL LABORATORIO DE
TRANSFORMADORES Y MOTORES DE INDUCCIÓN.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

Presentan:

**ROBERTO ROMERO TÉLLEZ
ÁNGEL SÁNCHEZ CABRERA**

Asesor:

M. en C. RODRIGO OCÓN VALDEZ



México 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



CONTENIDO

INTRODUCCION	I
CAPITULO 1. CONCEPTOS BASICOS DE TRANSFORMADORES	1
1.1 SEGURIDAD EN INSTALACIONES ELECTRICAS	2
1.2 FUENTE DE ALIMENTACION	8
1.3 CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA	13
1.4 INTRODUCCIÓN A LOS TRANSFORMADORES	24
CAPITULO II. PRUEBAS DE RUTINA EN FÁBRICA	53
2.1 PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO	56
2.2 PRUEBA DE RESISTENCIA DE OHMICA	59
2.3 PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA EN LOS AISLAMIENTOS	62
2.4 PRUEBA DE CORRIENTE DE EXCITACIÓN	65
2.5 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD RESIDUAL EN AISLAMIENTOS SÓLIDOS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA	68
2.6 MEDICIÓN DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN (TTR)	71
2.7 MEDICIÓN DE RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE	74
2.8 PRUEBA DE POTENCIAL APLICADO	76
2.9 PRUEBA DE POTENCIAL INDUCIDO	78
2.10 PRUEBA DE POLARIDAD Y SECUENCIA DE FASES	80
2.10.2 PRUEBA DE SECUENCIA DE FASES	81
CAPITULO III. PRUEBAS DE PROTOTIPO EN FABRICA	83
3.1 PRUEBA DE CORTO CIRCUITO	84
3.2 PRUEBA DE IMPULSO TIPO MANIOBRA	86
3.3 PRUEBA DE IMPULSO POR ONDA TIPO RAYO	89
3.4 PRUEBA DE DESCARGAS PARCIALES	93
3.5 PRUEBA PARA MEDICIÓN DE RESPUESTA EN FRECUENCIA	96
3.6 PRUEBA DE ELEVACION DE TEMPERATURA	99
3.6.1 método de carga real	100
3.6.2 métodos de carga simulada	100
CAPITULO IV. PROPUESTA DE PRACTICAS PARA EL LABORATORIO DE TRANSFORMADORES Y MOTORES DE INDUCCION	101
PRACTICA 1 SEGURIDAD, FUENTE DE ALIMENTACIÓN Y CIRCUITOS BÁSICOS	102
PRACTICA 2 EL TRANSFORMADOR MONOFASICO	119
PRACTICA 3 POLARIDAD DEL TRANSFORMADOR Y REGULACIÓN DE VOLTAJE	131
PRACTICA 4 EL TRANSFORMADOR TRIFASICO	143
CONCLUSIONES	159
GLOSARIO	160
BIBLIOGRAFIA	161



INTRODUCCIÓN.

Durante el transporte de la energía eléctrica se originan pérdidas que dependen de su intensidad. Para reducir estas pérdidas se utilizan tensiones elevadas, las cuales transmiten la misma potencia pero con corrientes de menor intensidad. Por otra parte es necesario que en el lugar donde se aplica la energía eléctrica (la distribución), se efectúe a tensiones más bajas y además se adapten las tensiones de distribución a los diversos casos de aplicación

Para transportar energía eléctrica de sistemas que trabajan a una tensión dada a sistemas que lo hacen a una tensión deseada se utilizan los transformadores. Al proceso de cambio de tensión se le conoce como “transformación”. Para llevar a cabo dicho proceso se requiere de un transformador, el cual es un dispositivo que convierte la energía eléctrica de un cierto nivel de tensión a otro de menor o mayor magnitud manteniendo constantes la frecuencia y la potencia.

El primer transformador fue, construido por Faraday cuando realizó los experimentos en los que descubrió la inducción electromagnética. El aparato que usó fueron dos bobinas enrolladas una encima de la otra. Al variar la corriente que circulaba por una de ellas, cerrando o abriendo el interruptor, el flujo magnético a través de la otra bobina variaba y se inducía una corriente eléctrica en la segunda bobina. Faraday no puso mayor atención en este aparato ya que estaba interesado en otras cuestiones. En el transcurso de los años varios experimentadores trabajaron con diferentes versiones de transformadores.

En la actualidad, la energía eléctrica es la principal fuente de energía renovable y limpia, la cual nos permite realizar diversas tareas en la vida cotidiana, y de igual forma para el sector industrial. Por tal motivo el suministro de electricidad debe de satisfacer con ciertas características como es un servicio en forma continua y eficiente así como con otras particularidades un poco más técnicas como es el nivel de tensión, su forma de onda y el ciclo de operación ya que de estos dependen el funcionamiento correcto de algunas áreas productivas en la industria.

Para esto se ocupan diversos equipos eléctricos, entre ellos los transformadores de potencia, de distribución y de instrumento (tc’s y tp’s). Dichos transformadores se encuentran comúnmente en operación continua y propensos a fallas. Para garantizar la confiabilidad durante la operación de estos equipos es necesario someterlos a distintas pruebas, antes de su puesta en servicio.

Es necesario hacer pruebas a los transformadores por distintas razones, durante su fabricación, para verificar la condición de sus componentes, durante su operación como parte del mantenimiento, después de su reparación, etc.



Las pruebas que se realizan a los transformadores se pueden clasificar en:

Pruebas de fábrica (rutina y prototipo y las especiales): estas pruebas se realizan en fábrica para verificar el buen estado de los materiales y de las piezas más importantes, así como también evaluar el estado en que se encuentra para soportar las condiciones normales de operación.

Pruebas de mantenimiento: son aquellas que se realizan cuando un equipo sale de servicio para mantenimiento preventivo y estas tiene por objeto determinar el estado en el que se encuentra el transformador.

Pruebas de diagnóstico: son aquellas pruebas que se realizan para evaluar algún tipo posible de falla existente en el transformador y realizar su corrección.

Puesto que los transformadores son una parte fundamental de cualquier sistema eléctrico, es necesario que el alumno de ingeniería eléctrica-electrónica conozca las diferentes pruebas que se aplican a los mismos, y estas se deben realizar en los laboratorios del área de potencia, ya que al realizar estas pruebas se adquiere la experiencia y la práctica para desenvolverse profesionalmente en el área de los transformadores en la industria eléctrica.

Objetivo General

Describir las pruebas que se realizan en fábrica tanto de rutina como de prototipo a los transformadores para su aceptación y puesta en servicio, así mismo presentar una propuesta de prácticas para el laboratorio de transformadores y motores de inducción, basados en las pruebas descritas y en el equipo disponible en los laboratorios.

Objetivos Particulares

- Revisar y dar mantenimiento al transformador de distribución con el que cuenta el laboratorio ya que es un equipo potencialmente útil para poner en práctica algunas de las pruebas más importantes a los transformadores.
- Realiza el estudio de las pruebas realizadas a los transformadores en base a la norma NOM-NMX-J-169
- Desarrollar propuestas de prácticas para el laboratorio de transformadores y motores inducción.
- Generar material didáctico para su uso en la impartición de prácticas.



Para alcanzar los objetivos generales como particulares. El presente trabajo de tesis se encuentra estructurado en capítulos secuenciales; en el capítulo uno se presenta el marco teórico tanto para entender las pruebas de fábrica que se realizan a los transformadores de potencia así como para introducirnos en la propuesta de prácticas del tema de transformadores para el laboratorio de transformadores y motores de inducción. Los temas que abarca este marco teórico son: seguridad en las instalaciones eléctricas, fuente de alimentación, circuitos de corriente alterna y una introducción a los transformadores eléctricos.

En los capítulos dos y tres se presentan algunas de las pruebas más importantes a los transformadores realizadas en fábrica las cuales se dividen en pruebas de rutina y pruebas de prototipo:

- Las pruebas de rutinas son aplicables a todos los transformadores de acuerdo a la norma **NOM-NMX-J-169** para verificar si la calidad del equipo se mantiene dentro de lo especificado por la misma.
- Las pruebas de prototipo se aplican a nuevos diseños con el propósito de verificar si el equipo cumple con lo especificado en las normas o por el usuario.

Y finalmente en el capítulo cuatro se presentan la propuesta de prácticas para el laboratorio de transformadores y motores de inducción de la carrera de Ingeniería eléctrica. Estas prácticas abarcan la parte referente a los transformadores y contienen los siguientes temas:

- Práctica 1. Seguridad, fuente de alimentación y circuitos de corriente alterna,
- Práctica 2. El transformador monofásico,
- Práctica 3. Polaridad y regulación de voltaje.
- Práctica 4. El transformador trifásico.



CAPÍTULO I

CONCEPTOS BÁSICOS DE TRANSFORMADORES.



1.1 SEGURIDAD EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS.

La seguridad en el trabajo es una disciplina que tiene como misión el estudio de los accidentes de trabajo analizando las causas que lo provocan, así mismo la seguridad es un factor vital en toda actividad, no es un tema que se deba programar para una sola sesión de una o dos horas y que posteriormente se deje a un lado a favor de otro tema; es una responsabilidad diaria de todos.

La gran difusión industrial y doméstica de la corriente eléctrica, unida al hecho de que no es perceptible por los sentidos, hacen caer a las personas en una rutina, despreocupación y falta de prevención en su uso. Por otra parte dada su naturaleza y los efectos, muchas veces mortales, que ocasiona su paso por el cuerpo humano, hacen que la corriente eléctrica sea una fuente de accidentes de tal magnitud que no se deben regatear esfuerzos para lograr las máximas previsiones contra los riesgos eléctricos.

Las consecuencias del paso de la corriente por el cuerpo pueden ocasionar desde lesiones físicas secundarias (golpes, caídas, etc.), hasta la muerte por fibrilación ventricular. Una persona se electriza cuando la corriente eléctrica circula por su cuerpo, es decir, cuando la persona forma parte del circuito eléctrico, pudiendo, al menos, distinguir dos puntos de contacto: uno de entrada y otro de salida de la corriente. La electrocución se produce cuando dicha persona fallece debido al paso de la corriente por su cuerpo.

1.1.1 ¿Qué es el riesgo de electrocución?

Definimos el riesgo de electrocución como la posibilidad de circulación de la corriente eléctrica a través del cuerpo humano, siendo para ello necesario que el cuerpo humano sea conductor, que pueda formar parte del circuito y que exista una diferencia de tensiones entre dos puntos de contacto

El riesgo eléctrico puede producir daños sobre las personas (parada cardiaca, respiratoria, quemaduras, etc.) y sobre los bienes, debido al riesgo asociado de incendios y explosiones.

Para que exista la posibilidad de circulación de una corriente por el cuerpo humano es necesario:

- Que el cuerpo humano sea conductor. El cuerpo humano, si no está aislado, es conductor debido a los líquidos que contiene (sangre, linfa, etc.).
- Que el cuerpo humano forme parte del circuito.
- Que exista entre los puntos de "entrada" y "salida" del cuerpo humano una diferencia de potencial mayor que cero.

Cuando estos requisitos se cumplan, se podrá afirmar que existe o puede existir riesgo de electrocución, entre los efectos que produce la corriente eléctrica se distinguen:



1. **Asfixia:** si el centro nervioso que regula la respiración se ve afectado por la corriente, puede llegar a producirse un paro respiratorio.
2. **Electrización:** la persona forma parte del circuito eléctrico, circulando la corriente por el cuerpo. Como mínimo se presenta un punto de entrada y otro de salida de la corriente.
3. **Electrocución:** fallecimiento debido a la acción de la corriente en el cuerpo humano.
4. **Fibrilación ventricular:** movimiento arrítmico del corazón, el cual, deja de enviar sangre a los distintos órganos y aunque esté en movimiento, no sigue su ritmo normal de funcionamiento; que puede ocasionar el fallecimiento de la persona.
5. **Tetanización:** movimiento incontrolado de los músculos debido a la acción de la corriente eléctrica. Dependiendo del recorrido de la corriente perderemos el control de las manos, brazos, músculos pectorales, etc.

1.1.2 Efectos de la electricidad sobre el organismo humano

Cuando una persona se pone en contacto con la corriente eléctrica no todo el organismo se ve afectado por igual. Hay unas partes del cuerpo que resultan más dañadas que otras. Éstas son:

Piel: supone el primer contacto del organismo con la electricidad. La principal lesión son las quemaduras debido al efecto térmico de la corriente.

En baja tensión se originan unas quemaduras superficiales («manchas eléctricas») en el punto de entrada y salida de la corriente. En alta tensión se pueden llegar a producir grandes quemaduras con destrucción de tejidos en profundidad.

Músculos: cuando un impulso eléctrico externo llega al músculo, éste se contrae. Si los impulsos son continuos, producen contracciones sucesivas conocidas como “Tetanización” de forma que la persona es incapaz físicamente de soltarse del elemento conductor por sus propios medios. En esta situación, y dependiendo del tiempo de contacto, la corriente sigue actuando con lo que pueden producirse daños en otros órganos, además de roturas musculares y tendinosas. La Tetanización puede provocar además una contracción mantenida de los músculos respiratorios y generar una situación de asfixia que puede dañar irreversiblemente al cerebro y producir la muerte.

Corazón: la corriente eléctrica produce una alteración total en el sistema de conducción de los impulsos que rigen la contracción cardíaca. Se produce así la denominada “fibrilación ventricular”, en la que cada zona del ventrículo se contrae o se relaja descoordinadamente. De esta forma, el corazón es incapaz de desempeñar con eficacia su función de mandar sangre al organismo, interrumpiendo su circulación y desembocando en la parada cardíaca.



Sistema nervioso: los impulsos nerviosos son de hecho impulsos eléctricos. Cuando una corriente eléctrica externa interfiere con el sistema nervioso aparecen una serie de alteraciones, como vómitos, vértigos, alteraciones de la visión, pérdidas de oído, parálisis, pérdida de conciencia o parada cardiorrespiratoria. También pueden afectarse otros órganos, como el riñón (insuficiencia renal) o los ojos (cataratas eléctricas, ceguera. Además, indirectamente, el contacto eléctrico puede ser causa de accidentes por caídas de altura, golpes contra objetos o proyección de partículas.

En la tabla 1.1.1 se resumen los efectos que provoca el paso de una corriente eléctrica por el cuerpo humano para una frecuencia de 60 Hz.

Tabla 1.1.1. Efectos fisiológicos producidos por el paso de una corriente eléctrica (50/60 Hz)	
Intensidad	Efectos fisiológicos que se observan en condiciones normales
0-0.5 mA.	No se observan sensaciones ni efectos. El umbral de percepción se sitúa en 0.5 mA.
0.5-10 mA.	Calambres y movimientos reflejos musculares. El umbral de no soltar se sitúa en 10 mA.
10-25 mA.	Contracciones musculares. Agarrotamiento de brazos y piernas con dificultad de soltar objetos. Aumento de la presión arterial y dificultades respiratorias.
25-40 mA.	Fuerte Tetanización. Irregularidades cardiacas. Quemaduras. Asfixia a partir de 4 s
40-100 mA.	Efectos anteriores con mayor intensidad y gravedad. Fibrilación y arritmias cardiacas.
-1 A.	Fibrilación y paro cardiaco. Quemaduras muy graves. Alto riesgo de muerte.
1-5 A.	Quemaduras muy graves. Paro cardiaco con elevada probabilidad de muerte

1.1.3 ¿Qué factores intervienen en el riesgo de lesiones por electricidad?

Los factores que intervienen en los accidentes eléctricos se pueden clasificar en factores técnicos y humanos.

Dentro de los factores técnicos mencionaremos los siguientes:

- Intensidad de la corriente que pasa por el cuerpo humano: Se ha demostrado experimentalmente que es la intensidad que atraviesa el cuerpo humano y no la tensión la que puede ocasionar lesiones debido al accidente eléctrico. En este sentido comentar que a partir de 1 mA. de corriente alterna ya se comienzan a percibir hormigueos, y que hasta intensidades de 10 mA. del mismo tipo de corriente, la persona aún es capaz de soltar un conductor.



- Tiempo de exposición al riesgo: No podemos hablar de valores de intensidad sin relacionarlos con el tiempo de paso por el cuerpo humano. De esta forma, para cada intensidad de corriente se establecen, según el tiempo de contacto, tres niveles:
 - ✓ Nivel de seguridad: Abarca desde la mínima percepción de corriente hasta el momento en que no es posible soltarse voluntariamente del conductor. En dicho periodo no se produce afectación cardíaca ni nerviosa.
 - ✓ Nivel de intensidad soportable: Se produce aumento de la presión sanguínea y alteraciones del ritmo cardíaco, pudiéndose llegar a parada cardíaca reversible. Además, el nivel de consciencia va disminuyendo llegándose al coma por encima de 50 mA.
 - ✓ Nivel de intensidad insostenible: Estado de coma persistente y parada cardíaca.
- Recorrido de la corriente eléctrica por el cuerpo humano: Las consecuencias del contacto dependerán de los órganos del cuerpo humano que atraviese la corriente. Las mayores lesiones se producen cuando la corriente circula en las siguientes direcciones:
 - ✓ Mano izquierda - pie derecho
 - ✓ Mano derecha - pie izquierdo
 - ✓ Manos - cabeza
 - ✓ Mano derecha - tórax (corazón) - mano izquierda
 - ✓ Pie derecho - pie izquierdo.
- Naturaleza de la corriente: Diferenciamos entre corriente alterna y corriente continua.
 - ✓ Corriente alterna: Su característica fundamental es la frecuencia, de tal modo que esa alternancia en el sistema cardíaco y nervioso produce espasmos, convulsiones y alteraciones del ritmo cardíaco, las altas frecuencias son menos peligrosas que las bajas (sólo percepción de calor con frecuencias superiores a 10.000 Hz). Por debajo de 10.000 Hz los efectos son similares a los de la corriente continua.
 - ✓ Corriente continua: Suele actuar por calentamiento y generalmente no es tan peligrosa como la alterna, si bien puede inducir riesgo de embolia y muerte.
- Resistencia eléctrica del cuerpo humano: Entre los factores determinantes tenemos la edad, el sexo, las tasas de alcohol en sangre, el estado de la superficie de contacto (humedad, suciedad, etc.), la presión de contacto, etc. El valor máximo de resistencia se establece en 3000 Ohms y el mínimo en 500 Ohms. La piel seca tiene una gran resistencia, del orden de 4.000 Ohms para la corriente alterna. En el caso de piel húmeda se reducen los niveles de resistencia hasta 1500 Ohms, con lo que sólo con 100 V la intensidad que atraviesa el organismo puede producir la muerte. La sudoración también es un factor que puede disminuir la resistencia de la piel. La resistencia en el interior del organismo es, en general, 1000 veces menor que la de la piel, siendo menor para la corriente alterna. En el interior del organismo la resistencia disminuye en proporción directa a la cantidad de agua que presentan los distintos tejidos; así, de mayor a menor resistencia tenemos los huesos, el tendón, la grasa, la



piel, los músculos, la sangre y los nervios.

- Tensión aplicada: Definimos la "tensión de contacto" como la diferencia de potencial que pueda resultar aplicada entre la mano y el pie de una persona que toque con aquella una masa o elemento sin tensión. En ausencia de contacto con elementos aislantes, aumenta la tensión de contacto y se favorece el paso de la corriente. Las tensiones más peligrosas son, para la corriente continua, las cercanas a 500 V, y para la corriente alterna las próximas a 300 V.

1.1.4 Contacto eléctrico

Se denomina contacto eléctrico al contacto de una persona con cualquier parte en tensión de una instalación o de un sistema eléctrico. La tensión de contacto es la tensión que hay en el punto de contacto antes de que lo toque el individuo y que en consecuencia, éste deberá soportar cuando se produzca el contacto. En general se distinguen dos tipos de contactos: directos e indirectos

El contacto directo se origina cuando la persona toca directamente un conductor o una parte activa bajo tensión. En general, cuando una persona entra en contacto directo entre una parte activa bajo tensión y tierra o una masa unida a tierra, la tensión de contacto (V_c) adquiere un valor muy próximo a la tensión simple o de fase ($V = 120 \text{ V}$). Se produce contacto indirecto cuando el individuo entra en contacto con una masa o una carcasa envolvente de un receptor que presenta accidentalmente un fallo de aislamiento. Debido al fallo, una fase puede entrar en contacto con la envolvente del aparato, presentando este circuito una resistencia (R_i) debida a la carcasa, pintura, material, etc., del aparato. El fallo de aislamiento provoca la aparición de una corriente de defecto (I_d) y una tensión de contacto (V_c) dadas por:

$$I_d = \frac{V}{R_i + R_t} \rightarrow V_c = R_t * I_d = R_t * \frac{V}{R_i + R_t}$$

En la figura 1.1.1 se representa la diferencia entre un contacto directo y un contacto indirecto.



Figura 1.1.1. Diferencia entre un contacto directo y un contacto indirecto.



1.1.5 Protección contra contactos directos e indirectos.

Las protecciones contra contactos directos tienen como objetivo impedir el contacto con elementos activos. Estas pueden ser aislando las partes activas, por ejemplo el recubrimiento de conductores y herramienta a partir de un material aislante. Otra forma de protección contra contactos directos es el uso de barreras y/o señalizaciones para mantener una distancia segura de los elementos activos. En la Tabla 1.2 se presenta la distancia mínima de seguridad que se debe mantener de un elemento activo en función del nivel de voltaje presente.

Tabla 1.1.2. Distancia mínima de seguridad entre un operador y un punto de tensión.	
Nivel de tensión	Distancia mínima
0 a 50 V	Ninguna
50 V a 1 KV	0.80 m
1 KV a 33 KV	0.80 m
33 KV a 66 KV	0.90 m
66 KV a 132 KV	1.50 m
132 KV a 150 KV	1.65 m
150 KV a 220 KV	2.10 m
220 KV a 330 KV	2.90 m
330 KV a 500 KV	3.60 m

Los sistemas de protección contra contactos indirectos se clasifican en:

- **Sistemas activos que protegen por corte automático de alimentación.** Estos sistemas detectan que la tensión de las masas respecto a tierra es superior a la establecida y desconecta la alimentación.
- **Sistemas pasivos que suprimen el riesgo.** Estos sistemas hacen que el contacto no sea peligroso o impiden el contacto simultáneo entre partes conductoras y masas.

1.1.6 Normas mexicanas de seguridad en instalaciones eléctricas.

La norma NOM-029-STPS-2011 establece las condiciones de seguridad para las actividades de mantenimiento de las instalaciones eléctricas en los centros de trabajo.

La norma NOM-001-SEDE-2011 establece los requisitos técnicos que deben cumplir las instalaciones destinadas a la utilización de la energía eléctrica, a fin de que ofrezcan condiciones adecuadas de seguridad para las personas y sus propiedades, en lo referente a la protección contra choques eléctricos, efectos térmicos, sobre corrientes, corrientes de falla y sobretensiones.

1.2 FUENTE DE ALIMENTACION.

Una fuente de alimentación es el elemento activo que es capaz de generar una diferencia de potencial entre sus bornes o proporcionar una corriente eléctrica para que otros circuitos funcionen.

En la figura 1.2.1 se muestra el diagrama a bloques de una fuente de alimentación típica, así como la descripción del voltaje en cada una de las fases. El voltaje de c.a. se conecta a un transformador, el cual lo disminuye hasta el nivel deseado para la salida c.d. Luego, un rectificador de diodos proporciona un voltaje rectificado de onda completa que se filtra mediante un filtro simple de capacitor para producir un voltaje de c.d. Este voltaje de c.d. por lo regular cuenta con cierto rizo de c.a. Un circuito regulador permite obtener un voltaje de c.d. con un rizo mucho menor, además de un voltaje constante aun cuando el voltaje c.a. de entrada o la carga cambien.

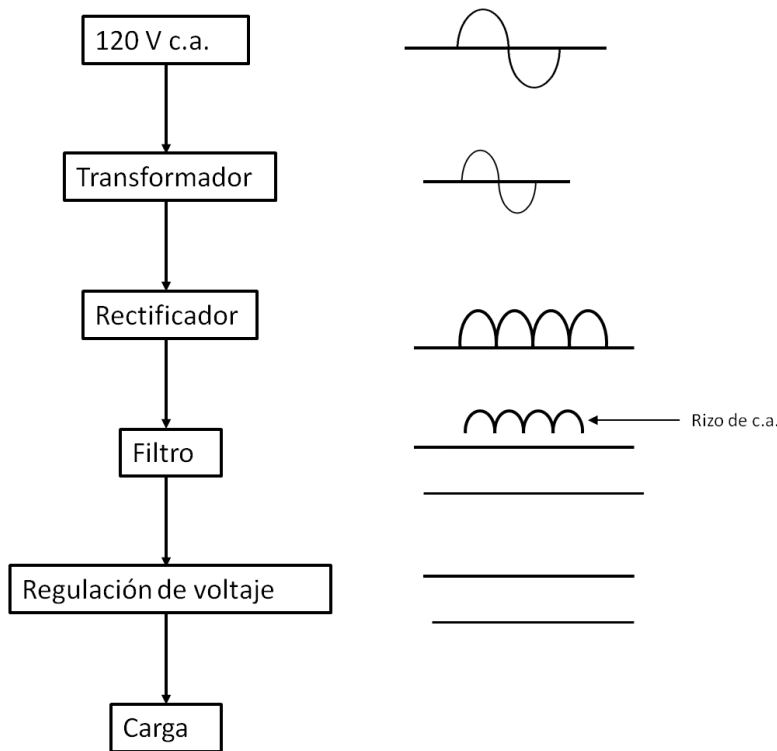


Figura 1.2.1. Diagrama de bloques de una fuente de alimentación.

1.2.1 El transformador.

El transformador realiza principalmente dos funciones:

- Cambia el valor del voltaje de línea o voltaje de corriente alterna al valor de voltaje, también alterno, requerido en la salida de c.d.
- Aísla eléctricamente al equipo electrónico del voltaje de línea.

1.2.2 El circuito rectificador.

Un circuito rectificador es un circuito que tiene la capacidad de convertir una señal de corriente alterna en una señal de corriente continua pulsante, transformando así una señal bipolar en una señal mono polar. Se utilizan sobre todo en las fuentes de alimentación de los equipos electrónicos, teniendo en cuenta que cualquier equipo electrónico funciona internamente con C.D (corriente directa), y aunque se conectan de la red eléctrica (127V a 60 Hz), la fuente de alimentación se encarga de convertir esa C.A (corriente alterna) en C.D. Existen dos tipos de rectificación los cuales son:

- Rectificación de media onda.
- Rectificación de onda completa.

Rectificador de media onda: El rectificador de media onda es un circuito que elimina la mitad de la señal que recibe en la entrada, en función de cómo esté polarizado el diodo: si la polarización es directa, eliminará la parte negativa de la señal, y si la polarización es inversa eliminará la parte positiva. Lo anterior se muestra en la figura 1.2.2.

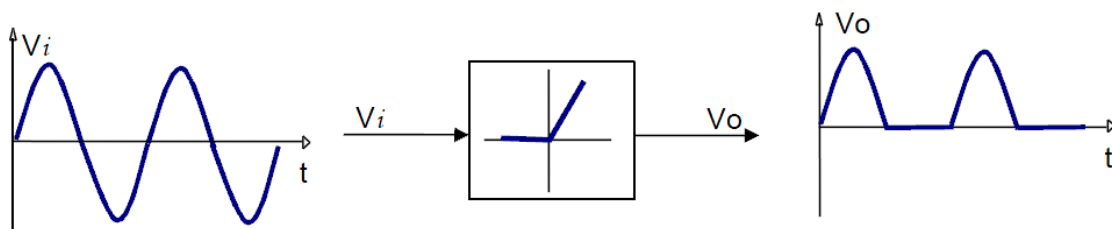


Figura 1.2.2.

El circuito básico para esta rectificación es el siguiente:

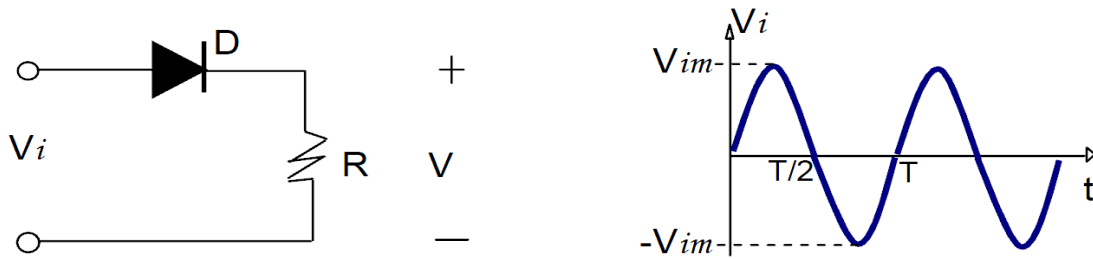


Figura 1.2.3.

Rectificadores de onda completa tipo puente: El circuito rectificador de media onda tiene como ventaja su sencillez, pero carece de dos defectos: 1) no permite utilizar toda la energía disponible, ya que los semiciclos negativos son desaprovechados; 2) en el caso típico en el que la fuente es el secundario de un transformador tiende a producirse una magnetización del núcleo debido a que el campo magnético es unidireccional. Esta magnetización se traduce en que la saturación magnética se alcanza con valores menores de corriente, produciéndose deformaciones en la onda. Estos inconvenientes se resuelven con los rectificadores de onda completa. El primer ejemplo es el rectificador tipo puente, ilustrado en la figura 1.2.4.

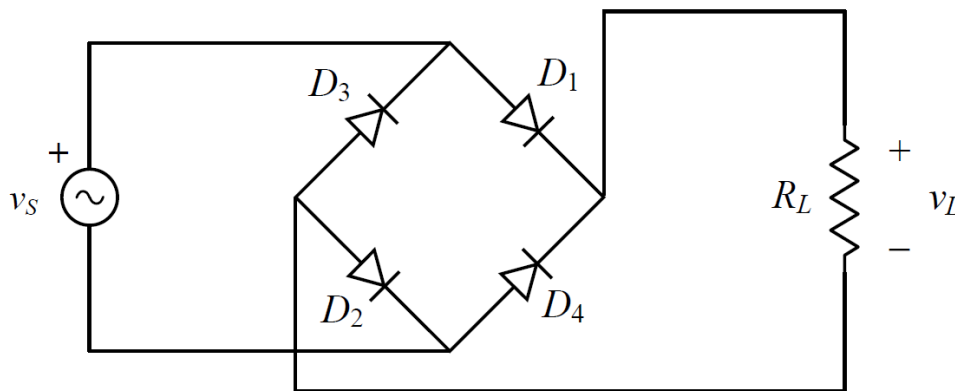


Figura 1.2.4.

Cuando $V_s > 0$, los diodos D_1 y D_2 están polarizados en forma directa y por lo tanto conducen, en tanto que D_3 y D_4 no conducen. Despreciando las caídas en los diodos por ser éstos ideales, resulta $V_L = V_s > 0$. Cuando la fase de la entrada se invierte, pasando a ser $V_s < 0$, serán D_3 y D_4 quienes estarán en condiciones de conducir, en tanto que D_1 y D_2 se cortarán. El resultado es que la fuente se encuentra ahora aplicada a la carga en forma



opuesta, de manera que $V_L = -V_s > 0$. Las formas de onda de la entrada y la salida se muestran en la figura 1.2.5.

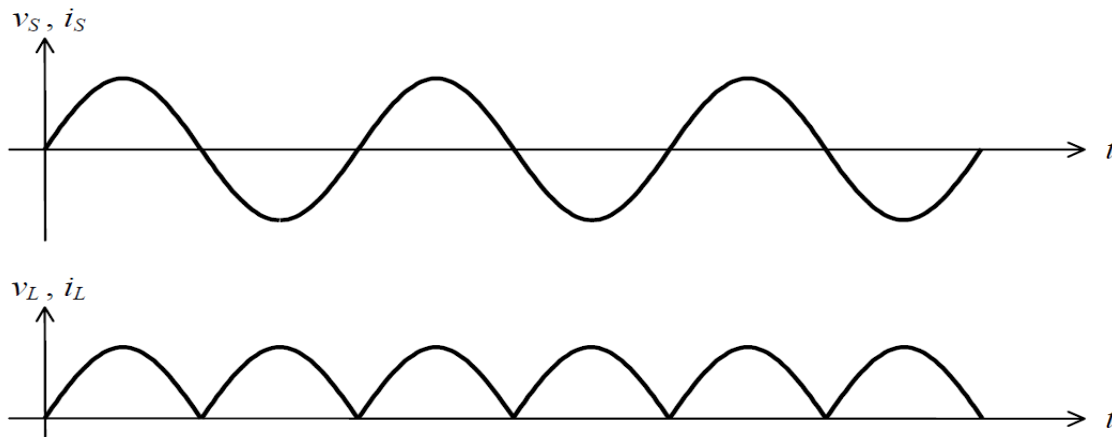


Figura 1.2.5.

1.2.3 El Filtro.

El voltaje de c.d. Pulsante generado por el circuito rectificador no será adecuado para ser utilizado por una fuente de alimentación de c.d. Para obtener un voltaje de c.d. más estable se requiere de un circuito de filtrado. La salida filtrada contará con un valor de c.d. y cierta variación de c.a. conocida como rizo. Mientras más pequeña sea la variación de c.a. con respecto al nivel de c.d., mejor será el desempeño del circuito de filtro.

Este circuito puede ser un capacitor conectado a la salida del circuito rectificador, figura 1.2.6. La salida será un voltaje de c.d. con cierta variación de c.a. o rizo. Para reducir aún más la cantidad de rizo se utiliza una sección adicional de filtro RC, figura 1.2.7. El propósito de esta es dejar pasar la mayor parte del componente de c.d. mientras reduce lo más posible el componente de c.a.

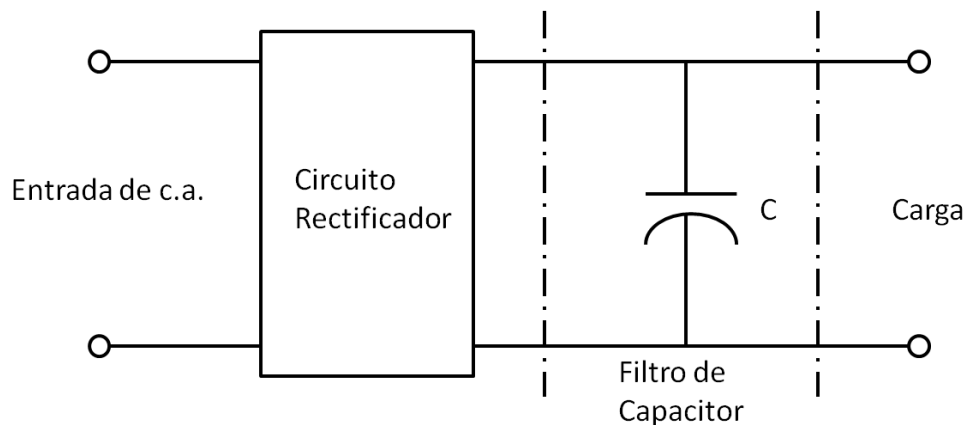




Figura 1.2.6. Filtro C.

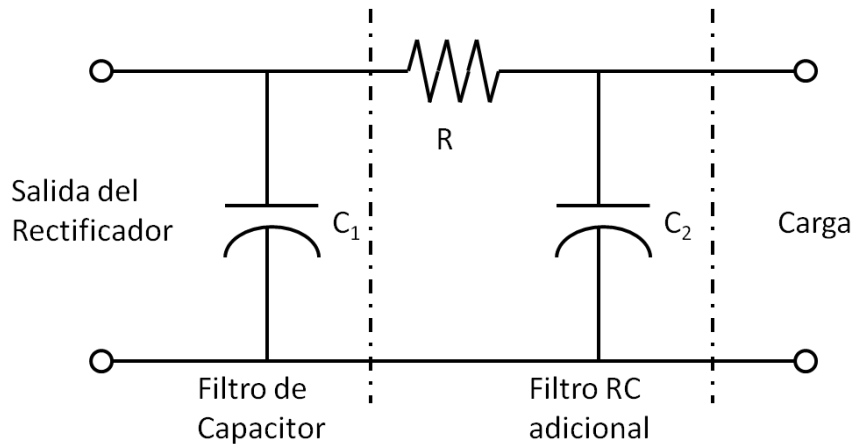


Figura 1.2.7. Filtro RC.

1.2.4 Circuito Regulador de voltaje.

Hay dos tipos de reguladores de voltaje con transistor, en serie y el regulador de voltaje en paralelo. Cada uno de estos circuitos entrega a la salida un voltaje de c.d. regulado aún si el voltaje de entrada o la carga conectada a la salida cambia.

En la figura 1.2.8 se muestra el circuito regulador en serie. Los elementos en serie controlan la cantidad de voltaje de entrada que llega a la salida. El voltaje de salida se muestra mediante un circuito que proporciona un voltaje de retroalimentación que se compara con un voltaje de referencia. Si el voltaje de salida se incrementa, un menor voltaje base-emisor ocasionará que el transistor conduzca menos, lo cual reduce el voltaje de salida manteniéndolo constante. Si el voltaje de salida disminuye, un mayor voltaje base-emisor ocasionará que el transistor conduzca más, con lo que se eleva el voltaje de salida y se mantiene constante.

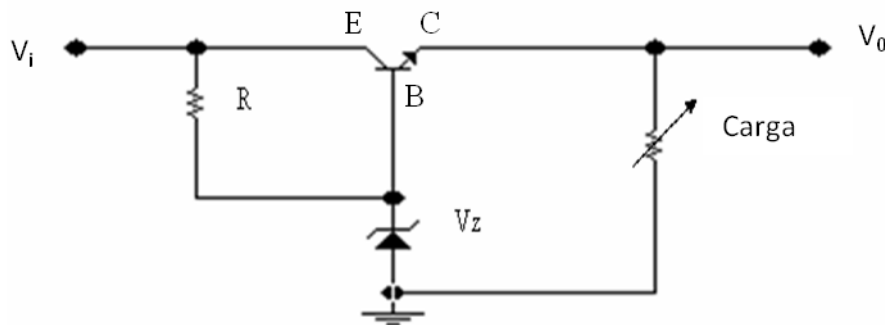


Figura 1.2.8. Circuito regulador de voltaje serie con transistor.



1.3 CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA.

1.3.1 Circuito eléctrico

Un circuito eléctrico es una combinación de componentes conectados en tal forma que proporcionen una trayectoria cerrada para la circulación de la corriente y permitan aprovechar la energía de los electrones en movimiento para producir otras formas de energía. Un circuito eléctrico se compone básicamente de los siguientes elementos.

- a) Una fuente de energía eléctrica: La cual suministra la fuerza necesaria para impulsar una corriente de electrones a través del circuito. Esta fuerza se expresa en Voltios (V) y la corriente producida se expresa en amperios.
- b) Un conjunto de conductores: Los cuales proporcionan un camino de poca resistencia para la circulación de la corriente.
- c) Una carga: La cual convierte la energía de los electrones en movimiento en otras formas de energía.
- d) Un interruptor: El cual actúa como elemento de control del circuito regulando el paso de corriente hacia la carga.

Parámetros de un circuito eléctrico

1. **Voltaje:** El voltaje, tensión o diferencia de potencial es la presión que ejerce una fuente de suministro de energía eléctrica o fuerza electromotriz (FEM) sobre las cargas eléctricas o electrones en un circuito eléctrico cerrado, para que se establezca el flujo de una corriente eléctrica. Este movimiento de las cargas eléctricas por el circuito se establece a partir del polo negativo de la fuente de FEM hasta el polo positivo de la propia fuente.
2. **Corriente:** Es la circulación de cargas o electrones a través de un circuito eléctrico cerrado, que se mueven siempre del polo negativo al polo positivo de la fuente de suministro de fuerza electromotriz (FEM).
3. **Resistencia:** Es toda oposición que encuentra la corriente a su paso por un circuito eléctrico cerrado, atenuando o frenando el libre flujo de circulación de las cargas eléctricas o electrones.
4. **Potencia eléctrica:** Es la velocidad a la que se consume la energía. Si la energía fuese un líquido, la potencia sería los litros por segundo que vierte el depósito que lo contiene. La potencia se mide en joule por segundo (J/seg.) y se representa con la letra "P". Un J/seg equivale a 1 watt (W), por tanto, cuando se consume 1 joule de potencia en un segundo, estamos gastando o consumiendo 1watt de energía eléctrica. La unidad de medida de la potencia eléctrica "P" es el "watt", y se representa con la letra "W".



1.3.2 Corriente alterna

La corriente alterna es aquella cuya polaridad cambia continuamente en el tiempo, tomando valores negativos y positivos. La forma de onda más comúnmente utilizada es la senoidal y se trata de una onda periódica que se repite a intervalos fijos.

El tiempo para que una onda senoidal complete un ciclo completo se conoce como **periodo** y las veces que ocurre esta repetición en un segundo es la **frecuencia**. Entre mayor número de ciclos en un segundo, mayor es la frecuencia. La relación que existe entre el periodo y la frecuencia es la siguiente:

$$f = \frac{1}{T}$$

La onda senoidal puede ser expresada en términos de su magnitud en valor instantáneo, pico, pico a pico, eficaz y valor promedio.

El **valor instantáneo** es aquel que la onda senoidal tiene en cualquier punto del tiempo. Este valor es diferente en distintos puntos a lo largo de la curva. Los valores instantáneos se designan por lo general con letras minúsculas.

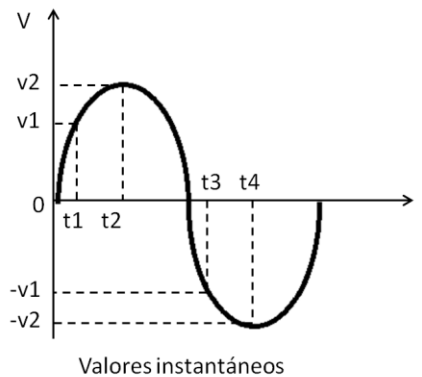


Figura 1.3.1.

El **valor pico** es el valor máximo de la onda senoidal con respecto a cero. Este puede ser negativo o positivo y dado que los picos son iguales en magnitud, una onda senoidal se caracteriza por un único valor pico. Para una onda senoidal dada el valor pico es constante y está representado por V_p o i_p .

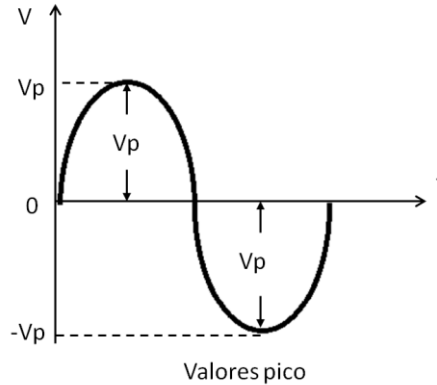


Figura 1.3.2.

El **valor pico-pico** de una onda senoidal es el voltaje o corriente medido del pico positivo al pico negativo. Por supuesto, es siempre dos veces el valor pico.

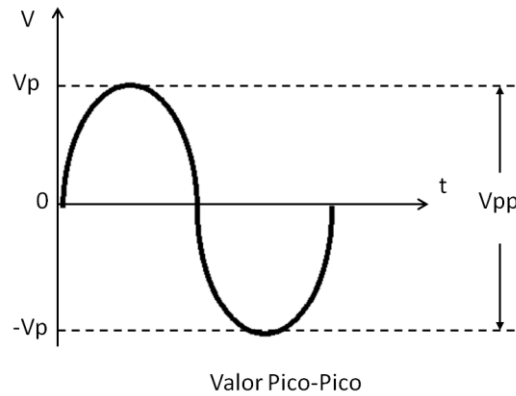


Figura 1.3.3.

El **valor eficaz (RMS)** de una onda senoidal es igual al voltaje en corriente directa que produce la misma cantidad de calor, como la producida con el voltaje senoidal”. Es el valor que la mayoría de los instrumentos de medición registran.

La relación entre el valor pico de una onda senoidal y el valor eficaz para el voltaje y de forma similar para la corriente es:

$$V_{eficaz} = 0.707 V_p$$

$$I_{eficaz} = 0.707 I_p$$

Si se tomara el **valor promedio** de una onda senoidal a partir de un ciclo completo sería cero, esto debido a que los valores positivos se cancelarían con los valores negativos. Por ser útil para los propósitos de comparación el valor promedio de una onda senoidal se toma a partir de medio ciclo y matemáticamente se define como:

$$V_{prom} = \left(\frac{2}{\pi}\right) V_p = 0.637V_p$$



Representación fasorial de una onda senoidal

La representación matemática de una onda senoidal en forma fasorial es la siguiente:

$$V(t) = V_m \sin \omega t$$

Dónde:

V_m : Es la magnitud del voltaje pico instantáneo, en volts.

ω : Es la frecuencia angular en radianes por segundo.

t : Es el tiempo en segundos.

La frecuencia también puede ser expresada como:

$$f = \omega/2\pi$$

Para las formas de onda senoidales, la relación entre los valores eficaz rms y pico instantáneo está dada por:

$$V_{max} = V_m/\sqrt{2}$$

Cuando se aplica un voltaje senoidal a una carga lineal pasiva, dependiendo del tipo de carga, la corriente senoidal que circula por ella puede estar en fase, atrasada o adelantada con respecto al voltaje aplicado. Para una carga puramente resistiva, el voltaje y la corriente están en fase, para una carga inductiva la corriente se atrasa del voltaje y para una carga capacitiva la corriente se adelanta respecto al voltaje.

La expresión matemática para las ondas de corriente desfasadas es:

Carga resistiva: $I(t) = I_m \sin \omega t$

Carga capacitiva: $I(t) = I_m \sin(\omega t + \theta)$

Carga inductiva: $I(t) = I_m \sin(\omega t - \theta)$

Dónde:

I_m : Es el valor pico instantáneo de la magnitud de corriente.

ω : Es la frecuencia angular en radianes por segundo.

t : Es el tiempo en segundos.

En la figura 1.3.4 se muestra la representación fasorial del voltaje y la corriente para cada una de las cargas. Un fasor es una representación vectorial de las relaciones entre voltajes y corrientes; su uso en el campo de la electricidad y de la electrónica se debe a que un diagrama fasorial es más fácil de interpretar que un diagrama de ondas.

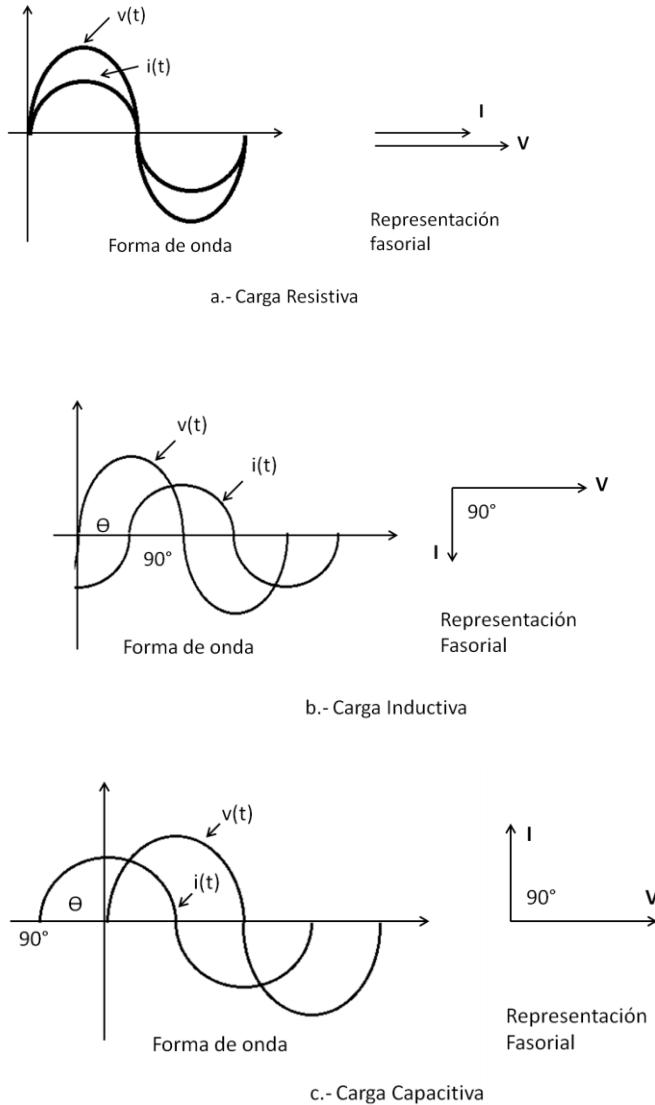


Figura 1.3.4. Representación fasorial para una carga resistiva, inductiva y capacitiva

1.3.3 Circuitos inductivos y capacitivos.

Circuitos inductivos.

La reactancia inductiva se puede definir como una oposición a la corriente alterna, debido a la inductancia del circuito. La unidad de la reactancia inductiva es el ohm, y su valor depende de la inductancia y de la frecuencia del voltaje de C.A. aplicado al circuito.

$$X_L = 2\pi fL$$

Dónde:

X_L : Es la reactancia inductiva en ohms.

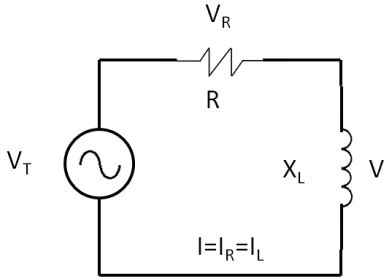
f : Es la frecuencia en Hertz.

L : Es la inductancia en Henry.



En un circuito puramente inductivo se puede calcular la corriente y el voltaje usando la ley de Ohm de forma similar a un circuito resistivo. En un circuito de C.A. que contenga solamente inductancias, la corriente se atrasa 90° respecto al voltaje.

En un circuito R-L en serie, la corriente es la misma tanto en la resistencia y en la impedancia. La caída de voltaje en resistencia es $V_R = IR$ y la caída de voltaje en la reactancia inductiva es $V_L = IX_L$. La corriente I que pasa por X_L debe estar atrasada 90° con respecto al voltaje V_L y la misma corriente pasa por R está en fase con su caída de voltaje V_R .



Circuito R-L serie
Figura 1.3.5.

La impedancia del circuito R-L se calcula con la expresión:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

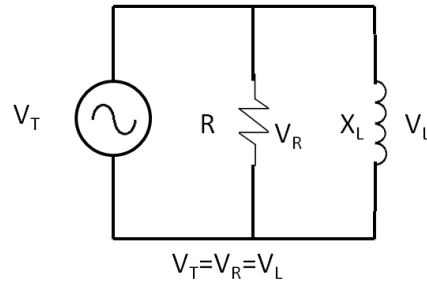
El ángulo de fase es el valor en grados del ángulo que la corriente se desplaza con respecto al voltaje. En un circuito R-L en serie se calcula de la siguiente manera:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{E_L}{E_R}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R}$$

En un circuito R-L paralelo el voltaje a través de todas las componentes es el mismo, es decir:

$$E_T = E_R = E_L$$



Circuito R-L paralelo

Figura 1.3.6.

El valor de la corriente en la rama resistiva se calcula como:

$$I_R = \frac{E_R}{R}$$

Para la rama inductiva:

$$I_L = \frac{E_L}{X_L}$$

La corriente total se calcula ahora como:

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$$

La impedancia total del circuito es igual al voltaje aplicado dividido por la corriente total:

$$Z = \frac{E_T}{I_T}$$

Circuitos capacitivos.

La reactancia capacitiva es la oposición que presenta un capacitor a la circulación de una corriente a través de él. El valor de la reactancia capacitiva es inversamente proporcional a la capacitancia del capacitor. A mayor capacitancia, menor reactancia capacitiva. La frecuencia de la corriente alterna misma afecta al valor de la reactancia capacitiva: a mayor frecuencia, menor reactancia capacitiva. La expresión matemática para su cálculo es:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

Dónde:

X_c : Reactancia capacitiva en ohms.

f : Frecuencia de operación en Hertz.

C : Valor del capacitor en Faraday.

Para un circuito puramente capacitivo, se adoptan las mismas reglas que en un circuito puramente resistivo. Para un circuito con reactancias capacitivas conectadas en serie:



$$X_{CT} = X_{C1} + X_{C2} + \dots + X_{CN}$$

Para reactancias capacitivas conectadas en paralelo:

$$X_{CT} = \frac{1}{\frac{1}{X_{C1}} + \frac{1}{X_{C2}} + \frac{1}{X_{C3}} + \dots + \frac{1}{X_{CN}}}$$

En un circuito puramente capacitivo, la reactancia capacitiva representa la única oposición al paso de corriente eléctrica, por lo tanto el voltaje se atrasa 90° con respecto a la corriente. Cuando se introduce una resistencia a un circuito capacitivo, el circuito ya no es puramente capacitivo; ahora, la resistencia y la capacitancia presentan una oposición al flujo de corriente y el voltaje se atrasa con respecto a la corriente con un ángulo menor de 90° .

Para un circuito R-C en serie todas las corrientes que circulan por él son iguales:

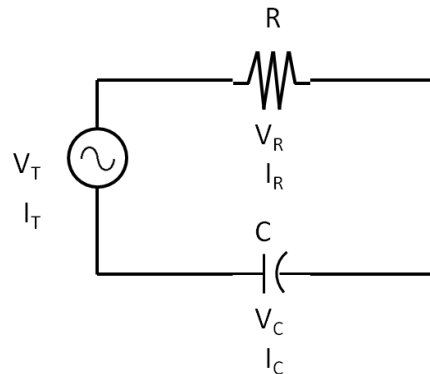
$$I_T = I_C = I_R$$

Dónde:

I_T : Es la corriente total en amperes.

I_C : Corriente a través de la capacitancia.

I_R : Corriente a través de la resistencia.



Circuito RC serie

Figura 1.3.7.

La caída de voltaje en la resistencia del circuito R-C es igual a $V_R = RI_R$, y se encuentra en fase con la corriente.

El voltaje a través de la capacitancia se atrasa 90° respecto a la corriente y es igual a:

$$V_C = I_C X_C$$

Dónde:

V_C : Magnitud del voltaje a través de la capacitancia.

I_C : Amplitud de la corriente a través de la capacitancia.

X_C : Reactancia capacitiva de la capacitancia en ohms.



La magnitud del voltaje total es:

$$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}$$

El valor del ángulo de fase se calcula ahora como:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_C}{V_R}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_C}{R}$$

El valor de la impedancia se puede obtener con la expresión:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

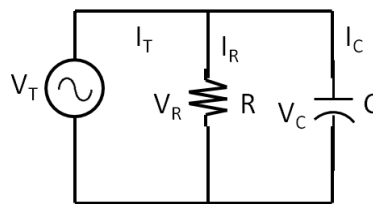
Dónde:

Z : Impedancia del circuito en ohms.

R : Resistencia en ohms.

X_C : Reactancia capacitiva en ohms.

Para un circuito R-C en paralelo, el voltaje total del circuito es igual al voltaje en cada uno de los elementos. Esto es $V_T = V_R = V_C$. Estos voltajes son iguales en magnitud y están en fase.



Circuito R-C paralelo

Figura 1.3.8.

Con relación a las corrientes, la que circula a través de la resistencia se encuentra en fase con el voltaje, pero la que circula a través de la capacitancia se encuentra desfasada en este caso adelantada 90° con respecto al voltaje.

La magnitud de la corriente y el ángulo de fase se pueden determinar en forma analítica, de acuerdo con la expresión:

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$$

Dónde:

I_T : Corriente total.

I_R : Corriente a través de la resistencia.

I_C : Corriente a través de la capacitancia.



El ángulo de fase es:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{I_C}{I_R}$$

La impedancia total o equivalente se calcula como:

$$Z_T = \frac{V_T}{I_T}$$

1.3.4 Potencia Reactiva, Aparente y Real.

Cuando una corriente alterna circula a través de una resistencia, ésta convierte la energía eléctrica a energía calorífica. El flujo de esta energía es unidireccional y pasa del generador a la carga y no regresa al generador. La capacidad de transferencia de esta energía que fluye en forma unidireccional del generador a la carga se le conoce como Potencia real o activa y se mide con un watt metro o se puede calcular con la expresión:

$$P = VI \cos \theta$$

Dónde:

P: Potencia activa expresada en watts (W).

V: Voltaje a través de la carga (V).

I: Corriente que circula por la carga (A).

La potencia que se intercambia continuamente entre la fuente y la carga se conoce como potencia reactiva (Q). Esta representa la energía que primero se almacena y luego se libera en el campo magnético de un inductor, o en el campo eléctrico de un capacitor. La potencia reactiva de una carga está dada por:

$$Q = VI \sin \theta$$

Dónde:

Q: Potencia reactiva (VAR).

V: Voltaje a través de la carga (V).

I: Corriente que circula por la carga (A).

θ : Ángulo de impedancia de la carga.

Para cargas inductivas Q es positiva y negativa para cargas capacitivas debido a que el ángulo θ es positivo para cargas inductivas y negativo para cargas capacitivas.

La potencia aparente (S) suministrada a la carga se define como el producto del voltaje a través de la carga y la corriente en la carga y está dada por la ecuación:

$$S = VI$$



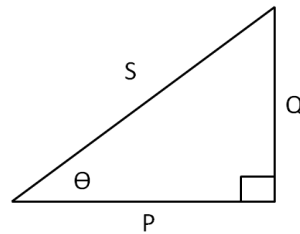
Dónde:

S : Potencia aparente (VA).

V : Voltaje a través de la carga (V).

I : Corriente que circula por la carga (A).

Las potencias real, aparente y reactiva se relacionan entre sí a través del triángulo de potencias.



Triángulo de Potencias

Figura 1.3.9.

Las relaciones que se obtienen de este triángulo son:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\theta = \cos^{-1}(P/S)$$

Dónde:

P = Magnitud de la potencia real.

S = Magnitud de la potencia aparente.

Q = Magnitud de la potencia reactiva.

El factor de potencia indica si la carga está convirtiendo toda la potencia consumida en trabajo real o no, si el factor de potencia es 1, se entiende que la carga está convirtiendo toda la potencia consumida en trabajo. Si el factor de potencia es cero, la carga no está produciendo trabajo real. Matemáticamente, el factor de potencia se define como:

$$\text{factor de potencia} = \cos \theta = \frac{P}{S}$$



1.4 INTRODUCCIÓN A LOS TRANSFORMADORES.

Un transformador es una máquina eléctrica estática que transfiere energía eléctrica alterna de un circuito a otro mediante la acción de un campo magnético. Su principio de operación se basa en la ley de inducción de Faraday la cual establece que si un flujo magnético variable en el tiempo atraviesa una bobina de alambre conductor, se inducirá una fuerza electromotriz en ella.

En su forma más básica, un transformador consta de dos bobinas de alambre conductor enrolladas alrededor de un núcleo ferromagnético común. Las bobinas no se encuentran conectadas de forma directa, su única conexión entre ellas es el flujo magnético común que se encuentra dentro del núcleo. La bobina que se conecta a la fuente de energía eléctrica alterna se conoce como “bobina primaria” y la bobina que suministra energía eléctrica alterna a las cargas se llama “bobina secundaria”.

Si la energía que suministra el transformador es mayor a la energía que recibe de la fuente se le denomina “transformador elevador”, si la energía que suministra es menor a la energía que recibe es un “transformador reductor”. En el caso en que la energía que recibe es igual a la energía que suministra, se dice que el transformador tiene una relación de transformación igual a la unidad.

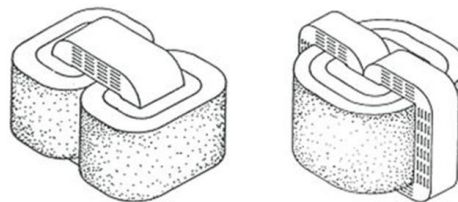
1.4.1 Clasificación de los transformadores

Los transformadores se pueden clasificar de distintas maneras, según se tome como base su operación, su construcción o su utilización.

a) Por su construcción o tipo de núcleo.

Desde el punto de vista de su construcción hay básicamente dos tipos de transformadores: el transformador tipo acorazado (Shell) y el transformador tipo columna. En el transformador tipo acorazado o Shell el núcleo magnético envuelve a las bobinas. Este diseño ofrece la ventaja de proporcionar una alta resistencia mecánica.

El transformador tipo columna tiene como característica principal que las bobinas envuelven al núcleo. Este diseño ofrece la ventaja de un menor costo inicial y de mantenimiento, además de una alta impedancia; pero tiene la desventaja de una baja resistencia mecánica y menor regulación.



Núcleo tipo columna

Núcleo tipo acorazado

Figura 1.4.1.



b) Por el tipo de enfriamiento.

De acuerdo con el tipo de enfriamiento, se clasifican en transformadores sumergidos en aceite aislante y transformadores de tipo seco.

Transformadores sumergidos en aceite	
Tipo de enfriamiento	Característica
ONAN	Transformador sumergido en aceite con enfriamiento natural. Se usa en capacidades mayores de 50 KVA.
ONAN/ONAF	Transformador sumergido en aceite con enfriamiento natural con aire forzado. Se usa cuando se espera que el equipo soporte sobrecargas durante períodos cortos pero frecuentes en condiciones normales de trabajo.
ONAN/ONAF/OFAF	Transformador sumergido en aceite con enfriamiento natural, con aire forzado y con aceite forzado.
OFAF	Transformador sumergido en aceite con enfriamiento natural y con aceite forzado.
OW	Transformador sumergido en aceite con enfriamiento con agua.
OFAF	Transformador sumergido en aceite con enfriamiento con aceite forzado y agua forzada.

Transformadores tipo seco	
Tipo de enfriamiento	Característica
AA	Transformador tipo seco con enfriamiento propio (ventilación natural).
AFA	Transformador tipo seco con enfriamiento por aire forzado.
AA/FA	Transformador tipo seco con enfriamiento propio y por aire forzado.

Tabla 1.4.1. Tipos de enfriamiento en Transformadores.

c) Por el número de fases.

De acuerdo al número de fases, los transformadores se clasifican en monofásicos y trifásicos. Los transformadores monofásicos son transformadores de potencia o de distribución que son conectados a una sola línea y a un neutro o tierra. Tienen un solo devanado de alta tensión y uno de baja tensión. Se denota con 1 \emptyset . Los transformadores trifásicos son transformador de potencia o de distribución que son conectados a tres líneas o y pueden estar o no conectados a un neutro común o tierra. Tienen 3 devanados de alta tensión y 3 de baja tensión. Se denota con 3 \emptyset .

d) Por su ambiente de operación.

En función de las condiciones de servicio se clasifican en: transformadores para interior o para intemperie. Los transformadores de gran capacidad son casi todos para intemperie.



e) Por su capacidad.

Por su capacidad los transformadores se clasifican en tres grupos:

- De pequeña potencia, con capacidades de 500 a 7500 KVA.
- De mediana potencia, con capacidades de 7.5 a 10 MVA.
- De gran potencia, con capacidad de 10 MVA en adelante.

f) En función de los lugares de instalación.

En función de los lugares de instalación, los transformadores se clasifican en:

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

g) Por su aplicación.

De acuerdo con su aplicación dentro de los sistemas eléctricos se clasifican en:

- Transformador para generador. Son transformadores de potencia que van conectados a la salida del generador. Proporcionan la energía a la línea de transmisión.
- Transformadores de subestación. Los transformadores de potencia que conectan al final de la línea de transmisión para reducir la tensión a nivel de subtransmisión.
- Transformadores de distribución. Reducen la tensión de subtransmisión a tensiones aplicables en zonas de consumo.
- Transformadores especiales. Son transformadores de potencia diseñados para aplicaciones no incluidas en las anteriores y que pueden ser: reguladores de tensión, transformadores para rectificador, transformadores para arranque, transformadores defasadores; transformadores para aterrizamiento, Transformadores de instrumentos. Son transformadores de potencial y transformadores de corriente que son usados en la medición, en la protección y en el control.

h) Por la preservación de aceite.

Los transformadores en función del sistema que utilizan para la preservación del aceite se clasifican en: con tanque conservador y sin tanque conservador.

i) Por su conexión.

De acuerdo a la conexión de sus devanados, los transformadores se clasifican en:

- Conexión delta/estrella. Se utilizan como transformadores elevadores en las centrales eléctricas.
- Conexión estrella/delta. Se utilizan con menor frecuencia en sistemas de distribución.



- Conexión estrella-estrella. En la práctica no suelen utilizarse debido a que son poco confiables cuando se presentan cargas desequilibradas.
- Conexión delta-delta. Se utilizan en baja tensión ya que presentan un buen comportamiento frente a cargas desequilibradas.

Partes y componentes de un transformador

Las partes que componen un transformador se pueden clasificar en cuatro grandes grupos:

1. Circuito magnético (núcleo)
2. Circuito eléctrico (devanados)
3. Sistema de aislamiento
4. Tanque y accesorios

a) El circuito magnético (núcleo).

El circuito magnético es la parte componente del transformador que sirve para conducir el flujo magnético generador, el cual concatenará magnéticamente los circuitos eléctricos del transformador. El núcleo está construido con láminas de acero al silicio aisladas entre sí, de grano orientado que facilita la trayectoria del flujo magnético, presentando baja reluctancia. De esta manera se logra que la corriente requerida para inducir el flujo sea pequeña. Este diseño permite reducir las pérdidas por las “corrientes de remolino”.

El tipo de lámina más usual en la fabricación de núcleos para transformadores es la M-4, cuyas características de watts por libra o watts por kilogramo contra la densidad de flujo (B) a 50 y 60 Hz se presentan en la siguiente tabla.

Grado de orientación	Espesor		60 Hz				50 Hz			
			Watts por Lb.		Watts por Kg.		Watts por Lb.		Watts por Kg.	
	Pulg.	mm	15 kGau ss	17 kGau ss	15 kGau ss	17 kGau ss	15 kGau ss	17 kGau ss	15 kGau ss	17 kGau ss
M-2	0.007	0.18	0.42		0.93		0.32		0.70	
M-3	0.009	0.23	0.46		1.01		0.35		0.77	
M-4	0.011	0.28	0.51	0.74	1.12	1.63	0.39	0.56	0.85	1.24
M-6	0.014	0.35	0.66	0.94	1.46	2.07	0.50	0.71	1.11	1.57

Tabla 1.4.2. Especificaciones de los tipos de lámina usadas en la fabricación del núcleo.

Las pérdidas en la lámina a 50 Hz comparadas con las pérdidas a 60 Hz tienen la siguiente equivalencia:

$$Pérdidas a 50 Hz = 0.76 x pérdidas a 60 Hz$$



b) El circuito eléctrico (devanados)

Los devanados están formados por varias bobinas conectadas en serie o en paralelo y están acoplados por el núcleo. Los devanados se fabrican de cobre o aluminio y están aisladas entre sí. Las características del aluminio y del cobre se presentan en la tabla 1.4.3. Hay dos tipos de devanados; el que se conecta a la fuente se denomina como devanado primario, y el que se conecta a la carga que se conoce como devanado secundario.

PROPIEDAD	ALUMINIO	COBRE
Conductividad eléctrica a 20°C recocido	62%	100%
Peso específico en gramos por centímetro cúbico a 20°C	2.7	8.89
Calor específico	0.21	0.094
Punto de fusión °C	660	1083
Conductividad térmica, a 20°C (calorías/°C/cm ² /cm)	0.53	0.941
Esfuerzo mecánico a la tensión en kg/mm ²	16	25
Peso total de un transformador de 2500 kVA con devanado de A.T. a 44 kV (kg)	6318	6682

Tabla 1.4.3. Características del cobre y del aluminio.

Las ventajas de las bobinas de cobre son:

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

Las ventajas de la bobina de aluminio son:

- Estabilidad en el costo por suministro,
- Eficiente disipación de calor (capacidades muy pequeñas) únicamente para devanados en banda (no para devanados de alambre); uso de hoja de aluminio (foil de aluminio),
- Considerable reducción de peso.

c) El sistema de aislamiento

Los transformadores utilizan una serie de materiales aislantes, los cuales, forman el sistema de aislamiento. Su función es proporcionar una separación dieléctrica entre los conductores en el circuito eléctrico del transformador. El aislamiento se clasifica de acuerdo a las partes que se requieren aislar de la siguiente manera.

- Aislamiento principal o mayor: proporciona la separación dieléctrica entre devanados de una misma fase o la separación entre devanados y tierra.



- Aislamiento menor: proporciona la separación entre vueltas adyacentes de una bobina o la separación entre secciones de la misma.
- Aislamiento entre fases: proporciona la separación entre devanados de distinta fase.

En función de sus características térmicas, los materiales aislantes se clasifican de la siguiente manera:

Clase de Aislamiento	Máxima temperatura de operación en °C
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180

Tabla 1.4.4. Tipos de aislamiento.

El aislamiento de un transformador también se clasifica de acuerdo al tipo de material aislante; si es aislamiento sólido o aislamiento líquido.

Algunos materiales utilizados para el aislamiento sólido son:

- Cartón prensado.
- Papel kraft normal o tratado (insuldur).
- Papel manila o corrugado.
- Cartón prensado de alta densidad.
- Collares de cartón prensado y aislamientos finales.
- Partes de cartón prensado laminados.
- Esmaltes y barnices.
- Recubrimientos orgánicos e inorgánicos para la laminación del núcleo.
- Porcelanas (boquillas).
- Recubrimientos de polvo epóxico.
- Madera de maple o machiche para armado.
- Fibra vulcanizada.
- Algodón (hilos, cintas).
- Plásticos y cementos, telas y cintas adhesivas, cintas de fibra de vidrio, etc.

Estos materiales deben cumplir las siguientes funciones:

1. Soportar altas tensiones (esfuerzos dieléctricos). Esto incluye ondas de impulso y transitorios.
2. Soportar esfuerzos mecánicos y térmicos (calor) los cuales, generalmente acompañan a un cortocircuito.
3. Prevenir acumulaciones de calor (transmisión de calor).



4. Mantener sus características esenciales durante su tiempo de vida útil.

El sistema aislante líquido está compuesto básicamente por aceite. Este debe tener una rigidez dieléctrica alta, un bajo factor de potencia y una estabilidad química y física. Este aceite baña las bobinas, el núcleo y los materiales aislantes sólidos y cumple con tres propósitos esenciales:

1. Provee una rigidez dieléctrica.
2. Proporciona un enfriamiento eficiente.
3. Protege al demás sistema aislante.

El fluido puede ser aceite mineral para transformador, silicona o r-temp; de estos tres, el aceite mineral es usado con mayor frecuencia.

Es importante realizar pruebas a los aislamientos para garantizar la integridad del sistema aislante, ya que conforme este se deteriora, puede conducir a una falla en el transformador.

d) Tanque y accesorios

El tanque cumple con la función de contener el aceite y proteger las partes energizadas del transformador. Sirve además como estructura para el montaje de los accesorios y equipo de control. El tanque de un transformador debe ser capaz de soportar la presión por expansión térmica del aceite aislante, no debe ser sometido a presiones mayores de 2 atmósferas (29.4 psi) para evitar deformaciones, fisuras o fracturas.

Entre los accesorios más importantes del transformador están:

- a) Boquillas (bushings). Su función es permitir la conexión entre las terminales del transformador y la red eléctrica.
- b) Radiadores. Permiten disipar el calor generado en el transformador.
- c) Ventiladores. Se usan para incrementar el nivel de disipación de calor.
- d) Indicador magnético de nivel de aceite. Indica el nivel de aceite dentro del tanque, cuando hay un nivel bajo de aceite se activa una alarma.
- e) Relevador Buchholz. Emite una alarma cuando hay un incremento súbito en la presión del aceite o hay generación de gases.
- f) Válvula de sobrepresión. Permite aliviar cualquier sobrepresión que se presente en el transformador.
- g) Indicadores de temperatura.
- h) Cambiador de derivaciones (taps). Permite modificar la relación del voltaje. Este puede ser con operación sin carga o con operación con carga.
- i) Válvula de muestreo de aceite.
- j) Placa de datos. Permite conocer las características importantes de un transformador. Debe estar en un lugar visible.
- k) Empaques. Su función es mantener la hermeticidad del transformador.

A todo lo anterior habrá que agregar el bastidor y los herrajes solicitados en la Norma Oficial Mexicana (NMX-J-116-ANCE).



1.4.2 Normas.

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

- Normas nacionales
 - o NOM-002-SEDE-1999 Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución.
 - o NOM-008-SCFI Sistema general de unidades.
 - o NOM-024-SCFI Información comercial para empaques, instructivos y garantía de los productos eléctricos, electrónicos y electrodomésticos.
 - o NMX-J-116-ANCE Productos eléctricos-Transformadores-Transformadores de distribución tipo poste y tipo subestación-Especificaciones.
 - o NMX-J-169-ANCE Productos eléctricos-Transformadores y autotransformadores de distribución y potencia. Métodos de prueba.
 - o NOM-J-284 Transformadores de potencia.
 - o NMX-J-285-ANCE-1996 Productos eléctricos-Transformadores de distribución tipo pedestal, monofásicos y trifásicos para distribución subterránea-Especificaciones.
 - o NMX-J-287-ANCE-1996 Productos eléctricos-transformadores de distribución tipo sumergible, monofásicos y trifásicos para distribución subterránea-Especificaciones.
 - o NOM-J-271 Técnicas de prueba en alta tensión.
 - o NMX-J-123/I-ANCE-1999 (IEC-296) Productos eléctricos-transformadores-aceites minerales aislantes para transformador-parte 1: especificaciones.
 - o NOM-J-153 Clasificación de materiales aislantes.
- CFE K-0000(Especificaciones de Comisión Federal de Electricidad)
 - o K-0000-01 Transformadores de distribución tipo poste.
 - o K-0000-02 Inspección por muestreo de transformadores de distribución.
 - o K-0000-03 Criterios de evaluación de pérdidas para concursos y penalizaciones.
 - o K-0000-09 Transformadores de potencia de 10 MVA y menores.
 - o K-0000-06 Transformadores de potencia de 10 MVA y mayores.
 - o K-0000-10 Reparación de transformadores de potencia.
- Normas internacionales. ANSI (American National Standard Institute).
 - o C57.12.00 General requirements for distribution. Power and regulating transformers.
 - o C57.12.00 a, b Thermal and short circuit requirement supplement to ANSI C57.12.00.
 - o C57.12.10 Requirements for transformers 230 000 volts, and below 833/958 through 83333/10417 kVA, single phase, and 750/862 through 60000/80000/100000 kVA, three phase.
 - C57.19.90 Test code for distribution, power and regulating transformers.
 - o C57.13 Requirements for instrument transformers.
 - o C62.1 Surge arresters and test code for outdoor apparatus bushings.
 - o C76.2 Electrical dimensional and related requirements for outdoor apparatus bushings.

1.4.3 El transformador ideal.

Un transformador ideal es un dispositivo sin pérdidas que tiene un devanado de entrada y un devanado de salida sobre un núcleo ferromagnético como se muestra en la figura 1.4.2.

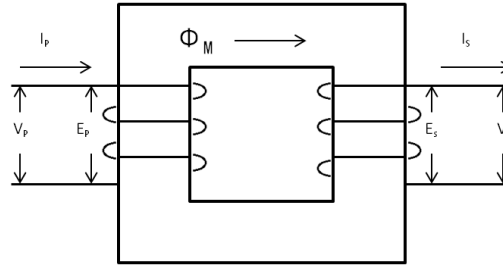


Figura 1.4.2. Transformador ideal.

Las relaciones entre el voltaje de entrada y el de salida, y entre la corriente de entrada y la de salida se describen a continuación.

La relación entre el número de vueltas en el devanado primario N_p y el número de vueltas en el devanado secundario N_s es $a = N_p/N_s = V_p/V_s$; donde a se define como la *relación de vueltas* del transformador y es siempre mayor o igual a la unidad. Como se puede observar, a también es la relación entre el voltaje aplicado al lado primario del transformador V_p y el voltaje producido en el lado secundario V_s .

La relación entre la corriente que fluye en el lado primario I_p del transformador y la corriente que sale del lado secundario del transformador es $a = I_s/I_p$.

En un transformador ideal, los devanados primario y secundario tienen el mismo factor de potencia y la potencia de entrada es igual a la potencia de salida.

$$P_{ent} = P_{sal} = V_p I_p \cos \theta = V_s I_s \cos \theta$$

Donde $\theta = \theta_p - \theta_s$, es el ángulo entre el voltaje y al corriente.

Esta relación se aplica de la misma manera para la potencia reactiva Q y la potencia aparente S .

$$Q_{ent} = Q_{sal} = V_p I_p \sin \theta = V_s I_s \sin \theta$$

$$S_{ent} = S_{sal} = V_p I_p = V_s I_s$$



1.4.4. El transformador real.

Un transformador ideal no tiene pérdidas y es útil para comenzar el análisis matemático de los transformadores, sin embargo, no se puede fabricar. Las características de un transformador real son muy parecidas a las de un transformador ideal, pero se consideran las pérdidas en el núcleo y en los devanados, el flujo disperso y la reactancia de magnetización.

Pérdidas en el núcleo.

Las pérdidas en el cobre son debidas a la histéresis y a las corrientes parásitas. Las pérdidas por corrientes parásitas son provocadas por el calentamiento resistivo en el núcleo del transformador. Las pérdidas por histéresis están asociadas con la reubicación de los dominios magnéticos en el núcleo para cada semiciclo.

Pérdidas en el cobre.

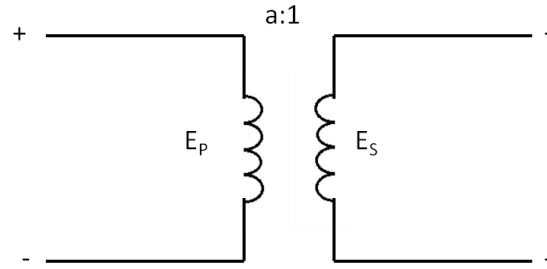
Las pérdidas en el cobre (I^2R) son causadas por el calentamiento resistivo en los devanados del transformador. Son proporcionales al cuadrado de la corriente de los devanados.

Flujo disperso.

A pesar de que las bobinas se enrollan en forma compacta y ocupan completamente el espacio central del núcleo de hierro, no todo el flujo magnético creado por las corrientes primaria y secundaria está confinado al circuito magnético. El flujo de un devanado tiene dos componentes: un flujo mutuo Φ_m que permanece en el núcleo y une ambos devanados y un flujo disperso Φ_D que pasa a través de un devanado pero regresa a través del aire sin conectar al otro devanado. Los flujos dispersos inducen voltajes en las vueltas en que ellos se entrelazan, pero no contribuyen a la transferencia de potencia entre los devanados. Su efecto, representado por las reactancias de dispersión en el primario y en el secundario, es el de caídas de voltaje inductivas.

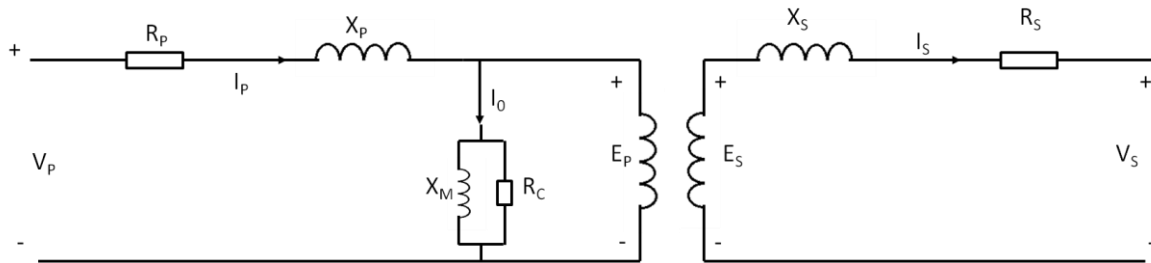
Circuito Equivalente de un transformador real.

En la figura 1.4.3 se presenta el circuito equivalente de un transformador ideal. Cuando se incluyen los efectos no ideales de las resistencias de los devanados, la reactancia de magnetización, el flujo disperso y las pérdidas en el núcleo se obtiene el circuito equivalente del transformador real (figura 1.4.4).



Transformador ideal

Figura 1.4.3.



Transformador Real

Figura 1.4.4.

Dónde:

V_p : Voltaje aplicado al devanado primario.

I_e : Corriente de excitación.

Φ_m : Flujo magnético mutuo.

R_p : Resistencia del devanado primario.

I_c : Componente real de la corriente de excitación que genera las pérdidas en el núcleo.

I_m : Componente reactiva que genera el flujo mutuo.

E_p : Voltaje inducido en el primario.

X_m : Reactancia de magnetización.

R_c : Resistencia del núcleo.

X_p : Reactancia de dispersión primaria.

X_s : Reactancia de dispersión secundaria.

En el circuito equivalente de un transformador real los devanados primario y secundario están acoplados por el circuito equivalente del transformador ideal.

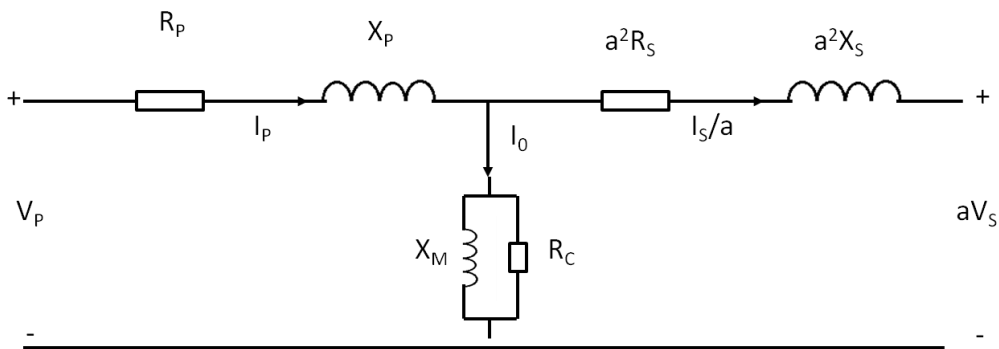
Cuando se aplica un voltaje al devanado primario V_p se genera una corriente de excitación I_e . Esta corriente crea el flujo magnético en el núcleo y genera las pérdidas en el núcleo y en el cobre. La resistencia primaria R_p y la corriente de excitación I_e son lo suficientemente pequeñas para que las pérdidas en el cobre P_{cu} sean despreciables.

La corriente de excitación I_e posee dos componentes: una componente de potencia verdadera I_c que genera las pérdidas en el núcleo y una componente reactiva I_m que crea el

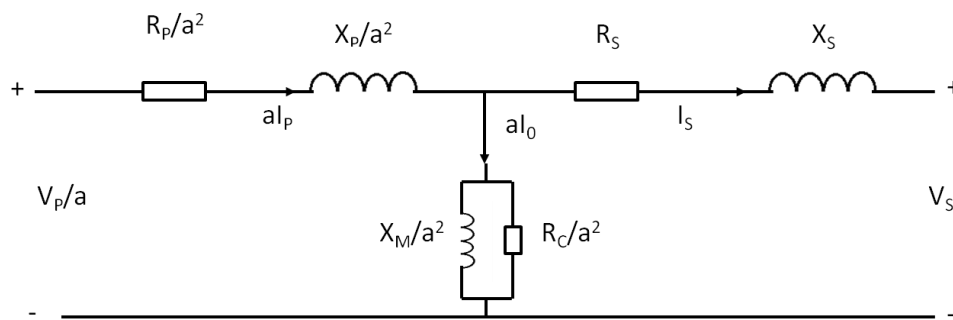


flujo mutuo Φ_m . El voltaje inducido en el primario E_p y las componentes de la corriente de excitación I_c e I_m están en función de la frecuencia y amplitud del flujo mutuo Φ_m . Con el transformador en vacío (sin carga), las pérdidas en el cobre en los devanados primario y secundario adquieren importancia para el cálculo de la regulación del voltaje y la eficiencia del transformador. La regulación de voltaje es afectada además por el flujo de dispersión.

El circuito equivalente del transformador real puede reducirse si se toma en cuenta que la magnitud de la corriente de excitación I_e es sólo significativa para las pérdidas en el núcleo y estas son constantes siempre y cuando la frecuencia y amplitud del voltaje aplicado al primario V_p sean constantes. Como las variaciones de amplitud y de frecuencia son muy pequeñas, R_c y X_m pueden omitirse considerando que en el análisis de eficiencia del transformador las pérdidas en el núcleo serán constantes. De esta manera, la figura 1.4.5 representa el circuito equivalente del transformador real referido al primario y al secundario.



Circuito equivalente de un transformador real referido al primario



Circuito equivalente de un transformador real referido al secundario

Figura 1.4.5. Circuito equivalente del transformador real

La figura 1.4.6 representa los diagramas fasoriales para un transformador real, cuando opera con un factor de potencia atrasado, adelantado y unitario.

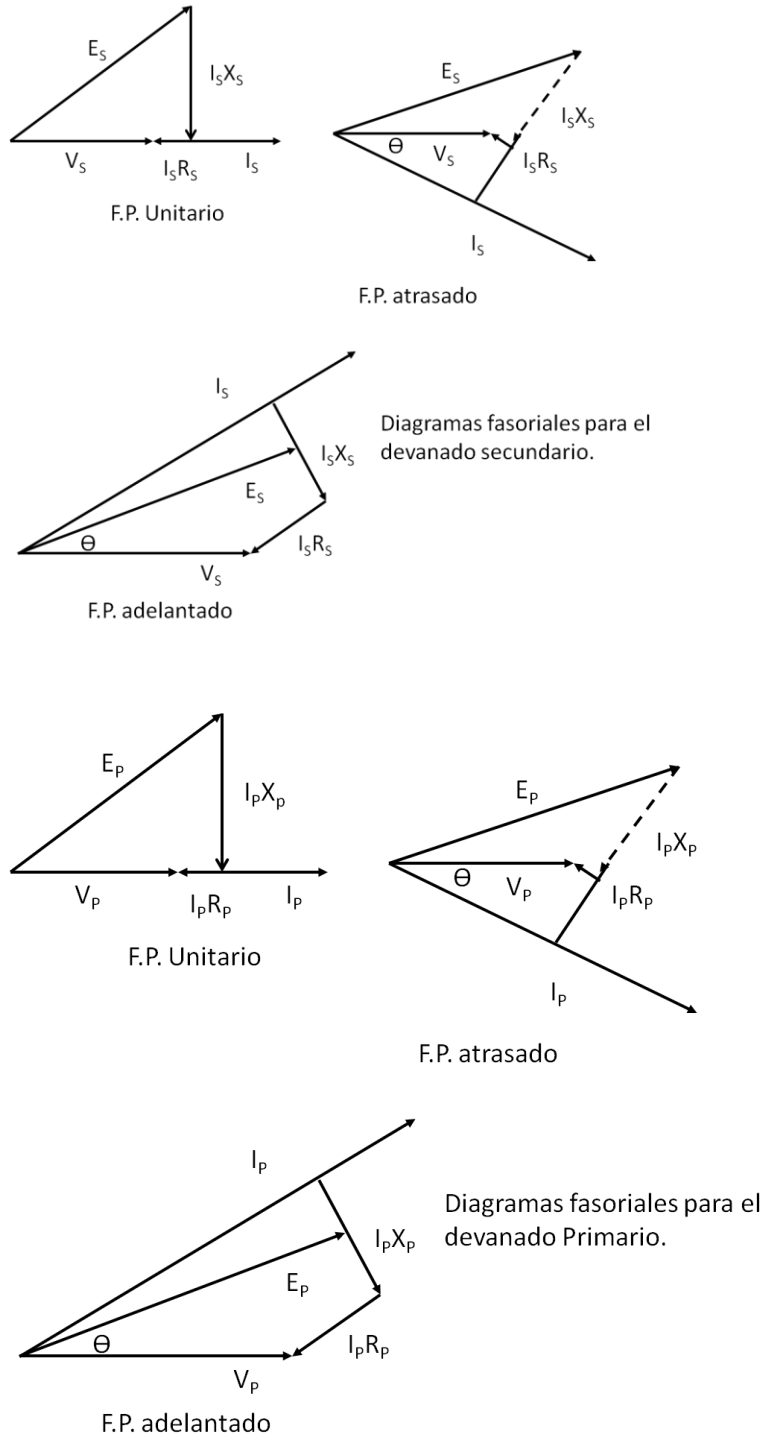


Figura 1.4.6. Diagramas fasoriales de un transformador real.



1.4.5 Prueba de circuito abierto y de cortocircuito.

Las características de un transformador pueden obtenerse a partir de su circuito equivalente. Los parámetros del circuito se obtienen a partir de los datos de diseño como del resultado de pruebas. La impedancia y las pérdidas del núcleo del transformador son necesarias para el análisis de la eficiencia y regulación del voltaje del transformador.

Las pruebas más comunes son: la prueba de circuito abierto o sin carga y la prueba de cortocircuito o con carga.

Prueba de circuito abierto

En esta prueba se abre uno de los devanados (sin carga) y al otro se le aplica un voltaje, normalmente el voltaje nominal. En las terminales del devanado donde se aplica el voltaje se mide el voltaje, la corriente y la potencia, en el otro devanado se mide el voltaje. De esta manera se verifica la relación de vueltas. Por lo general se aplica el voltaje al devanado cuyo voltaje nominal es próximo al de la fuente de energía.

Las pérdidas de potencia sin carga se obtienen con un watt metro. Las pérdidas el núcleo se obtiene restando las pérdidas del cobre en el devanado. En general los parámetros del circuito se obtienen a partir de:

$$P_c = P_0 - I_0^2 R_1$$

$$E_1 = V_0$$

$$R_c = \frac{E_1^2}{P_c}$$

$$I_c = \frac{P_c}{E_1}$$

$$I_m = \sqrt{I_0^2 - I_c^2}$$

$$X_m = \frac{E_1}{I_m}$$

$$a \approx \frac{V_0}{E_2}$$

Dónde:

P_c : Pérdidas en el núcleo.

P_0 : Pérdidas de potencia sin carga (wattómetro)

I_0 : Corriente en el devanado primario.

R_1 : Resistencia del devanado primario.

E_1 : Voltaje inducido en el primario.

V_0 : Voltaje de entrada.

R_c : Resistencia en el núcleo.

I_c : Corriente en el núcleo.

I_m : Corriente de magnetización.

X_m : Reactancia de magnetización.

a : Relación de vueltas.

E_2 : Voltaje inducido en el secundario.



Prueba de corto circuito

En esta prueba, un devanado se pone en cortocircuito a través de sus terminales y se aplica un voltaje reducido al otro devanado. El valor de voltaje se escoge de tal manera que produzca una corriente cuyo valor sea el de la corriente nominal del devanado en cortocircuito. El devanado que se va a poner en cortocircuito se escoge en función del equipo de medición.

Si es el devanado secundario el que se pone en corto y al devanado primario se le aplica el voltaje, la corriente de magnetización y las pérdidas en el núcleo se hacen muy pequeñas y el circuito equivalente se reduce (figura).

Para el cálculo de los parámetros del circuito referidos al primario se tienen las siguientes relaciones:

$$Z_s = \frac{V_s}{I_s}$$

$$R_1 + a^2 R_2 = R_s = \frac{P_s}{I_s^2}$$

$$X_1 + a^2 X_2 \equiv X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$$

$$X_1 = a^2 X_2 = \frac{1}{2} X_s$$

Regulación de voltaje y eficiencia de un transformador.

La regulación de voltaje de un transformador es una cantidad que compara el voltaje de salida de un transformador en vacío con el voltaje de salida a plena carga. Se define por la ecuación:

$$RV = \frac{V_s \text{ en vacío} - V_s \text{ a plena carga}}{V_s \text{ a plena carga}} \times 100\%$$

Dónde:

RV : Regulación de voltaje de un transformador

$V_s \text{ en vacío}$: Voltaje de salida en vacío

$V_s \text{ a plena carga}$: Voltaje de salida a plena carga.

Normalmente, se desea tener una regulación de voltaje tan pequeña como sea posible. Para un transformador ideal $RV = 0\%$.

La eficiencia de un Transformador está dada por la ecuación:



$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \times 100\% = \frac{P_{sal}}{P_{sal} + P_{pe}} \times 100\%$$

Donde η es la eficiencia, P_{sal} la potencia de salida, P_{ent} la potencia de entrada y P_{pe} son las pérdidas y están dadas por:

$$P_{pe} = P_{cu} + P_n$$

Donde P_{cu} son las pérdidas en el cobre (I^2R) y P_n son las pérdidas en el núcleo (pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas).

Para calcular la eficiencia de un transformador con una carga dada, simplemente adicione las pérdidas en cada resistor y aplique la ecuación. Ya que la potencia de salida está dada por

$$P_{sal} = V_s I_s \cos \theta_s$$

La eficiencia del transformador se puede expresar como

$$\eta = \frac{V_s I_s \cos \theta}{P_{cu} + P_{núcleo} + V_s I_s \cos \theta} \times 100\%$$

Además de calcular la regulación y la eficiencia, los ensayos de vacío y de cortocircuito proporcionan los datos útiles para calcular la eficiencia diaria total de los transformadores de distribución, en los que por definición eficiencia diaria total = (energía total suministrada por un transformador a una carga)/(energía total de entrada recibida por el transformador), para un periodo de 24 horas.

Expresándolo en forma matemática, la eficiencia diaria se expresa como:

$$Eficiencia\ diaria = \frac{W_{sal(total)}}{W_{entrada(total)}} = \frac{W_{01} + W_{02} + W_{03} + \dots}{W_{salida\ (total)} + W_{perdidas\ (total)}}$$

Donde W_{01} , W_{02} , W_{03} , etc., son las energías individuales absorbidas del transformador por la carga conectada durante el periodo de 24 horas al transformador. $W_{perd(total)}$ es la suma de las pérdidas de energía en el hierro (fijas) y de la carga en el cobre (variables durante el periodo de 24 horas).

1.4.6 Polaridad e identificación de fases.

Conforme a la norma ANSI, las terminales de alta tensión de un transformador se identifican con la letra “H” y las terminales de baja tensión se designan con la letra X. Los subíndices de numeración consecutiva indican tanto los terminales de bobina como la polaridad. Un transformador con las terminales H_1, H_2, X_1, X_2, X_3 y X_4 tendrá un devanado H_2 sea positivo con respecto a H_1 , X_2 será positivo con respecto a X_1 y X_4 será positivo con respecto a X_3 . Aunque esta es una norma actual, muchos transformadores antiguos carecen de esta identificación; por lo tanto, el procedimiento seguro consiste en verificar antes de conectar cualquier circuito en el cual la polaridad constituye una consideración importante.

La identificación de fases es el proceso mediante el cual se identifican las terminales individuales que constituyen cada una de las bobinas del transformador. En forma práctica, esta se puede hacer de la siguiente manera. Con una lámpara de 120 V conectada de un extremo a una fuente de alimentación, el otro extremo de la lámpara se conecta a una de las terminales del transformador, por ejemplo H_1 (figura 1.4.7). La conexión de exploración (que va a la fuente de alimentación) se conecta a las otras terminales del transformador; solamente en las terminales que forman parte de la misma bobina se cerrará el circuito y por lo tanto se encenderá la lámpara. El brillo de la lámpara también puede indicar las tomas, la lámpara brilla más cuando el circuito se cierra entre $H_1 - H_2$ que entre $H_1 - H_4$.

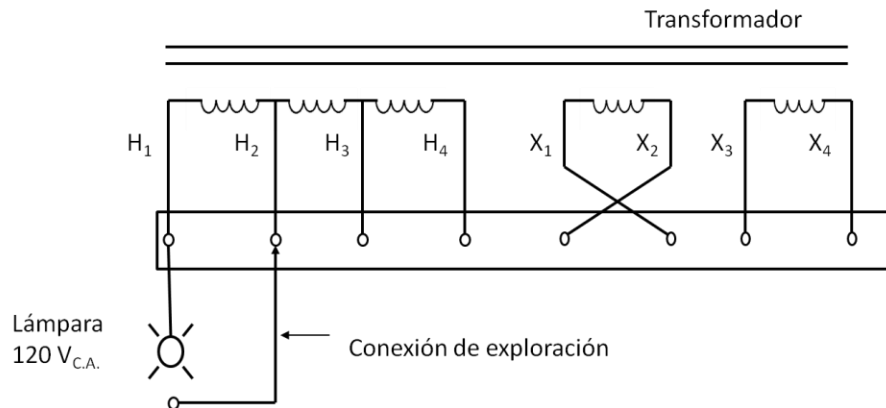


Figura 1.4.7. Prueba de fases.

Una terminal de alta tensión tiene la misma polaridad que una terminal de baja tensión si la corriente que entra por la terminal de alta tensión está aproximadamente en fase con la corriente que entra por el devanado de baja tensión. La prueba de polaridad consiste en conectar una terminal de la bobina de alta tensión con la terminal contigua del devanado de baja tensión (figura 1.4.8). Las otras dos terminales se conectan entre sí por medio de un voltímetro. Al devanado de alta tensión se le aplica un voltaje de c.a. conveniente. Si el voltaje que marca el voltímetro es menor al voltaje aplicado se dice que la *polaridad es sustractiva*, esto indica que las dos terminales que se conectaron entre sí tienen la misma polaridad. Si la lectura del voltímetro es mayor al voltaje aplicado se dice que la *polaridad es aditiva*, por lo que las terminales que se conectaron entre sí tienen polaridades diferentes.



La importancia de identificar la polaridad se puede observar cuando se conectan bancos trifásicos.

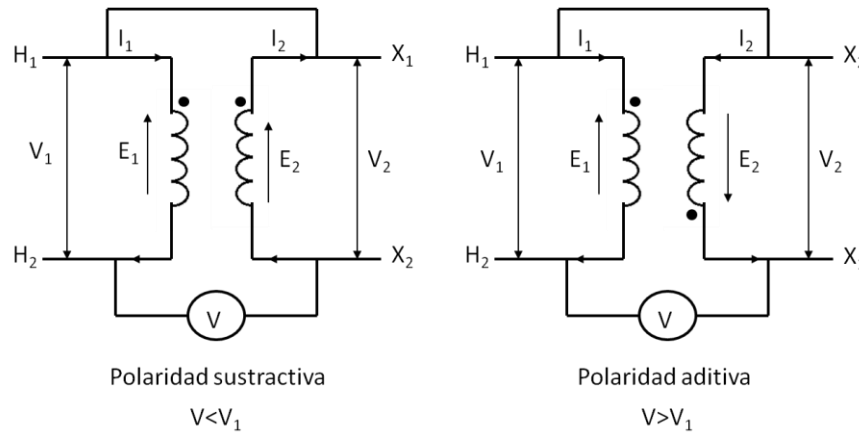


Figura 1.4.8. Prueba de polaridad.

1.4.7 TAPS

Por lo general, los transformadores de distribución tienen una serie de tomas (taps) en los devanados que permiten pequeños cambios en su relación de vueltas. Una instalación típica tiene cuatro tomas, además del valor nominal con intervalos de 2.5% del voltaje a plena carga. Tal distribución permite ajustes de hasta $\pm 5\%$ del voltaje nominal del transformador.

Esto permite ajustar el transformador a las variaciones de voltaje locales como las caídas de voltaje que reducen el voltaje de línea a línea a medida que la aumenta la distancia a la subestación; sin embargo, estos ajustes se deben de realizar antes de poner el transformador en servicio. Además deben respetarse las especificaciones del transformador. Un abuso común es el de sacar corrientes por encima de las nominales lo que provoca un sobrecalentamiento en el equipo lo que provoca un deterioro en el aislamiento y fallas en el equipo. También deben rebajarse el KVA permisible cuando se utilicen derivaciones. (Norma ANSI C57.12.00-1973).

1.4.8 El autotransformador.

Un autotransformador se define como un transformador de un solo devanado. El circuito de un autotransformador puede desarrollarse a partir de un transformador de dos devanados; si se conectan en serie ambos devanados de manera que las polaridades sean aditivas (figura 1.4.9), de modo que el devanado primario sea la suma de ambos devanados y el devanado secundario sea solo un devanado.

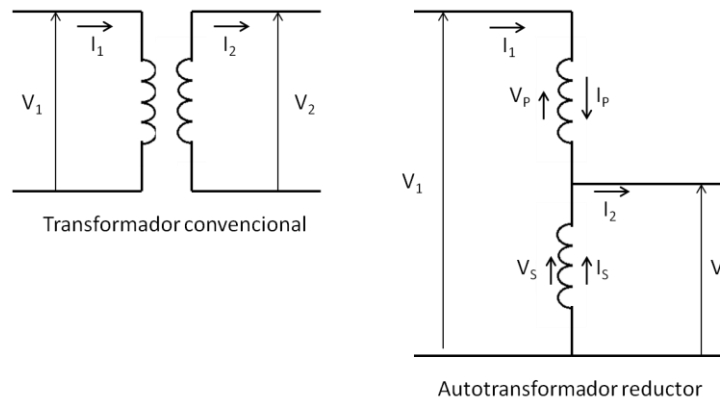


Figura 1.4.9.

Esta configuración es para un autotransformador reductor. Su relación de voltajes es mayor a la del transformador original y está dada por:

$$a_L = \frac{V_P + V_S}{V_S} = a + 1$$

Dónde:

a : Relación de voltajes del transformador original.

V_1 : Voltaje en el devanado primario del transformador convencional.

V_2 : Voltaje en el devanado secundario del transformador convencional.

Para un autotransformador elevador (figura 1.4.10) la relación de voltajes es:

$$a_L = \frac{V_P}{V_S + V_P} = \frac{a}{1 + a}$$

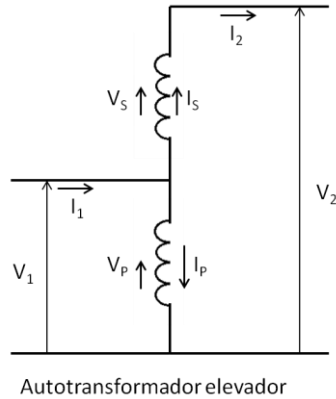


Figura 1.4.10.

Por lo regular no es posible conectar un transformador convencional como autotransformador y usarlo como tal, esto debido a que el aislamiento de un transformador convencional en el lado de bajo voltaje no es lo suficientemente fuerte para soportar todo el voltaje de salida de la conexión como autotransformador. En un autotransformador que se construyen como tal, el aislamiento en ambas bobinas es lo suficientemente fuerte como para soportar los voltajes con los que trabaja.

Además de proporcionar una relación de transformación mayor, un autotransformador puede proporcionar más volt-amperes (potencia aparente) que el valor nominal del transformador si se le conecta como transformador convencional. Esto es debido a que la transferencia de potencia no solo se da por inducción, como en un transformador normal, sino también por conducción. Sin embargo, esta ventaja se logra a expensas del aislamiento eléctrico entre el circuito primario y el circuito secundario por lo que no puede emplearse donde se requiera tal característica.

En los sistemas de potencia suelen utilizarse para la regulación de voltaje, ya que a igual potencia manejada, los autotransformadores son más económicos que los transformadores normales. Otra aplicación se encuentra en el variac (c.a. variable), de uso frecuente en laboratorios para regular el voltaje que se aplica en las pruebas de los equipos eléctricos.



1.4.9 Transformadores Trifásicos.

En la actualidad, la mayor parte de los sistemas de generación y distribución de energía eléctrica son trifásicos de c.a. Los transformadores para los sistemas trifásicos pueden ser un solo transformador con tres grupos de devanados enrollados sobre un núcleo común o puede ser tres transformadores monofásicos conectados en un banco trifásico. Actualmente se prefiere construir un transformador trifásico ya que resulta más económico.

Conexiones de transformadores trifásicos.

Conexión delta-delta ($\Delta - \Delta$).

En la conexión $\Delta - \Delta$ los voltajes de línea son idénticos a los voltajes del transformador tanto en el lado primario como en el secundario y poseen los mismos ángulos de fase. Por lo que la relación de voltajes es:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a$$

Sin embargo, con cargas balanceadas, las corrientes de línea son mayores que las corrientes del transformador por un factor de $\sqrt{3}$ y difieren en un ángulo de fase de 30° .

La conexión delta-delta es satisfactoria para cargas balanceadas y desbalanceadas. Sin embargo, tiene la desventaja de no contar con una manera inherente de proveer una tierra neutral.

Este transformador no tiene desplazamiento de fase asociado y no tiene problemas con cargas desequilibradas o armónicas.

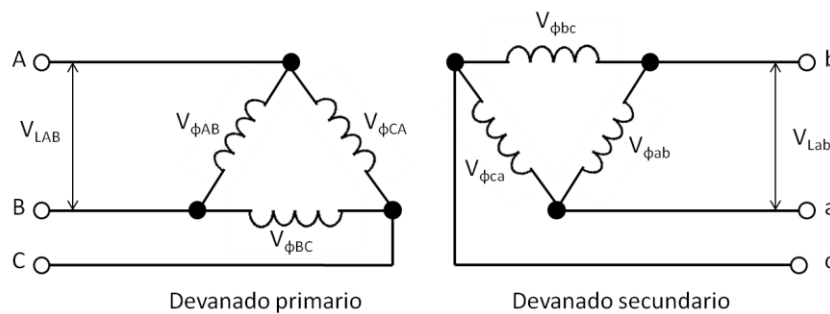
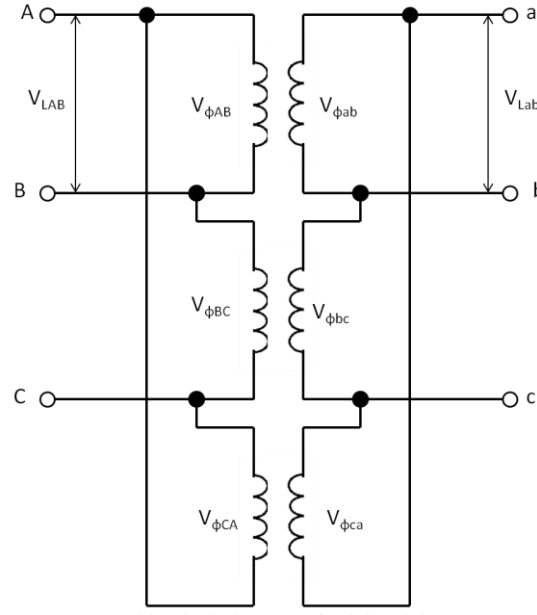


Diagrama de conexión delta-delta

Figura 1.4.11.



Cableado de la conexión delta-delta.

Figura 1.4.12.

Conexión delta abierta (V-V)

Si se daña una fase de un banco de transformadores $\Delta - \Delta$ y debe retirarse para su reparación el banco de transformadores puede seguir trabajando; esta nueva conexión se conoce como delta abierta (V-V). El sistema continúa suministrando potencia trifásica sin cambio alguno en el voltaje. A menudo a la tercera fase se le conoce como *fase fantasma*.

La conexión delta abierta permite que un banco de transformadores siga funcionando con sólo dos de sus transformadores. Los volt-amperes (VA) que suministra cada transformador en un sistema V-V es 11 57.7% de los VA originales.

La conexión delta delta-abierta se puede emplear para prestar servicio en una nueva área de desarrollo urbano con la esperanza de añadir un tercer transformador en un futuro para acomodar el crecimiento en la demanda de potencia; también se utiliza en áreas rurales y suburbanas para suministrar el acostumbrado servicio residencial monofásico y también trifásico para aplicaciones tales como en bombas de agua y acondicionadores de aire.

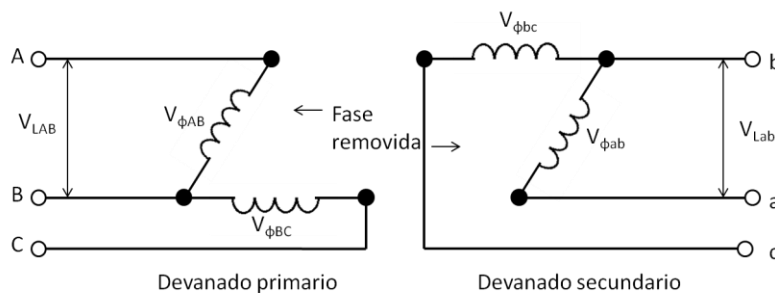


Diagrama de conexión delta abierta

Figura 1.4.13.



Conexión Y-Y

La conexión Y-Y se muestra en la figura 1.4.14. El voltaje de línea $\sqrt{3}$ el voltaje de fase y ambos están desplazados 30° entre sí. La relación de transformación es la misma que para un transformador monofásico. Esta conexión presenta dos graves problemas:

1. Si se presenta un desequilibrio en las cargas del sistema, esto causara un desplazamiento en el neutro eléctrico y los voltajes de fase del transformador pueden llegar a desequilibrarse severamente.
2. Los voltajes de terceras armónicas pueden ser grandes.

Para resolver estos graves problemas se pueden utilizar las siguientes técnicas.

1. Conectar sólidamente a tierra los neutros de los transformadores. Esto suministra un camino de regreso para cualquier desequilibrio de las corrientes en las cargas del sistema.
2. Añadir un tercer devanado conectado en delta al banco de transformadores. Esto permite una trayectoria para la corriente de tercera armónica.

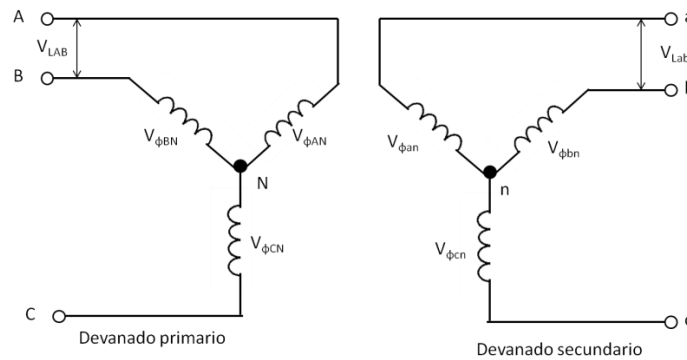


Diagrama de conexión estrella-estrella.

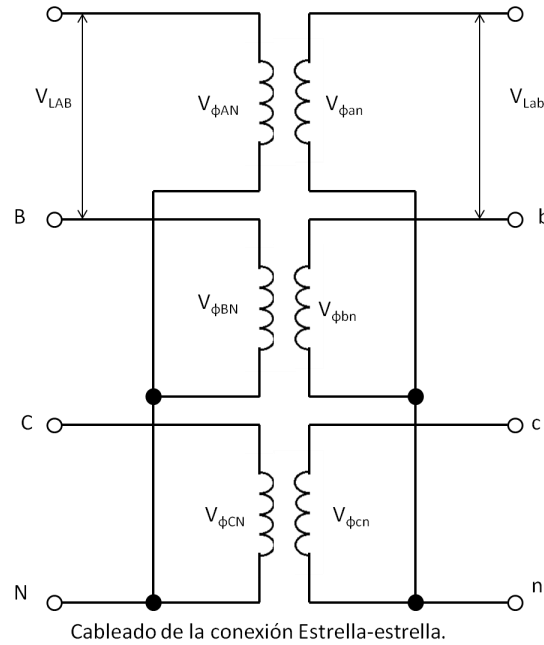


Figura 1.4.14.

Conexión delta-estrella ($\Delta - Y$)

En una conexión $\Delta - Y$, el voltaje de línea primario es igual al voltaje de fase primario $V_{LP} = V_{\phi P}$, mientras que los voltajes secundarios están relacionados por $V_{LS} = \sqrt{3}V_{\phi S}$. Por lo tanto, la relación de voltaje de línea a línea en esta conexión es

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}}$$

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

En esta conexión el voltaje secundario está en retraso con respecto al voltaje primario en 30° . Debido a esto, no es posible poner paralelo un banco $\Delta - Y$ con un banco de transformadores $\Delta - \Delta$ o bien $Y - Y$. La conexión $\Delta - Y$ permite un neutro a tierra en el lado secundario, proporcionando así un servicio de tres fases a cuatro hilos.

Esta conexión no tiene problemas con armónicas o cargas desbalanceadas debido a la conexión delta en el primario. La $\Delta - Y$ optimiza la elevación de voltaje de línea a línea y comúnmente se utiliza en el extremo del generador de una línea para transformación de mediano a alto voltaje para transmisión. También es útil para transformación de mediano a bajo voltaje, en aplicaciones que requieren potencia tanto trifásica como monofásica.

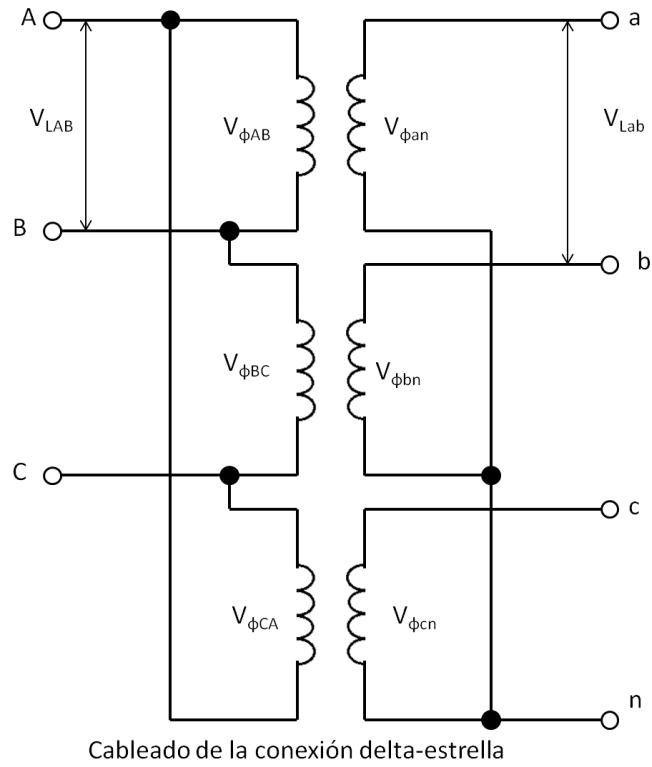
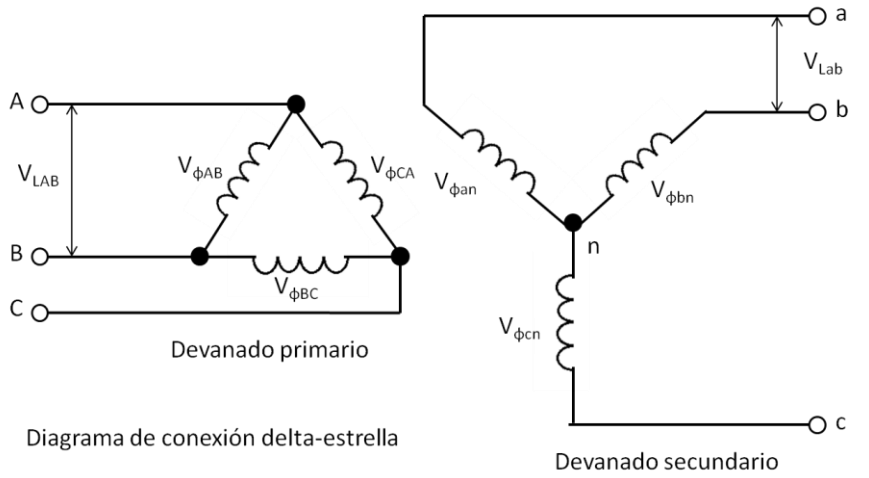


Figura 1.4.15.



Conexión estrella-delta ($Y - \Delta$)

Al igual que en la conexión $\Delta - Y$, hay un desfase de 30° en los voltajes de línea entre el primario y el secundario. Para esta conexión es conveniente conectar a tierra el neutro primario, conectándolo de este modo en 4 hilos.

En esta conexión los voltajes primarios de línea y de fase cumplen la relación $V_{LP} = \sqrt{3}V_{FP}$, mientras que los voltajes secundarios de línea y de fase son iguales $V_{LS} = V_{FS}$. La relación de voltajes de fase es:

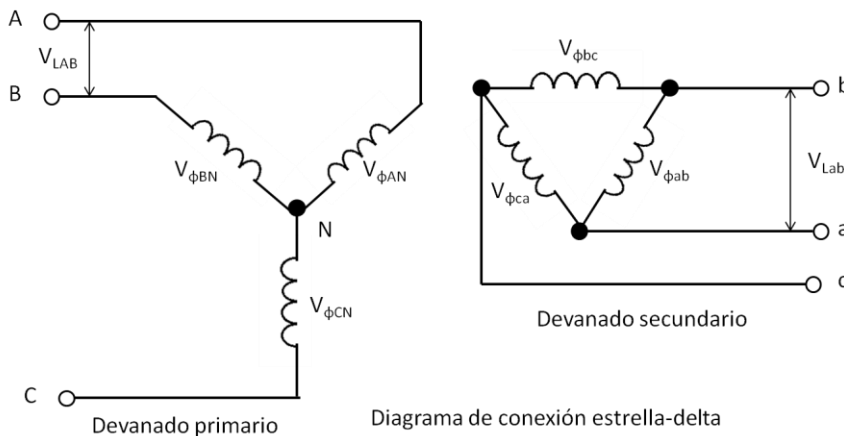
$$\frac{V_{FP}}{V_{FS}} = a$$

Y la relación de voltajes de línea,

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

En esta conexión no existen problemas con los componentes de tercera armónica de tensión, puesto que éstos se consumen en corriente circulante en el lado secundario conectado en delta. Además, la delta redistribuye parcialmente cualquier desequilibrio que se presente lo que permite que esta conexión sea estable cuando se presentan cargas desbalanceadas.

El problema que presenta este arreglo es que el voltaje secundario se desplaza 30° con respecto del voltaje primario del transformador. Esto quiere decir que se desea poner en paralelo un banco de transformadores $Y - \Delta$ con otro banco hay que tener cuidado en la dirección del desplazamiento de fase de 30° en cada banco de transformadores.



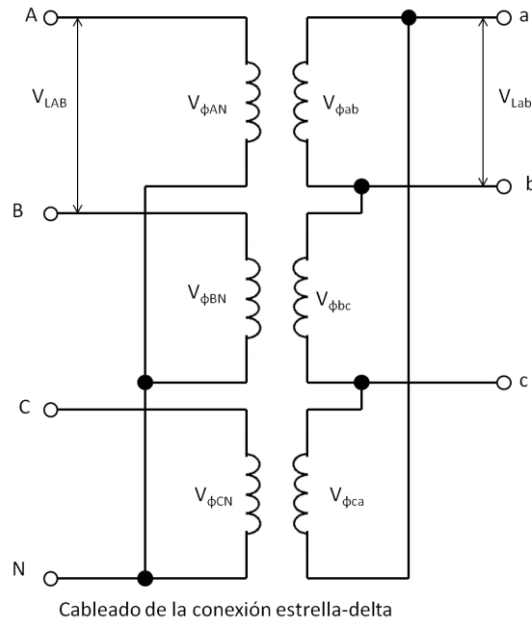


Figura 1.4.16.

Conexión Scott.

La conexión Scott permite obtener dos fases separadas por 90° a partir de un sistema trifásico. Consta de dos transformadores monofásicos con idéntica capacidad. El transformador principal tiene el primario con una salida al centro, o bien dos devanados iguales conectados en serie. El transformador corto tiene una capacidad de voltaje igual al 86.6% del voltaje nominal del transformador principal. La toma de 86.6% del transformador corto se conecta a la toma central del transformador principal como se muestra en la figura 1.4.17.

Esta conexión permite convertir potencia trifásica a potencia bifásica y viceversa.

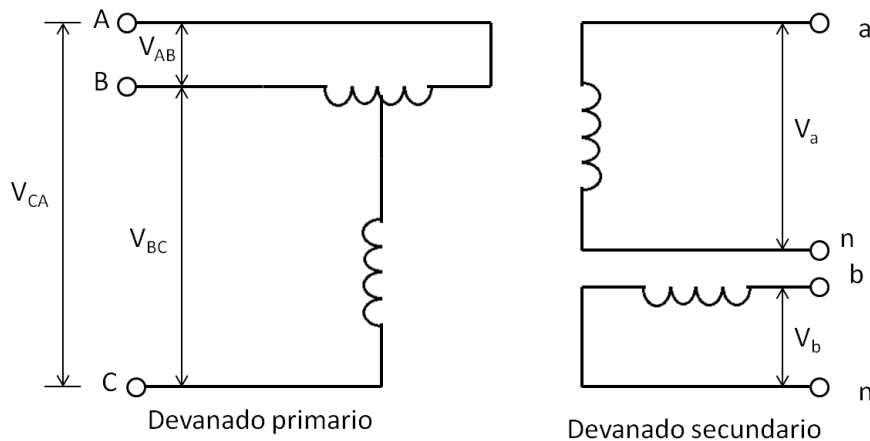


Diagrama de la conexión Scott

Figura 1.4.17.



Conexión T-T.

Al igual que la conexión delta abierta-delta abierta (V-V) La conexión T-T permite convertir potencia trifásica con sólo dos transformadores. Sin embargo, necesita de dos transformadores especiales, distintos entre sí. Estos transformadores son un *transformador corto* que maneja menor tensión en el lado de alta tensión y cuyos voltajes nominales son 86.6% los voltajes nominales del segundo transformador llamado *transformador principal*. El voltaje de entrada trifásico produce dos voltajes desfasados por 90° en el primario y estos producen dos voltajes desfasados en el secundario.

Aunque tienen la ventaja de poder conectar un neutro tanto en el primario como en el secundario, requiere de dos transformadores especiales y de un arreglo especial de conexiones lo que lo hace más costoso. Además, es difícil agregar otro transformador para formar un banco delta-delta, lo cual es más sencillo con una conexión V-V. Por tal motivo, la conexión T-T es poco usada.

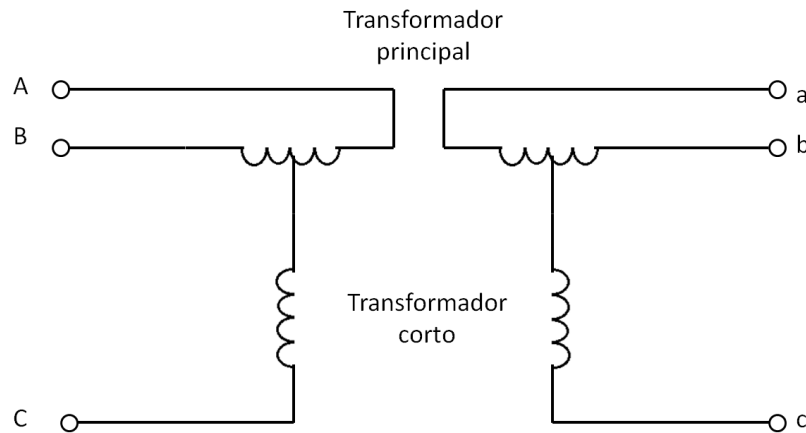


Diagrama de conexión Trifásica T

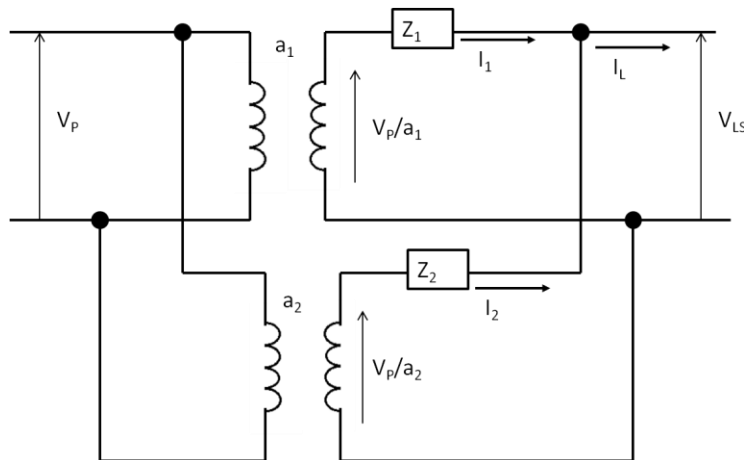
Figura 1.4.18.

1.4.10 Acoplamiento de transformadores en paralelo.

Se dice que dos transformadores están acoplados en paralelo si se hayan conectados eléctricamente borne a borne en el lado primario y en el lado secundario; y están conectados a la misma red y alimentan a la misma carga. Esta conexión se suele ocupar cuando la potencia exigida a un transformador alcanza el límite de la potencia nominal o se requiere ampliar la instalación debido a un aumento en la demanda de potencia y hace el cambio de transformador por uno de mayor potencia no resulta viable.

Para que sea posible la conexión en paralelo de dos transformadores se deben cumplir las siguientes condiciones:

1. El defasamiento en el secundario con respecto al primario han de ser iguales para los transformadores que se van a acoplar en paralelo.
2. El sentido de rotación de las fases secundarias han de ser el mismo.
3. Las relaciones de vueltas deben ser idénticas.
4. Deben tener la misma relación entre las resistencias y reactancias equivalentes.



Transformadores en paralelo

Figura 1.4.19.



CAPITULO II

PRUEBAS DE RUTINA EN FÁBRICA



ANTECEDENTES

En los sistemas eléctricos de potencia los transformadores son de vital importancia, ya que por ellos se hace posible, que la energía eléctrica sea transmitida a grandes distancias, lo que resulta relativamente económico. Una falla de un transformador repercute directamente en la eficiencia del sistema, debido a esta situación es necesaria y de suma importancia las pruebas antes de su puesta en marcha.

En fábrica se llevan a cabo diversas pruebas a los transformadores con el fin de garantizar su operación y eficiencia, así como corregir defectos de fabricación y operación en campo. Estas pruebas proporcionan datos sobre los parámetros eléctricos y mecánicos, los cuales deben de ser cumplidos de acuerdo a las normas vigentes, son punto de partida para el estudio de su comportamiento durante su operación.

En este capítulo II así como en el capítulo III hablaremos de algunas pruebas que se llevan a cabo en fábrica a los transformadores para garantizar el buen funcionamiento de estos y para evitar cualquier falla en campo que pueda afectar al suministro de energía eléctrica del sistema.

Es necesario mencionar que las pruebas que se realizan en fábrica también se pueden y se realizan en campo a transformadores que han estado en servicio, esto para realizar el mantenimiento preventivo y saber las condiciones en las cuales se encuentra para seguir en operación o realizar un correctivo en caso necesario.

En la tabla 2.1 se puede observar las pruebas que se realizan en fábrica a transformadores de potencia así como a transformadores de distribución según la norma NMX-J-284-ANCE-2006.



Pruebas	Transformadores de potencia					
	Clase I*			Clase II*		
	P	R	O	P	R	O
1.- Características físicas de los componentes	X			X		
2.- Elevación de temperatura promedio de los devanados.	X			X		
3.- Tensión de aguante al impulso por rayo normalizado.	X				X	
4.- Tensión de aguante al impulso por maniobra para 230 KV y mayores.				X		
5.- características físicas del transformador totalmente ensamblado.		X			X	
6.- Resistencia de aislamiento en los devanados		X			X	
7.- Rigidez dieléctrica del aceite aislante.		X			X	
8.- Relación de transformación.		X			X	
9.- Resistencia óhmica de los devanados.		X			X	
10.- Polaridad y secuencia de fases.		X			X	
11.- Perdidas en vacío al 100% y 110% de la tensión nominal.		X			X	
12.- Corriente de excitación al 100% y 110% de la tensión nominal.		X			X	
13.- Corriente de excitación a baja tensión. (2.5 KV 0 10KV)			X		X	
14.- Tensión de impedancia.		X			X	
15.- Perdidas debidas a la carga		X			X	
16.- Tensión aplicada.		X			X	
17.- Tensión inducida.		X			X	
18.- Hermeticidad.		X			X	
19.- Presión negativa (vacío).			X			X
20.- Prueba a circuitos de control, medición y fuerza.		X			X	
21.- Cromatografía de gases.			X		X	
22.- Factor de potencia en los aislamientos.		X			X	
23.- Resistencia de aislamiento del núcleo a tierra.			X		X	
24.- Nivel de ruido audible.			X	X		
25.- Porcentaje de humedad residual.			X		X	
26.- Medición de descargas parciales.			X		X	
27.- Cortocircuito.			X			X
28.- Tensión aplicada contra el núcleo, 2KV, 60 Hz, 1 min.			X		X	
29.- Perdidas, corriente de excitación e impedancia a tensión, carga o frecuencia distinta a las nominales.			X			X
30.- Elevación de temperatura promedio de los devanados a capacidades distintas a las nominales.			X			X
31.- Prueba hidrostática.			X			X
32.- Impedancia de secuencia cero.			X			X
33.- Respuesta a la frecuencia.						X
34.- Factor de potencia y capacitancia a boquillas capacitivas.		X			X	
NOTA: las letras de las columnas significan:						
P= Prototipo. R= Rutina O= Opcional.						

Tabla 2.1 pruebas aplicables a transformadores de potencia.



2.1 PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

La resistencia de aislamiento se puede definir como la oposición del aislamiento al paso de una corriente eléctrica al aplicar un voltaje constante de corriente directa. La resistencia de aislamiento está en función del tiempo y la magnitud del voltaje aplicado y se mide en megaohms ($M\Omega$). La resistencia de aislamiento varía directamente con el espesor del aislamiento e inversamente al área del mismo.

La prueba de resistencia de aislamiento a transformadores se lleva a cabo en fábrica y campo, sirve básicamente para determinar las condiciones en las que se encuentran los aislamientos, la cantidad de humedad e impurezas que contienen, evaluación de las condiciones de aceite y detección de daños en los elementos aislantes, además permite obtener información rápida y confiable de las condiciones del aislamiento total del transformador bajo medición. Esta prueba se realiza con un medidor de resistencia de aislamiento ó mega óhmetro comúnmente pero de forma errónea llamado “MEGGER”.

Al aplicar un voltaje de corriente directa a un aislamiento, se genera una corriente que se denomina corriente de aislamiento. Esta corriente está integrada por dos componentes principales: la componente que fluye en el volumen del aislamiento y la corriente de fuga.

La corriente que fluye en el volumen del aislamiento está formada por tres corrientes: corriente capacitiva, corriente de absorción dieléctrica y corriente de conducción irreversible.

La corriente capacitiva tiene un valor inicial alto y decrece a medida que se carga la capacitancia del aislamiento y alcanza un valor despreciable en un tiempo máximo de 15 segundos. Debido a esto, la resistencia inicial del aislamiento tiene un valor bajo, y aumenta gradualmente con el tiempo, hasta estabilizarse.

La corriente de absorción dieléctrica decrece gradualmente en minutos, desde un valor relativamente alto a un valor cercano a cero y varía exponencialmente. Generalmente, los valores de resistencia obtenidos en los primeros minutos de una prueba, están determinados por ésta corriente de absorción dieléctrica.

La corriente de conducción irreversible fluye a través del aislamiento, es prácticamente constante y predomina cuando la corriente de absorción dieléctrica es despreciable.

La corriente de fuga es pequeña y fluye sobre la superficie del aislamiento. Esta corriente, al igual que la corriente de conducción, permanece constante y ambas permiten analizar las condiciones del aislamiento. Su valor se afecta debido a las condiciones superficiales de contaminación y humedad del aislamiento.

En la figura 2.1.1 se ilustra el circuito equivalente generado a partir de la medición de prueba de resistencia de aislamiento.

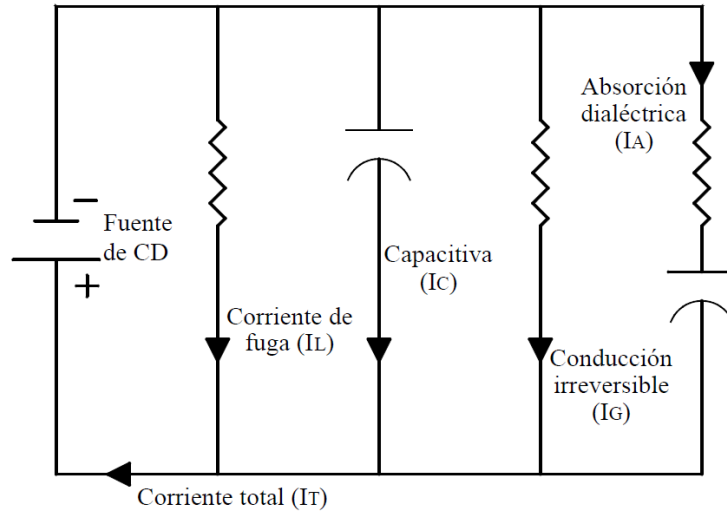


Figura 2.1.1 circuito equivalente generado de la prueba de resistencia de aislamiento.

PROCEDIMIENTO PARA LAS MEDICIONES

El tiempo de duración para cada medición es de diez minutos. Se toman las lecturas a los 15, 30, 45 y 60 segundos de iniciada la prueba, después se toman lecturas a cada minuto, es decir, a los 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 minutos de iniciada la prueba. En la medición, se debe aplicar el máximo voltaje de prueba del medidor de resistencia de aislamiento, tomando en consideración el voltaje nominal del devanado del transformador bajo medición. Se toman las lecturas de temperatura del aceite y del ambiente y de humedad relativa.

DIAGRAMAS DE CONEXIÓN PARA REALIZAR LA PRUEBA

En transformadores monofásicos



Figura 2.1.2 diagrama de conexiones para prueba de resistencia de aislamiento entre las terminales de alta y baja tensión



Figura 2.1.3 diagrama de conexiones para prueba de resistencia de aislamiento entre la terminal de alta tensión y tierra.

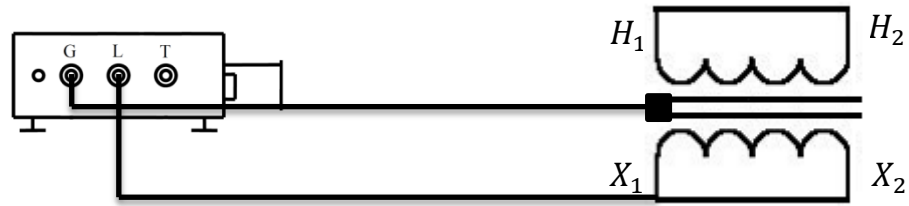


Figura 2.1.4 diagrama de conexiones para prueba de resistencia de aislamiento entre la terminal de baja tensión y tierra.

Para transformadores trifásicos

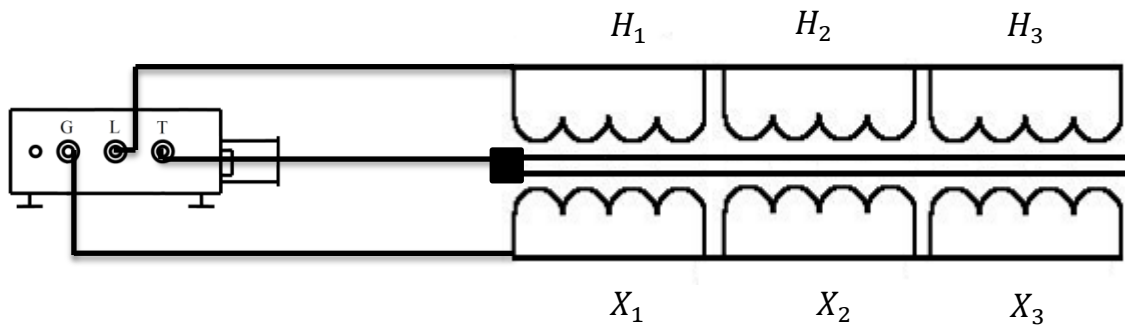


Figura 2.1.5 diagrama de conexiones para prueba de resistencia de aislamiento entre las terminales alta y baja tensión.

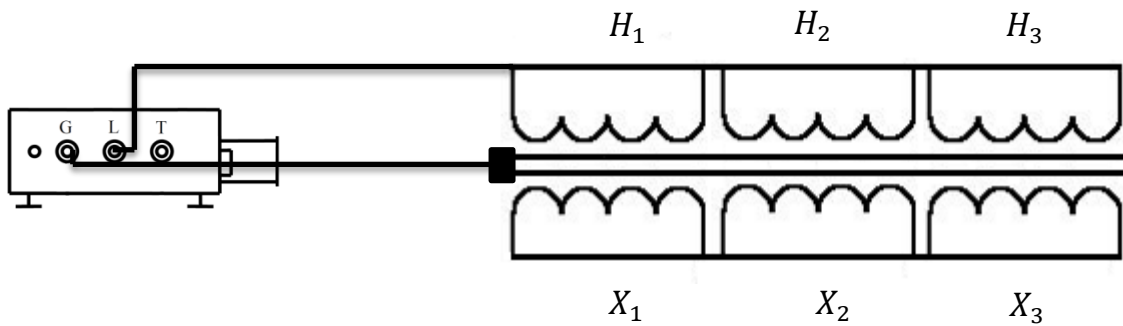


Figura 2.1.6 diagrama de conexiones para prueba de resistencia de aislamiento entre las terminales de alta tensión y tierra.

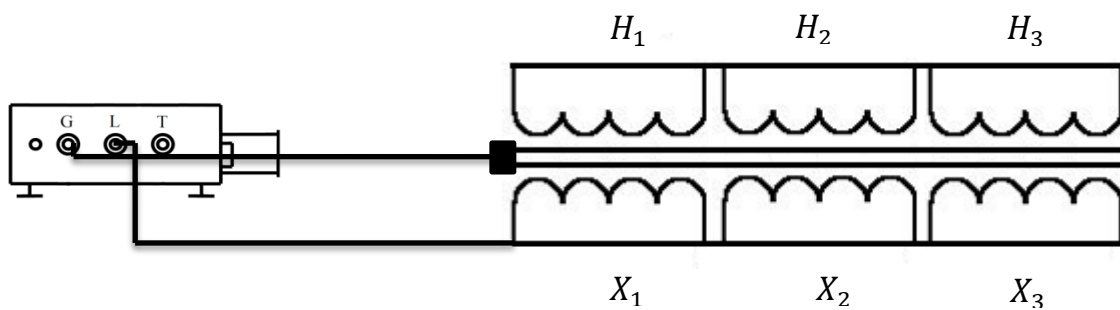


Figura 2.1.7 diagrama de conexiones para prueba de resistencia de aislamiento entre las terminales de baja tensión y tierra.



2.2 PRUEBA DE RESISTENCIA DE OHMICA.

La resistencia eléctrica es la oposición al paso de la corriente en un circuito eléctrico cerrado. También se define como la propiedad de un objeto o sustancia para transformar energía eléctrica en calor u otro tipo de energía radiante.

Esta prueba permite detectar falsos contactos entre conductores y terminales, espiras cortocircuitadas o alta resistencia de contacto en cambiadores de derivación. Por lo general, estas condiciones producen puntos calientes en el devanado y pueden generar gases.

Es necesario conocer el valor de la resistencia óhmica de cada uno de los devanados del transformador para poder determinar las pérdidas por efecto joule (RI^2) así como la elevación de temperatura en el cobre

Esta prueba es aplicable a transformadores de potencia, de distribución, de instrumentos, autotransformadores, reguladores de voltaje, reactores y contactos de interruptores; así como de cuchillas. En lo específico se realiza para la comprobación del cálculo de pérdidas totales de un transformador.

Los métodos empleados para realizar la prueba de resistencia óhmica son: el método del puente de wheatstone, el método de puente de kelvin y el método de caída de potencial, siendo el método de los puentes el más usado por su simplicidad y exactitud, además de operar con corrientes pequeñas que evitan calentamiento en los devanados y reducen errores en las mediciones.

El método de caída de potencial se utiliza cuando la corriente nominal del devanado a probar es mayor a un ampere, dicha prueba se lleva a cabo haciendo circular una corriente directa por el devanado que no sobrepase el 15% de la corriente nominal con el objetivo de evitar calentamientos en los devanados y por consiguiente errores de medición, además no deben registrarse las mediciones hasta después que se haya alcanzado estabilidad en la medición. Para transformadores trifásicos con conexión en estrella, la resistencia en el devanado se mide de fase a neutro y para obtener mediciones precisas en transformadores trifásicos con conexión delta, se deben realizar 3 mediciones de fase a fase por cada devanado. Ya que la resistencia medida en cada fase está compuesta por la combinación en paralelo del devanado bajo medición y la combinación en serie de los devanados restantes.

El equipo empleado para esta prueba son el puente de Wheatstone y el puente de Kelvin, ambos equipos son para medición de resistencia en las figuras 2.2.1 y 2.2.2 se muestra el diagrama interno de cada uno de ellos.

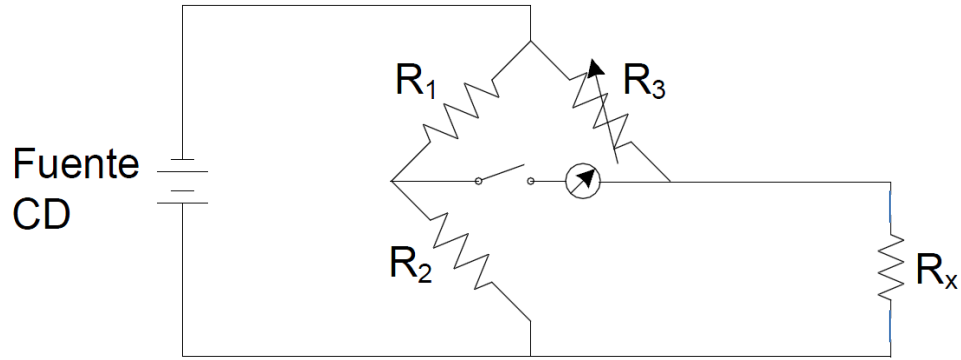


Figura 2.2.1 diagrama de puente de Wheatstone

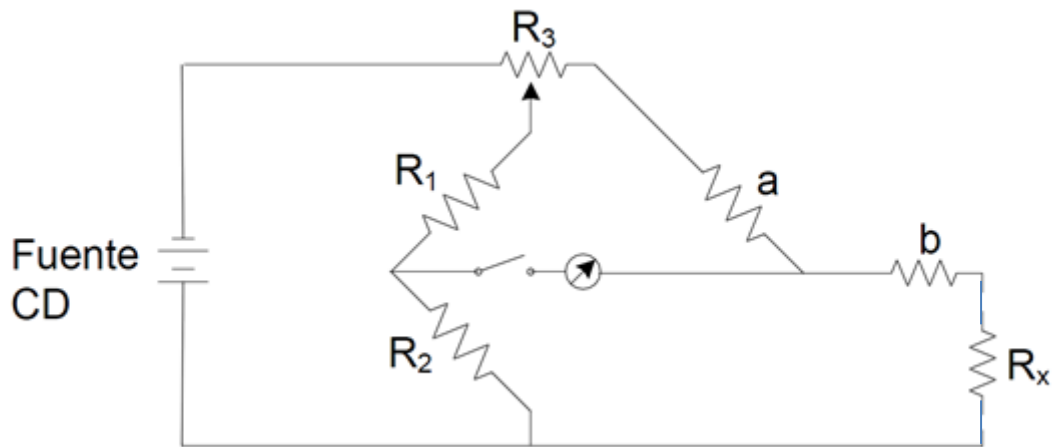


Figura 2.2.2 diagrama de puente de kelvin

Los resultados de las mediciones de esta prueba deben ser muy similares entre las 3 fases de cada uno de los devanados. Cuando existan discrepancias, esto es indicativo de un falso contacto interno de la fase que presente mayor valor, lo cual provoca calentamiento en el equipo y a la larga un daño muy severo que obligara a retirar el equipo del servicio para su reparación en taller especializado.



CIRCUITOS DE CONEXIÓN

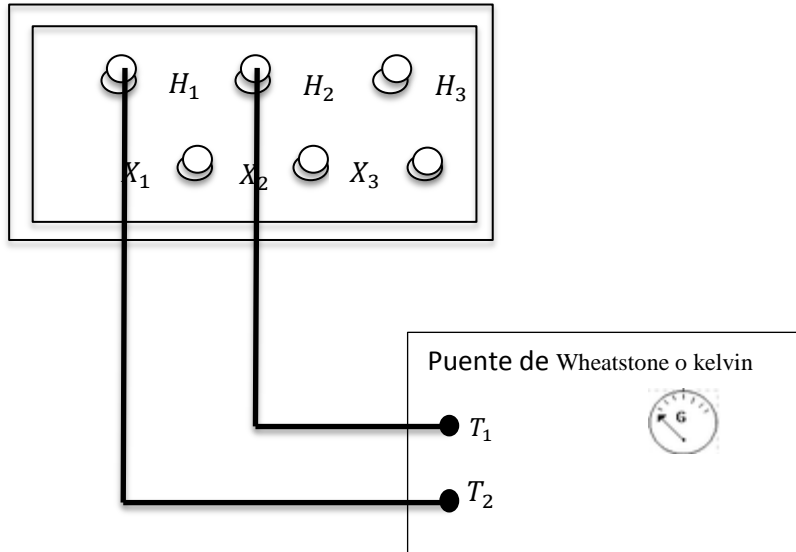


Figura 2.2.3 diagrama de puente de kelvin

2.3 PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA EN LOS AISLAMIENTOS.

El factor de potencia es la relación de las pérdidas del dieléctrico (watts, mili watt), entre la carga que demanda el aislamiento bajo prueba (mili-amperes, mili volt-amperes), manejado en por ciento para facilidad de referencia. El valor obtenido de esta relación para un aislamiento en particular depende de las condiciones de humedad, ionización y temperatura. Este factor se incrementa debido a las siguientes condiciones:

Envejecimiento, contaminación, fallas, esfuerzos eléctricos, degradación, etc.

Una de las aplicaciones de esta prueba es conocer el estado de los aislamientos, basándonos en la comparación de un dieléctrico con un condensador, en donde el conductor energizado se puede considerar una placa y la carcasa o tierra del equipo como la otra placa del capacitor. El circuito equivalente de un aislamiento bajo prueba se representa en la figura 2.3.1

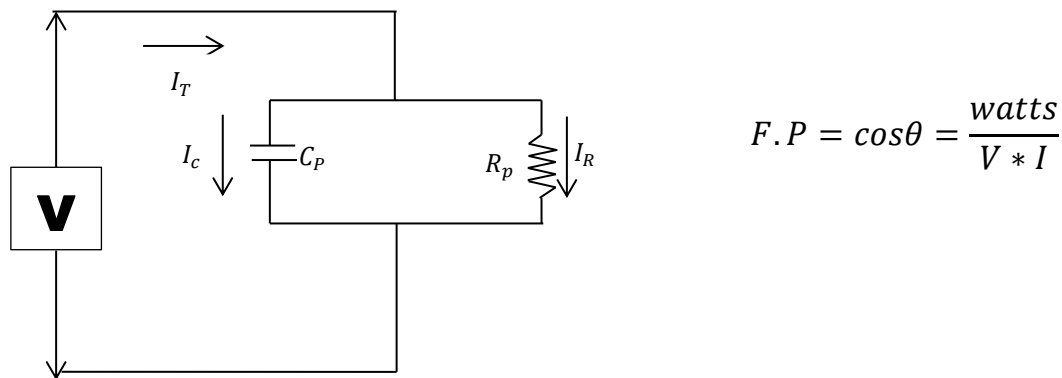


Figura 2.3.1 circuito equivalente de un aislamiento bajo prueba.

El factor de potencia en un aislamiento se define como el coseno del ángulo entre el vector del voltaje aplicado y vector de la corriente total que circula por el aislamiento bajo prueba. Debido a la situación de no ser aislantes perfectos, además de una corriente de carga puramente capacitiva, siempre los atravesara una corriente que está en fase con la tensión aplicada (I_r), a esta corriente se le denomina de pérdidas dieléctricas, en estas condiciones el comportamiento de los dieléctricos se muestra en el siguiente diagrama vectorial.

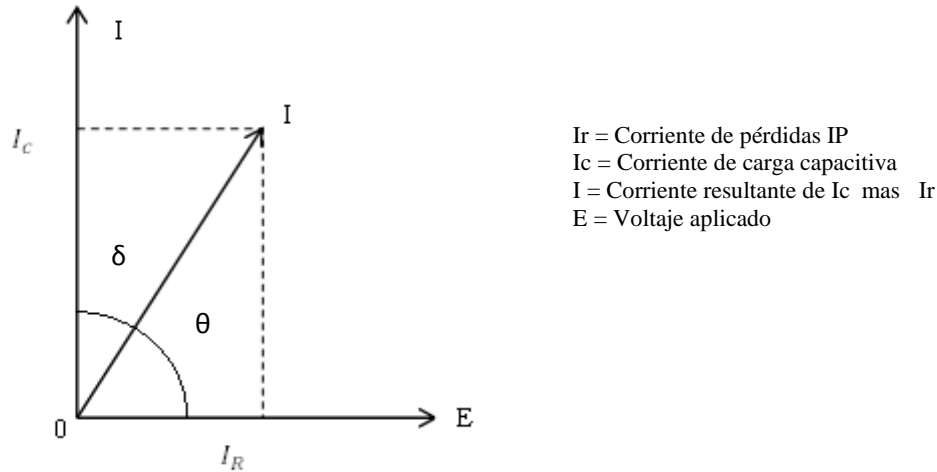


Figura 2.3.2 diagrama vectorial del comportamiento de un aislamiento al aplicarle una tensión.

El equipo de prueba de aislamiento F.P. mide la corriente de carga y Watts de pérdida, en donde el factor de potencia, capacitancia y resistencia de corriente alterna pueden ser fácilmente calculados para una tensión de prueba dado.

La prueba consiste en aplicar un potencial determinado al aislamiento que se desea probar, medir la potencia real que se disipa a través de él y medir la potencia aparente del mismo. El Factor de Potencia se calcula dividiendo la potencia real entre la potencia aparente.

Con el equipo de prueba de factor de potencia existen 3 métodos de medición.

a) espécimen aterrizado.- se prueba en gst (ground specimen test o espécimen bajo prueba aterrizado). Cuando el selector de (lv) se coloca en posición ground, el cable (lv) es conectado a potencial de tierra. De esta forma el cable de baja tensión (lv) puede ser utilizado para aterrizar el espécimen bajo prueba. Es también posible aterrizar el espécimen, utilizando la terminal de tierra del cable de alta tensión (hv). Otra forma es aterrizar directamente a tierra.

b) espécimen guardado.- se prueba en gst-guard. Cuando el selector del lv se coloca en posición guard, el cable lv es conectado a guarda del equipo de prueba. La conexión a guarda también puede ser posible si se utiliza la terminal de guarda del cable hv.

c) espécimen no aterrizado.- se prueba en ust (ungrounded specimen test). Cuando el control de lv se coloca en posición ust, solamente la medición de mva y mw se efectúa a través del cable lv. Se puede observar como el punto de conexión de guarda y tierra son comunes, de este modo la medición de MVA Y MW no es realizada a través de tierra.

El panel del equipo de prueba de factor de potencia de 10 KV se muestra en la figura 2.3.3

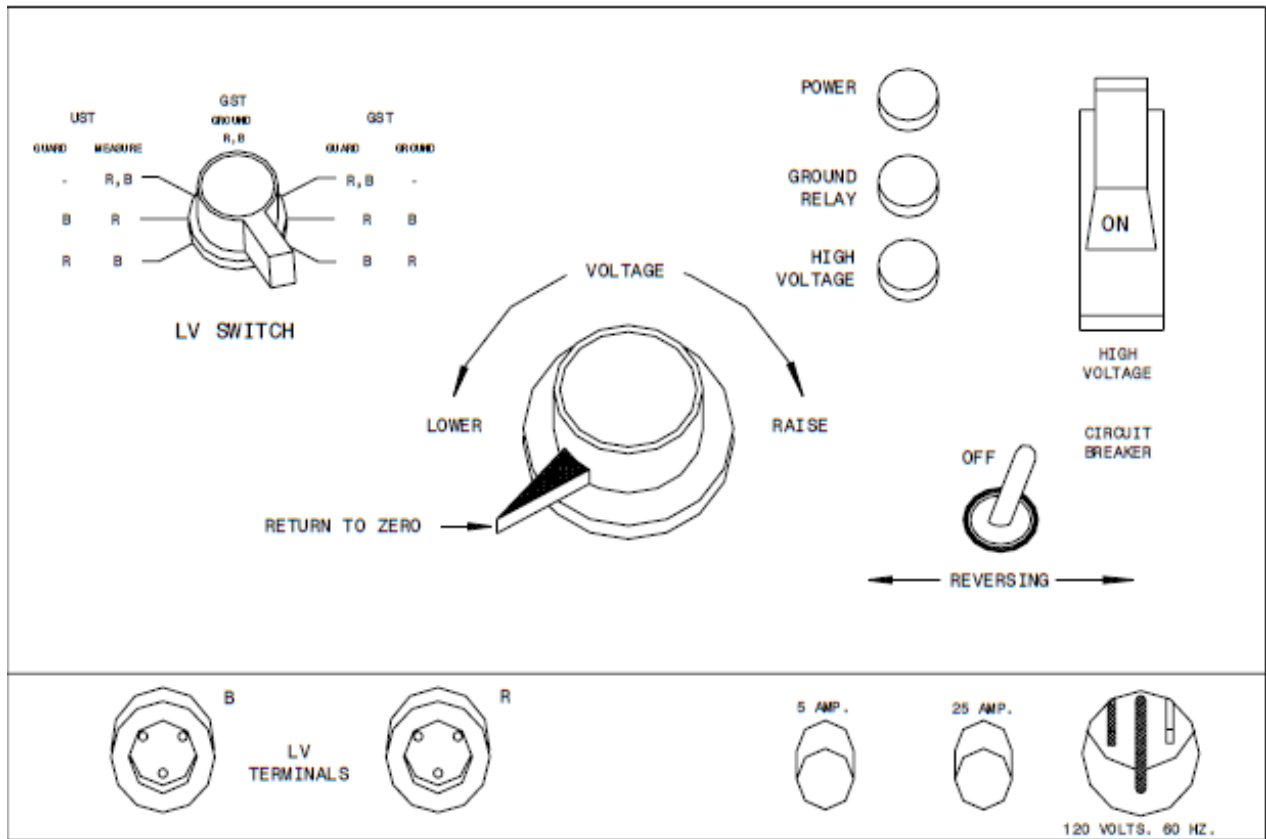


Figura 2.3.4 panel del equipo de prueba de factor de potencia de 10 KV.



2.4 PRUEBA DE CORRIENTE DE EXCITACIÓN.

Los transformadores están expuestos a fallas en sus devanados y núcleo, originados por los esfuerzos eléctricos y mecánicos causados por corto circuito o daños ocasionados por golpes durante su transportación. Estos esfuerzos provocan corto circuito entre espiras, sobrecalentamientos y desplazamiento de devanados y en núcleos. Los métodos utilizados para detectar estos daños normalmente son pruebas e inspecciones visuales.

El método de medición de la corriente de excitación consiste básicamente en medir la corriente que toma un devanado al ser energizado con una tensión de 10kV a 60 Hz. Esta corriente se compara con el registro histórico del equipo bajo prueba o con el resultado de devanados similares. Dicha medición se puede efectuar a otros niveles de tensión, según las condiciones del equipo bajo prueba o características del equipo de medición. Esta medición ayuda a determinar la existencia de corto circuito entre espiras, espiras abiertas, deformaciones del devanado, falsos contactos, problemas en el núcleo, etc.

La corriente de excitación de un transformador se obtiene en el devanado de alta tensión al aplicar un voltaje, manteniendo el transformador en vacío, es decir, con los demás devanados en circuito abierto.

Cuando un devanado tiene una o varias espiras en corto, estas espiras se convierten en un devanado adicional que se encuentra en corto circuito incrementando las pérdidas. Estas pérdidas originan que la corriente de excitación se incremente. También, el exceso de corriente se puede deber a defectos dentro del circuito magnético, como por ejemplo, cuando el núcleo presenta multi-aterrizamientos, estos multi-aterrizamientos, incrementan las pérdidas debido a la existencia de fallas en el aislamiento de los tornillos de sujeción que aterrizan al núcleo con el yugo.

Métodos de medición

Medición directa de la corriente de excitación para devanados monofásicos y trifásicos

En el caso de un transformador monofásico, bastará conectar directamente un amperímetro en uno de los extremos del devanado energizado. Para un transformador trifásico conectado en estrella, la corriente de excitación se logra medir aplicando un voltaje independiente a cada una de las fases y conectando un amperímetro en serie entre el neutro y tierra. En este caso la corriente de excitación medida en la pierna central es menor a la medida en las otras dos fases. Esto se debe a que el flujo retorna por las dos piernas adyacentes, lo que reduce la reluctancia del circuito magnético. En transformadores con devanados conectados en delta, la corriente de excitación medida corresponde a dos fases. Esto debido a que el voltaje de prueba se aplica simultáneamente a dos devanados de diferentes piernas. Por lo tanto, la corriente que se registra en el amperímetro indica tanto la corriente debida a la fase

bajo prueba, como a la aportación de los otros devanados. Generalmente la aportación de un devanado se descarta cuando se aterriza su terminal. Sin embargo, esto crea una corriente en el otro devanado que circula entre tierra y el amperímetro de medición, ver figura 2.4.1

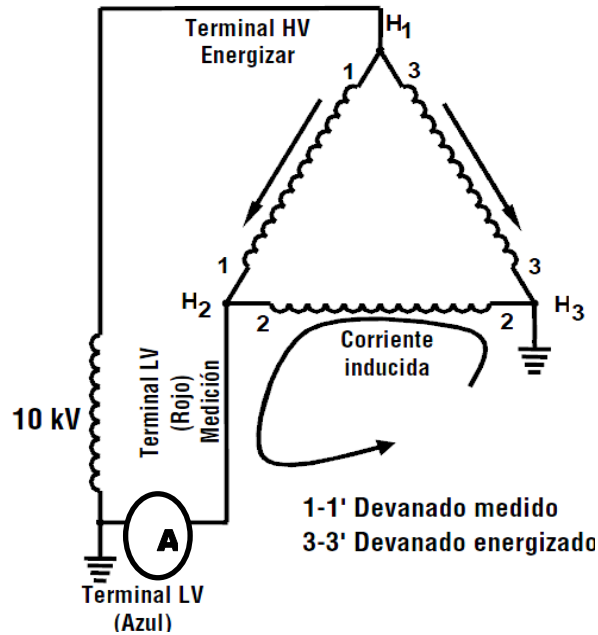


Figura 2.4.1 circuito de medición directa para un transformador conectado en delta.

Medición inversa de la corriente de excitación para devanados monofásicos y trifásicos

En el método inverso se deben invertir las terminales del equipo de prueba y proceder en la misma forma que se describe en el método directo tal como se muestra en a figura 2.4.2. Esta medición se realiza para cancelar los efectos de magnetismo remanente del núcleo o inducciones que pudieran afectar la medición directa

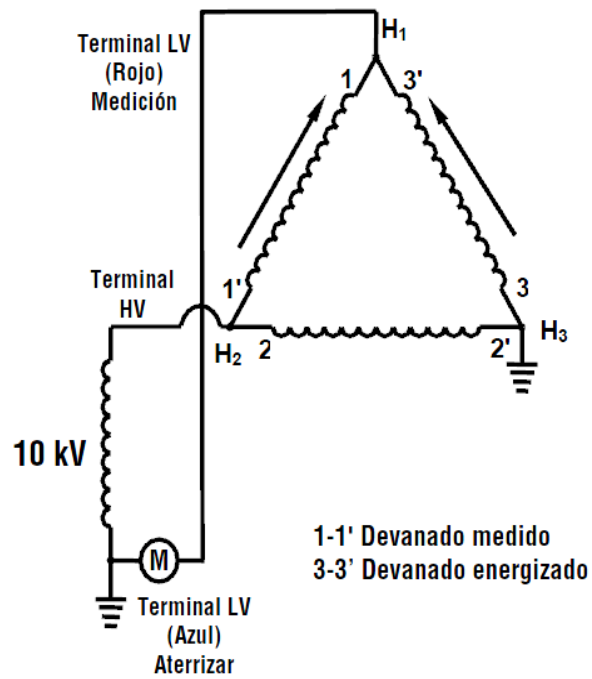


Figura 2.4.2 circuito de medición inversa para un transformador conectado en delta.

La medición de corriente de excitación en campo se realiza utilizando el equipo de factor de potencia de 10 kV o mayor y de acuerdo con el método UST. Se utiliza la terminal HV para aplicar la tensión, la terminal LV para realizar la medición y la terminal LV para aterrizar el otro devanado en la conexión delta.



2.5 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD RESIDUAL EN AISLAMIENTOS SÓLIDOS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

La función principal de los aislamientos sólidos en transformadores, es formar una barrera dieléctrica capaz de soportar la diferencia de potencial a que están sujetas las diferentes partes del equipo. También se emplea para mantener el flujo de corriente principal en una trayectoria predeterminada, con el objeto de evitar trayectorias de corriente no deseadas.

Aproximadamente el 95% de los aislamientos sólidos de los transformadores están compuestos por papel kraft, cartón y madera. Este tipo de aislamientos, desde el punto de vista químico, están compuestos principalmente por cadenas de glucosa.

Los tipos de papel utilizados en transformadores son el Kraft y Crepé con sus variantes. Dependiendo del fabricante, este tipo de materiales se someten a diferentes tratamientos con el fin de reforzar sus características como son su resistencia dieléctrica, la resistencia al desgarro, las temperaturas de utilización, el envejecimiento, entre otros. El papel Kraft tiene muy buenas propiedades mecánicas y una buena permeabilidad al aire, la cual facilita la evacuación del aire atrapado entre las capas de los embobinados. Sin embargo, el papel Kraft es un material higroscópico, conteniendo del 8 al 10 % de su peso en humedad.

El papel crepé, dada su forma, facilita enormemente el encintado de formas irregulares, teniendo también excelentes características mecánicas y una relativa permeabilidad al aire.

Considerando los voltajes de transmisión y transformación, el secado de los transformadores ha tomado una importancia vital para la puesta en servicio y operación de los mismos. El factor más importante en el proceso de secado de transformadores, es la determinación del contenido de humedad residual permisible en los aislamientos, ya que la presencia de agua afecta considerablemente la rigidez dieléctrica, tanto del papel, como del aceite, disminuyendo hasta límites peligrosos e incrementando los esfuerzos dieléctricos a los cuales están sometidos estos materiales y que son originados por las tensiones de operación de los equipos.

El método de secado en fábrica varía según el fabricante del transformador. Todos los métodos tienden a reducir la humedad de un 0.2% a 0.5% por peso de los aislamientos secos en transformadores nuevos. En transformadores en operación el contenido de humedad dependerá del historial, de las condiciones de operación y de la comparación de los resultados con otros transformadores similares.

Para conocer el estado de los aislamientos, se efectúan pruebas dieléctricas como son la medición de resistencia de aislamiento y la medición del factor de potencia, con estas pruebas solo se puede determinar el comportamiento de los aislamientos ante esfuerzos



eléctricos, pero no es posible determinar la degradación térmica, ya que esta está en función del contenido de humedad en los aislamientos.

Debido a lo anterior, es necesario disminuir al mínimo el contenido de humedad en los aislamientos. También es necesario desarrollar nuevos métodos para la determinación exacta de la humedad residual, tanto en el papel, como en el aceite.

Actualmente se usan dos métodos para determinar la humedad residual en los aislamientos sólidos:

1.- Método del abatimiento de vacío

La presión absoluta dentro de un transformador es originada por el movimiento molecular de un gas, en este caso el vapor de agua desprendido por los aislamientos. Con la medición de esta presión y la temperatura de los devanados, se determina el porcentaje (%) de humedad residual contenido en los aislamientos.

2.- Método del punto de rocío del gas

El punto de rocío de un gas es, la temperatura a la cual la humedad presente comienza a condensarse sobre la superficie en contacto con el gas, con base en este valor se logra determinar, sobre un volumen conocido, la cantidad total de agua contenida en dicho volumen, así como su humedad relativa.

El procedimiento general de esta prueba consiste en llenar el transformador con un gas seco, nitrógeno de alta pureza, de tal manera que al cabo de un cierto tiempo, se alcance el estado de equilibrio en humedad, una vez alcanzado el equilibrio, se mide el punto de rocío del gas y con este valor se determina la humedad residual en los aislamientos. La prueba de punto de rocío se realiza antes de iniciar el secado del equipo para tener un valor de referencia y también se realiza al término del secado del transformador.

El contenido de humedad en un aislamiento, se equilibra a un nivel que depende de la presión de vapor y de la temperatura del medio aislante, en la actualidad, los fabricantes están utilizando exclusivamente la temperatura del punto de rocío como base para determinar si el equipo está seco o húmedo.

Los grandes fabricantes de transformadores y reactores de potencia recomiendan que la humedad residual en los aislamientos sólidos sea menor al 0.5%, aunque es preferible un contenido de humedad de 0.2 a 0.3%, el cual es un valor aceptable para la operación del equipo, por otra parte no se recomiendan valores de humedad residual inferiores a 0.1%, ya que este valor de humedad residual, además de ser difícil de alcanzar, afecta las propiedades físicas del papel e incrementa la posible pérdida de vida del aislamiento. En la



tabla 2.5.1 se muestran los valores de humedad residual en porcentaje que deben alcanzar los transformadores después del proceso de secado.

Clase	Humedad residual en %	
	Mínimo	Máximo
KV		
69 a 85	0.5	0.7
115 a 150	0.3	0.5
230 a 400	0.2	0.3

Tabla 2.5.1 valores de referencia de humedad residual



2.6 MEDICIÓN DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN (TTR)

La razón entre el número de vueltas de las bobinas de alta tensión y las de baja tensión de un transformador se conoce como “la relación de vueltas de un transformador” o relación de transformación, los medidores de relación de transformación, más conocidos como TTR, nos dan la lectura de la relación de vueltas y las corrientes de excitación de los devanados de un transformador de potencia, potencial o transformador de corriente.

La prueba de la relación de transformación sirve para confirmar la relación de transformación y polaridad de transformadores nuevos y usados e identificar desviaciones en las lecturas de la relación de vueltas, mediante la aplicación de esta prueba es posible detectar corto circuito entre espiras, falsos contactos, circuitos abiertos, etc.

La relación de transformación se deduce de dividir el número de vueltas del devanado primario entre el número de vueltas del devanado secundario, o el resultado de dividir la tensión en el devanado primario entre la tensión del devanado secundario, ambas tensiones de línea a neutro de las fases, matemáticamente la relación de transformación se puede expresar de la siguiente manera:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Dónde:

a = relación de transformación.

N_1 y N_2 = número de vueltas en el primario y número de vueltas en el secundario.

V_1 y V_2 = tensión en el primario y tensión en el secundario.

I_1 y I_2 = corriente en el primario y corriente en el secundario.

Anteriormente el método más utilizado para llevar a cabo estas pruebas es con el medidor de relación de vueltas, Transformer Turn Ratio (T.T.R.), que opera bajo el principio de que cuando dos transformadores que nominalmente tienen la misma relación de transformación y polaridad, y se excitan en paralelo, con la más pequeña diferencia en la relación de alguno de ellos, se produce una corriente circulante entre ambos relativamente alta. El equipo para medición de relación de transformación está formado básicamente; por un transformador de referencia con relación ajustable desde “0” hasta “130”, una fuente de excitación de corriente alterna, un galvanómetro detector de cero corriente, un voltmetro, un ampermetro y un juego de terminales de prueba, contenidos en una caja metálica o de fibra de plástico.

Para relaciones de transformación mayores de 130, a este equipo se le acoplan transformadores auxiliares.

En la actualidad existen medidores de relación de transformación diseñados a base de microprocesadores que nos permiten realizar la prueba de relación de transformación a transformadores trifásicos o monofásicos en menor tiempo, por su característica digital. Además cuenta con un sistema programado para su auto verificación; con estos equipos se pueden hacer mediciones de relación de 0.08 a 2700.

La medición de relación de transformación debe realizarse en todos los taps y en todas las combinaciones de conexiones posibles. Esto se realiza con la finalidad de verificar el estado de las derivaciones de los devanados. Al terminar las mediciones deberá verificarse la relación de transformación en la posición del tap en que el transformador entrará en operación.

En la figura 2.6.1 se indica la conexión del TTR, para realizar la prueba

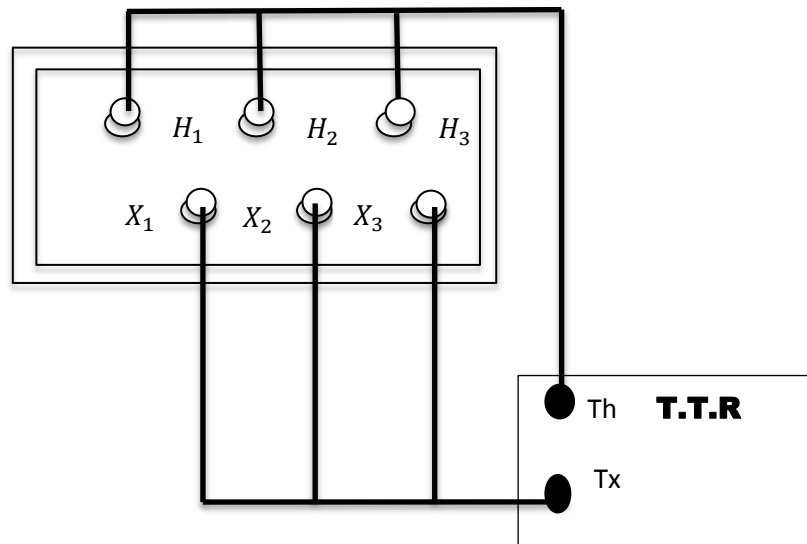


Figura 2.6.1 diagrama de conexión de T.T.R.

Antes de realizar la medición de relación de transformación en un transformador de tres devanados, es necesario interpretar el diagrama vectorial para hacer las conexiones correctamente, es decir, que las dos bobinas que se van a medir se encuentren montadas sobre la misma pierna del núcleo para evitar errores en la medición. Ver figura 2.6.2

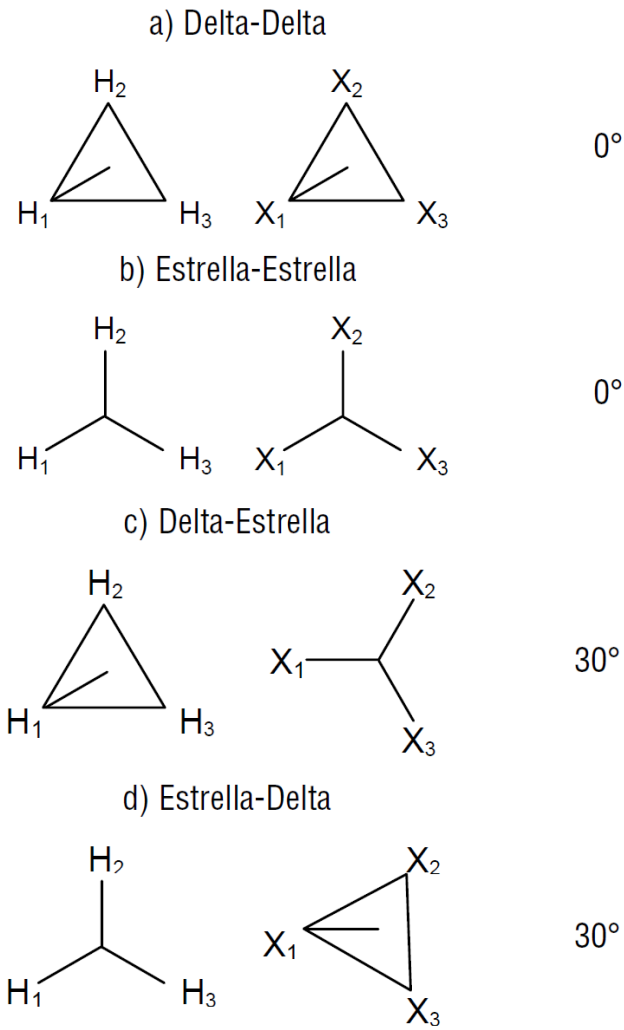


Figura 2.6.2 conexión de transformadores trifásicos y desplazamiento angular.



2.7 MEDICIÓN DE RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE

La determinación de la rigidez dieléctrica del aceite es muy importante, ya que con esta se verifica la capacidad que tiene dicho aceite para soportar esfuerzos dieléctricos sin fallar. El valor de la rigidez dieléctrica está representado por el voltaje al que se presenta la ruptura dieléctrica del aceite entre los electrodos de prueba. Esta prueba permite también detectar la presencia de agentes contaminantes como agua, suciedad o algunas partículas conductoras en el aceite.

En el caso de los transformadores sumergidos en aceite, este tiene doble fin, el primero es servir como medio refrigerante y el segundo es servir como dieléctrico entre todas las piezas sumergidas.

Un aceite que muestra baja rigidez dieléctrica no es apropiado para su uso en un transformador, por lo que es necesario someterlo a un proceso de filtrado para eliminar humedad e impurezas.

La prueba se lleva a cabo con el equipo llamado “probador de aceite”, que básicamente consiste en un transformador elevador, un regulador de tensión, un voltmetro de medida, un interruptor y electrodos dentro de una copa estándar. La copa estándar consiste en un recipiente de baquelita o de vidrio refractado, dentro del cual se encuentran dos electrodos en forma de discos separados a una distancia de 2.54 mm (figura 2.7.1)

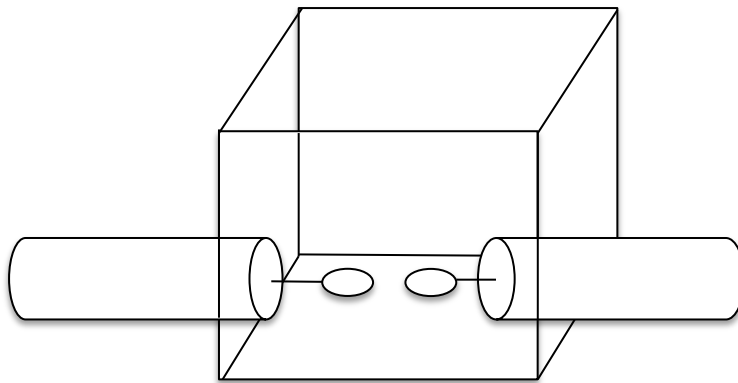


Figura 2.7.1 copa estándar para prueba de rigidez dieléctrica del aceite.



La prueba se lleva a cabo llenando la copa con aceite hasta que los electrodos queden cubiertos completamente y al nivel marcado en la copa, posteriormente se cierra el interruptor y se incrementa gradualmente la tensión con el regulador aproximadamente a una velocidad de 3 KV por segundo, hasta que el aceite contenido en la copa falle, consistiendo esta falla en el arco eléctrico entre los electrodos.

Cuando un aceite rompe su rigidez a menos de 22 KV se debe de proceder a su acondicionamiento por medio de un filtro de prensa y una bomba centrifuga para aceite o una unidad regeneradora de aceite, al pasar por este proceso el aceite debe de incrementar su rigidez dieléctrica, si después de varias veces que se haga dicho procedimiento el aceite no sube su rigidez, este deberá ser remplazado por aceite nuevo.

Tipo de aceite	Ruptura dielectrica
Aceites degradados y contaminados	De 10 a 28 kV
Aceites carbonizados no degradados	De 28 a 33 kV
Aceites Nuevo sin desgasificar	De 33 a 44 kV
Aceite Nuevo desgasificado	De 40 a 50 kV
Aceite regenerado	De 50 a 60 kV



2.8 PRUEBA DE POTENCIAL APLICADO

Esta prueba tiene como fin, comprobar la capacidad de los aislamientos para soportar sobretensiones producidas por disturbios en las redes o debidas a factores externos. Esta capacidad está determinada por la calidad de los aislamientos empleados, calidad del diseño en cuanto a distancias mínimas entre devanados y entre estos y tierra, calidad del proceso empleado tanto en el secado como en la fabricación misma de las bobinas, así como el encube de la parte activa en el tanque respectivo (distancias de partes energizadas con respecto a tierra).

Esta prueba consiste en aplicar una tensión elevada a uno de los devanados con el otro devanado, el núcleo y el tanque conectados a tierra, el valor de la tensión que se aplica depende de la clase de aislamiento (ver tabla número 2.8.1). Para la prueba se requiere de un transformador elevador alimentado en baja tensión con una fuente de voltaje regulado y capaz de suministrar en alta tensión el voltaje requerido para la prueba, debe tener un voltmetro integrado que mida los KV en alta tensión.

Esta prueba de potencial aplicado, es una prueba destructiva, ya que produce más esfuerzos sobre el aislamiento sólido que sobre el aceite. Por lo general esta prueba es realizada en fábrica, por eso no se recomienda, hacerla nuevamente, porque el transformador puede llegar a tener fallas cuando esté en funcionamiento.

Tensión de prueba de acuerdo al nivel de aislamiento			
Clase de aislamiento KV	Potencial aplicado KV	Clase de aislamiento KV	Potencial aplicado KV
0.6	4	138	275
1.2	10	161	325
2.5	15	196	395
5.0	19	215	430
8.7	26	230	460
15	34	315	630
18	40	345	690
25	50	375	750
34.5	70	400	800
46	95	430	860
69	140	460	920
92	185	490	980
115	230	520	1040

Tabla 2.8.1 valores de potencial aplicado de acuerdo a la clase de aislamiento.

La prueba se lleva a cabo aplicando una tensión a una frecuencia de 60Hz durante un minuto, iniciando la misma con un valor no mayor a un cuarto de lo establecido como tensión de prueba, posteriormente se eleva gradualmente hasta alcanzar la tensión requerida en un tiempo no mayor a 15 segundos, y para suspender o cortar la tensión se reducirá en forma gradual hasta alcanzar por lo menos un cuarto de la tensión máxima aplicada, en un tiempo no mayor a 5 segundos.

En esta prueba se conectan las terminales de un mismo devanado entre si y el devanado bajo prueba se conecta a la terminal de alta tensión del transformador de prueba y todas la demás terminales junto con el tanque se conectan a tierra, como se muestra en el diagrama de la figura 2.8.1

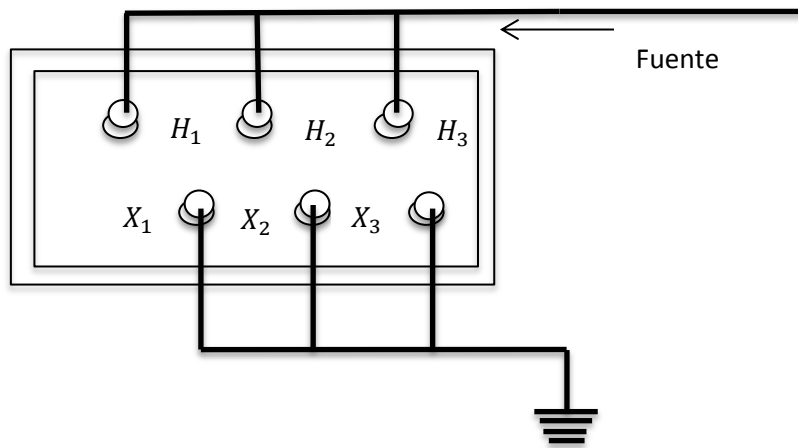


Figura 2.8.1 diagrama de conexión para prueba de potencial aplicado.



2.9 PRUEBA DE POTENCIAL INDUCIDO

Esta prueba consiste en probar si el aislamiento entre vueltas, capas y secciones de los devanados del transformador es de la cantidad y calidad requerida, así como verificar el aislamiento entre bobinas y entre devanados y tierra. La prueba se realiza al doble de la tensión nominal y hasta completar 7200 ciclos. El flujo máximo al que opera el núcleo está determinado por la ecuación general del transformador como sigue:

$$\varphi_{max} = \frac{E}{4.44 f N}$$

Al aplicar una tensión al doble, el flujo aumentara en una misma proporción, por lo que para limitarlo y evitar que el núcleo se sature, se tiene que aumentar de igual forma la frecuencia, esto quiere decir que si el transformador está diseñado para trabajar a 60 Hz, la prueba se podrá realizar a 120 Hz y tendrá una duración de 60 segundos, cuando la prueba se realiza a una frecuencia más alta que 120 Hz, el esfuerzo dieléctrico en los devanados es mayor, motivo por el cual la prueba se ha limitado a 7200 ciclos, por esta razón el tiempo de la prueba depende de la frecuencia del generador utilizado (ver tabla 2.9.1).

Frecuencia en Hz	Duración de la prueba en seg.
120	60
180	40
240	30
360	20
400	18

Tabla 2.9.1 valores de potencial inducido

La fórmula para calcular el tiempo de duración de la prueba es la siguiente:

$$t = \frac{7200}{f}$$

Dónde:

t= tiempo de prueba en segundos

f= frecuencia del generador en Hz



La prueba se inicia aplicando una tensión menor o igual a la cuarta parte del valor de la tensión de prueba, incrementándose posteriormente hasta alcanzar una tensión plena en un tiempo no mayor a 15 segundos. Se sostiene la tensión de prueba durante el tiempo necesario según sea lo calculado y para suspender la prueba se reduce gradualmente la tensión hasta alcanzar por lo menos una cuarta parte de la tensión de prueba no mayor de 5 segundos. La tensión de prueba se puede suspender solamente que presente una falla ya que de otra manera se pueden dañar los aislamientos por transitorios de sobre tensión mayores que el de prueba.

2.10 PRUEBA DE POLARIDAD Y SECUENCIA DE FASES

En los transformadores monofásicos es factible identificar entre sus cuatro terminales, dos de ellas que corresponden a la misma polaridad, en cambio en transformadores trifásicos que tienen de seis a ocho terminales, resulta bastante confuso identificar pares de terminales de misma polaridad instantánea, por lo que en este caso se recurre al concepto de secuencia de fases. Por lo que se puede decir que el concepto de polaridad se asocia con los transformadores monofásicos y el de secuencia de fases con los transformadores trifásicos.

2.10.1 PRUEBA DE POLARIDAD

En los transformadores monofásicos, además de identificar una terminal de alta tensión con uno de baja tensión que tengan misma polaridad, la posición relativa de estas terminales en el arreglo global se identifica con la nomenclatura que damos en la siguiente explicación. Cuando el observador se coloca frente a los dos terminales de baja tensión (X_1 y X_2), si H_1 queda a su izquierda y X_1 a su derecha se dice que el transformador tiene polaridad aditiva, y si H_1 y X_1 quedan a su izquierda se dice que tiene polaridad sustractiva (H_1 y X_1 son terminales de misma polaridad). Lo anterior se observa en la figura 2.10.1

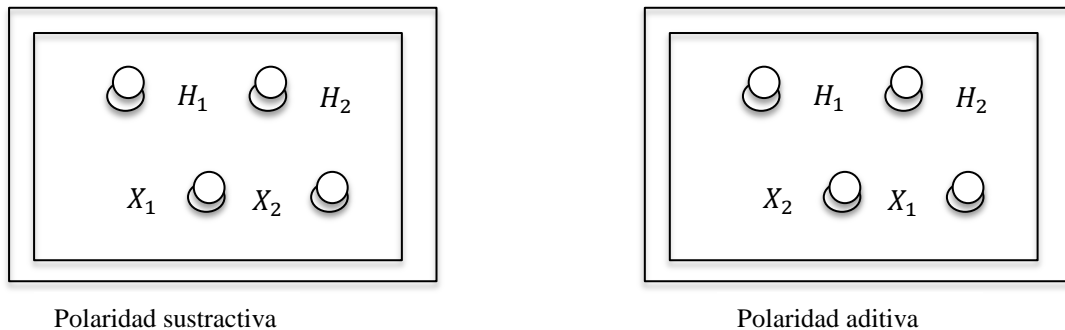


Figura 2.10.1.1 polaridad de acuerdo al orden de colocación de las terminales

Uno de los métodos para verificar la polaridad en un transformador es el de los dos voltímetros, este consiste en aplicar al devanado de alta tensión un voltaje alterno de valor nominal o menor, colocarse de frente a las terminales de baja tensión, puentando las dos terminales de la izquierda y colocando dos voltímetros, uno entre las terminales de alta y otro en las terminales del lado derecho como se muestra en la figura 2.10.1.2

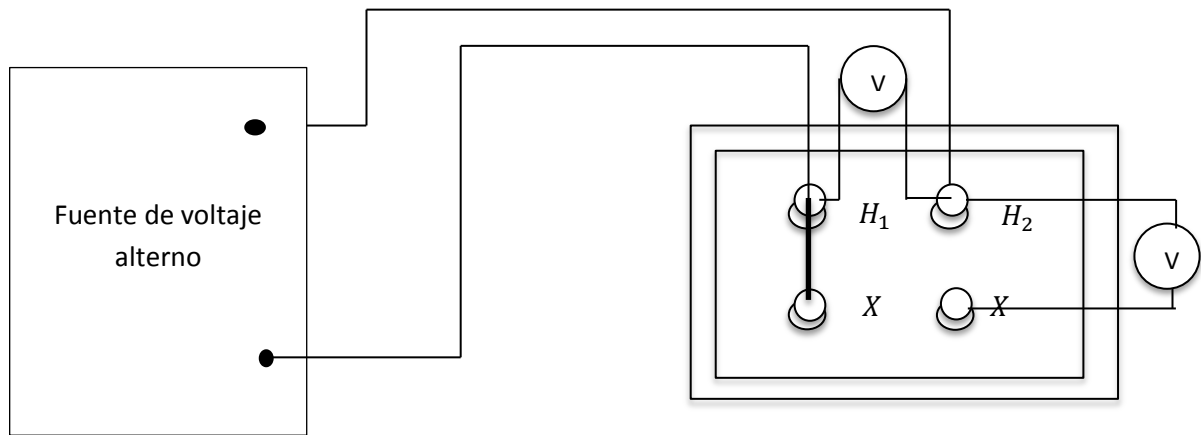


Figura 2.10.1.2 diagrama de conexión para prueba de polaridad con dos voltímetros

2.10.2 PRUEBA DE SECUENCIA DE FASES

Un sistema trifásico de voltajes es un conjunto de tres tensiones alternas de misma magnitud y frecuencia, desfasadas entre sí 120 grados. Esto implica que un determinado valor instantáneo de voltaje no aparece simultáneamente en las tres líneas, o sea que se presenta primeramente en una línea, un tiempo $t = \frac{1}{3}T$ aparece en la segunda línea, y otro tiempo $t = \frac{2}{3}T$ aparece en la tercera, T es el periodo de onda alterna.

La secuencia de fases es el orden en que aparece en las líneas un determinado valor instantáneo de voltaje, por ejemplo el valor máximo de la onda. Si identificamos las líneas con los nombres A, B, y C, la secuencia ABC significa que el valor máximo de voltaje aparece primeramente en la línea A, en seguida en la línea B y por último en la línea C y así se repite constantemente con la rapidez de la frecuencia del sistema. Si conectamos los devanados de alta tensión de nuestro transformador en prueba a las líneas trifásicas, de tal manera que se le aplique la secuencia H1– H2–H3, en el lado de baja tensión se inducirán voltajes con una determinada secuencia. Si esta secuencia aparece de la forma X1– X2– X3, se dice que el transformador tiene secuencia normal.

Para realizar esta prueba se necesita un secuencímetro indicador.

El secuencímetro es un aparato que nos indica la secuencia de fases a partir de la indicación del sentido de rotación de un disco, en la figura 2.10.2.1, se muestra uno en que la indicación de las fases viene dado por la dirección de la flecha grabada en un disco

rotante. Básicamente es un pequeño motor asincrónico, cuya rotación dependerá del orden de sucesión en el tiempo de las fases que alimentan las bobinas estáticas.



Figura 2.10.1.1 secuencímetro indicador de fases.

La prueba puede realizarse energizando el lado de alta o el lado de baja, en esta ocasión solamente se mostrara el diagrama de conexión para la prueba de secuencia de fases energizando el lado de alta tensión. Figura 2.10.2.2

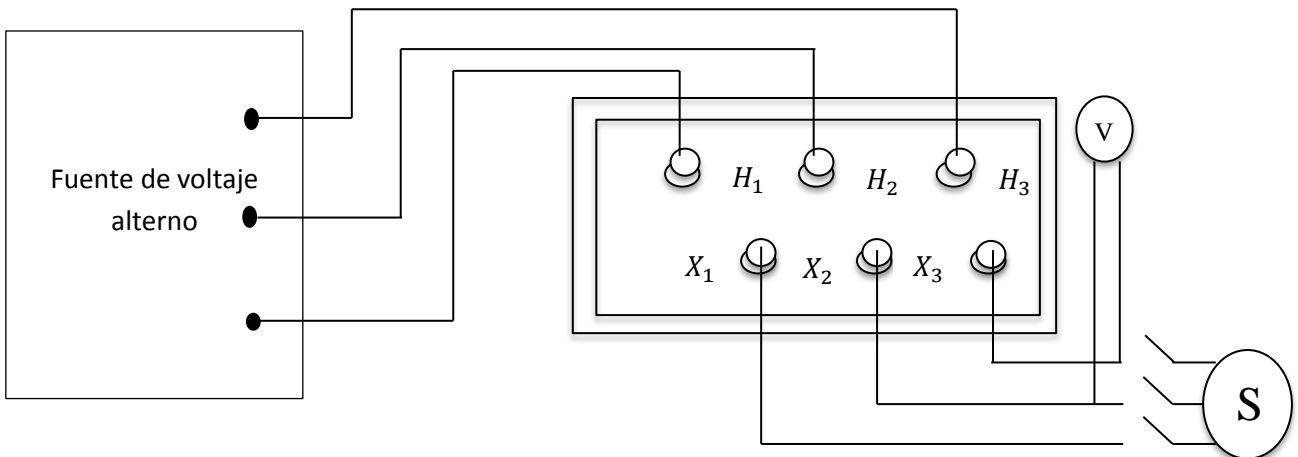


Figura 2.10.2.2 diagrama de conexión para prueba de secuencia de fases energizando el lado de alta tensión.



CAPITULO III

PRUEBAS DE PROTOTIPO EN FÁBRICA



3.1 PRUEBA DE CORTO CIRCUITO.

La prueba de cortocircuito tiene como finalidad, demostrar la capacidad mecánica de los transformadores, en condiciones de corto circuito, y se aplica principalmente a transformadores nuevos, con la finalidad de evaluar su diseño.

Este método es aplicable a transformadores de potencia y distribución de 5KVA y superiores, inmersos en líquido aislante. Existen cuatro categorías dentro de este rango, enlistadas en la tabla número 3.1.1

Categoría	Monofásico (KVA)	Trifásico (KVA)
1	5-500	15-500
2	501-1667	501-5000
3	1668-10000	5001-30000
4	Arriba de 10000	Arriba de 30000

Tabla 3.1.1 categorías de transformador para la prueba de corto circuito según la capacidad nominal.

Los cortocircuitos externos de prueba deben incluir fallas trifásicas de una fase a tierra, doble fase a tierra y entre fases en cualquier grupo de terminales, y solo en terminales de un valor mayor del 35% de la terminal del devanado de la más alta capacidad. El cortocircuito puede ser aplicado en las terminales primarias o secundarias del transformador, según lo permita la fuente de tensión disponible, sin embargo el cortocircuito en el secundario es preferible ya que es más representativo de las condiciones de falla del sistema.

En orden de preferencia, las pruebas pueden ser efectuadas de la manera siguiente:

- Cerrando un interruptor que establezca la falla en terminales, teniendo el transformador previamente energizado.
- Cerrando un interruptor en terminales del lado de la fuente, aplicando la energía al transformador previamente puesto en cortocircuito.

La duración de las pruebas de cortocircuito deben ser las siguientes según su categoría.

Categoría 1: la duración de cada prueba debe ser de 0.25 s, excepto una prueba que debe satisfacer los requisitos de corriente simétrica, que se hace con mayor duración, calculada de la siguiente manera:



$$t = \frac{1250}{I^2}$$

Dónde: t= es el tiempo en segundos

I= definida por la corriente simétrica y calculada de la siguiente manera:

$$I_{cc} = \frac{I_b}{Z_t}$$

En donde: Icc es la corriente simétrica de cortocircuito en amperes (eficaz)

Ib es la corriente base en amperes (rms)

Zt es la impedancia del transformador (eficaz)

Categoría 2: las pruebas de cortocircuito deben de durar 0.25 s, excepto una que dura 1.0 s.

Categoría 3: las pruebas de cortocircuito deben de durar 0.25 s, excepto una que dura 0.5 s.

Categoría 4: todas las pruebas de cortocircuito deben durar 0.25 s.

El transformador bajo prueba debe cumplir durante y después de las pruebas con lo siguiente:

- No deben ocurrir cambios abruptos en la forma de onda de la corriente de cortocircuito ni de la tensión en terminales, durante el desarrollo de las pruebas.
- La corriente de excitación medida después de la serie de pruebas no debe incrementarse por encima de los valores medidos antes de la serie de pruebas en más del 5 % para transformadores con núcleo apilado. Para transformadores con núcleo tipo devanado el incremento no deberá exceder del 25 %.
- La inspección visual del núcleo y bobinas no debe dar indicaciones de cambios en las condiciones mecánicas que impidan el funcionamiento del transformador. La severidad de la inspección visual se establece con base en la evidencia combinada obtenida de las mediciones descritas anteriormente. Cuando las mediciones en terminales no indiquen evidencia de cambios en las condiciones del transformador, una inspección externa de núcleo y bobinas será suficiente. Pero si hay evidencia de cambios considerables en las condiciones del transformador, según las mediciones efectuadas, se hará necesario desensamblar las bobinas del núcleo para una inspección detallada.

3.2 PRUEBA DE IMPULSO TIPO MANIOBRA

El propósito de la prueba de impulso por maniobra es asegurar que los aislamientos entre los devanados, entre los devanados y tierra, así como entre las diferentes terminales de línea y tierra soporten las sobretensiones de maniobra que pueden ocurrir durante el servicio de un transformador.

Esta prueba consiste en aplicar o inducir en la terminal de línea a tierra de cada fase una tensión transitoria de impulso por maniobra con un valor de cresta mínimo.

La onda de tensión de impulso por maniobra tendrá un valor de cresta de acuerdo con el nivel de aislamiento asignado, con una tolerancia de $\pm 3\%$, y superará el 90% del valor de cresta al menos 200 ms. El tiempo real o efectivo para llegar a la cresta debe ser mayor que $100 \mu\text{s}$ y el tiempo para la tensión en la cola de la onda no debe ser menor a 1000 ms, excepto en el caso donde la saturación del núcleo haga que la cola sea más corta. La aplicación de ondas sucesivas de la misma polaridad puede causar que este tiempo disminuya todavía más. Con el fin de incrementar dicho tiempo debe desmagnetizarse el núcleo aplicando ondas reducidas de polaridad opuesta después de la onda reducida y de cada una de las ondas completas.

La tensión de impulso por maniobra es producida por un generador de impulso convencional, la polaridad es negativa y la forma de onda se muestra en la figura 3.2.1

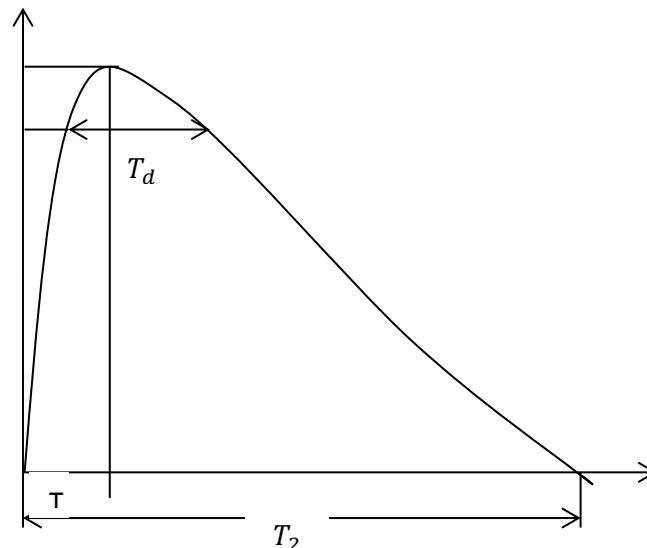


Figura 3.2.1 Forma de onda de tensión de impulso por maniobra.



Dónde:

T: es el lapso de tiempo entre el inicio y el instante en el que la tensión alcanza su valor cresta o máximo.

Td: es el lapso en el cual la tensión excede el 90% de su valor cresta

T2: es el lapso entre el origen y el instante en el que el valor de la tensión pasa por cero.

El valor de pico de la tensión es medida por un voltímetro de impulso. El cambio de forma de onda de voltaje y corriente del devanado se determinan por medio de un osciloscopio. Los fallos que se pueden producir durante la prueba son determinadas por la comparación de los registros oscilo gráficos de corriente y tensión. Las descargas repentinas en los efectos de sonido tensión anormal pueden mostrar los daños en el aislamiento del transformador. La variación de la forma de onda de voltaje y el aumento en la saturación de sonido debido a la saturación magnética del núcleo no debe ser considerado como motivos de cualquier fallo, ya que cuando el núcleo se satura, se puede escuchar un ligero ruido provocado por la misma saturación.

Detección de fallas durante la prueba de impulso

Debido a la naturaleza de las fallas en las pruebas de impulso, uno de los puntos más importantes es la detección de dichas fallas. Algunas de las indicaciones de fallas de aislamientos son:

a) Oscilogramas de tensión

Se debe considerar como falla cualquier diferencia en la forma de onda entre la onda de tensión reducida y la onda de tensión completa final, misma que se detecta sobreponiendo los dos oscilogramas de tensión, siempre que la diferencia no sea atribuible a los dispositivos de protección o a las condiciones del circuito externo de prueba, en cuyo caso se debe investigar completamente este fenómeno, aplicando nuevamente una onda reducida y una onda completa.

Se deben considerar como posibles fallas las diferencias que se observen al comparar las ondas cortadas entre sí, principalmente en rizo final. Como las desviaciones pueden ser originadas también por las condiciones en el circuito de prueba externo del transformador o por los dispositivos de protección, se debe verificar la posibilidad de falla al aplicar la onda de tensión completa.

b) Humo y burbujas



Las burbujas con humo que suben a través del líquido aislante en el transformador son una evidencia definitiva de falla. Las burbujas claras no siempre son evidencia de falla, ya que pueden ser originadas por aire ocluido. Sin embargo, se debe investigar repitiendo la prueba o reprocesando al transformador y repitiendo la prueba, para determinar si efectivamente hubo una falla.

c) Ausencia de arqueos en el explosor

Si al hacer la prueba de onda cortada no ocurre un arqueo en el explosor o cualquier parte externa, a pesar de que los oscilogramas muestren una onda cortada, esto es una indicación definitiva de un arqueo dentro del transformador.



3.3 PRUEBA DE IMPULSO POR ONDA TIPO RAYO.

Esta prueba consiste en aplicar al transformador una descarga de alta tensión la cual es de una duración muy breve, del orden de microsegundos, dicha prueba tiene como objetivo el detectar si en el transformador se generan situaciones anormales con motivo de este tipo de descargas, las cuales en operación normal pueden producirse por descargas atmosféricas o en aperturas de interruptores.

Es cierto que las condiciones que se producen en la realidad cuando aparecen estos fenómenos transitorios no se producen fielmente en la prueba, aunque dicha prueba ha demostrado que es lo suficientemente confiable para garantizar este aspecto en la operación del transformador.

Para proteger un transformador de las descargas atmosféricas es necesario ver, primeramente que tipo de onda se produce. En base a muchas experiencias y años de estudios se determinó que estas descargas son de corta duración, ya que, desde el momento en que se inicia hasta que llega a su valor máximo, tarda un tiempo de 1 a 20 μs , y el tiempo en que su valor desciende a cero es del orden de 10 a 90 μs . Pero la mayoría de estos transitorios tarda entre 1 y 5 μs , donde 1,2 es el tiempo en μs que tarda una onda normalizada a llegar a su valor máximo y entre 10 y 40 μs en descender a un 50% de su valor pico.

Cuando se requiera como prueba de rutina o cuando sea especificada la prueba de impulso, debe aplicarse en el siguiente orden: una onda completa a tensión reducida, dos ondas cortadas y una onda completa a tensión plena. El intervalo de tiempo entre la aplicación de la última onda cortada y la onda completa final, debe minimizarse para evitar la recuperación de la rigidez dieléctrica de los aislamientos.

Cuando se especifica la prueba de frente de onda, la prueba de impulso es generalmente aplicada en el siguiente orden: una onda completa a tensión reducida, dos frentes de onda, dos ondas cortadas y una onda completa a tensión plena.

La aplicación de la onda completa en el transformador, es para verificar que éste soportará los disturbios producidos en la línea de transmisión al caer en ellas ciertas descargas atmosféricas, ya que estos disturbios viajan por dicha línea hacia el transformador, en cuyo viaje la onda original es cambiada a causa de los efectos corona y efectos capacitivos, Cuando la onda llega al transformador tiene un tiempo aproximado de 1,2 μs de frente y de 50 μs de cola.

La onda cortada es aplicada, debido a que cuando la onda se aproxima al transformador, en algunas ocasiones se corta, drenándose su tensión a tierra. Esto es, a causa del bajo

aislamiento que existe en las subestaciones; ya que en estas partes, el aislamiento es más débil que en la línea de transmisión y, además, se encuentran instalados apartarrayos. Esta onda es de un 15 % mayor en magnitud que la onda completa y su tiempo de duración es aproximadamente de 1 a 3 μs .

La prueba de frente de onda es aplicada para predecir el comportamiento del transformador, cuando se vea sometido a una descarga atmosférica en forma directa, ya sea que caiga sobre él o muy cerca, esta onda sube muy rápidamente hasta producir un arco, causando así un transitorio de pendiente pronunciada con una duración del orden 0.025 a 1 μs y una magnitud de 50 % más que la onda completa. Las tres ondas mencionadas anteriormente se muestran en la figura 3.3.1

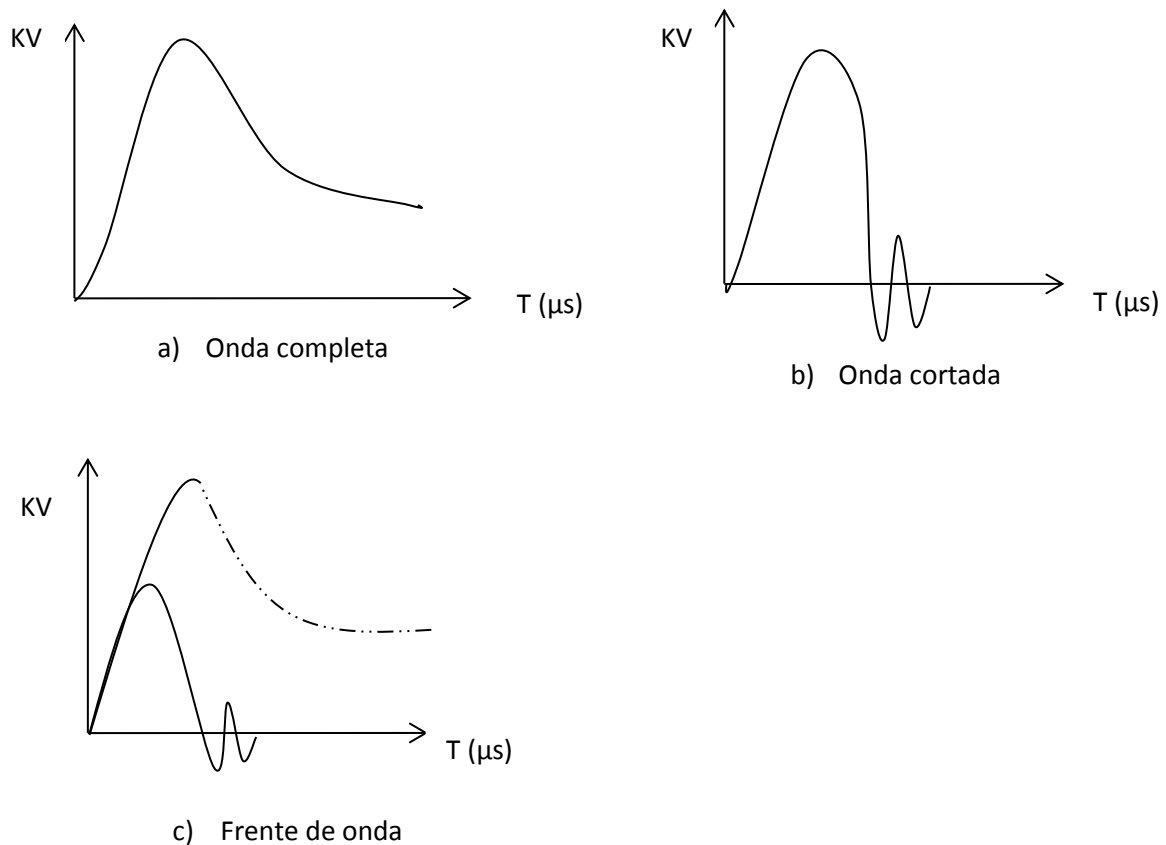


Figura 3.3.1 Tipos de onda aplicadas en la prueba de impulso.

El equipo empleado para esta prueba es un generador de impulso, que consiste en un conjunto de capacitores conectados en paralelo a través de resistencias, los cuales se cargan por medio de una fuente de C.D (figura 3.3.2).

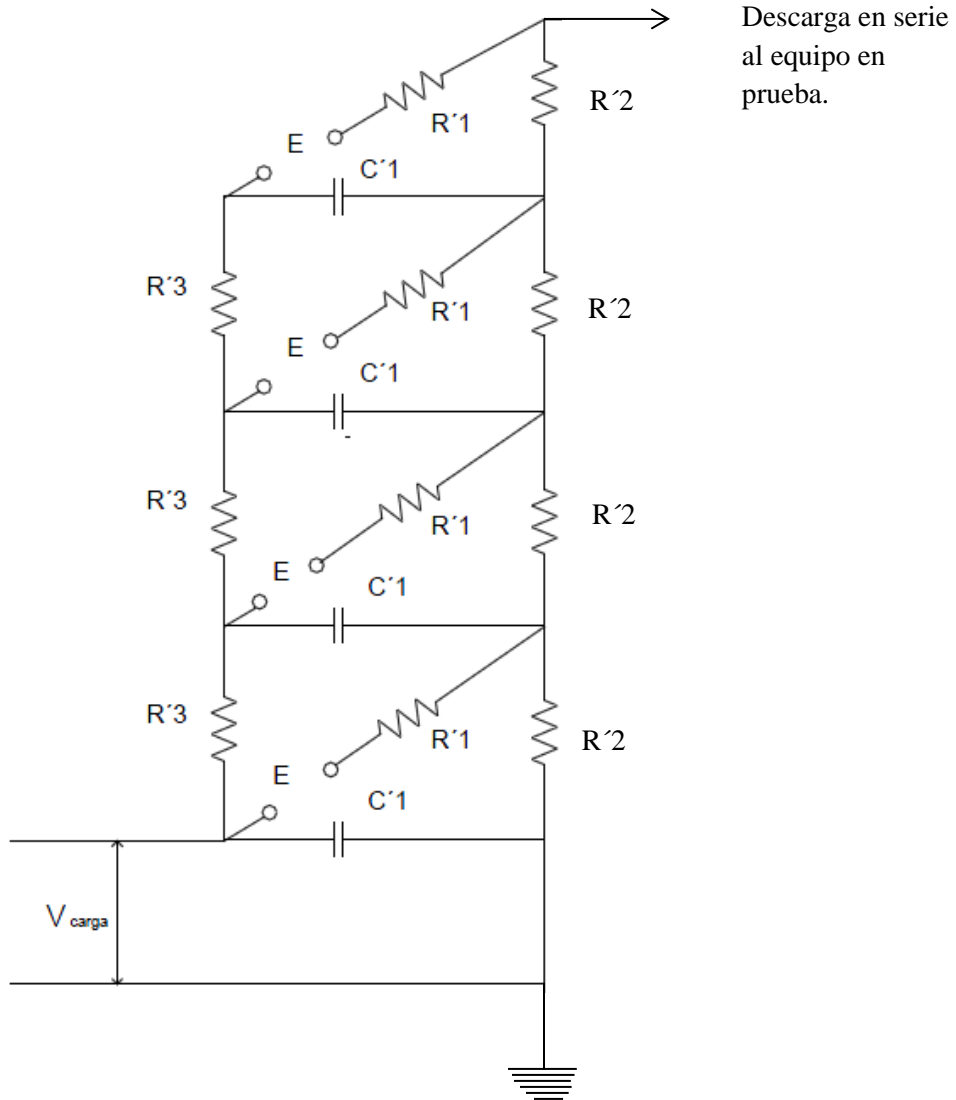


Figura 3.3.2 Diagrama de un generador de impulso.

Generalmente cada una de las terminales de los devanados se debe probar por separado. Las terminales del mismo devanado que no están siendo probadas deben conectarse directamente a tierra, así como también las terminales de los otros devanados que no están bajo prueba, con el fin de limitar altas tensiones inducidas, o a través de una resistencia de bajo valor cuando se requiera medir la corriente. (Ver figura 3.3.3)

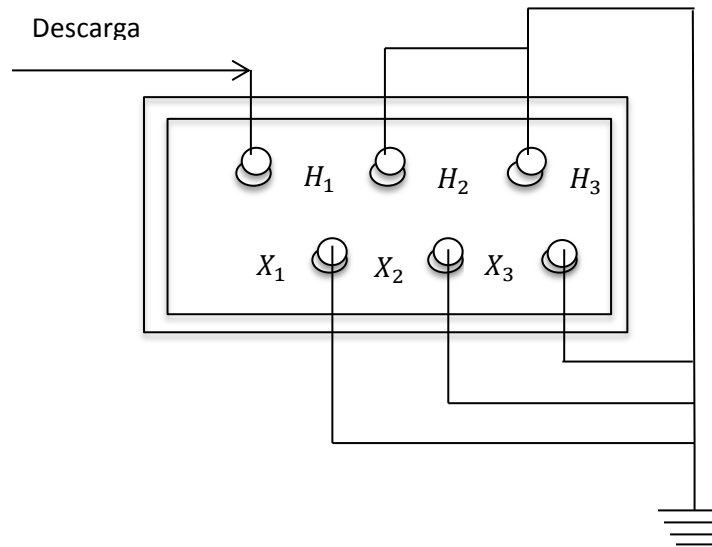


Figura 3.3.3 Conexión de un transformador para la prueba de impulso.

3.4 PRUEBA DE DESCARGAS PARCIALES.

Esta prueba tiene como objetivo principal el verificar la calidad de las conexiones y los dieléctricos, entre ellos los aislamientos y los pasa muros. Dicha prueba consiste en aplicar al equipo una tensión elevada cuyo valor no llega a los de potencial aplicado o de impulso y detectar la presencia de fugas de corriente cuando existen zonas de falla, a estas fugas de corriente se les conoce como descargas parciales.

Una descarga parcial es una fuga de corriente entre dos electrodos, rompiendo la rigidez del medio que los separa, sin llegar al corto-circuito, estas se presentan en tres tipos, que son los siguientes y se ilustran en la figura 3.4.1

1. Descargas externas: cuando un conductor de alta tensión presenta salientes puntiagudas, principalmente en las conexiones mal terminadas, es una zona de alta concentración del campo eléctrico, y por lo mismo favorece a la formación de pequeños arcos en el medio circundante. Esta situación en el interior de un transformador produce la degradación del aceite.
2. Descargas superficiales: el origen es muy similar al de las descargas externas pero con la diferencia de que los arcos en vez de dispersarse en el medio circundante, inciden en la superficie de un aislamiento, provocando la degradación del mismo.
3. Descargas internas: cuando un dieléctrico presenta inclusión de burbujas o de impurezas, el coeficiente dieléctrico es notablemente menor en estas zonas con respecto al resto del cuerpo aislante, lo cual provoca concentración del campo eléctrico que lo atraviesa, hasta el punto de la ruptura de la rigidez de la burbuja o impureza, presentándose un pequeño arqueo dentro del dieléctrico.

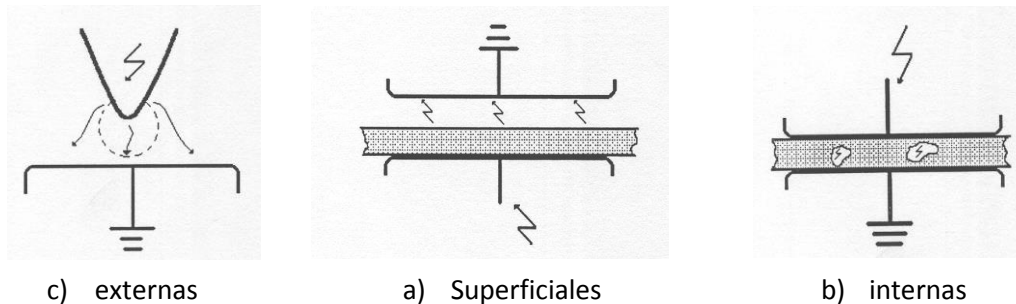


Figura 3.4.1 Tipos de descargas parciales.

El arqueo de las descargas parciales se asocia con un conjunto de fenómenos físicos y químicos que estas producen como son:

- Pulsos de alta frecuencia
- Radiaciones electromagnéticas



- Pérdidas dieléctricas
- Luz
- Sonido
- Presión de gas
- Degradación de los dieléctricos

De las anteriores manifestaciones, las más sencillas de detectar son las primeras tres, aunque en ocasiones se toman la cuarta y quinta como evidencia de presencia de descargas.

Las descargas parciales en transformadores pueden detectarse por los siguientes métodos:

- **MÉTODOS ELÉCTRICOS:** empleados principalmente en transformadores de potencia de alta tensión, por medio de dispositivos que registran la magnitud de las descargas, aunque son de gran utilidad los métodos eléctricos no pueden determinar el origen o ubicación de las descargas parciales.
- **MÉTODOS QUÍMICOS:** estos métodos aprovechan la información entregada por los gases que aparecen en el aceite del transformador, no obstante no permiten detectar la presencia de descargas incipientes en el aislamiento del transformador.
- **MÉTODOS ACÚSTICOS:** Estos detectan la actividad de descargas parciales por medio de sensores colocados en el tanque del transformador y además de medir la magnitud de las descargas pueden entregar la ubicación física de la fuente de las mismas.

Circuito de prueba.

Para poder medir las rápidas corrientes impulsionales que producen las descargas parciales es necesario contar con un circuito de medida que permita establecer un camino para la circulación de estas corrientes, integrar un sensor de medida capaz de detectarlas, y permitir a la vez la aplicación de elevadas tensiones eléctricas. Figura 3.4.2

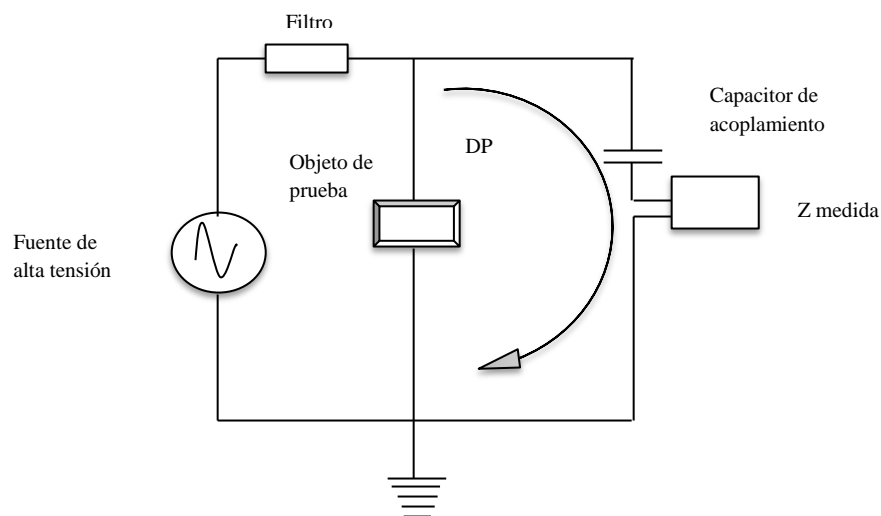


Figura 3.4.2 Circuito de medida de descargas parciales.



Al objeto bajo prueba se le aplica tensión mediante la fuente de alta tensión, siempre intercalando un filtro inductivo en serie con el objeto de prueba.

El filtro inductivo intercalado en serie, también llamado inductancia de bloqueo o choque, evita que las descargas parciales que se producen en el equipo a probar circulen por el lazo de la fuente de alta tensión. De esta forma toda la corriente de la descarga parcial circula por el lazo del divisor y la impedancia de medida, aumentando así la sensibilidad de la medida.

El capacitor de acoplamiento, forma el lazo por el que circulan las corrientes de las descargas parciales. Estos capacitores suelen tener valores comprendidos entre los picofaradios y decenas de nano faradios. Habitualmente se instala un segundo capacitor que hace de divisor de tensión, del orden los microfaradios, para poder medir el valor y la fase de la onda de tensión.



3.5 PRUEBA PARA MEDICIÓN DE RESPUESTA EN FRECUENCIA

La prueba de análisis de respuesta en frecuencia (ARF) ayuda a detectar diversos tipos de daños, de manera similar a otras técnicas de medición, tales como: relación de transformación, corriente de excitación, reactancia de dispersión, factor de potencia y capacitancia, entre otras. Algunas de las ventajas de la medición de respuesta en frecuencia es la cantidad de puntos de medición y su sensibilidad para identificar pequeñas desviaciones. Las cuales están relacionadas con las propiedades eléctricas, mecánicas y con la integridad del transformador, y que no son posibles de detectar con las pruebas normalizadas de campo.

El circuito equivalente de un transformador puede considerarse como un arreglo **R-L-C**, cuyos parámetros varían dependiendo de la frecuencia de medición. La inductancia **L** está relacionada al número y forma de las espiras que tienen los devanados y al circuito magnético. Mientras que la resistencia **R** está asociada a la longitud y resistencia del cobre, y que puede reflejarse en problemas de contacto en el cambiador de derivaciones y a las pérdidas del aislamiento. Por otro lado, la capacitancia **C** refleja la disposición física del devanado y su aislamiento. La capacitancia está definida por la forma y distancias entre devanados, entre capas de devanado y entre espiras, así como por las distancias al tanque y al núcleo.

Los resultados de medición obtenidos la primera vez deben permanecer constantes durante la operación y vida útil del transformador, y no deben existir variaciones en mediciones futuras. Se debe garantizar que los equipos de medición utilizados son capaces de repetir los ensayos sin variaciones que puedan afectar el diagnóstico. Para esto se obtiene el patrón de comportamiento, también denominado *huella digital del transformador*, al salir de fábrica o lo antes posible. Esta huella debe ser comparada con los resultados de mediciones futuras.

La detección de asimetrías en los espectros obtenidos con respecto a su huella digital nos indica que los componentes R-L-C, que representa la geometría interna, han sufrido modificaciones. Los cambios en las propiedades mecánicas como dieléctricas, reflejan deformaciones de los devanados y núcleo.

Las deformaciones que se presentan debilitan el sistema de sujeción, soportes y separadores, haciéndolos vulnerables a fallas debidas a esfuerzos térmicos, mecánicos y dieléctricos, o una combinación de ellos. Estos esfuerzos generalmente están presentes en condiciones normales de operación.

Con esta medición se puede verificar la existencia de deformaciones, espiras en corto o devanados desplazados antes de existir una falla franca.



Existen dos métodos para la medición de respuesta en frecuencia:

- Barrido (sweep)
- Impulso de bajo voltaje (LVI)

METODO DE BARRIDO.

En este método emplea un generador de señales puntuales de tensión y los valores registrados se grafican en una escala dentro de un rango de frecuencias de 10 Hz hasta 1 o 2 MHz, el cual se conoce como V_{in} a una tensión de 10V como mínimo, y un circuito de medición de tensión denominado V_{out} . Para una medición se emplean aproximadamente 10 minutos.

Hasta la fecha, las frecuencias a las cuales se realiza cada medición dependen de cada fabricante, de los equipo de prueba, pero debe tener una cantidad significativa de puntos en el rango de frecuencia de 20 Hz a 1 ó 2 MHz y graficados en una escala logarítmica.

METODO DE IMPULSO DE BAJO VOLTAJE

El método de impulso de bajo (LVI) voltaje está integrado por un generador de impulso normalizado de $1.2 \times 50 \mu s$ y de 200V a. Cuenta con una tarjeta de adquisición de datos de alta velocidad, que obtiene los parámetros de la tensión de entrada V_{in} y la tensión de salida V_{out} . Todo esto en un mismo sistema, que tiene una interface (serie/paralelo, usb, etc.) que se conecta a una computadora portátil con un sistema que realiza la conversión de las señales adquiridas a la transformada rápida de Fourier, obteniendo el espectro en función de la frecuencia.

La información se almacena en una base de datos en formato ASCII, donde la primera columna representa la frecuencia y las siguientes las mediciones, resultando un sistema ligero y rápido para el diagnóstico.

La impedancia de acoplamiento normalmente es de 50Ω . El tiempo empleado para una medición es de aproximadamente 30 s.

El sistema LVI debe garantizar la confiabilidad y repetibilidad de las mediciones y se deben eliminar las posibles desviaciones ocasionadas por los cables de prueba y las terminales que pueden influir en la forma de los espectros.

Las conexiones de prueba son las siguientes:

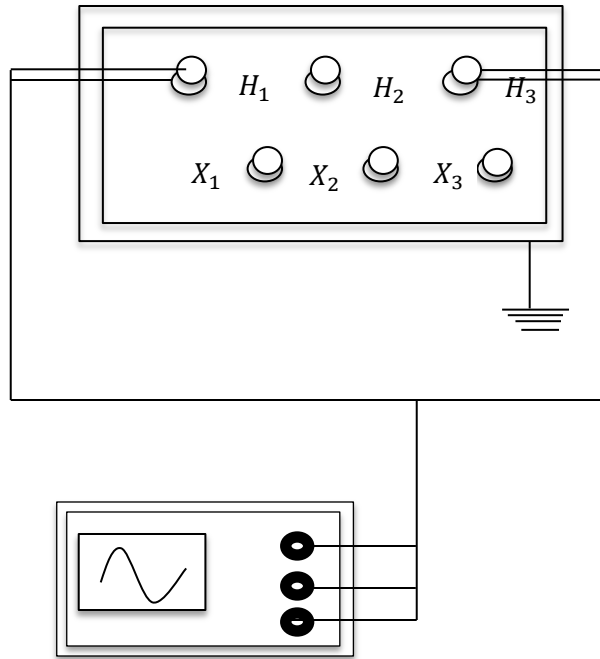


Figura 3.5.1 Diagrama de conexión de circuito abierto.

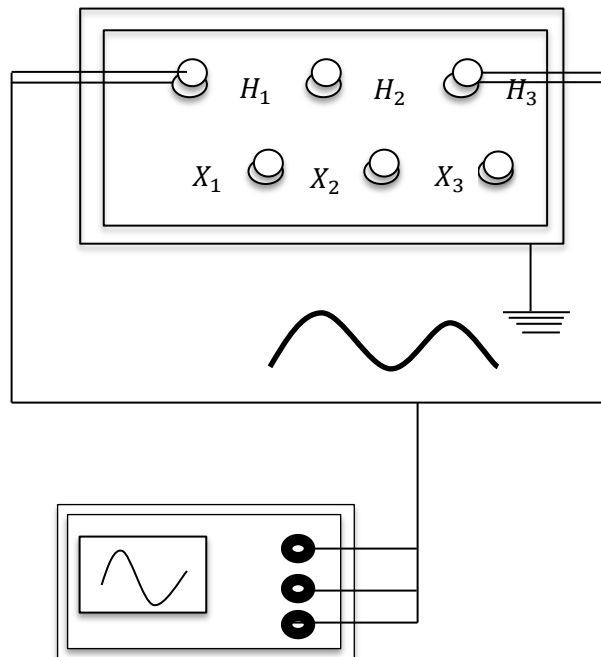


Figura 3.5.2 Diagrama de conexión de corto circuito.



3.6 PRUEBA DE ELEVACION DE TEMPERATURA

Las pérdidas magnéticas y eléctricas producen calentamiento en los elementos del transformador y los aislamientos de los devanados son los principales afectados, ya que con el calentamiento están expuestos a un proceso de degradación, lo que reduce la vida útil del equipo.

La prueba de elevación de temperatura en los devanados consiste en operar el transformador en condiciones de plena carga durante un tiempo prolongado con el fin de verificar si cumple con la capacidad especificada. Si al trabajar en condiciones nominales durante el tiempo de prueba, la temperatura en las diversas partes del transformador no excede el valor permisible, puede garantizarse la duración del mismo.

Todas las pruebas de elevación de temperatura deben efectuarse bajo las condiciones normales de operación. Los transformadores deben estar completamente ensamblados con todos sus accesorios tales como indicadores de temperatura, transformadores de corriente tipo boquilla, y si son sumergidos en líquido aislante, deben estar llenos hasta el nivel indicado.

El tiempo de la prueba depende del tamaño del transformador, pudiendo prolongarse hasta más de 24 horas en transformadores de potencia.

Para determinar en qué momento puede darse por terminada la prueba se considera que la temperatura se ha estabilizado cuando no varía en más de un grado en un lapso de tres horas consecutivas.

Los métodos para la medición son los siguientes:

- Carga real
- Carga simulada.

3.6.1 método de carga real.

El método de carga real es el más exacto de todos los métodos, pero su aplicación no es práctica en transformadores de gran capacidad por la energía tan grande que se requiere, ya que resulta problemático, tanto un banco de carga real como el costo de energía utilizada debido a lo prolongado de esta prueba. Los transformadores de capacidad pequeña pueden probarse bajo condiciones reales de carga, aplicada por medio de reóstatos, banco de lámparas, resistencias de agua o cualquier carga resistiva que haga circular la corriente nominal.



3.6.2 métodos de carga simulada.

Existen varios métodos para transformadores monofásicos y trifásicos, con arreglos en los cuales se pueden producir las pérdidas nominales sin emplear la energía de la capacidad nominal del transformador. El producir las pérdidas magnéticas y eléctricas nominales, el comportamiento de la temperatura es idéntico al que se tendría con carga real.

1. **Método de corto circuito.** Este método requiere de una cantidad pequeña de equipo y de energía, y es adecuado tanto para transformadores grandes como pequeños. Esta prueba se realiza poniendo en cortocircuito uno de los devanados, ya sea el de alta tensión o de baja tensión, según convenga y alimentando por el otro devanado las pérdidas correspondientes. En el método de cortocircuito se requiere una predeterminación precisa de las pérdidas de vacío y pérdidas debidas a la carga, incluyendo las pérdidas indeterminadas a la temperatura de operación. Tiene la ventaja de permitir la medición directa de elevación de temperatura.
2. **Método de oposición.** En este método, dos transformadores duplicados se conectan en paralelo, se excita a tensión y frecuencia nominales, uno de los grupos de devanados puestos en paralelo y en el otro grupo de devanados se intercala una fuente de tensión entre terminales de igual designación, que haga circular la corriente nominal por dichos devanados. Esta corriente debe ser preferentemente a frecuencia nominal. El método de oposición requiere una mayor cantidad de equipo para la prueba y también un mayor consumo de energía. Debido a estos requisitos, este método se complica conforme aumenta la capacidad de los transformadores.



CAPÍTULO IV

PROPUESTA DE PRÁCTICAS PARA EL LABORATORIO DE TRANSFORMADORES Y MOTORES DE INDUCCIÓN.



PRACTICA 1

SEGURIDAD, FUENTE DE ALIMENTACIÓN Y CIRCUITOS BÁSICOS

OBJETIVO:

Al término de la práctica el alumno:

1. El alumno conocerá las reglas básicas de seguridad que requiere su persona y el equipo de laboratorio, sobre las recomendaciones del instructor.
2. Identificará los interruptores, controles, instrumentos de medición y terminales de salida del panel de la fuente de energía.
3. Entenderá el comportamiento de un inductor y un capacitor en un circuito de c-a.
4. Entenderá la relación entre potencia real, potencia aparente y potencia reactiva.
5. Aprenderá el concepto de resonancia en un circuito RLC.

INTRODUCCIÓN:

La seguridad es un factor vital en toda actividad, no es un tema que se deba programar para una sola sesión de una o dos horas y que posteriormente se deje a un lado a favor de otro tema; es una responsabilidad diaria de todos.

Choque eléctrico.

La corriente eléctrica a su paso por el cuerpo humano produce diversos efectos que pueden provocar lesiones físicas como quemaduras, contracciones musculares, dificultades respiratorias, paros cardíacos, caídas,... hasta el fallecimiento por fibrilación ventricular.



¿Qué es el riesgo de electrocución?

El riesgo de electrocución para las personas se puede definir como la "posibilidad de circulación de una corriente eléctrica a través del cuerpo humano". Así, se pueden considerar los siguientes aspectos:

Para que exista la posibilidad de circulación de una corriente por el cuerpo humano es necesario:

- Que el cuerpo humano sea conductor. El cuerpo humano, si no está aislado, es conductor debido a los líquidos que contiene (sangre, linfa, etc.)
- Que el cuerpo humano forme parte del circuito
- Que exista entre los puntos de "entrada" y "salida" del cuerpo humano una diferencia de potencial mayor que cero

Cuando estos requisitos se cumplan, se podrá afirmar que existe o puede existir riesgo de electrocución

Entre los efectos que produce la corriente eléctrica se distinguen:

- 1) **Asfixia:** si el centro nervioso que regula la respiración se ve afectado por la corriente, puede llegar a producirse un paro respiratorio.
- 2) **Electrización:** la persona forma parte del circuito eléctrico, circulando la corriente por el cuerpo. Como mínimo se presenta un punto de entrada y otro de salida de la corriente.
- 3) **Electrocución:** fallecimiento debido a la acción de la corriente en el cuerpo humano.
- 4) **Fibrilación ventricular:** movimiento arrítmico del corazón, el cual, deja de enviar sangre a los distintos órganos y aunque esté en movimiento, no sigue su ritmo normal de funcionamiento; que puede ocasionar el fallecimiento de la persona.
- 5) **Tetanización:** movimiento incontrolado de los músculos debido a la acción de la corriente eléctrica. Dependiendo del recorrido de la corriente perderemos el control de las manos, brazos, músculos pectorales, etc.

Los efectos que produce la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano dependen fundamentalmente de:

- a) Intensidad de la corriente eléctrica.
- b) Tiempo de contacto o de paso de corriente.
- c) Tensión o diferencia de potencial.
- d) Resistencia o impedancia del cuerpo entre los puntos de contacto.
- e) Trayectoria o recorrido de la corriente a través del cuerpo.



- f) Frecuencia de la corriente.
- g) Condiciones fisiológicas de la persona.

Efectos fisiológicos producidos por el paso de una intensidad eléctrica de 50/60 Hz.

Intensidad	Efectos fisiológicos que se observan
0 a 0.5 mA	No se observan sensaciones ni efectos. El umbral de percepción se sitúa en 0.5 mA.
0.5 a 10 mA	Calambres y movimientos reflejos musculares. El umbral de no soltar se sitúa en 10 mA.
10 a 25 mA	Contracciones musculares. Agarrotamiento de brazos y piernas con dificultad de soltar objetos. Aumento de la presión arterial y dificultades respiratorias.
25 a 40 mA	Fuerte Tetanización. Irregularidades cardíacas. Quemaduras. Asfixia a partir de 4 s.
40 a 100 mA	Efectos anteriores con mayor intensidad y gravedad. Fibrilación y arritmias cardíacas.
1 A	Fibrilación y paro cardíaco. Quemaduras muy graves. Alto riesgo de muerte.
1 a 5A	Quemaduras muy graves. Parada cardíaca con elevada probabilidad de muerte.

Tabla 1.1

Si R es la resistencia del cuerpo humano, la intensidad que circula para una diferencia de potencial V , viene dada por la ley de Ohm: $i = V/R$

En la tabla 1.1 se pueden observar los efectos fisiológicos producidos sobre una persona adulta, con un peso mínimo de 50 Kg, suponiendo que la corriente circula cuando los dos puntos de contacto corresponden a dos extremidades, para una frecuencia de 50/60 Hz.

Nueve reglas para trabajar con seguridad y evitar los percances eléctricos:

1. Asegúrese de las condiciones del equipo y de los peligros presentes.
2. Nunca confíe, por protección propia, en dispositivos de seguridad tales como fusibles, relevadores y sistemas de trabajo. Pueden no estar funcionando y no brindar protección cuando más se necesita.
3. Nunca quite la punta de conexión a tierra de un enchufe de tres alambres. Con ello se elimina su característica de estar conectado a tierra y se le convierte en un riesgo potencial de peligro.
4. No trabaje sobre una mesa desordenada.
5. No trabaje sobre pisos mojados.



6. No trabaje solo.
7. Trabaje con una mano detrás de usted o metida en uno de sus bolsillos. Una corriente que pase por las dos manos cruza por el corazón y puede ser más letal que una corriente que vaya de la mano al pie.
8. Nunca distraiga a alguien que esté trabajando. No permita que lo distraigan; tampoco distraiga a otros.
9. Muévase siempre con lentitud cuando esté trabajando cerca de circuitos eléctricos.

Introducción a los circuitos de c-a RLC.

En un circuito de c-a con una carga resistiva, cuando aumenta el voltaje a través de la resistencia, aumenta la corriente que pasa por ella. En consecuencia cuando v llegue a su valor máximo, i también estará en su máximo valor.

También existen condiciones en que la corriente no esté en “fase” con el voltaje; esto es, que la corriente alcance su valor máximo antes o después que el voltaje. Se dice entonces que la corriente y el voltaje están “desfasados” cierto número de grados.

Por ejemplo, si la corriente alcanza su valor máximo 90° antes o después que el voltaje se dice que están desfasados 90° . En este caso se observa que, cuando el voltaje tiene su valor máximo, la corriente es cero o viceversa. Esto sucede cuando una carga que puede almacenar energía (un inductor o un capacitor), se conecta a una fuente de c-a.

Comportamiento de un capacitor en un circuito de c-a

En un circuito de c-a, el voltaje aumenta, disminuye e invierte su polaridad. Cuando el voltaje aumenta el capacitor almacena energía, actuando como carga con respecto a la fuente de alimentación; cuando el voltaje disminuye, el capacitor libera energía hacia la fuente de alimentación.

El capacitor no disipa energía, sólo la almacena y luego la libera, esto en comparación con una resistencia que no puede almacenar energía, sólo disiparla en forma de calor.

La potencia real correspondiente a un capacitor ideal es cero. Sin embargo, se produce una caída de voltaje en el capacitor y se tiene un flujo de corriente en el circuito. El producto de ambos es la potencia aparente. La corriente se adelanta 90° al voltaje.

La reactancia capacitiva es la resistencia al flujo de la corriente alterna, debido a la presencia de una capacitancia en el circuito.



$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

Dónde:

$$\begin{aligned} X_c &= \text{reactancia capacitiva en ohms} \\ C &= \text{capacitancia en farads} \\ f &= \text{frecuencia en ciclos por segundo (Hz)} \end{aligned}$$

Comportamiento de un inductor en un circuito de c-a

En un circuito de c-a con carga inductiva, la fuente de energía de c-a hará que fluya una corriente alterna en la bobina y dicha corriente aumenta, disminuye y cambia de polaridad en forma continua. Por lo tanto, la bobina recibe energía de la fuente y luego devuelve a la misma, dependiendo de si la corriente aumenta o disminuye.

La potencia real correspondiente a un inductor ideal es cero. No obstante, se tiene una caída de voltaje en la bobina y la corriente fluirá por el circuito. El producto de ambos es la potencia aparente. La corriente tiene un atraso de 90° respecto al voltaje.

La reactancia inductiva es la resistencia ofrecida al flujo de una corriente alterna, debido a la presencia de un inductor en el circuito.

$$X_L = 2\pi fL$$

Dónde:

$$\begin{aligned} X_L &= \text{reactancia inductiva en ohms} \\ L &= \text{inductancia en henrys} \\ f &= \text{frecuencia en ciclos por segundo (Hz)} \end{aligned}$$

Potencia real, Potencia aparente y Potencia reactiva.

La potencia real (P) es la potencia que se puede medir con el vatímetro. Sus unidades son watts. Si se conoce el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje se puede calcular de la siguiente forma:

$$P = VI \cos \theta$$

La potencia aparente (S) suministrada a una carga se define como el producto del voltaje a través de la carga y la corriente en la carga. Ésta es la potencia que “parece” ser suministrada a la carga si se ignoran las diferencias de ángulo de fase entre el voltaje y la corriente. Sus unidades son el va (volt-ampere).

$$S = VI$$

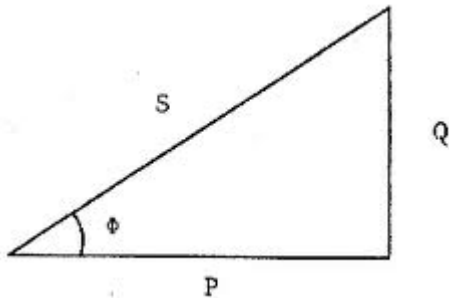
La potencia reactiva (Q) representa la energía que primero se almacena y luego se libera en el campo magnético de un inductor, o en el campo eléctrico de un capacitor.



$$Q = VI \sin \theta$$

Donde θ es el ángulo de impedancia de la carga. Q es positiva para cargas inductivas y negativa para cargas capacitivas. Sus unidades son el var (volt-ampere reactivo).

Las potencias real, reactiva y aparente suministradas a una carga se relacionan por medio del triángulo de potencia.



Normalmente la cantidad $\cos \theta$ se conoce como el factor de potencia de una carga. Éste se define como la fracción de la potencia aparente S que en realidad suministra potencia real a la carga. Entonces:

$$FP = \cos \theta$$

O, también se puede calcular como:

$$FP = P/S$$

Circuito RLC paralelo.

$$E = IZ$$

Dónde:

$E =$ voltaje total del circuito en volts.

$I =$ corriente total que circula x el circuito en amperes.

$Z =$ impedancia total del circuito en ohms.

$$Z = \sqrt{(R^2 + X^2)}$$

Dónde:

$R =$ resistencia total en ohms

$X =$ reactancia total en ohms

$$X = \frac{X_L X_C}{X_L - X_C}$$

Dónde:

$X_L =$ reactancia inductiva en ohms.

$X_C =$ reactancia capacitiva en ohms.



En un circuito RC o RL en paralelo, el voltaje aplicado es idéntico en cada rama, la corriente de la fuente se determina sumando vectorialmente las corrientes en cada rama.

$$I_S = \sqrt{(I_R^2 + I_C^2)}$$

$$I_S = \sqrt{(I_R^2 + I_L^2)}$$

Dónde:

I_S = corriente de la fuente en amperes.

I_R = corriente que circula por la carga resistiva en amperes.

I_C = corriente que circula por la carga capacitiva en amperes.

I_L = corriente que circula por la carga inductiva en amperes.

CUESTIONARIO PREVIO:

¿Qué es seguridad en el trabajo?

¿Qué es higiene en el trabajo?

¿Qué es un accidente de trabajo?

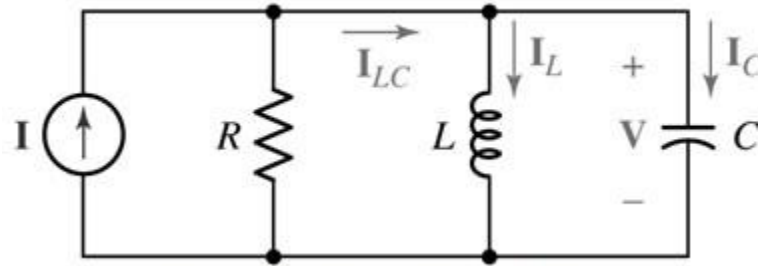
Defina lo que es un acto inseguro. De tres ejemplos.

Defina lo que es una condición insegura. De tres ejemplos.

Defina que es una fuente de alimentación.

¿Qué es un autotransformador?

Para el siguiente circuito (circuito 1.1):



Circuito 1.1

Dónde:

$$\begin{aligned}C &= 8.8 \mu F \\L &= 0.8 H \\R &= 300 \text{ ohms} \\f &= 60 \text{ Hz}\end{aligned}$$

Calcular:

- La Reactancia inductiva y la reactancia capacitiva.
- Tomando en cuenta la carga que se indica a continuación, calcular la corriente que pasa por la carga, la corriente total del circuito y la potencia eléctrica. Anotar los resultados en la tabla que viene al final del experimento 4. (Tabla 1.3).
 - Circuito R
 - Circuito L
 - Circuito C
 - Circuito RL
 - Circuito RC
 - Circuito LC
 - Circuito RLC

MATERIAL:

- Multímetro.
- Puntas de prueba.
- Módulo de suministro de potencia EMS 8821.
- Módulo de medición de c-a (250/250/250V) EMS 8426.
- Dos módulos de medición de c-a (2.5/2.5/2.5A) EMS 8425.



6. Módulo de resistencias EMS 8311.
7. Módulo de capacitancia EMS 8331
8. Módulo de inductancia EMS 8321.
9. Módulo de vatímetro monofásico EMS 8431.
10. Cables de conexión.

DESARROLLO:

EXPERIMENTO 1:

1. Con las manos totalmente secas mida la resistencia que hay de la mano derecha a la izquierda.
2. Realice ahora la medición de una mano a un pie.
3. Humedezca ahora sus dedos y repita las mediciones.
4. Realice nuevamente las mediciones con otros dos compañeros y anote los valores en la siguiente tabla (tabla 1.2).

	Resistencia entre las dos manos (secas)	Resistencia entre una mano y un pie (secos)	Resistencia entre las dos manos (húmedas)	Resistencia entre una mano y un pie (húmedos)
1				
2				
3				

Tabla 1.2

La resistencia del cuerpo varía, dependiendo de los puntos de contacto, de las condiciones de la piel y le área de contacto. Observe como varía la resistencia, al oprimir firmemente las probetas. La resistencia de la piel puede variar entre 250 Ohms, cuando está húmeda y el área de contacto es grande, hasta 500,000 Ohms, para la piel seca.

5. Considerando la tabla donde se muestra los efectos fisiológicos que produce el paso de una intensidad de corriente eléctrica a través del cuerpo humano y las resistencias del cuerpo humano medidas anteriormente calcule que voltajes podrían resultar fatales. Use la “Ley de Ohm”.

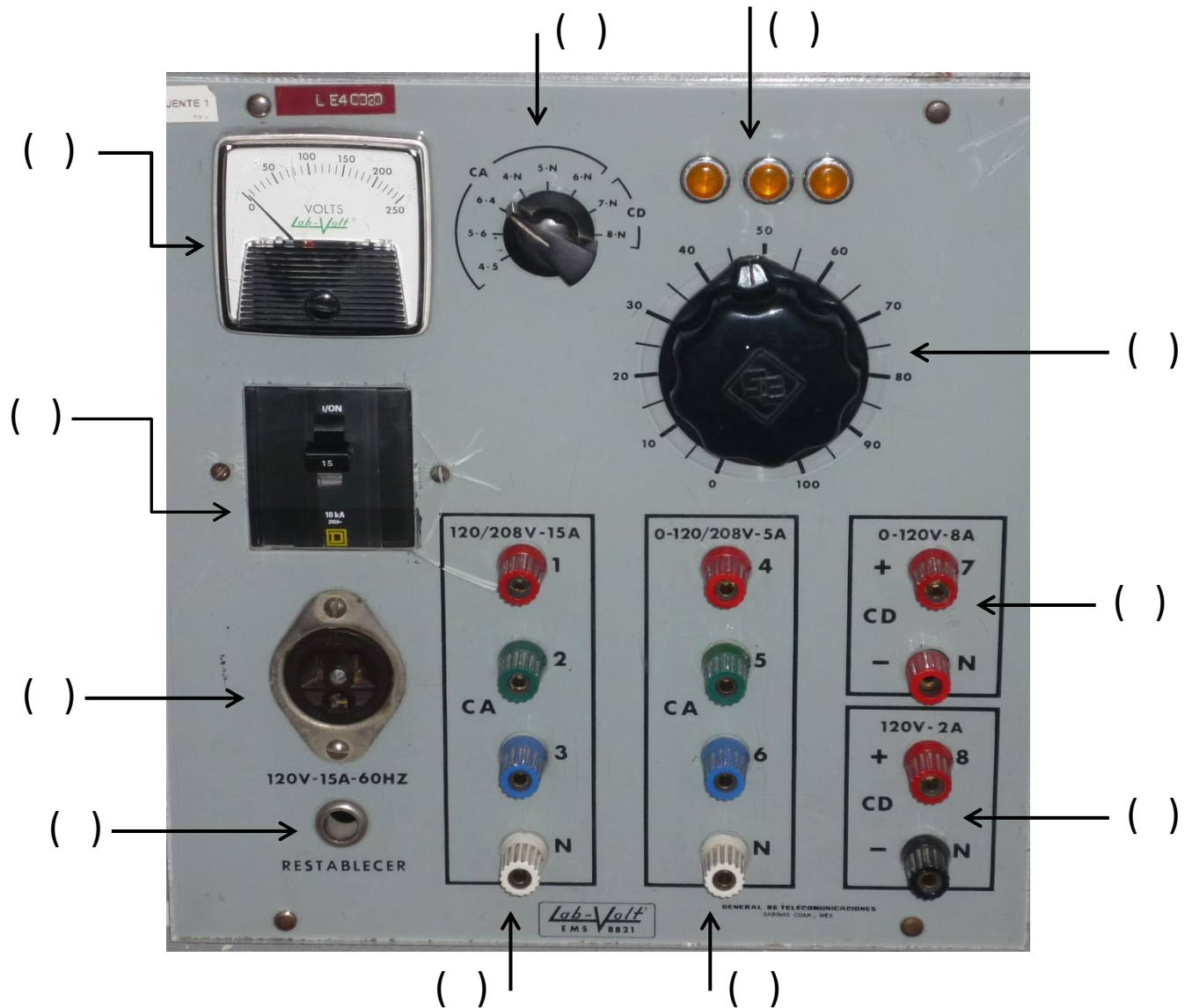
$$V = RI$$



RESISTENCIA	VOLTAJE
Resistencia entre las dos manos (secas)	
Resistencia entre una mano y un pie (secos)	
Resistencia entre las dos manos (húmedas)	
Resistencia entre una mano y un pie (húmedos)	

EXPERIMENTO 2:

1. Examine la construcción del módulo del suministro de potencia EMS 8821, sobre el tablero de enfrente e identifique lo siguiente:
 - a) El interruptor de tres polos del circuito.
 - b) Las tres luces que indican el funcionamiento de cada fase.
 - c) El voltímetro de cd/cd.
 - d) La llave selectora del voltímetro de ca/cd.
 - e) La perilla de control de la salida variable.
 - f) El receptáculo de 120 V ca fija.
 - g) Las terminales de la salida de 120/208 ca fija (1, 2, 3 y N).
 - h) Las terminales de la salida de 0-120/208 ca variable (4, 5, 6 y N).
 - i) Las terminales de la salida de cd fija (8, N).
 - j) Las terminales de la salida de cd variable (7, N).
 - k) El botón común de reconexión.



2. Diga cuál es el voltaje de ca y cd y la corriente nominal para cada una de las terminales siguientes:

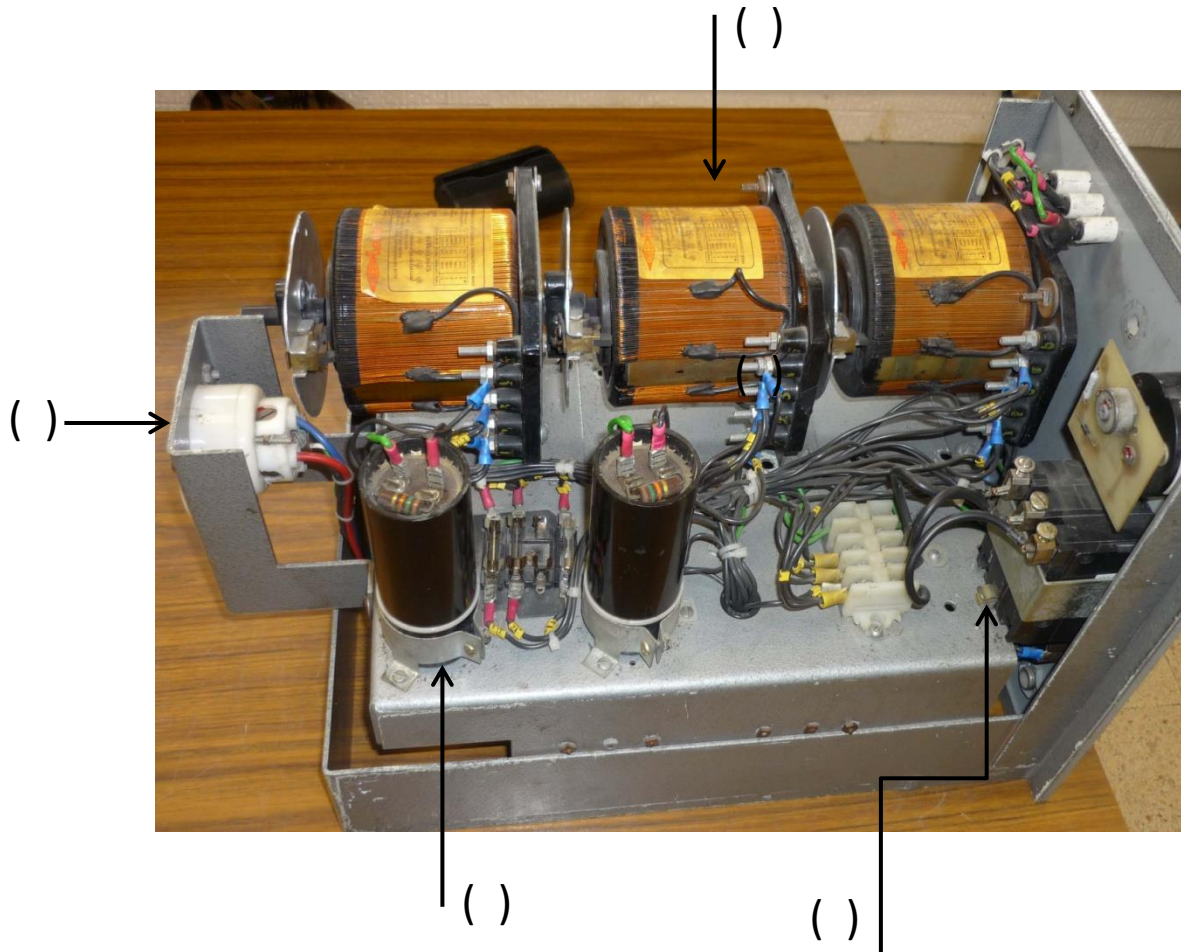
- a) Terminales 1 y N: _____ v _____ A _____
- b) Terminales 2 y N: _____ v _____ A _____
- c) Terminales 3 y N: _____ v _____ A _____
- d) Terminales 4 y N: _____ v _____ A _____

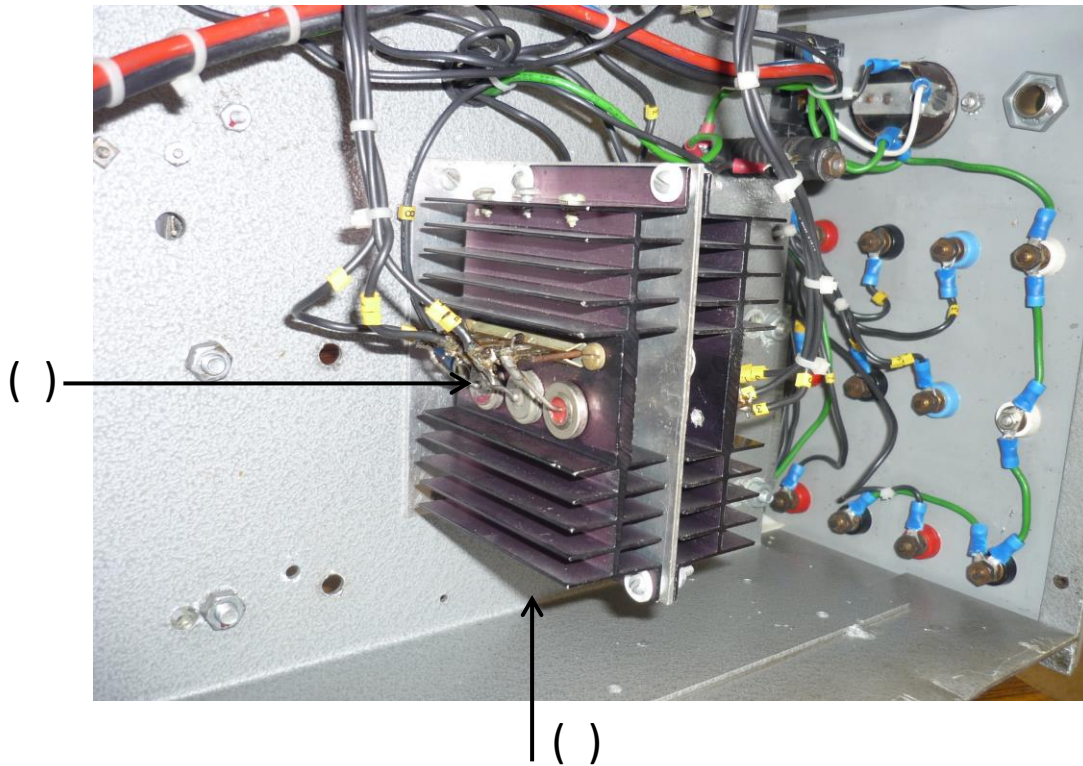


- e) Terminales 5 y N: _____ v _____ A _____
- f) Terminales 5 y N: _____ v _____ A _____
- g) Terminales 7 y N: _____ v _____ A _____
- h) Terminales 8 y N: _____ v _____ A _____
- i) Terminales 1, 2 y 3: _____ v _____ A _____
- j) Terminales 4, 5 y 6: _____ v _____ A _____
- k) El receptáculo: _____ v _____ A _____

3. Examine la construcción interior del módulo. Identifique lo siguiente:

- a) El autotransformador.
- b) Los capacitores filtros.
- c) Los disyuntores termo-magnéticos.
- d) Los diodos rectificadores del estado sólido.
- e) Los disipadores de calor de los diodos.
- f) El conector de cinco patas con seguro de torsión.





EXPERIMENTO 3:

Precaución: ¡En este experimento de Laboratorio se manejan altos voltajes! ¡No haga conexión alguna en la energía conectada! Debe desconectarse (poner el interruptor en la posición de apagado) la potencia después de completar cada medición individual.

1. Coloque el Módulo de suministro de potencia EMS 8821 en la consola.
 - a) Cerciórese de que el interruptor está en la posición de apagado (off) y que la perilla de control de salida variable está totalmente girada en sentido contrario a las manecillas del reloj.
 - b) Haga pasar el cable del alimentador a través del orificio en la parte posterior de la consola, y enchúfelo en el conector de cinco patas con seguro de torsión.
 - c) Conecte el otro extremo del cable alimentador a la fuente de 120/220 volts trifásica.
2.
 - a) Ponga el selector del voltímetro en la posición 7-N y conecte la fuente de energía poniendo el interruptor en la posición de encendido (ON).
 - b) Haga girar la perilla de control del autotransformador y observe cómo aumenta el voltaje. Mida y anote el voltaje máximo y el mínimo de salida en CD.



$$V_{CD \text{ mínimo}} = \underline{\hspace{2cm}} \quad V_{CD \text{ máximo}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- c) Baje el voltaje a cero haciendo girar la perilla de control en sentido contrario al de las manecillas del reloj.
3. a) Coloque el selector del voltímetro en la posición 4-N.
b) Haga girar la perilla de control y vea cómo aumenta el voltaje. Mida y anote los voltajes máximo y mínimo de salida en CA.

$$V_{CA \text{ mínimo}} = \underline{\hspace{2cm}} \quad V_{CA \text{ máximo}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- c) reduzca nuevamente el voltaje a cero y desconecte la fuente de energía.
4. Para cada una de las siguientes mediciones:
a) Conecte el medidor de 250 V ca entre las terminales especificadas.
b) Conecte la fuente de alimentación.
c) Mida y anote el voltaje.
d) Desconecte la fuente de alimentación.

Terminales 1 y 2 = $\underline{\hspace{2cm}}$ V_{ca}

Terminales 2 y 3 = $\underline{\hspace{2cm}}$ V_{ca}

Terminales 3 y 1 = $\underline{\hspace{2cm}}$ V_{ca}

Terminales 1 y N = $\underline{\hspace{2cm}}$ V_{ca}

Terminales 2 y N = $\underline{\hspace{2cm}}$ V_{ca}

Terminales 3 y N = $\underline{\hspace{2cm}}$ V_{ca}

5. Ajuste el selector del voltímetro a la posición 8-N.
a) Conecte la fuente de energía.
b) Mida y anote el voltaje.
c) Desconecte la fuente de energía.

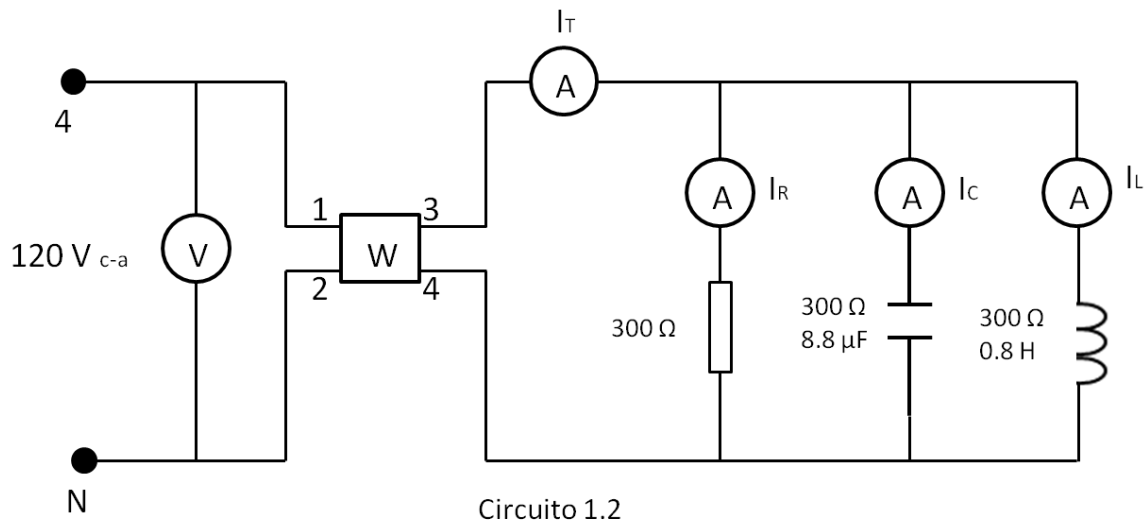
Terminales 8 y N = $\underline{\hspace{2cm}}$ V_{cd}



EXPERIMENTO 4:

Precaución: ¡En este experimento de Laboratorio se manejan altos voltajes! ¡No haga conexión alguna en la energía conectada! Debe desconectarse (poner el interruptor en la posición de apagado) la potencia después de completar cada medición individual.

1. Arme el siguiente circuito (circuito 1.2).



- a) Verifique que las cargas (R, L y C) estén apagadas (el switch que viene por cada carga en los módulos debe de estar hacia abajo).
- b) La perilla de control de la salida variable de la fuente de alimentación debe de estar totalmente girada hacia la izquierda).
- c) Encienda la fuente de alimentación.
- d) Gire lentamente la perilla de control de la salida variable hacia la derecha hasta que el voltímetro marque 120 V c-a.
- e) Para cada de los circuitos, medir la corriente en las cargas, la corriente total del circuito y la potencia real (medida por el vatímetro). Anotar los valores en la tabla (Tabla 1.3).
 - Circuito R.
 - Circuito C.
 - Circuito L.
 - Circuito RC.
 - Circuito RL.
 - Circuito LC.
 - Circuito RLC.



Tabla de valores medidos y calculados para cada uno de los circuitos.

Carga	Valores Medidos						Valores Calculados				
	V	I _T	I _R	I _C	I _L	P	I _T	I _R	I _C	I _L	P
R											
C											
L											
RC											
RL											
LC											
RCL											

Tabla 1.3

PREGUNTAS DE EVALUACIÓN:

1. ¿Qué entiendes por resonancia en un circuito RLC c-a paralelo?

2. Dibuje la forma de ondas de corriente esperado para un circuito RLC.

3. Dibuje el diagrama fasorial de las corrientes de un circuito RLC.



4. Explique por qué en un circuito LC la corriente total del circuito es cero y en un circuito RLC la corriente total del circuito es la corriente que circula por la resistencia.

CONCLUSIONES:

BIBLIOGRAFIA:

SEGURIDAD ELÉCTRICA: EFECTOS DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA SOBRE EL CUERPO HUMANO.

M. VILLARRUBIA

FACULTAD DE FÍSICA. UNIVERSIDAD DE BARCELONA.

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELECTRICO.

WILD Y DEVITO

LIMUSA

CIRCUITOS ELECTRICOS

JOSEPH A. EDMINISTER

MC GRAW HILL



PRACTICA 2

EL TRANSFORMADOR MONOFASICO

1.-OBJETIVO:

Al término de la práctica el alumno:

1. Conocerá el principio de funcionamiento del transformador así como los tipos de transformadores que existen y su construcción.
- 2.- Identificara el núcleo y devanados de un transformador

2.-INTRODUCCIÓN:

De todas las formas de energía conocidas en la actualidad, la que más se emplea en la economía de cualquier nación, es la energía eléctrica.

Sus bases fueron cimentadas a mediados del siglo XIX en 1831 cuando el científico inglés Michael Faraday descubrió el fenómeno de la inducción electromagnética.

A finales del siglo XIX en 1885 el descubrimiento del Transformador hizo que la transmisión de energía eléctrica alterna fuera una alternativa práctica, dando paso al nacimiento de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) como se conocen actualmente.

El transformador es una máquina eléctrica que basada en el principio de inducción electromagnética, transfiere potencia eléctrica de un devanado a otro, estando ambos aislados eléctricamente entre sí, pero enlazados por medio del campo magnético. En este proceso se modifican la tensión eléctrica y la corriente, manteniendo prácticamente constantes la frecuencia y la impedancia.

Está compuesto por un circuito eléctrico y un circuito magnético. En su forma más simple, el circuito eléctrico está integrado por dos bobinas o devanados, aislados eléctricamente, uno que recibe la energía de la fuente y se denomina PRIMARIO. Y otro que entrega la



energía ya modificada y se denomina SECUNDARIO. El circuito magnético lo forma en NÚCLEO de acero laminado que enlaza ambos devanados.

El transformador en su concepción teórica ideal consta de un núcleo con dos devanados que poseen N_1 y N_2 vueltas respectivamente como se muestra en la figura 2.1.

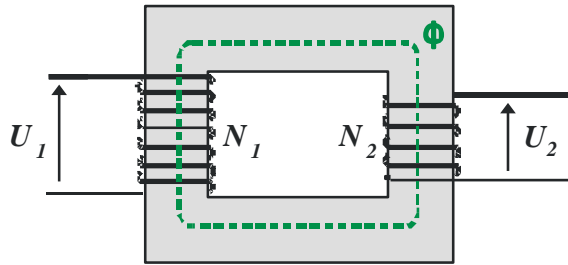


Figura 2.1.

Clasificación de transformadores

1. Operación.- Se refiere a la energía que manejan dentro del sistema eléctrico, los cuales son:

- Transformador de distribución.- Capacidad desde 3 a 500 KVA.
- Transformador de Potencia.- Capacidad superior a 500 KVA.

2. Número de fases.- Se clasifican en:

- Monofásicos. Son conectados a una línea o fase y a un neutro o tierra. Tiene un solo devanado en AT y uno en BT.
- Trifásicos.- Son conectados a 3 líneas o fases y pueden estar o no conectados a un neutro o tierra común. Tienen 3 devanados de AT y 3 en BT. Se simbolizan como $3\emptyset$.

3. Construcción.-De acuerdo a la relación que guardan los devanados respecto al núcleo en la construcción del transformador:

- Tipo Columnas.- Conocido también como tipo núcleo o “core”, el núcleo está formado por un yugo inferior, un yugo superior y 2 o 3 columnas verticales o piernas para 1 o 3 fases, respectivamente. Los devanados son ensamblados concéntricamente en cada una de las piernas.
- Tipo Acorazado.- Conocido también como tipo “Shell”. En esta construcción, los devanados forman 1 o 3 anillos, para 1 o 3 fases respectivamente y el núcleo se ensambla alrededor de ellos, formando 2 o más circuitos magnéticos que envuelven al circuito eléctrico.



4. Enfriamiento.-Dependiendo del medio refrigerante empleado, para su operación, los transformadores utilizan 2 diferentes tipos de enfriamiento: enfriamiento natural y enfriamiento forzado.

El enfriamiento natural se aplica cuando el transformador está alimentando cargas que, aun siendo variables, no rebasaran la capacidad nominal del aparato.

Por otra parte, el enfriamiento forzado permite aumentar la disipación del calor, aumentando a la vez los KVA de salida. Requiere de equipo de control, ya que el arranque y paro de dicho equipo depende de la variación de temperatura del líquido y del devanado, a través de controles que permiten la operación manual o automática.

TIPOS DE NUCLEO

De acuerdo con la relación que guardan los devanados respecto al núcleo en la construcción del transformador, se tienen dos tipos:

Tipo de Columnas:

Conocido también como tipo "Core". En esta construcción, el núcleo proporciona un sólo circuito magnético formado por un yugo superior y 2 ó 3 columnas verticales o piernas para 1 ó 3 fases, respectivamente. Los devanados son ensamblados concéntricamente en cada una de las columnas o piernas del núcleo. De esta manera, el circuito eléctrico envuelve al circuito magnético.

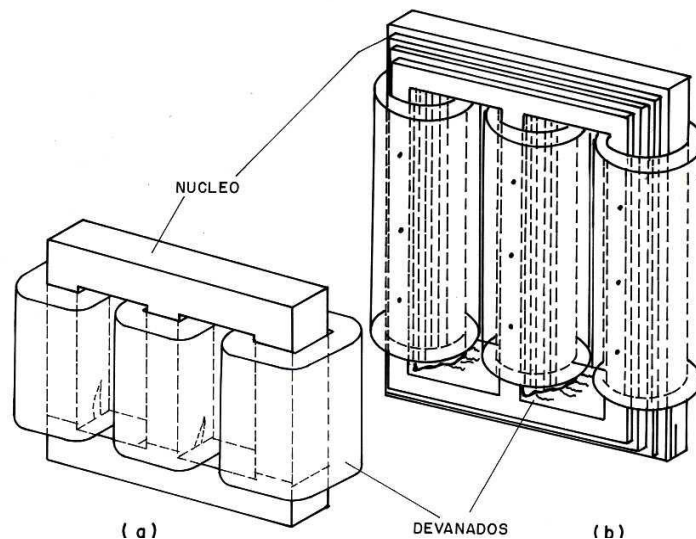


Figura 2.2



Tipo Acorazado:

Conocido como tipo "SHELL". En esta construcción los devanados forman 1 ó 3 anillos, para 1 ó 3 fases respectivamente y el núcleo se ensambla alrededor de ellos, formando 2 ó más circuitos magnéticos que envuelven al circuito eléctrico.

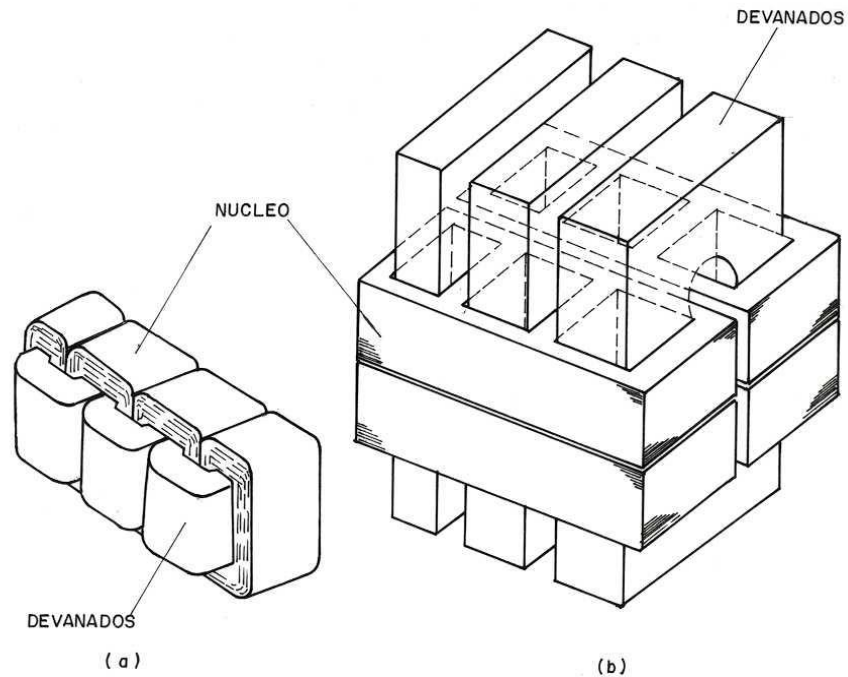


Figura 2.3



3.-CUESTIONARIO PREVIO:

- 1.- ¿Qué es un transformador?
- 2.- ¿Qué es la relación de transformación?
- 3.- ¿Qué es la eficiencia de un transformador?
- 4.- Dibuje el circuito equivalente del transformador.
- 5.- Explique qué es y para qué sirve la corriente de excitación.
- 6.- Explique cómo se realiza la prueba de corto circuito y que parámetros se obtienen del circuito equivalente de esta prueba.
- 7.- Explique cómo se realiza la prueba de circuito abierto y que parámetros se obtienen del circuito equivalente de esta prueba.
- 8.- Describa como se clasifican los transformadores
- 9.- Explique las diferencias entre un transformador tipo columna y un tipo acorazado

4.-MATERIAL

- 1.- módulo de transformador. EMS 8341
- 2.- módulo de fuente de alimentación (120/208 volts de c.a). EMS 8821
- 3.- módulo de medición de c.a (100/100/250/250 V). EMS 8426
- 4.- módulo de medición de c.a (0.5/0.5/0.5 A). EMS 8425
- 5.- cables de conexión. EMS
- 6.- óhmetro.



5.- DESARROLLO

5.1 EXPERIMENTO 1:

¡ATENCIÓN! En esta práctica se manejan altos voltajes, no hacer ninguna conexión cuando la fuente este energizada y siempre des energice la fuente después de cada medición.

1.- Examine la estructura del módulo EMS 8341 de transformador e identifique lo siguiente:

- a) El núcleo del transformador echo de capas delgadas (laminaciones) de acero.
- b) Observe que los devanados del transformador están conectados a las terminales montadas en la bobina del transformador.
- c) Observe que los devanados van conectados a las terminales de conexión montadas a la cara del módulo.

2.- Identifique los tres devanados independientes del transformador marcados en la cara del módulo.

- a) Anote el voltaje nominal de cada uno de los tres devanados:
 - Terminales 1 a 2 = _____ V c.a
 - Terminales 3 a 4 = _____ V c.a
 - Terminales 5 a 6 = _____ V c.a
- b) Escriba el voltaje nominal entre las siguientes terminales de conexión:
 - Terminales 3 a 7 = _____ V c.a
 - Terminales 7 a 8 = _____ V c.a
 - Terminales 8 a 4 = _____ V c.a
 - Terminales 3 a 8 = _____ V c.a
 - Terminales 7 a 4 = _____ V c.a
 - Terminales 5 a 9 = _____ V c.a
 - Terminales 9 a 6 = _____ V c.a



c) Indique la corriente nominal de cada una de las siguientes conexiones.

- Terminales 1 a 2 = _____ V c.a
- Terminales 3 a 4 = _____ V c.a
- Terminales 5 a 6 = _____ V c.a
- Terminales 3 a 7 = _____ V c.a
- Terminales 8 a 4 = _____ V c.a

3.- Utilice la escala más baja del óhmetro, mida y anote la resistencia en c.d de cada uno de los devanados:

- Terminales 1 a 2 = _____ Ω
- Terminales 3 a 4 = _____ Ω
- Terminales 3 a 7 = _____ Ω
- Terminales 7 a 8 = _____ Ω
- Terminales 8 a 4 = _____ Ω
- Terminales 5 a 6 = _____ Ω
- Terminales 5 a 9 = _____ Ω
- Terminales 9 a 6 = _____ Ω

5.2 EXPERIMENTO 2:

1.- Medir los voltajes del secundario sin carga, cuando se aplican 120 V de c.a al devanado primario.

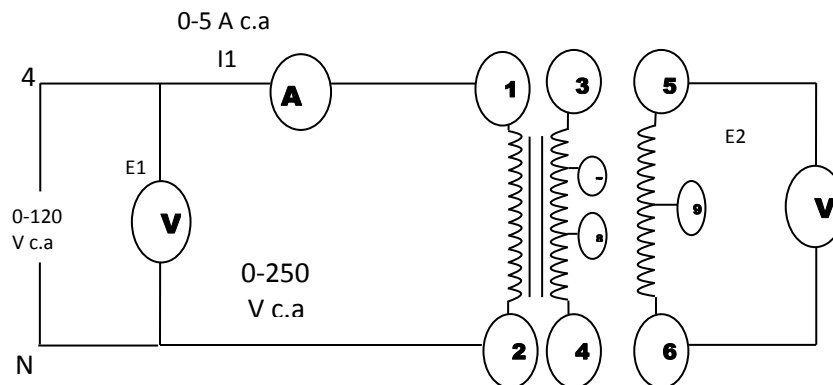


Figura 2.4



- Conecte el circuito de la figura 2.4
- Conectar la fuente de alimentación y ajuste a 120 V de c.a, según lo indique el voltímetro conectado a las terminales 4 y N.
- Mida y anote el voltaje de salida E2.
- Reduzca a 0 el voltaje y desconecte la fuente de alimentación
- Repita los pasos b, c y d midiendo el voltaje de salida para los siguientes devanados:

- Devanado 1 a 2 = _____ V c.a
- Devanado 3 a 4 = _____ V c.a
- Devanado 5 a 6 = _____ V c.a
- Devanado 3 a 7 = _____ V c.a
- Devanado 7 a 8 = _____ V c.a
- Devanado 8 a 4 = _____ V c.a
- Devanado 5 a 9 = _____ V c.a
- Devanado 9 a 6 = _____ V c.a

2.- ¿concuerdan los voltajes medidos con los voltajes nominales? ¿Por qué?

3.- ¿puede medir el valor de la corriente de excitación? ¿Por qué?

5.3 EXPERIMENTO 3:

1.- conecte el circuito que aparece en la figura 2.5. Observe que el medidor de corriente I_2 pone en corto circuito al devanado 5 y 6

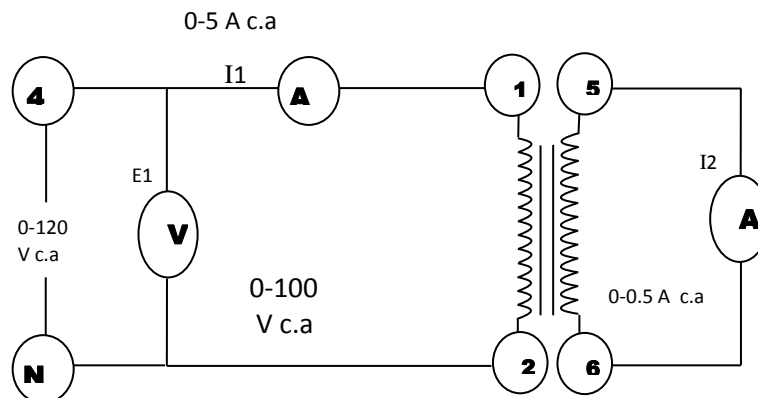


Figura 2.5



2.- Conecte la fuente de alimentación y aumente gradualmente el voltaje hasta que la corriente de corto circuito I_2 sea 0.4 A de c.a

3.- mida y anote I_1 y E_1

$$I_1 = \text{_____ A c.a}$$

$$E_1 = \text{_____ V c.a}$$

$$I_2 = \text{_____ A c.a}$$

4.- reduzca a 0 el voltaje y desconecte la fuente de alimentación.

5.- calcule la relación de corriente

$$\frac{I_1}{I_2} = \text{_____}$$

6.- ¿es igual la relación de corrientes a la relación de vueltas? Explique porque.

5.4 EXPERIMENTO 4:

A continuación determinara el efecto de saturación del núcleo en la corriente de excitación de un transformador.

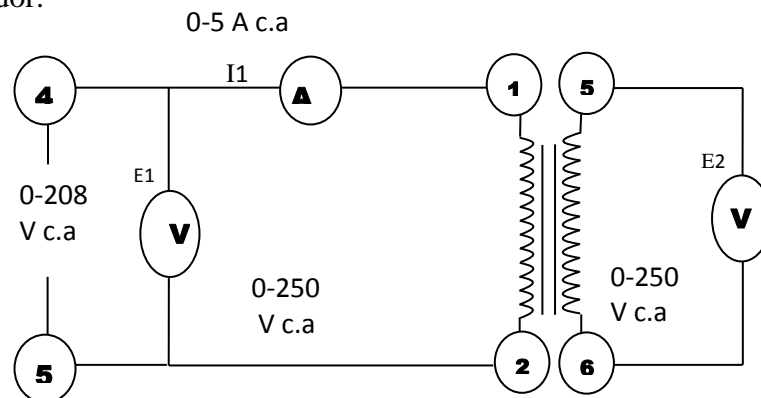


Figura 2.6

1.- conecte el circuito que se ilustra en la figura 2.6. Observe que las terminales 4 y 5 de la fuente de alimentación se van a utilizar ahora. Estas terminales proporcionan un voltaje variable de 0 a 208 volts de c.a.



2.- conecte la fuente de alimentación y ajústela a 25 V c.a. tomando esta lectura en el volt metro conectado a las terminales 4 y 5 de la fuente de alimentación.

3.- mida y anote la corriente de excitación I_1 y el voltaje de salida E_2 para cada voltaje de entrada que se indica el la tabla 2.1.

4.- reduzca el voltaje a 0 y desconecte la fuente de alimentación.

E_1 V c.a.	I_1 mA c.a.	E_2 V c.a.
25		
50		
75		
100		
125		
150		
175		
200		

Tabla 2.1

PREGUNTAS DE EVALUACIÓN:

1. Da una breve explicación del funcionamiento del transformador.

2. Explica las pruebas de corto circuito y circuito abierto y su función.



3. ¿Cuáles son las pérdidas que ocurren dentro de un transformador real?

4. ¿Explica que es la histéresis?

5. ¿Qué es el flujo disperso?

CONCLUSIONES:



BIBLIOGRAFÍA:

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELECTRICO.
WILD Y DEVITO
LIMUSA

MÁQUINAS ELÉCTRICAS, TRANSFORMADORES Y CONTROLES.
HAROLD W, GRINGRICH
PRENTICE HALL

MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
STEPHEN J. CHAPMAN.
MMC GRAW HILL



PRACTICA 3

POLARIDAD DEL TRANSFORMADOR Y REGULACIÓN DE VOLTAJE.

OBJETIVOS:

Al término de la práctica el alumno:

1. Determinará la polaridad de los devanados del transformador.
2. Aprenderá cómo se conectan los devanados del transformador en serie aditiva y en serie substractiva.
3. Estudiará la regulación de voltaje del transformador.
4. Estudiará la regulación del transformador con cargas inductivas y capacitivas.

INTRODUCCIÓN:

Polaridad del transformador.

Cuando se energiza el devanado primario de un transformador por medio de una fuente de c-a, se establece un flujo magnético alterno en el núcleo del transformador. Este flujo alterno concatena las vueltas de cada devanado del transformador induciendo así voltajes de c-a en ellos.

Por definición, un voltaje en c-a cambia continuamente su valor y su polaridad, por lo tanto, el voltaje aplicado al devanado primario (terminales 1 y 2) cambia constante la polaridad de la terminal 1 con respecto a la terminal 2. Las terminales 1 y 2 no pueden tener jamás la misma polaridad. La terminal 1 debe ser siempre negativa o positiva con respecto a la terminal 2. Por consiguiente, el flujo magnético alterno induce voltajes en todos los demás devanados, haciendo que aparezca un voltaje de c-a en cada par de terminales. Las terminales de cada devanado también cambian de polaridad la una en relación a la otra.

Cuando se habla de la “polaridad” de los devanados de un transformador, se trata de identificar todas las terminales que tienen la misma polaridad (positiva o negativa) en el mismo instante. Por lo común se utilizan “marcas de polaridad” para identificar estas terminales. Estas marcas pueden ser puntos negros, cruces, números, letras o cualquier otro signo que indique cuáles terminales tienen la misma polaridad.



Por ejemplo, en la figura 3.1 las marcas de polaridad son puntos negros que indican que en un instante dado, 1 es positivo con respecto a 2, 3 es positivo con respecto a 4, 6 es positivo con respecto a 5, etc.

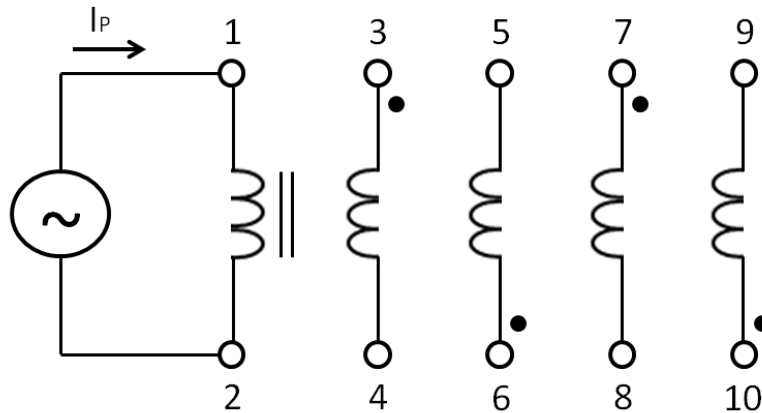


Figura 3.1

Es conveniente notar que una terminal no puede ser positiva por sí sola, sólo puede serlo con respecto a otra terminal.

Cuando las baterías se conectan en serie para obtener un mayor voltaje de salida, la terminal positiva de una de las baterías se debe conectar con la terminal negativa de la siguiente. Cuando se conectan de esta manera, los voltajes individuales se suman. De igual manera, si los devanados del transformador se conectan en serie para que sus voltajes individuales se sumen, la terminal con la “marca de polaridad” de un devanado se debe conectar a la terminal “no marcada” del otro devanado.

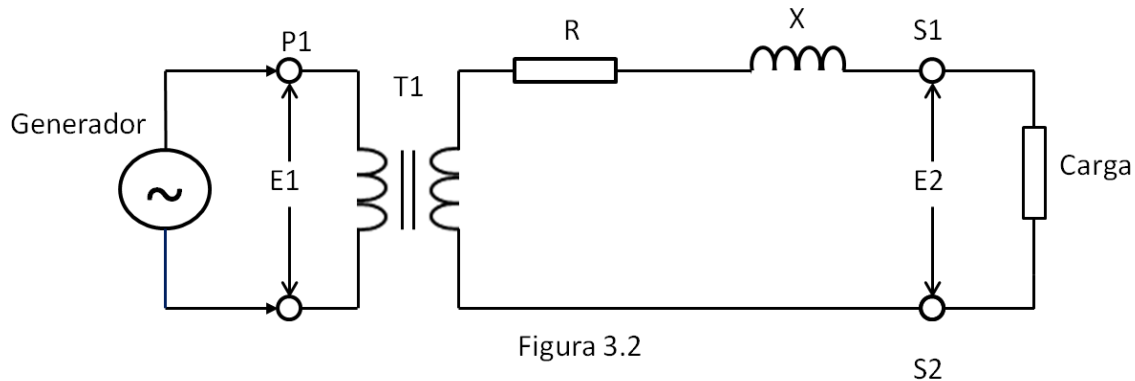
Regulación de voltaje.

La carga de un gran transformador de potencia, en una subestación, usualmente varía desde un valor muy pequeño en las primeras horas de la mañana, hasta valores muy elevados durante los períodos de mayor actividad industrial y comercial. El voltaje secundario del transformador variará un poco con la carga y, puesto que los motores, las lámparas incandescentes y los dispositivos de calefacción son muy sensibles a los cambios en el voltaje, la regulación del transformador tiene una importancia vital. El voltaje secundario depende también de si el factor de potencia de la carga es adelantado, atrasado o es la unidad. Por lo tanto, se debe conocer la forma en que el transformador se comportará cuando se le somete a una carga capacitiva, inductiva o resistiva.



En un transformador ideal, sus devanados no tendrían ninguna resistencia y no requeriría ninguna potencia reactiva para establecer el campo magnético en su interior. Este transformador tendría una regulación perfecta en todas las condiciones de carga y el voltaje del devanado secundario se mantendría constante. Sin embargo, los transformadores reales tienen cierta resistencia de devanado y requieren una potencia reactiva para producir sus campos magnéticos. En consecuencia, los devanados primario y secundario poseen una resistencia R y una reactancia X .

La figura 3.2 muestra el circuito equivalente de un transformador de potencia con una relación de vueltas de 1 a 1. Las terminales reales del transformador son P_1 P_2 en el lado primario y S_1 S_2 en el secundario.



Teniendo en cuenta, que se trata de un transformador ideal en serie que tiene una impedancia R y una reactancia X . Si el voltaje del primario se mantiene constante, el voltaje del secundario variará con la carga debido a R y X .

CUESTIONARIO PREVIO:

1. ¿Qué entiendes por polaridad de un transformador?
2. ¿Cómo se conectarían dos baterías de 5 VCD para obtener un voltaje de 10VCD?
3. ¿Cómo se comporta la polaridad en el voltaje de CA?
4. ¿Qué es la regulación de voltaje en un transformador?



5. ¿Cuál es el valor de la regulación de voltaje en un transformador ideal? ¿Por qué?

MATERIAL:

- | | |
|--|----------|
| 1. Módulo de fuente de alimentación (0-120 V c-d, 0-120 V c-a) | EMS 8821 |
| 2. Dos módulo de medición de c-a 8250/250/250V) | EMS 8426 |
| 3. Módulo de medición de c-d (20/200v) | EMS 8412 |
| 4. Módulo de transformador | EMS 8341 |
| 5. Módulo de medición de c-a (0.5/50 A) | EMS 8425 |
| 6. Módulo de resistencia | EMS 8311 |
| 7. Módulo de inductancia | EMS 8321 |
| 8. Módulo de capacitancia | EMS 8331 |
| 9. Cables de conexión. | |

DESARROLLO:

Precaución: ¡En estos experimentos de Laboratorio se manejan altos voltajes! ¡No haga conexión alguna en la energía conectada! Debe desconectarse (poner el interruptor en la posición de apagado) la potencia después de completar cada medición individual.

EXPERIMENTO 1:

1. Conecte el medidor de 0-20 V c-d a la salida variable de la fuente de alimentación (terminal 7 y N).
2. Conecte la fuente de alimentación y ajústela lentamente a un voltaje de 10 V c-d.
3. Sin tocar la perilla de control del voltaje, desconecte la fuente de energía y desconecte el medidor.
4. Arme el siguiente circuito (figura 3.3).

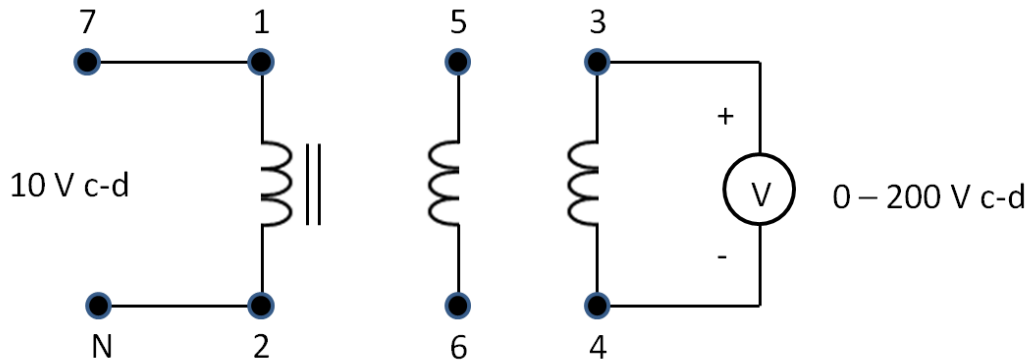


Figura 3.3

5. Observe la deflexión de la aguja del voltímetro de c-d en el momento en que se cierra el interruptor de la fuente de alimentación. Si la aguja del voltímetro se desvía momentáneamente a la derecha, las terminales 1 y 3 tienen la misma marca de polaridad (La terminal 1 se conecta al lado positivo de la fuente de alimentación de c-d, y la terminal 3 al polo positivo del voltímetro).

¿Cuáles terminales son positivas en los devanados 1 a 2 y 3 a 4? _____

6. Desconecte el voltímetro de c-d del devanado 3 a 4 y conéctelo al devanado 5 a 6. Repita la misma operación.

¿Cuáles terminales son positivas en los devanados 1 a 2 y 5 a 6? _____

7. Vuelva e voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.



EXPERIMENTO 2:

En este experimento se conectarán en serie dos devanados de un transformador.

1. Arme el siguiente circuito (figura 3.4).

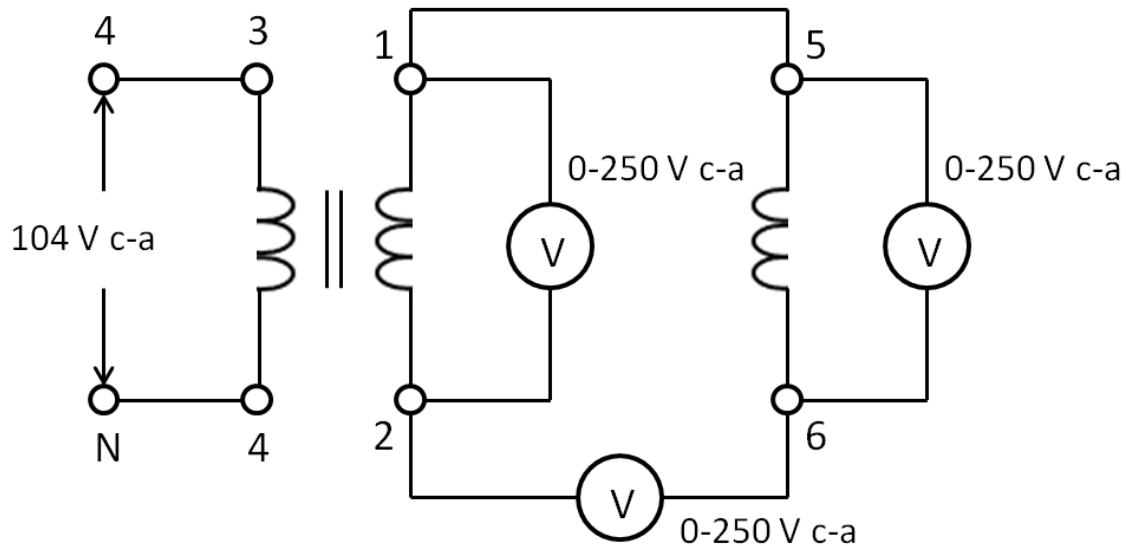


Figura 3.4

2. Conecte la fuente de alimentación y ajústela exactamente a 104 V c-a.
3. Mida y anote los valores en las terminales:

$$E_{1-2} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V c-a}$$

$$E_{5-6} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V c-a}$$

$$E_{2-6} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V c-a}$$

4. Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.



EXPERIMENTO 3:

1. Arme el siguiente circuito (figura 3.5).

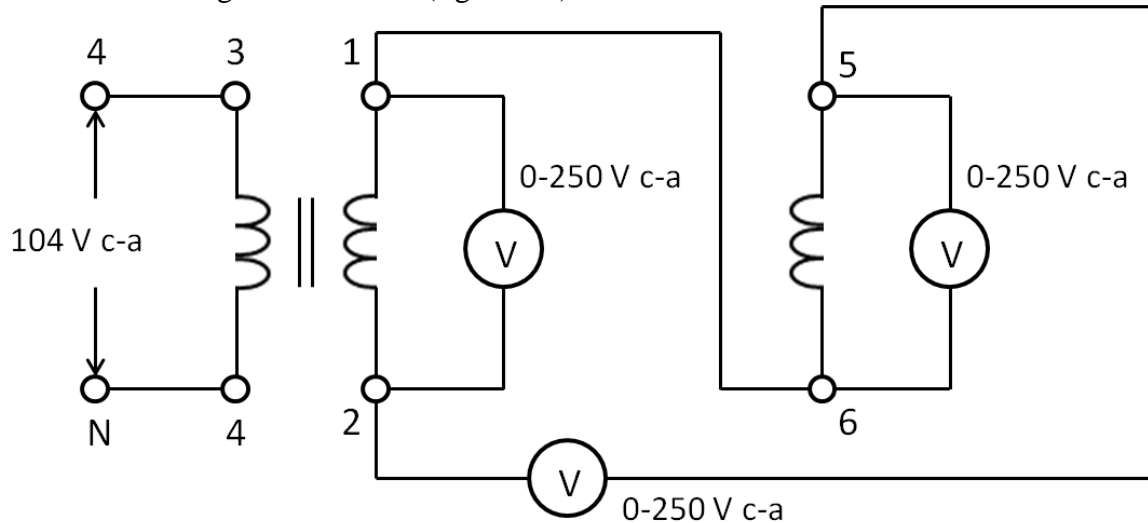


Figura 3.5

2. Conecte la fuente de alimentación y ajústela exactamente a 104 V c-a.
3. Mida y anote los valores en las terminales:

$$E_{1-2} = \text{_____} \text{ V c-a}$$

$$E_{5-6} = \text{_____} \text{ V c-a}$$

$$E_{2-5} = \text{_____} \text{ V c-a}$$

4. Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.



EXPERIMENTO 4:

1. Conecte el circuito ilustrado en la figura 3.6, utilizando para Z_L una carga resistiva (módulo EMS 8311).

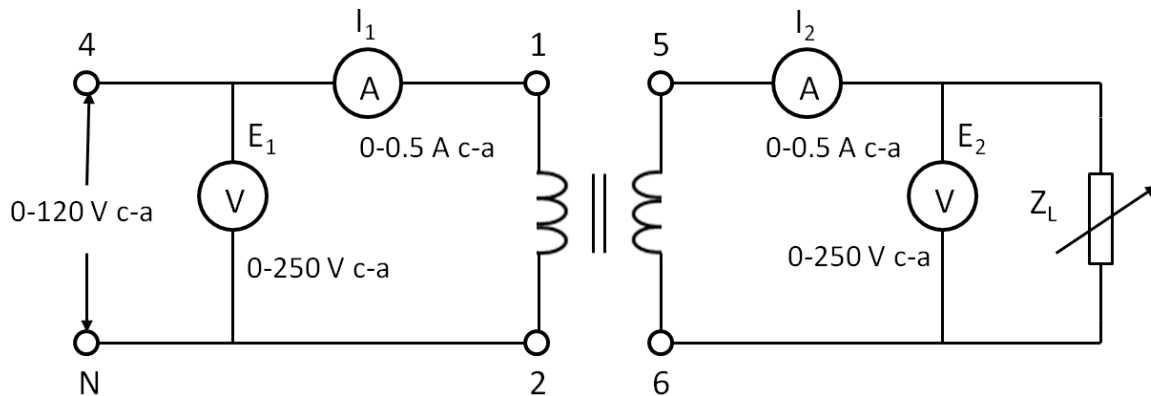


Figura 3.6

2. Abra todos los interruptores del Módulo de resistencias para tener una carga igual a cero.
3. Conecte la fuente de alimentación y ajústela exactamente a 120 V c-a (E_1).
4. Mida y anote en la tabla 3.1, la corriente de entrada I_1 , la corriente de salida I_2 y el voltaje de salida E_2 .
5. Ajuste la resistencia de carga Z_L a 1200 Ohms. Cerciórese de que el voltaje de entrada se mantiene exactamente a 120 V c-a. Mida y anote I_1 , I_2 y E_2 .
6. Realice las mismas mediciones para cada valor de carga indicado en la tabla 3.1.
7. Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.

Z_L (ohms)	E_1 (V c-a)	I_1 (mA c-a)	E_2 (V c-a)	I_2 (mA c-a)
∞				
1200				
600				
400				
300				
240				

Tabla 3.1

8. Cambie el módulo de resistencias por el módulo de inductancias (EMS 8321).
9. Abra todos los interruptores del Módulo de inductancias para tener una carga igual a cero.



10. Repita los pasos del 3 al 7, anote los valores medidos en la tabla 3.2.

Z_L (ohms)	E_1 (V c-a)	I_1 (mA c-a)	E_2 (V c-a)	I_2 (mA c-a)
∞				
1200				
600				
400				
300				
240				

Tabla 3.2

11. Cambie el módulo de inductancias por el módulo de capacitancias (EMS 8331).
12. Abra todos los interruptores del Módulo de capacitancias para tener una carga igual a cero.
13. Repita los pasos del 3 al 7, anote los valores medidos en la tabla 3.3.

Z_L (ohms)	E_1 (V c-a)	I_1 (mA c-a)	E_2 (V c-a)	I_2 (mA c-a)
∞				
1200				
600				
400				
300				
240				

Tabla 3.3

A continuación trazará la curva de regulación del voltaje de salida E_2 en función de la corriente de salida I_2 , para cada tipo de carga del transformador.

14. En la gráfica de la figura 3.7, marque los valores de E_2 obtenidos por cada valor de I_2 para la carga resistiva (tabla 3.1).
15. Trace la curva continua que pase por los puntos marcados. Identifique esta curva como "carga resistiva).
16. Repita el procedimiento anterior para las cargas inductivas (tabla 3.2) y las capacitivas (3.3).

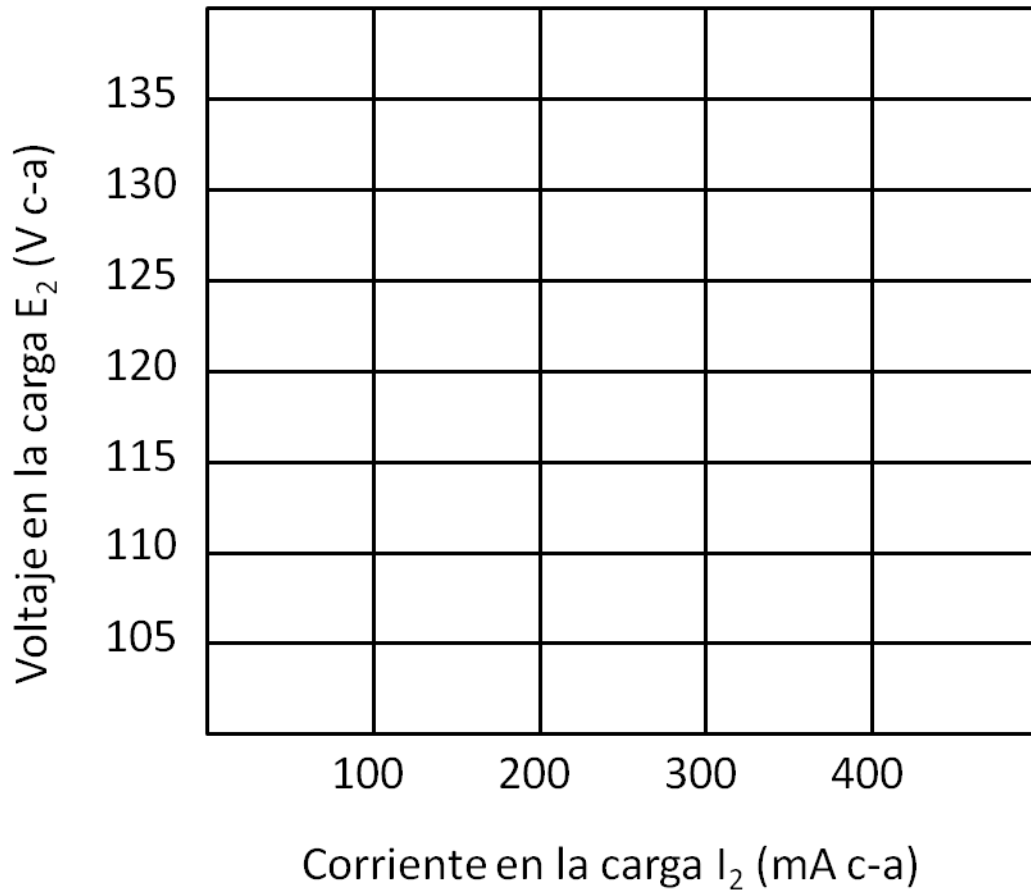


Figura 3.7

PREGUNTAS DE EVALUACIÓN:

1. Suponga que se cuenta con una fuente de alimentación de 120 v c-a y que todos los devanados del módulo de transformador (EMS 8341) desarrollan su voltaje nominal. ¿Cómo se conectarían los devanados para obtener los siguientes voltajes?
 - a) 240 volts
 - b) 88 volts
 - c) 180 volts
 - d) 92 volts



2. Explique por qué el voltaje de salida aumenta cuando se utiliza una carga capacitiva.

3. Un transformador tiene una impedancia muy baja (R y X pequeñas). ¿Qué efecto tiene esto en la regulación? ¿Qué efecto tiene esto en la corriente de corto circuito?

4. ¿Es aproximadamente igual el calentamiento de un transformador cuando la carga es resistiva, inductiva o capacitiva, para el mismo valor nominal de VA? ¿Por qué?

CONCLUSIONES



BIBLIOGRAFÍA:

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELECTRICO.
WILD Y DEVITO
LIMUSA

MÁQUINAS ELÉCTRICAS
STEPHEN J. CHAPMAN
MC GRAW HILL

MÁQUINAS ELÉCTRICAS, TRANSFORMADORES Y CONTROLES.
HAROLD W. GRINGRICH
PRENTICE HALL



PRACTICA 4

EL TRANSFORMADOR TRIFASICO.

1.-OBJETIVO:

Al término de la práctica el alumno:

6. Conocerá los tipos de conexiones de un transformador trifásico.
7. Entenderá los conceptos de desplazamiento angular y diagrama fasorial.
8. Cono
9. Conocerá las pruebas que se aplican a un transformador antes de su instalación.

2.-INTRODUCCIÓN:

Dependiendo del propósito de la instalación, un transformador se puede conectar de distintas formas. En el caso de los transformadores monofásicos, hay distintas formas de conectarlos a la fuente de alimentación y a la carga. En los transformadores trifásicos la polaridad correspondiente a cada fase se puede definir y determinar del mismo modo que para los transformadores monofásicos. Como se sabe, la principal finalidad de la determinación de la polaridad de un transformador es para su conexión en paralelo con otro, para el caso de un transformador trifásico se tiene la situación ilustrada en la figura 4.1, donde se percibe fácilmente que cuando se desea conectar el transformador en paralelo con otro, esto se hace conectando las fases 1 de ambos, 2 y 3, así como se hace para los monofásicos

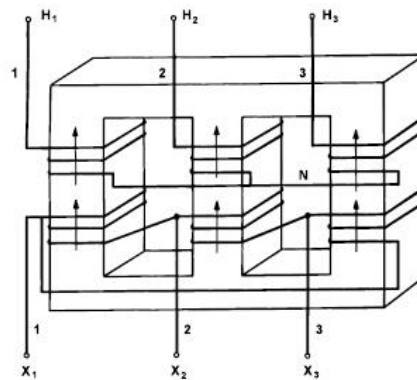


Figura 4.1 polaridad de un transformador trifásico.



El concepto de polaridad.

La polaridad de los transformadores indica el sentido relativo instantáneo del flujo de corriente en los terminales de alta tensión con respecto a la dirección del flujo de corriente en los terminales de baja tensión. La polaridad de un transformador de distribución monofásico puede ser aditiva o sustractiva.

Una simple prueba para determinar la polaridad de un transformador es conectar dos bornes adyacentes de los devanados de alta y baja tensión y aplicar un voltaje reducido a cualquiera de los devanados.

Dado que es importante, cuando dos o más transformadores se conectan juntos, conocer la dirección relativa del voltaje de cada transformador, se han establecido ciertas convenciones para designar la llamada *polaridad de un transformador*.

La prueba de polaridad.

Cuando en un transformador no está especificada la polaridad o se desconoce, se puede determinar por una simple medición de voltaje como se indica a continuación:

1. Hacer una conexión entre las terminales de alto voltaje y bajo voltaje del lado derecho cuando se ve al transformador desde el lado de las boquillas y de bajo voltaje.
2. Aplicar un voltaje bajo, por ejemplo 120 volts a las terminales de alto voltaje y medir este voltaje con un voltímetro.
3. Medir el voltaje de la terminal del lado izquierdo del lado de alto voltaje a la terminal del lado izquierdo de bajo voltaje.

Si el voltaje anterior es menor que el voltaje a través de las terminales de alto voltaje, el transformador tiene polaridad sustractiva. Si este voltaje es mayor, entonces la polaridad es aditiva.

Nomenclatura de los transformadores.

Está establecido como estándar que las entradas a la bobina primaria del transformador se utilicen las siguientes letras:

H1, H2 para el caso de un transformador monofásico.
H1, H2, H3 para el caso de un transformador trifásico.

Y en las salidas de la bobina secundaria se establece la siguiente nomenclatura:

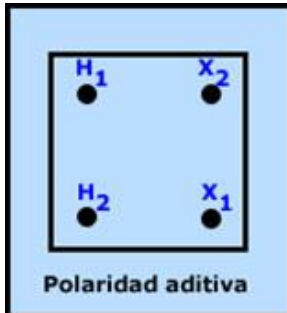
X1, X2 para el caso de un transformador monofásico.
X1, X2, X3 para el caso de un transformador trifásico.



Polaridad en un transformador monofásico.

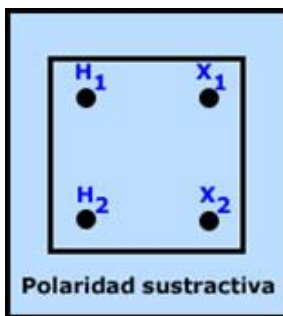
Cuando se ubica un transformador en el tanque que lo tiene que contener se puede colocar de dos formas diferentes: aditiva y sustractiva.

Polaridad aditiva.



En el caso de polaridad aditiva, es cuando H_1 coincide diagonalmente con X_1 . La mayoría de transformadores disponen de polaridad aditiva.

Polaridad sustractiva.



Hablamos de polaridad sustractiva cuando el terminal H_1 está colocado de forma adyacente al terminal de salida X_1 .

Existen pocos transformadores con este tipo de polaridad.

Los transformadores mayores de 200 KVA son de polaridad sustractiva

Conexión de los transformadores.

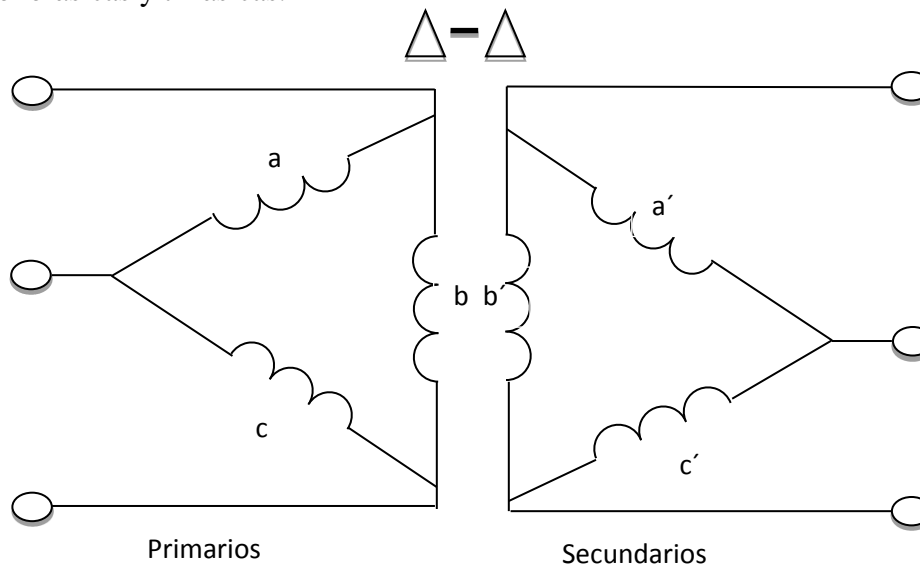
La transformación trifásica se puede realizar por medio de tres transformadores monofásicos en conexión trifásica o por medio de transformadores trifásicos. Los métodos de conexión de los devanados par a la conexión trifásica son los mismos, ya sea que se usen tres devanados en un transformador trifásico, o bien tres transformadores monofásicos por



separado, en conexión trifásica. Las conexiones trifásicas más comunes son las denominadas *delta* y *estrella*.

Conexión delta-delta.

Esta conexión se usa con frecuencia para alimentar cargas de alumbrado pequeñas y cargas trifásicas simultáneamente. Para esto se puede localizar una derivación o Tap en el punto medio del devanado secundario de uno de los transformadores conectándose a tierra y se conecta también al neutro del secundario. De esta manera, las cargas monofásicas se conectan entre los conductores de fase y neutro, por lo tanto, el transformador con la derivación en el punto medio toma dos terceras partes de la carga monofásica y una tercera parte de la carga trifásica. Los otros dos transformadores cada uno toma un tercio de las cargas monofásicas y trifásicas.



Conexión estrella-delta.

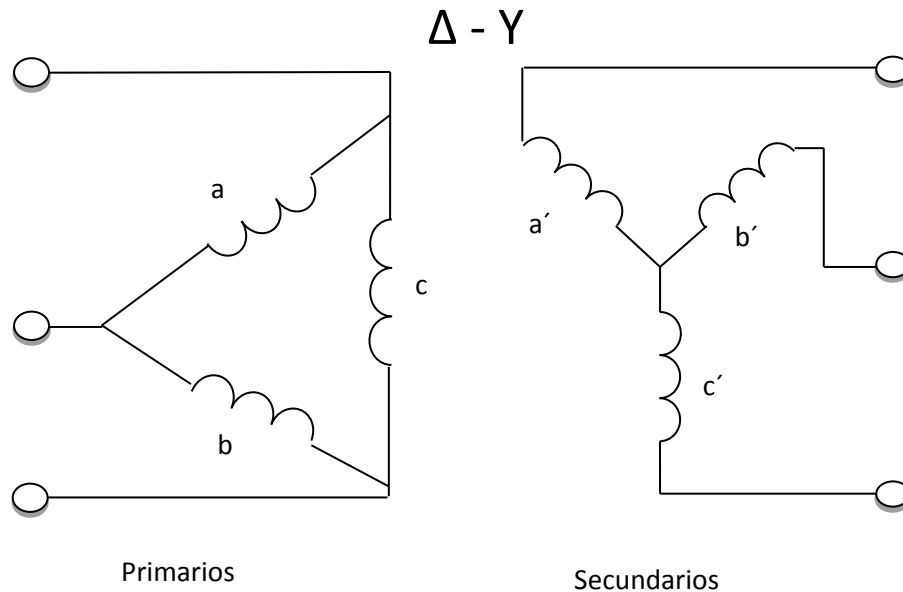
Esta conexión se usa con frecuencia para alimentar cargas trifásicas grandes de un sistema trifásico de alimentación conectado en estrella. Tiene la limitante de que para alimentar cargas monofásicas y trifásicas en forma simultánea, no dispone del neutro.

Por otra parte, tiene la ventaja relativa de que la impedancia de los tres transformadores no necesita ser la misma en esta conexión.



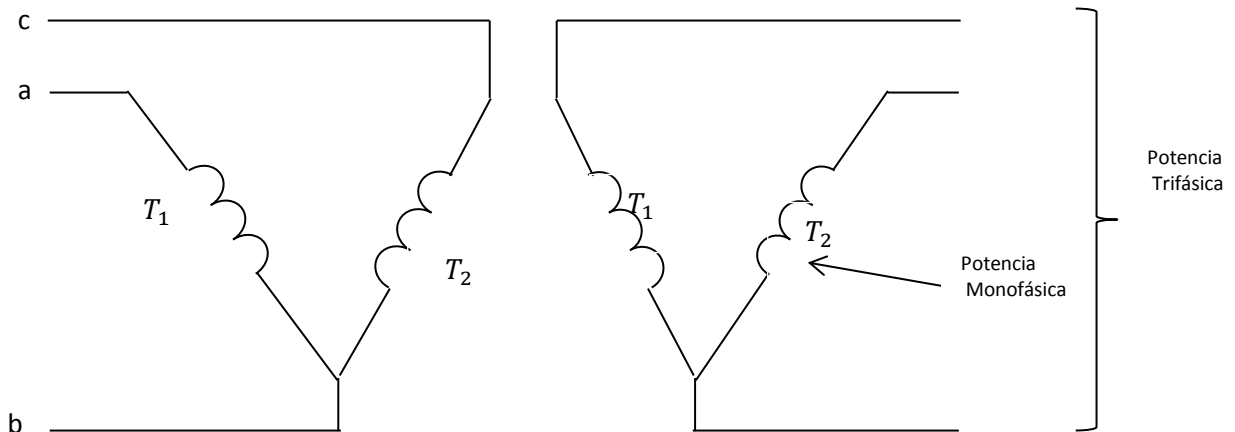
Conexión delta-estrella.

Esta conexión optimiza la elevación de voltaje de línea a línea y comúnmente se utiliza en el extremo del generador de una línea para transformación de mediano a alto voltaje para transmisión. Los devanados del lado de alta presentan menores esfuerzos en su aislamiento que los que ocurrirían en un secundario en delta para el mismo voltaje de línea. Para transformación de mediano a bajo voltaje, esta conexión es útil en aplicaciones que requieren potencia tanto trifásica como monofásica.



Conexión delta abierta-delta abierta.

La conexión delta-delta representa en cierto modo la más flexible de las conexiones trifásicas. Una de las ventajas de esta conexión, es que si uno de los transformadores se daña o se retira de servicio, los otros dos pueden continuar operando en la llamada conexión delta-abierta o V. Con esta conexión se suministra aproximadamente el 58% de la potencia que entrega un banco en conexión delta-delta. En la conexión delta abierta, las impedancias de los transformadores no necesitan ser iguales necesariamente, aunque esta situación es preferible cuando es necesario cerrar la delta con un tercer transformador. La conexión delta abierta, se usa normalmente para condiciones de emergencia, cuando en una conexión delta-delta uno de los transformadores del banco se desconecta por alguna razón. En forma similar a la conexión delta-delta, del punto medio del secundario de uno de los transformadores se puede tomar una derivación para alimentar pequeñas cargas de alumbrado o bien otros tipos de cargas.



Pruebas a transformadores.

Las pruebas se hacen en los transformadores y sus accesorios por distintas razones, durante su fabricación, para verificar la condición de sus componentes, durante la entrega, durante su operación como parte del mantenimiento, después de su reparación, etc.

Algunas de las pruebas que se hacen en los transformadores se consideran como básicas y algunas otras varían de acuerdo a la condición individual de los transformadores y pueden cambiar de acuerdo al tipo de transformador, por lo que existen distintas formas de clasificación de las pruebas a transformadores, por ejemplo algunos las clasifican en prueba de baja tensión y prueba de alta tensión. También se pueden agrupar como pruebas preliminares, intermedias y de verificación.

Las pruebas preliminares se realizan cuando un transformador se ha puesto fuera de servicio para mantenimiento programado o para revisión programada o bien ha tenido alguna falla. Las pruebas se realizan antes de abrir el transformador y tienen el propósito general de encontrar el tipo y naturaleza de la falla. Las llamadas pruebas preliminares incluyen:

- Prueba al aceite del transformador.
- Medición de la resistencia de aislamiento de los devanados.
- Medición de la resistencia óhmica de los devanados.
- Determinación de las características del aislamiento.

Las llamadas pruebas intermedias, como su nombre lo indican se realizan durante el transcurso de una reparación o bien en las etapas intermedias de la fabricación, cuando el transformador está en proceso de armado o bien desarmado y el tipo de pruebas depende del propósito de la reparación o la etapa de fabricación, por lo general se hacen cuando las bobinas no han sido montadas o desmontadas y son principalmente las siguientes:



- Medición de la resistencia de aislamiento de tornillos y herrajes contra el núcleo.
- Prueba de la resistencia de aislamiento de tornillos y herrajes por voltaje aplicado.
- Prueba de las boquillas por medio de voltaje aplicado.

Cuando se han desmontado las bobinas durante un trabajo de reparación, entonces las pruebas se incrementan. Las pruebas finales se hacen sobre transformadores terminados de fabricación o armados totalmente después de una reparación e incluyen las siguientes:

- Prueba al aceite del transformador.
- Medición de la resistencia de aislamiento.
- Prueba de relación de transformación.
- Determinación del desplazamiento de fase de los grupos de bobinas.
- Determinación de las características del aislamiento.
- Prueba del aislamiento por voltaje aplicado.
- Prueba para la determinación de las pérdidas en vacío y en cortocircuito (determinación de impedancia).
- Prueba del aislamiento entre espiras por voltaje inducido.
- Medición de la corriente de vacío y la corriente de excitación.

El orden de las pruebas no es necesariamente el mencionado anteriormente. Y de hecho existen normas nacionales e internacionales que recomiendan qué pruebas y en qué orden se deben realizar, así como cuando se deben efectuar.

3.-CUESTIONARIO PREVIO:

1. ¿Qué es la polaridad en un transformador?
2. En qué consiste la prueba de polaridad para un transformador.
3. Mencione las conexiones que existen para los transformadores trifásicos.
4. ¿Qué es y para que se ocupa el diagrama fasorial?
5. ¿Qué es el desplazamiento angular?
6. Dibuje el circuito equivalente de un transformador real y su diagrama fasorial.
7. Investigue cuál es la tabla IEC para conexiones trifásicas de empleo general.



MATERIAL:

1. Módulo de fuente de alimentación (0-120/208V 3 fases) EMS8821
2. Módulo de medición de c-a (250/250/250V) EMS8426
3. Tres Módulos de transformadores EMS8941
4. Cables de Conexión
5. Transformador trifásico sumergido en aceite.
6. Caimanes

DESARROLLO:

Experimento 1: conexiones de transformadores.

Advertencia: ¡En este Experimento de Laboratorio se manejan altos voltajes! ¡No haga ninguna conexión cuando la fuente esté conectada! ¡La fuente debe desconectarse después de hacer cada medición!

1. El circuito que aparece en la figura 5.1 tiene tres transformadores conectados en una configuración estrella-estrella.
 - a. Calcule los voltajes esperados ya note los valores en los espacios correspondientes.
 - b. Conecte el circuito tal y como se indica.
 - c. Conecte la fuente de alimentación y aumente la salida a un voltaje de línea a línea de 120V c-a.
 - d. Mida los voltajes indicados y anote los valores en los espacios correspondientes.
 - e. Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación. Repita los pasos (c), (d) y (e), hasta que haya medido todos los voltajes indicados.

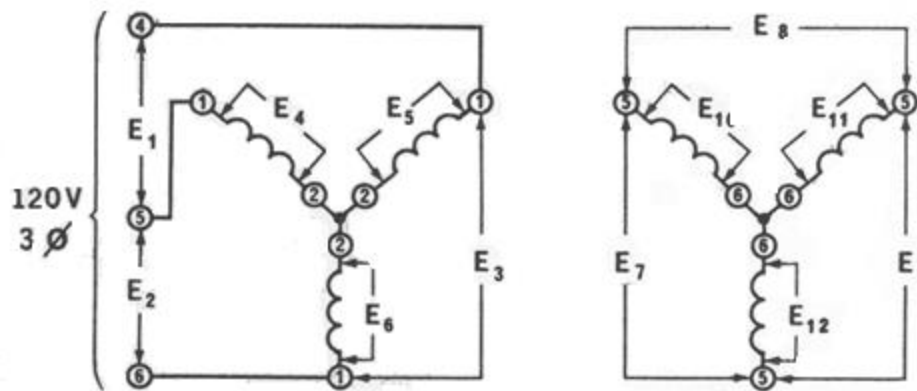


Figura 5.1



Valores Calculados:

$$E_1 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_5 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_9 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_2 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_6 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_{10} = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_3 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_7 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_{11} = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_4 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_8 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_{12} = \underline{\hspace{2cm}} V$$

Valores Medidos:

$$E_1 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_5 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_9 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_2 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_6 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_{10} = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_3 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_7 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_{11} = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_4 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_8 = \underline{\hspace{2cm}} V$$

$$E_{12} = \underline{\hspace{2cm}} V$$

2. El circuito que aparece en la figura 5.2 tiene tres transformadores conectados en una configuración delta-delta.
 - a. Calcule los voltajes esperados y anote los valores en los espacios correspondientes.
 - b. Conecte el circuito como se indica. Abra el secundario conectando en delta en el punto "A" y conecte el voltímetro a través de la delta abierta.
 - c. Conecte la fuente de alimentación y aumente lentamente el voltaje de salida. El voltímetro conectado a la delta abierta, en el punto "A", no indicará ningún voltaje apreciable si las conexiones en delta tienen la fase debida.
 - d. Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación.
 - e. Desconecte el voltímetro y cierre el circuito de la delta en el punto "A".
 - f. Conecte la fuente de alimentación y aumente lentamente la salida hasta obtener un voltaje de línea a línea de 120V c-a.
 - g. Mida los voltajes indicados y anote los valores en los espacios correspondientes.
 - h. Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación. Repita los pasos (f), (g) y (h), hasta que haya medido todos los voltajes.

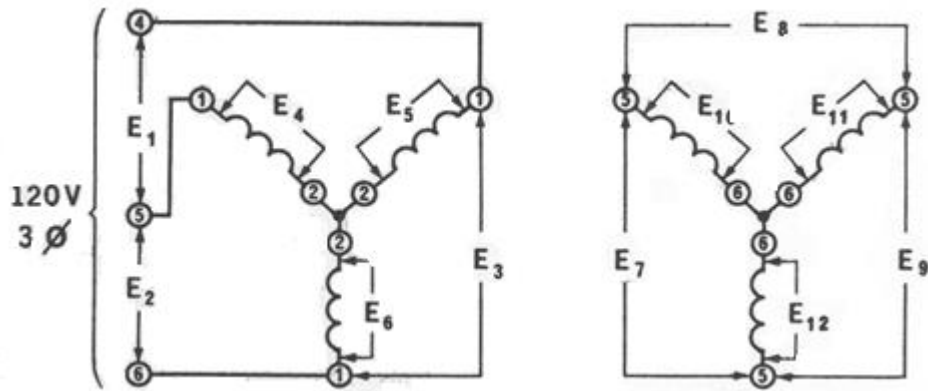


Figura 5.2

Valores Calculados:

$E_1 = \text{_____} V$

$E_3 = \text{_____} V$

$E_5 = \text{_____} V$

$E_2 = \text{_____} V$

$E_4 = \text{_____} V$

$E_6 = \text{_____} V$

Valores Medidos:

$E_1 = \text{_____} V$

$E_3 = \text{_____} V$

$E_5 = \text{_____} V$

$E_2 = \text{_____} V$

$E_4 = \text{_____} V$

$E_6 = \text{_____} V$

3. El circuito de la figura 5.3 tiene dos transformadores conectados en una configuración delta-estrella.
 - a. Calcule los voltajes esperados y anote los valores en los espacios correspondientes.
 - b. Conecte el circuito tal y como se indica.
 - c. Conecte la fuente de alimentación y aumente lentamente la salida hasta tener un voltaje de línea a línea de 90 V c-a.
 - d. Mida los voltajes indicados y anote los valores en los espacios correspondientes.
 - e. Reduzca el voltaje a cero y desconecte la fuente de alimentación. Repita los procedimientos (c), (d) y (e), hasta que hayan medido todos los voltajes indicados.

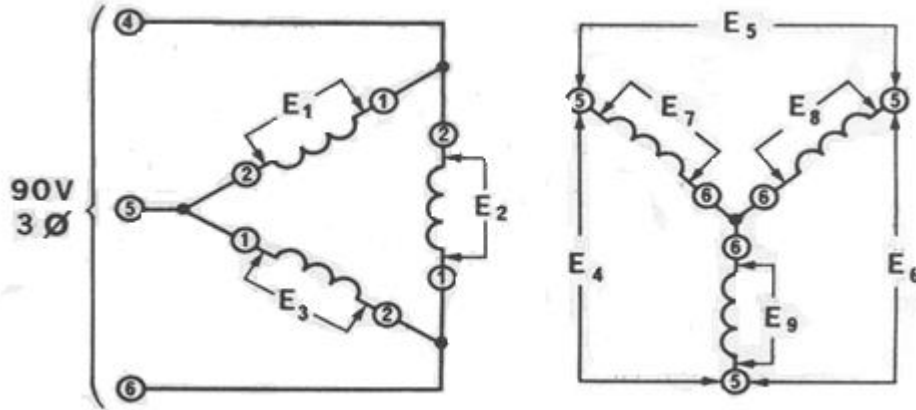


Figura 5.3

Valores Calculados:

$E_1 = \text{_____} V$

$E_4 = \text{_____} V$

$E_7 = \text{_____} V$

$E_2 = \text{_____} V$

$E_5 = \text{_____} V$

$E_8 = \text{_____} V$

$E_3 = \text{_____} V$

$E_6 = \text{_____} V$

$E_9 = \text{_____} V$

Valores Medidos:

$E_1 = \text{_____} V$

$E_9 = \text{_____} V$

$E_2 = \text{_____} V$

$E_{10} = \text{_____} V$

$E_3 = \text{_____} V$

$E_4 = \text{_____} V$

$E_5 = \text{_____} V$

$E_6 = \text{_____} V$

$E_7 = \text{_____} V$

$E_8 = \text{_____} V$



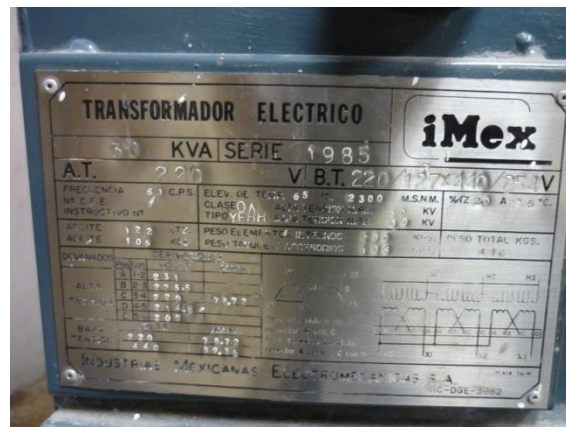
Experimento 2. Diagrama fasorial y desplazamiento angular.

Advertencia: ¡En este Experimento de Laboratorio se manejan altos voltajes! ¡No haga ninguna conexión cuando la fuente esté conectada! ¡La fuente debe desconectarse después de hacer cada medición!

1. Identifique las partes que componen el Transformador trifásico sumergido en aceite que se encuentra en el laboratorio.



2. Identifique en la placa de datos el tipo de conexión del transformador.





- ¿Qué tipo de conexión presenta? _____
3. Conecte X1 con H1.
 4. Conecte H1, H2 y H3 a la fuente de alimentación EMS 8821 (terminales de salida de c-a variable 4, 5 y 6).
 5. Encienda la fuente.
 6. Ajuste el voltaje a 90 V c-a.
 7. Conforme las tablas de diagrama fasorial y desplazamiento angular realice las siguientes mediciones:
 - a. $H3-X2 =$ _____
 - b. $H3-X3 =$ _____
 - c. $H1-H3 =$ _____
 - d. $H2-X2 =$ _____
 - e. $H2-X3 =$ _____
 8. Desconecte la fuente.
 9. Verifique las relaciones de tensión:
 - a. $H3-X2 = H3-X3$
 - b. $H3-X2 < H1-H3$
 - c. $H2-X2 < H2-X3$
 - d. $H2-X2 < H1-H3$
 10. ¿Se cumplen las relaciones de tensión? _____

CONCLUSIONES:



PREGUNTAS DE EVALUACIÓN:

1. Si cada transformador tiene una capacidad de 60 KVA, ¿cuál es el total de potencia trifásica que se puede obtener en:
 - a. Conexión estrella-estrella.
 - b. Conexión delta-delta.
 - c. Conexión delta-estrella.
2. Del experimento 2, dibuje el diagrama de conexión del transformador (ver tabla de datos).
3. Del experimento 2, ¿cuál es el ángulo de desfase del transformador y por qué?

Bibliografía:

EXPERIMENTOS CON EQUIPO ELÉCTRICO
WILD Y DEVITO
LIMUSA

TRANSFORMADORES DE POTENCIA, DE MEDIDA Y DE PROTECCIÓN.
ENRIQUE RAS
ALFAOMEGA

MÁQUINAS ELÉCTRICAS, TRANSFORMADORES Y CONTROLES.
HAROLD W. GRINGRICH
PRENTICE HALL



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Respecto al objetivo general de este trabajo, se concluye que se cumplió ya que se presentan las pruebas de fábrica que se realizan a los transformadores así como la propuesta de prácticas para el laboratorio de transformadores y motores de inducción de acuerdo al material y equipo que se tiene en dicho laboratorio.
- La aportación principal de este trabajo consistió en contribuir en parte con el laboratorio de transformadores y motores de inducción con una propuesta de prácticas que se pueden realizar en el mismo y que sirven para que el alumno adquiriera conocimientos prácticos relacionados con los cursos de teoría.
- Los transformadores son parte importante para el sistema eléctrico y ya que es necesario la continuidad de su servicio, las pruebas que se realizan en fábrica son esenciales para garantizar su correcto funcionamiento así como para hacer mejoras en los equipos.
- Se cumple con el objetivo planteado de dar mantenimiento al transformador de distribución que se encuentra en el laboratorio, así como la modificación de la tapa del intercambiador de derivaciones para su uso didáctico, siendo esta de acrílico transparente permite visualizar la posición del cambiador de derivaciones.
- Las pruebas en fábrica a los transformadores son muy importantes, ya que con ellas se garantiza el mínimo de fallas durante su operación, y que soportara con las especificaciones dadas por el fabricante.
- Se recomienda ampliamente la adquisición de equipos por parte de la universidad como mega óhmetro digital, ya que es conveniente que los alumnos conozcan el uso y funcionamiento de este instrumento de medición, así mismo realizar algunas pruebas que se realizan con este como es la prueba de resistencia de aislamiento, que no solo se hace a transformadores sino también a motores. Esta prueba puede llevarse a cabo con el transformador de distribución con el que cuenta el laboratorio y que actualmente no se utiliza en la práctica.



Glosario.

Accidente de trabajo: es toda lesión orgánica o perturbación funcional, inmediata o posterior, o la muerte, producida repentinamente en ejercicio, o con motivo del trabajo, cualesquiera que sean el lugar y el tiempo en que se preste. Quedan incluidos en la definición anterior los accidentes que se produzcan al trasladarse el trabajador directamente de su domicilio al lugar del trabajo y de éste a aquél.

Capacitancia: es una medida de la cantidad de energía eléctrica almacenada para una diferencia de potencial eléctrico dada.

Concatenar: unir, enlazar, relacionar una cosa con otra.

Corriente eléctrica: es el flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre un material.

Higroscopia: palabra que deriva del griego ὑγρός hygros “húmedo, mojado” y σκοπεῖν skopein “observar, mirar” es la capacidad de algunas sustancias de absorber o ceder humedad al medioambiente. También es sinónimo de higrometría, siendo esta el estudio de la humedad, sus causas y variaciones (en particular de la humedad atmosférica).

Impedancia: es la oposición al paso de la corriente alterna.

Inductancia: Es la oposición a un cambio de corriente de una bobina que almacena energía en presencia de un campo magnético.

Ionización: la ionización es un fenómeno químico o físico mediante el cual se producen iones, estos son átomos o moléculas cargadas eléctricamente debido al exceso o falta de electrones respecto a un átomo o molécula neutra.

Linfa: es un líquido transparente que recorre los vasos linfáticos (canales que transportan material de desechos y células del sistema inmunológico) y generalmente carece de pigmentos.

Reactancia: es la oposición ofrecida al paso de corriente alterna por inductores y condensadores. Es la parte imaginaria de la impedancia.

Reluctancia: La reluctancia magnética de un material o circuito magnético es la resistencia que este posee al paso de un flujo magnético cuando es influenciado por un campo magnético.

Rigidez dieléctrica: entendemos por rigidez dieléctrica al valor límite de la intensidad del campo eléctrico en el cual un material pierde su propiedad aislante y pasa a ser conductor.



BIBLIOGRAFÍA:

NORMA MEXICANA ANCE “TRANSFORMADORES Y AUTOTRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y POTENCIA - MÉTODOS DE PRUEBA”NMX-J-169-ANCE-2004.

NORMA MEXICANA ANCE “TRANSFORMADORES Y AUTOTRANSFORMADORES DE POTENCIA -ESPECIFICACIONES” NMX-J-284-ANCE-2006.

PRUEBAS DE EQUIPO ELECTRICO TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION Y POTENCIA.

ING. VICTOR PEREZ AMADOR
EDITORIAL LIMUSA

MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
STEPHEN J. CHAPMAN
MC. GRAW HILL

J Y P. TRANSFORMER BOOK
HEATHCOTE
NEWNES

TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.
PEDRO AVELINO PÉREZ
EDITORIAL REVERTE