

18  
20j.



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN



**PRUEBAS A TRANSFORMADORES EN EL  
LABORATORIO DE MAQUINAS  
ELECTRICAS**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

**P R E S E N T A N :**  
**JULIO CÉSAR GOMEZ SANDOVAL**  
**ANSELMO ANGOA TORRES**

**ASESOR: ING. FRANCISCO JAVIER CARRILLO GARCIA**

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx.

1994

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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 está 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN



DEPARTAMENTO DE  
EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA F.E.S. - C.  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

"Pruebas a transformadores en el laboratorio de  
máquinas eléctricas"

que presenta el pasante Julio César Gómez Sandoval  
con número de cuenta: 8329478-I para obtener el TÍTULO de:  
Ingeniero Mecánico Electricista ; en colaboración con :  
Anselmo Angoa Torres

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

AT E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 25 de Agosto de 1993

PRESIDENTE Ing. Javier Hernández Vega  
VOCAL Ing. Benjamín Contreras Santacruz  
SECRETARIO Ing. Francisco Javier Carrillo García  
PRIMER SUPLENTE Ing. Esteban Corona Escamilla  
SEGUNDO SUPLENTE Ing. Francisco Rodríguez López

*[Firmas manuscritas de los miembros del tribunal]*



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FEG-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

" Pruebas a transformadores en el laboratorio de  
máquinas eléctricas".

que presenta el pasante: Anselmo Angoa Torres  
con número de cuenta: 8335883-2 para obtener el TITULO de:  
Ingeniero Mecánico Electricista ; en colaboración con :  
Julio César Sandoval

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuatitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 25 de Agosto de 1973

PRESIDENTE	<u>Ing. Javier Hernández Vega</u>	
VOCAL	<u>Ing. Benjamín Contreras Santacruz</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. Francisco Javier Carrillo García</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Esteban Corona Escamilla</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Francisco Rodríguez López</u>	

## **Dedicatorias**

*Al Honorable Jurado, por hacer posible la realización de esta tesis.*

*A nuestros profesores, que fueron la parte principal en nuestra formación profesional*

*A nuestro asesor y amigo Ing. Francisco J. Carrillo García por el apoyo y sus valiosos consejos que nos brindó en todo momento*

*A nuestros amigos: Enrique Lóme, José F. Camacho, José Reyes, Carlos Fuentes, Roberto Galván, Agustín Puente, Juan Maruri, Héctor Cortés, José L. Vázquez por brindarnos su amistad*

**JULIO CÉSAR GOMEZ SANDOVAL  
ANSELMO ANGOA TORRES**

***A mi familia:***

***Antonia Sandoval Islas***

***Rubén Gómez Cabrera***

***Lizbeth Gómez Sandoval***

***José Antonio Vargas Sandoval***

***Ma. del Refugio Esquitín González***

***Alejandra Gómez Esquitín***

***Eulogia Islas Garrido***

***Edmundo Sandoval Islas***

**Gracias por la confianza que me depositaron en el transcurso de mi vida escolar,  
no desesperando en los momentos difíciles.**

**JULIO CÉSAR GOMEZ SANDOVAL**

**A mi madre:  
Hermelinda,**

**por brindarme todo su  
apoyo incondicional,  
enseñándome que no hay  
camino difícil en la vida  
y obstáculos que no  
se puedan vencer, si  
existe fe, confianza  
y perseverancia.**

**A mis hermanas:  
Isabel y Cristina,**

**que siempre me han  
demostrado su confianza  
y cariño.**

**A mis hermanos:  
Luis, Andrés, Rafael, José,  
Pedro y César,**

**por compartir su tiempo conmigo.**

**A mi padre:  
Pedro,**

**por formar parte  
de mi existencia.**

**A mi cuñado Felipe  
y sus hijos:  
Iván, Miriam, Sandra,  
Manuel, Yazmín, Lizbeth  
y Andrea,  
que forman  
parte de mi vivir cotidiano**

**ANSELMO ANGOA TORRES**

# CONTENIDO

	Pág.
<b>Introducción</b> . . . . .	11
<b>Capítulo I Teoría del transformador de potencia</b>	
1.1. Fundamento del transformador . . . . .	12
1.2. Relación de transformación . . . . .	14
1.3. Clasificación de los transformadores . . . . .	16
1.4. Utilización del transformador de potencia . . . . .	18
1.5. Funcionamiento del transformador monofásico en vacío . . . . .	19
1.6. Diagrama vectorial del transformador en vacío . . . . .	22
1.7. Funcionamiento del transformador monofásico con carga . . . . .	25
1.8. Diagrama vectorial del transformador con carga . . . . .	28
<b>Capítulo II Características constructivas del transformador</b>	
2.1. Núcleo . . . . .	33
2.1.1. Función . . . . .	33
2.1.2. Construcción . . . . .	33
2.1.3. Pérdidas en el hierro . . . . .	35
2.2. Devanados . . . . .	37
2.2.1. Función . . . . .	37
2.2.2. Construcción . . . . .	37
2.2.3. Tipos de devanados . . . . .	37
2.2.4. Pérdidas en el cobre . . . . .	38
2.3. Aislamientos . . . . .	38
2.3.1. Función del aislamiento . . . . .	38
2.3.2. Propiedades . . . . .	38
2.3.3. Disposición de los aislamientos . . . . .	40
2.3.4. Clasificación térmica de los aislantes . . . . .	41
2.3.5. Temperaturas de aislamiento límites . . . . .	43
2.4. Aceite . . . . .	44
2.4.1. Función . . . . .	44

	Pág.	
2.4.2.	Tipos de aceites aislantes . . . . .	44
2.4.3.	Propiedades del aceite . . . . .	44
2.4.4.	Pruebas físicas . . . . .	45
2.4.5.	Pruebas eléctricas . . . . .	46
2.5.	Boquillas . . . . .	47
2.5.1.	Función . . . . .	47
2.5.2.	Tipos de construcción . . . . .	48
2.6.	Tanque . . . . .	50
2.6.1.	Función . . . . .	50
2.6.2.	Construcción . . . . .	50
2.7.	Cambiador de derivaciones . . . . .	51
2.8.	Indicadores . . . . .	52
2.8.1.	Temperatura del aceite . . . . .	52
2.8.2.	Temperatura de los devanados . . . . .	53
2.8.3.	Indicador de vacío o manovacuómetro . . . . .	54
2.8.4.	Indicador de nivel . . . . .	54
2.8.5.	Indicador de flujo del aceite . . . . .	55
2.9.	Dispositivos de protección contra fallas internas . . . . .	55
2.9.1.	Relevador detector de gases (Buchholz) . . . . .	55
2.9.2.	Dispositivos de sobrepresión súbita . . . . .	58
2.10.	Sistema de enfriamiento . . . . .	58
2.11.	Tanque conservador . . . . .	63
2.12.	Placa de datos . . . . .	63

### **Capítulo III Pruebas a transformadores**

3.1.	Pruebas a transformadores en general . . . . .	66
3.1.1.	Pruebas en fábrica . . . . .	66
3.1.2.	Embarque . . . . .	67
3.1.3.	Recepción . . . . .	68
3.1.4.	Almacenaje . . . . .	69
3.1.5.	Puesta en servicio . . . . .	69
3.1.6.	Operación del transformador . . . . .	70
3.1.7.	Mantenimiento del transformador . . . . .	70
3.1.8.	Reparación . . . . .	72

	Pág.	
3.2.	Pruebas en el laboratorio de transformadores . . . . .	72
3.2.1.	Resistencia óhmica . . . . .	72
3.2.2.	Resistencia de aislamiento . . . . .	79
3.2.3.	Relación de transformación . . . . .	83
3.2.4.	Polaridad . . . . .	91
3.2.5.	Prueba de circuito abierto . . . . .	96
3.2.6.	Prueba de corto circuito . . . . .	103
3.2.7.	Conexiones trifásicas . . . . .	106
3.2.8.	Desplazamiento angular . . . . .	116
3.2.9.	Secuencia de fases . . . . .	120
3.2.10.	Medición de resistencia óhmica al transformador trifásico . . . . .	124
3.2.11.	Método del puente de Wheatstone . . . . .	124
3.2.12.	Método de la caída de potencial . . . . .	125
3.2.13.	Emparalelamiento del transformador . . . . .	127
<b>Capítulo IV</b>	<b>Transformadores de medición</b>	
4.1.	Introducción . . . . .	132
4.1.1.	El transformador de corriente . . . . .	132
4.1.2.	El transformador de potencial . . . . .	133
4.2.	Clasificación de pruebas . . . . .	135
4.2.1.	Pruebas de precisión . . . . .	136
4.2.2.	Descripción de los puentes de calibración . . . . .	142
<b>Apéndice</b>	. . . . .	145
<b>Conclusiones</b>	. . . . .	146
<b>Bibliografía</b>	. . . . .	147

## Introducción

El transformador es uno de los dispositivos más importantes con que se cuenta para la transmisión, distribución y suministro de energía eléctrica. Es una máquina estática que basándose en el principio de la inducción electromagnética sirve para transferir energía de un circuito a otro, y al no tener partes móviles, aparentemente está exenta de sufrir alguna descompostura o daño, pero no es así, durante su transporte, instalación o en su funcionamiento puede sufrir deterioro, razón por la cual es necesario que los técnicos o ingenieros desarrollados en esta área tengan conocimiento de las diversas pruebas para verificar el correcto funcionamiento de la misma.

Por lo anteriormente expuesto, este trabajo se ha desarrollado en cuatro capítulos tratando que la exposición de cada tema sea explícito y de fácil comprensión para así cumplir con su objetivo principal que es el de analizar las pruebas más comunes a las que los transformadores deben ser sometidos; dichas pruebas se realizaron en el laboratorio de esta Facultad.

El primer capítulo versa sobre la teoría del transformador, indica algunas formas de clasificación, así como diagramas vectoriales de funcionamiento del mismo. En el segundo capítulo se hace un análisis de las características constructivas de los elementos que lo componen, la función que realizan y propiedades que tienen. El tercer capítulo enmarca las diferentes pruebas que se le practican, primero haciendo una clasificación, posteriormente realizando algunas de ellas con el auxilio de un banco de transformadores monofásicos. El cuarto capítulo cuenta con una breve descripción de los transformadores de medición, haciendo una referencia de sus pruebas más comunes.

Cabe destacar que las pruebas aquí expuestas están apoyadas en las normas nacionales especificadas por la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI).

# CAPITULO I

## TEORIA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

### 1.1. FUNDAMENTO DEL TRANSFORMADOR.

El transformador es una máquina eléctrica que no tiene partes móviles; sirve para transferir energía eléctrica de un circuito a otro bajo el principio de inducción electromagnética.

La transferencia de energía se hace por lo general con cambios en los valores de voltajes y corrientes y se compone principalmente de tres partes que son, el circuito eléctrico, el circuito magnético y partes auxiliares.

Su representación es:

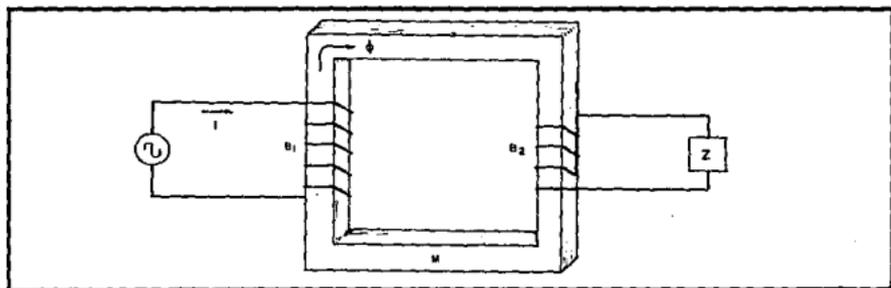


Figura 1.1. El transformador de potencia.

Donde:

- $B_1$  y  $B_2$  = Bobinas (circuito eléctrico)
- $Z$  = Carga
- $\Phi$  = Flujo
- $M$  = Laminaciones de hierro y silicio (circuito magnético)

Su funcionamiento es el siguiente:

Al aplicar un voltaje alternante en la bobina  $B_1$  se origina una corriente  $I$ , la cual entra según el sentido de arrollamiento de la bobina  $B_1$ . Esta corriente ocasiona que haya un flujo en el circuito magnético, este flujo va a ser alternante y al circular por el material ferromagnético, se va a encontrar a la bobina  $B_2$  perpendicularmente y va a originar una fem en la bobina  $B_2$ . Esta fem ocasiona una corriente en la carga  $Z$  y por lo tanto un voltaje  $V_z$ .

El transformador eleva el voltaje y reduce la corriente en su funcionamiento como elevador y reduce el voltaje y aumenta la corriente en su funcionamiento como reductor.

Esto depende de que el número de vueltas del primario sea mayor o menor al del secundario.

Como primario se considera al arrollamiento que tiene la alimentación y secundario al arrollamiento donde se conecta la carga.

La forma de representar un transformador eléctricamente es la que nos muestra la figura 1.2.

Las dos rayas paralelas representan el núcleo,  $H_1$  con  $H_2$  representan el embobinado de alta tensión y  $X_1$  con  $X_2$  el embobinado de baja tensión, los números ones (1) representan la polaridad positiva y los números pares (2) la polaridad negativa.

En el lado de alta tensión es donde se encuentra el mayor voltaje, esto ocasiona que la corriente sea pequeña.

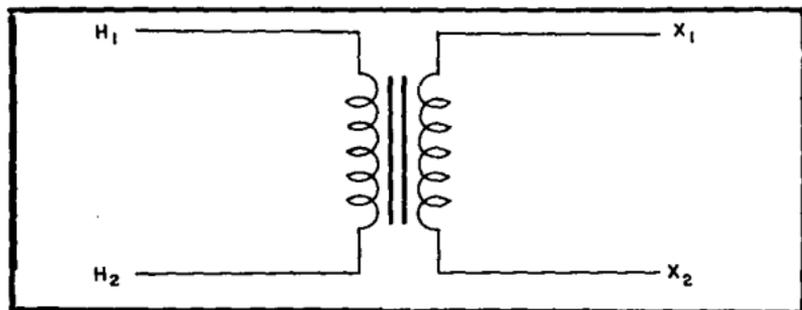


Figura 1.2.

En el lado de baja tensión el voltaje es pequeño, la corriente es grande y esto se debe a que su número de vueltas es menor que el lado de alta tensión, esto ocasiona que el diámetro de la espira del lado de baja sea mayor por la corriente que pasa por él.

Como primario se considera al arrollamiento que tiene la alimentación y como secundario al arrollamiento donde se conecta la carga.

En un transformador reductor, el primario es el lado de alta tensión y el secundario es el lado de baja tensión.

Para un transformador elevador, el primario es el lado de baja tensión y el secundario es el lado de alta tensión.

## 1.2. RELACION DE TRANSFORMACION.

La relación de transformación es la relación del número de vueltas del primario, con respecto al número de vueltas del secundario.

Para encontrar esta relación vamos a partir de lo siguiente:

- a) La reluctancia en el circuito magnético es nula.
- b) Las resistencias de los arrollamientos primario y secundario son nulas.
- c) Las pérdidas en el hierro, por histéresis y por corrientes de Foucault, son nulas.
- d) El flujo de dispersión es nulo.

En la figura 1.3. vemos un transformador que puede ser reductor o elevador.

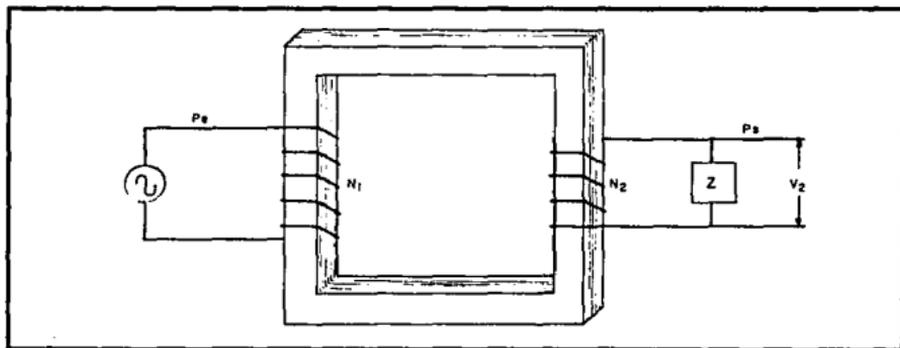


Figura 1.3.

Donde:

- $P_e$  = Potencia de entrada
- $P_s$  = Potencia de salida
- $N_1$  = Número de vueltas del primario
- $N_2$  = Número de vueltas del secundario

$V_1$  = Voltaje primario  
 $V_2$  = Voltaje secundario

Con las especificaciones anteriores concluimos que en este caso la potencia de entrada va a ser idéntica a la potencia de salida.

$$P_e = P_s$$

En donde:

$$P_e = V_1 I_1$$

$$P_s = V_2 I_2$$

entonces, para un transformador monofásico

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

y si es trifásico

$$\sqrt{3}V_1 I_1 = \sqrt{3}V_2 I_2$$

despejando

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Para un transformador construido se tiene que la tensión es proporcional al flujo magnético y al número de espiras o sea:

$$V_1 = K_1 \Phi N_1$$

$$V_2 = K_2 \Phi N_2$$

$K$  es el coeficiente de acoplamiento, y como el flujo magnético es común se tiene

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{K_1 N_1}{K_2 N_2}$$

y como  $K_1$  y  $K_2$  son iguales se obtiene

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots(1)$$

La ecuación 1 se llama relación de voltajes

como  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$

obtenemos  $\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \dots(2)$

La ecuación (2) se llama relación de corrientes.

La relación de transformación es:

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

$$a = \frac{V_1}{V_2} \text{ y}$$

$$a = \frac{I_2}{I_1}$$

Nota:  $N_1$ ,  $V_1$  e  $I_1$ , son el número de vueltas, el voltaje y la corriente del primario.

La relación de transformación para un transformador reductor será un número mayor de la unidad.

De la relación:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Para un transformador reductor

$$V_1 > V_2 \text{ por lo tanto}$$

para compensar esta relación

$$I_2 > I_1$$

y de la relación.

$$I_1 N_1 = I_2 N_2$$

$$\Rightarrow N_2 < N_1$$

Concluimos que para este tipo de transformador, la corriente del secundario es alta, tiene un número de vueltas inferior y mayor sección.

Nota: Por lo tanto la relación de transformación para un transformador elevador será un número menor que la unidad.

### 1.3. CLASIFICACION DE LOS TRANSFORMADORES.

Existen varios aspectos para clasificar transformadores ya sea por el tipo de forma del núcleo, por el sistema de enfriamiento, que establece la forma de disipación del calor producido en los mismos, o bien en términos de su potencia

y voltaje para aplicaciones, como por ejemplo: clasificar en transformadores de potencia o tipo de distribución.

La clasificación general de los transformadores es la siguiente:

Transformadores de	Potencia
	Potencial
	Corriente
	Frecuencia
	Audio
	Etc.

Debido a que el transformador de potencia es el que estamos analizando en esta tesis nos centraremos en el estudio de éstos.

#### *a) Transformadores de potencia*

De acuerdo a la potencia se clasifican en transformadores de:

- Gran potencia

Su potencia es mayor de 85 KV.

- Distribución

Su potencia es mayor de 5 KV hasta 85 KV.

- Tipo Seco

Su potencia es menor o igual a 5 KV.

Por su tipo de núcleo se clasifican en:

- Tipo núcleo

- Tipo acorazado

- Tipo columnas

La operación que desempeñan puede ser de:

- Enlace

- Reductores de tensión

- Elevadores de tensión

Por su alimentación.

- Monofásico o trifásico.

## b) Transformadores de instrumento

- Este tipo de transformadores sirven para medición, control y protección para diversos dispositivos, los cuales trabajan bajo el mismo principio de operación que el transformador de potencia.

## 1.4. UTILIZACION DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA.

En la siguiente figura se representan los principales elementos de un sistema de energía eléctrica.

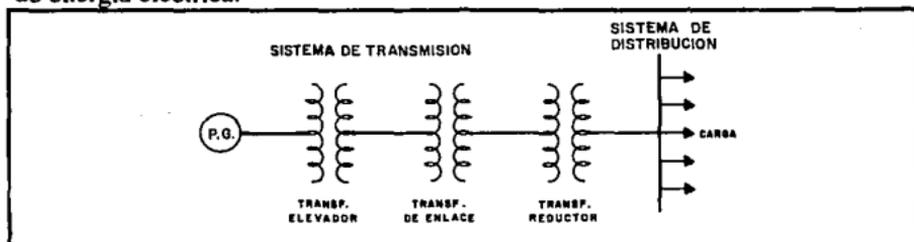


Figura 1.4.

Es fácil ver que si la tensión de transmisión se hace  $n$  veces mayor, el peso del conductor necesario para transmitir una potencia dada, con unas pérdidas determinadas, se reduce  $n^2$  veces.

Tenemos que  $P = VI \cos \theta$

Si aumentamos la tensión  $n$  veces

$$V_1 = nV$$

y manteniendo la potencia suministrada constante, la corriente disminuye.

$$I_1 = \frac{I}{n}$$

Nos queda  $P = nV \frac{I}{n} \cos \theta$

Las pérdidas por el efecto Joule son:

$$RI^2 = R_1 I_1^2 = R_1 \left(\frac{I_1}{n}\right)^2$$

Por lo tanto la sección, el volumen y el peso del conductor son  $1/n^2$  veces menores

Por esta causa la transmisión de energía se hace a voltajes elevados. En general, las plantas generadoras están alejadas de los centros de consumo y conectadas a éstos a través de una red de alta tensión, aunque algunas plantas generadoras pueden estar conectadas directamente al sistema de distribución.

La tensión se eleva a la salida de los generadores para realizar la transmisión de energía eléctrica en forma económica y se reduce en la proximidad de los centros de consumo para alimentar el sistema de distribución a una tensión adecuada. También se puede contar con un transformador de enlace en la línea, la cual sirve de interconexión de la red de alta tensión.

### 1.5. FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR MONOFASICO EN VACIO.

Un transformador trabaja en vacío cuando en el secundario no tiene carga como se muestra en la figura 1.5.

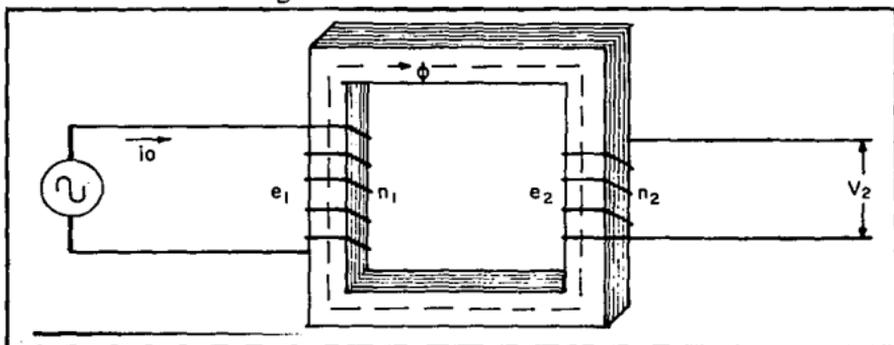


Figura 1.5.

donde:

- $V_1$  = Voltaje senoidal de alimentación.
- $i_0$  = Corriente de vacío.
- $n_1$  = Número de vueltas del primario.
- $e_1$  = Fuerza electromotriz del primario.
- $n_2$  = Número de vueltas del secundario.
- $V_2$  = Voltaje senoidal del secundario.
- $e_2$  = Fuerza electromotriz del secundario.

Al aplicar un voltaje senoidal  $V_1(t)$  al transformador se crea una corriente  $i_0(t)$  la cual se origina por una resistencia que ofrece el conductor. Al pasar la

corriente a través del conductor se crea en éste un magnetismo por el contacto con el aire, y esto da lugar a una inductancia  $L$  como se muestra en la figura 1.6.

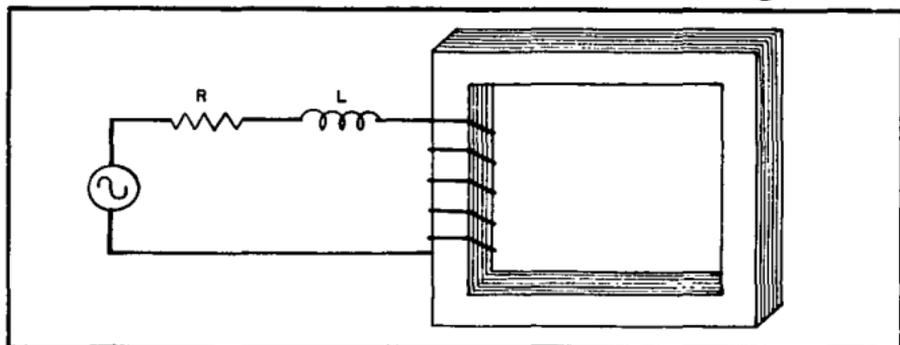


Figura 1.6.

El calentamiento en el conductor debido a  $R$  y a  $L$  son pérdidas que en un transformador ideal se desprecian y en este caso se va a estudiar como transformador ideal.

Analizando el transformador idealmente, vemos (en la Fig. 1.7) que:

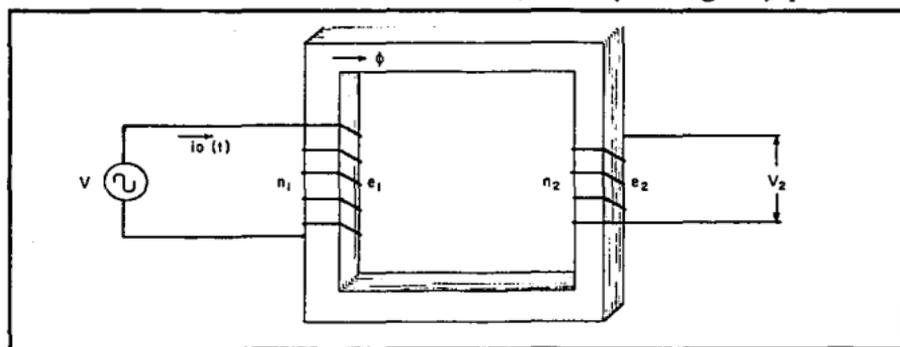


Figura 1.7.

Sale la corriente de vacío polarizando la bobina y creando un flujo, este flujo por medio de inducción crea la fuerza electromotriz  $e_1$  y  $e_2$ .

Haciendo la suma de voltajes de Kirchhoff en el circuito 1, tenemos.

$$V_1 + e_1 = 0$$

$$\Rightarrow V_1 = -e_1$$

donde  $e_1 = -n_1 \frac{d\Phi}{dt}$

y del circuito 2 vemos que:

$$V_2 = e_2$$

Por lo tanto vemos que para el primario la fuerza magnetomotriz es igual y opuesta a la de alimentación. La fuerza magnetomotriz del secundario  $e_2$  es igual al voltaje de salida  $V_2$ .

Su relación de transformación es:

$$\frac{V_1 \text{ vacío}}{V_2 \text{ vacío}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

La corriente de vacío es muy pequeña debido a que el circuito del secundario está abierto y en consecuencia en el secundario no hay corriente.

Esto causa la circulación de una corriente pequeña, llamada corriente de vacío, esta corriente es normalmente inferior al 5% de la corriente a plena carga.

Como la fuente de voltaje  $V_1(t)$  es senoidal y variante en el tiempo, también serán senoidales y variantes en el tiempo la corriente circulante, el flujo magnético y la fuerza magnetomotriz.

La representación gráfica se muestra en la siguiente figura.

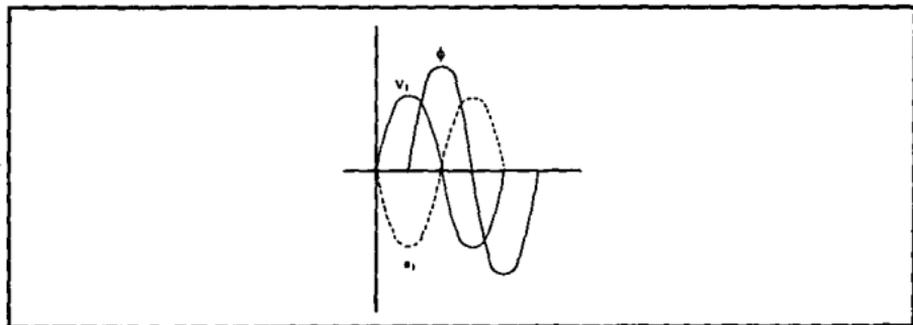


Figura 1.8. Gráfica de  $V_1$ ,  $e_1$  y  $\Phi$  de un transformador monofásico en vacío.

La tensión  $V_1$  está avanzada en  $90^\circ$  respecto al flujo  $\Phi$  ya que  $V_1 = n \frac{d\Phi}{dt}$  y la derivada de un vector, es otro vector defasado  $90^\circ$  en avance. Y como  $V_1 = -e_1$ , o también  $e_1$  es igual y opuesto a  $V_1$  como se ve en la figura anterior.

Como consideramos que el transformador es ideal entonces la corriente  $I_0$  es la corriente que se emplea en el circuito magnético y esta corriente se divide en 2 componentes que son:

$I_M$  que es la corriente de magnetización del núcleo, que estará en fase con el flujo  $\Phi$  en el hierro.

En la práctica, cuando se tiene un flujo variante en un núcleo de material magnético, se presentan pérdidas. Una parte de estas pérdidas son debidas a las corrientes circulantes en el núcleo magnético y la otra es debida al llamado efecto de histéresis. Estas dos pérdidas se combinan y se denominan en conjunto pérdidas en el hierro.

A estas pérdidas las identificaremos como  $I_{fe}$ .

Los valores de estas corrientes están expresados por:

$$I_M = I_0 \sin \theta_0 \text{ (componente reactiva de } I_0)$$

$$I_{fe} = I_0 \cos \theta_0 \text{ (componente activa de } I_0)$$

Esto se ilustra en la figura 1.9.

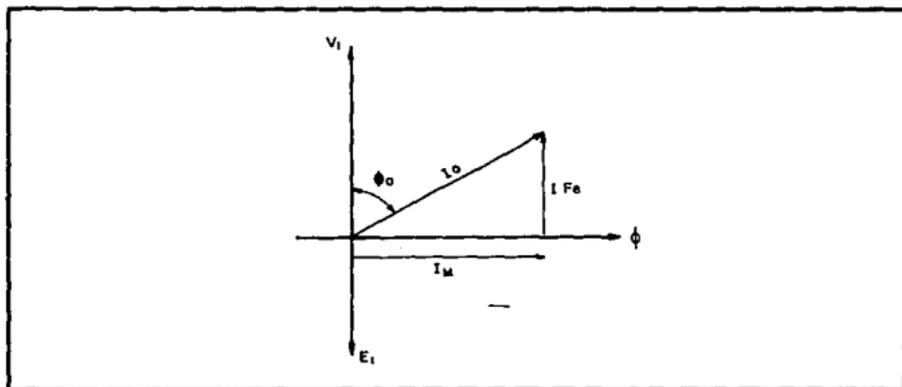


Figura 1.9. Descomposición vectorial de la corriente de vacío  $I_0$ , en corrientes de pérdidas  $I_{fe}$  y corrientes magnetizantes  $I_M$ .

## 1.6 DIAGRAMA VECTORIAL DEL TRANSFORMADOR EN VACIO.

La teoría más simple es la de considerar a un transformador perfecto eléctricamente que es el caso del transformador ideal.

En realidad el transformador con núcleo de hierro tiene ciertas imperfecciones que a continuación se enuncian:

1.- Los devanados tienen una pequeña resistencia óhmica, la cual ocasiona un calentamiento cuando es cruzado por una corriente.

2.- En los devanados se crea un efecto inductivo ( $L$ ) al circular por ellos una corriente, este efecto crea un flujo magnético que se cierra por el aire y se llama flujo de dispersión.

3.- En el núcleo se producen pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas (pérdidas por corrientes de Foucault).

4.- Para crear el flujo se precisa una corriente de excitación.

Si excitamos un transformador con un voltaje  $V_1(t)$  en el lado primario y el lado secundario lo dejamos abierto para trabajar en vacío, lo podemos representar como se muestra en la figura 1.10.

Entonces al alimentar un voltaje  $V_1$ , se crea una corriente  $i(t)$  debido a la resistencia del conductor y al efecto inductivo ( $X_M$ ) en el conductor. La corriente al pasar por la bobina crea un flujo magnético.

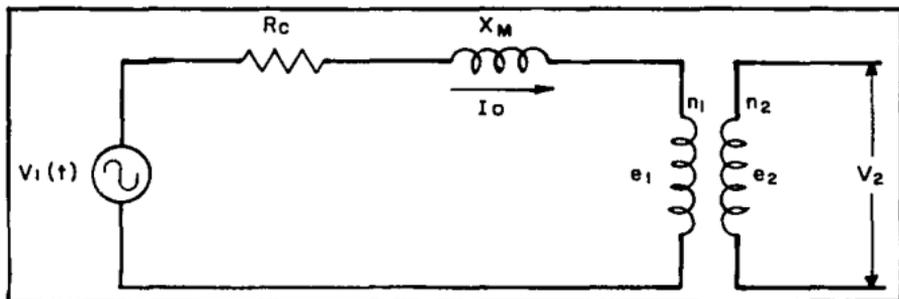


Figura 1.10.

Donde:

$V_1(t)$  = Voltaje senoidal de alimentación.

$e_1(t)$  = Fuerza electromotriz senoidal del primario.

$e_2(t)$  = Fuerza electromotriz senoidal del secundario.

$V_2(t)$  = Voltaje senoidal del secundario.

$I_0(t)$  = Corriente senoidal de vacío.

$R_c$  = Resistencia del conductor.

$X_M$  = Reactancia inductiva de dispersión.

El flujo magnético al circular senoidalmente en el núcleo y cruzando las bobinas, crea las fuerzas electromotrices  $e_1$  y  $e_2$  en los devanados.

Como el circuito secundario está abierto, por ahí no circulará ninguna corriente, cosa contraria pasa en el primario, donde circula una corriente muy pequeña, llamada corriente de vacío ( $I_0$ ).

En el transformador ideal en vacío se tenía.

$$V_1 + e_1 = 0$$

Aplicando la ley de voltajes de Kirchoff en la malla izquierda de la figura 1.10.

$$R_c I_o + X_M I_o - e_1 - V_1 = 0$$

Donde:

$$V_1 = -e_1 + R_c I_o + X_M I_o$$

es decir:

$$V_1 = -e_1 + \sum \text{caídas de tensión.}$$

Con los datos anteriores, se puede deducir el diagrama vectorial de la figura 1.11.

Para ello partimos del flujo magnético común  $\Phi$ , que está en el eje  $X$ , que produce las fuerzas electromotrices  $E_1$  y  $E_2$ , en los arrollamientos primario y secundario. Y por la ley de Lenz estas fem's están defasadas  $90^\circ$  en atraso con respecto al flujo.

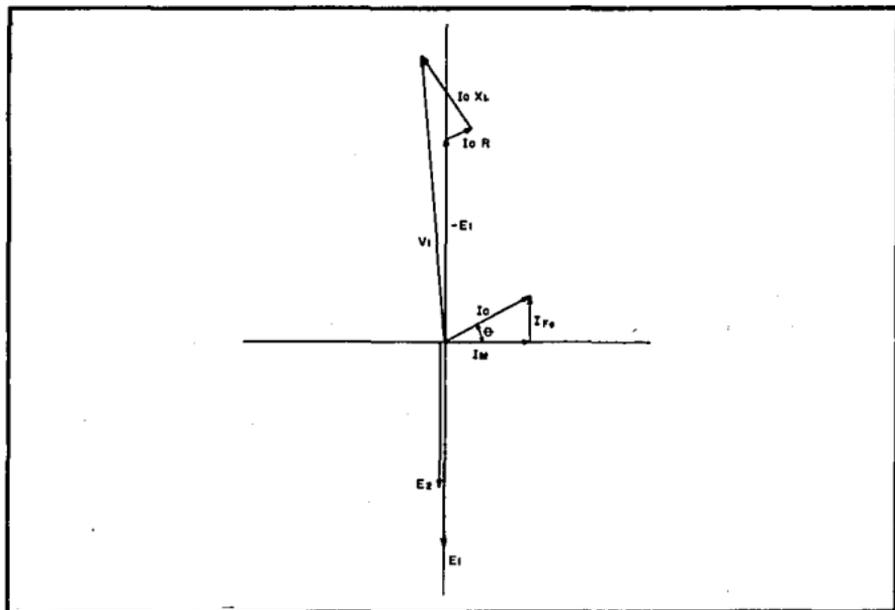


Figura 1.11. Diagrama vectorial del transformador monofásico en vacío.

$E_1$  y  $E_2$  están en fase y una será más grande en magnitud que la otra, esto depende si el transformador es reductor ( $E_1 > E_2$ ) o es elevador ( $E_1 < E_2$ ). En este caso hablaremos de un transformador reductor.

La corriente de vacío  $I_0$  tiene 2 componentes; la corriente de magnetización  $I_M$  y la corriente de pérdida en el hierro  $I_{fe}$  avanzada  $90^\circ$  respecto al flujo.

Por lo tanto la corriente  $I_0$  tiene un ángulo formado entre ella y el flujo  $\Phi$ , este ángulo se denomina ángulo de pérdida y debe procurarse que sea lo más pequeño posible.

Para encontrar la dirección y magnitud de  $V_1$  es necesario conocer la resistencia  $R_c$  y la reactancia  $X_M$  ya que:

$$V_1 = -e_1 I_0 R_c + I_0 X_M$$

$I_0 R_c$  está en fase con la corriente ya que  $R_c$  es una componente real que no produce ningún defasamiento  $I_0 X_M$ , está adelantada  $90^\circ$  con respecto a  $I_0$  ya que la componente reactiva  $X_M$  es inductiva la cual al multiplicarse con  $I_0$  da un voltaje adelantado  $90^\circ$ .

Mediante la suma de los tres vectores  $-\overline{E_1}$ ,  $\overline{I_0 R_c}$  y  $\overline{I_0 X_M}$ , se obtiene el vector representativo de  $V_1$ , que es la tensión que debe aplicarse al primario.

## 1.7. FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR MONOFASICO CON CARGA.

En este caso vamos a considerar que el transformador no tiene pérdidas, es decir que el transformador es ideal. En consecuencia no va a tener resistencia óhmica y tampoco reactancia de dispersión.

Un transformador con carga, tiene una impedancia conectada en el secundario como se muestra en la figura 1.12.

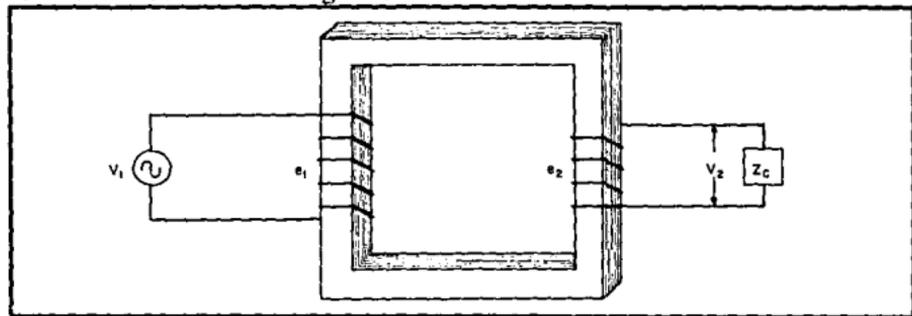


Figura 1.12.

Donde:

$V_1(t)$  = Voltaje senoidal de alimentacion.

$V_2(t)$  = Voltaje senoidal del secundario.

$Z_c$  = Impedancia de carga.

Al conectar la carga  $Z_c$  en el secundario da origen a una corriente  $I_2$  la cual al atravesar las espiras del arrollamiento secundario crea una fmm (fuerza magnetomotriz).

Sabemos:

$$fmm = \Phi R \text{ [Amp} \cdot \text{Vuelta]}$$

o

$$fmm = nI$$

donde:

$\Phi$  = flujo

$R$  = Reluctancia

$I$  = Corriente

$n$  = número de vueltas

Por lo tanto la fuerza magnetomotriz creada en el secundario es:

$$fmm_2 = n_2 I_2$$

y la fuerza magnetomotriz de vacío es:

$$fmmo = n_1 I_0$$

Ahora por la ley circuital de Ampere

$$\sum fmm = 0$$

y tenemos que

$$n_1 I_0 + n_2 I_2 \neq 0$$

Entonces deducimos que la corriente  $I_0$  debe aumentar para poder cumplir con la ley circuital de Ampere.

También nos damos cuenta que para cumplir esta condición es necesario que la  $fmmo$  sea igual a la  $fmm_2$ .

$$fmmo \neq fmm_2$$

donde

$$\Phi_0 R \neq \Phi_2 R$$

Como el material es uniforme en el circuito magnético, la reluctancia va a ser constante, entonces lo que varía es el flujo.

A causa de la  $fmm_2$ , la fuerza magnetomotriz de vacío disminuye (el mismo razonamiento sería válido si se supone que aumenta).

Al disminuir el flujo, también disminuye la fuerza electromotriz  $E_1$ , proporcional a dicho flujo, pero sabemos que se cumple:

$$V_1 = - E_1$$

Como la tensión primaria  $V_1$ , es también la tensión de la red, si esta es de potencia suficientemente grande frente a la potencia de carga, prácticamente no tendrá caída de tensión, por lo que  $V_1$  permanecerá constante y, por lo tanto, no podrá variar tampoco el valor de  $E_1$ .

Como consecuencia, el flujo no puede variar, por lo que se necesitará una nueva fuerza magnetomotriz que contrarreste la variación del flujo.

Esta nueva fuerza magnetomotriz se obtiene, suponiendo que por el primario circula una corriente  $I_2'$ , diferente de la corriente de vacío y cuyo valor ha de ser tal que se cumpla la relación:

$$n_1 I_2' = n_2 I_2 \quad n_1 I_2' + n_2 I_2 = 0$$

De esta ecuación despejando  $I_2'$  para conocer su valor.

$$I_2' = \frac{n_2}{n_1} I_2 = \frac{I_2}{a}$$

$$\text{donde } \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{a}$$

$a$  = relación de transformación.

Ahora la corriente que circula por el primario, es una corriente más grande que es:

$$I_1 = I_0 + I_2'$$

Funcionamiento del Transformador Monofásico Real. Debido a que hay una carga ZL en el secundario circula momentáneamente una corriente  $I_2$  y por lo tanto se encuentran pérdidas debidas a la resistencia  $R_2$  y la reactancia de dispersión  $X_{d2}$  del embobinado secundario.

Su circuito equivalente se muestra en la figura 1.13.

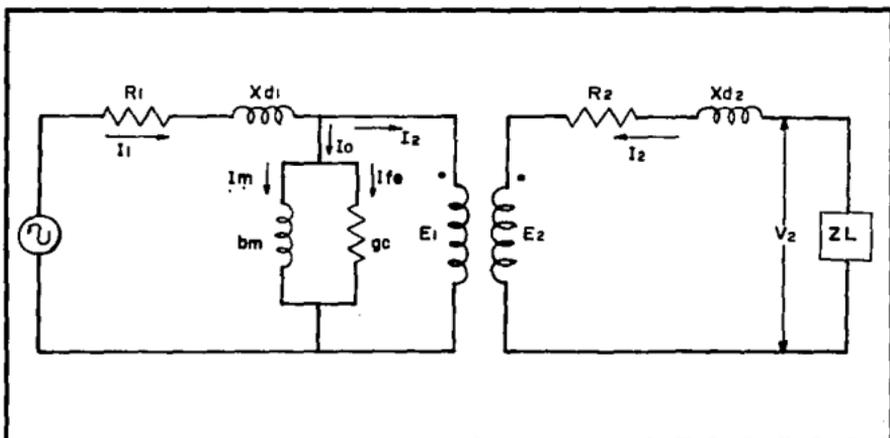


Figura 1.13.

donde:

$$E_2 = V_2 + R_2 I_2 + X_{d2} I_2$$

De la relación

$$n_1 I_2' + n_2 I_2 = 0$$

para que se cumpla

$$\frac{I_2}{a} = -I_2'$$

En otras palabras;  $I_2'$  debe ser opuesta y será más grande en magnitud si se trata de un transformador elevador y será más pequeño si se trata de un transformador reductor, esto se debe a la relación de transformación.

## 1.8. DIAGRAMA VECTORIAL DEL TRANSFORMADOR CON CARGA.

Consideraremos en primer caso una carga de resistencia pura como se muestra en la siguiente figura 1.14.

En el diagrama vectorial partiremos que  $V_1$  aparece en primera instancia, después se genera una corriente  $I_1$ , esta corriente da origen al flujo magnético  $\Phi$  el cual da origen a las fuerzas electromotrices  $E_1$  y  $E_2$ . Por eso vemos el diagrama, y en primera instancia se ve  $V_1$  y girando el diagrama en sentido anti-horario vemos  $I_1$ ,  $\Phi$ ,  $E_2$  consecuentemente.

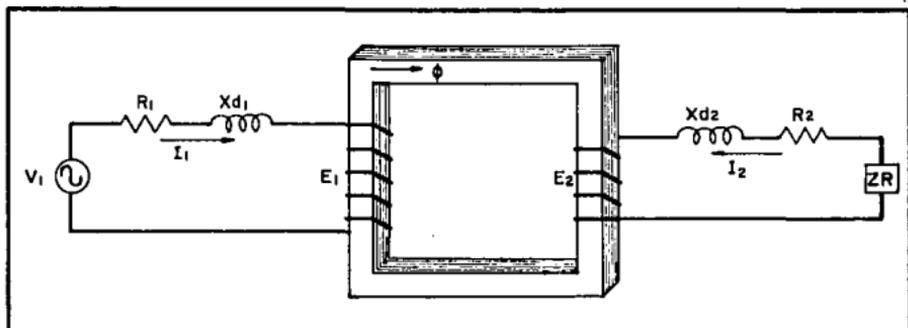


Figura 1. 14..

$E_1$  y  $E_2$  están en fase ya que ambas fems están inducidas por el mismo flujo  $\Phi$  y están defasadas  $90^\circ$  atrás con respecto al flujo  $\Phi$ .

Debido a la reactancia de dispersión,  $I_2$  está atrasada con respecto a  $E_2$ , y como la carga es una resistencia pura,  $I_2$  y  $V_2$  están en fase.

Sabemos que:

$$\overline{E_2} = \overline{V_2} + \overline{I_2 X_{d2}} + \overline{I_2 R_2}$$

Donde la caída de tensión  $I_2 R_2$  está en fase con la corriente  $I_2$ .

La caída de tensión  $I_2 X_{d2}$  está adelantada  $90^\circ$  con respecto a la corriente  $I_2$  debido a la componente inductiva  $X_{d2}$ .

Esta suma vectorial se observa en la figura 1.15.

También se sabe que  $I_2'$  es opuesta a  $I_2$  y por lo tanto tenemos que

$$I_2' = -\frac{I_2}{a}$$

$$\overline{I_1} = \overline{I_0} + \overline{I_2'}$$

Se hace la suma vectorial por medio del paralelogramo en la figura 1.15, para obtener  $I_1$  y por último se hace la suma vectorial siguiente para obtener  $V_1$ .

$$\overline{V_1} = \overline{-E_1} + \overline{I_1 X_{d1}} + \overline{I_1 R_1}$$

El segundo caso es cuando se tiene una carga inductiva. En este caso no será inductiva para, lo que quiere decir que la carga es resistiva inductiva.

$E_1$  y  $E_2$  están en fase,  $I_2$  se atrasa con respecto a  $V_2$  debido a la carga inductiva (el ángulo de atraso depende del ángulo de impedancia de la carga).

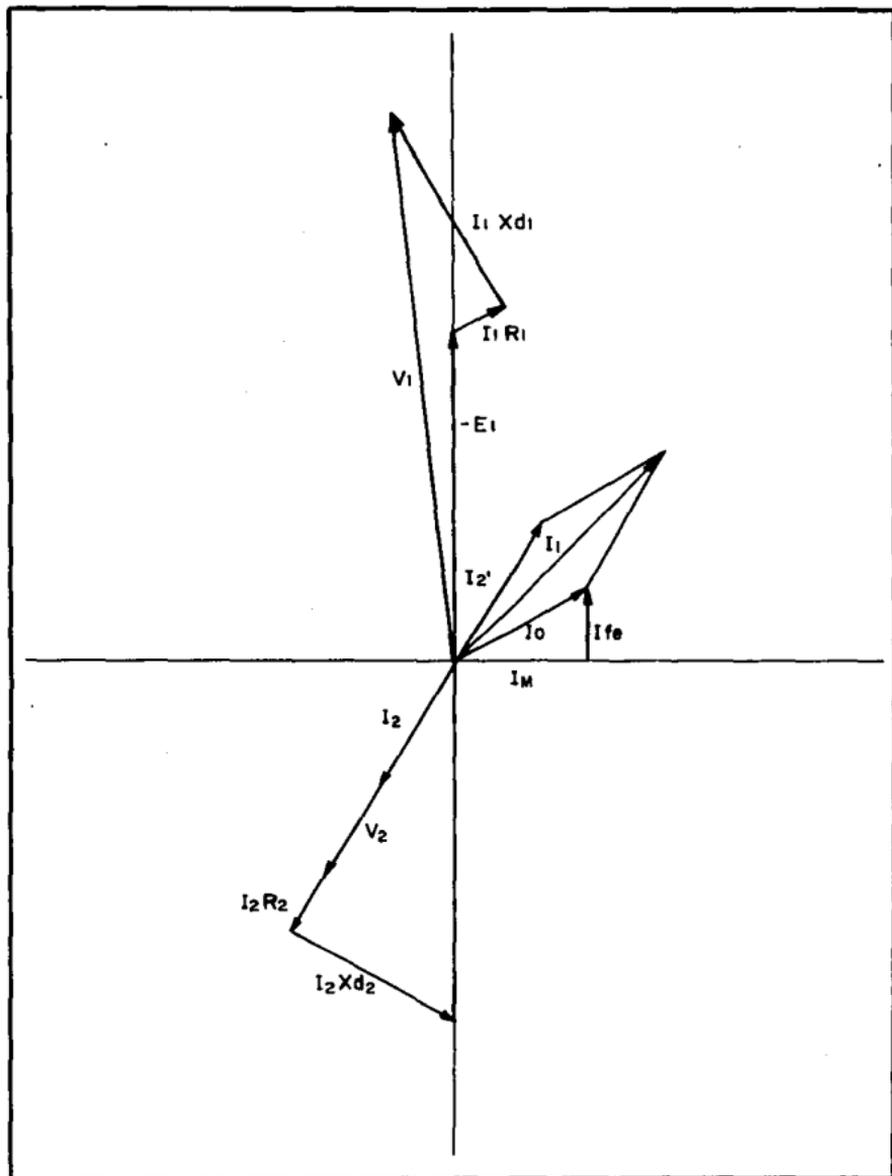


Figura 1.15. Diagrama vectorial con carga resistiva pura.

Haciendo las sumas vectoriales anteriores.

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + I_2 X_{d2}$$

$$I_o = I_{fe} + I_M$$

$$I_2' = \frac{-I_2}{a}$$

$$I_1 = I_o + I_2'$$

$$V_1 = -E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_{d1}$$

Se obtiene el diagrama vectorial de la figura 1.16.

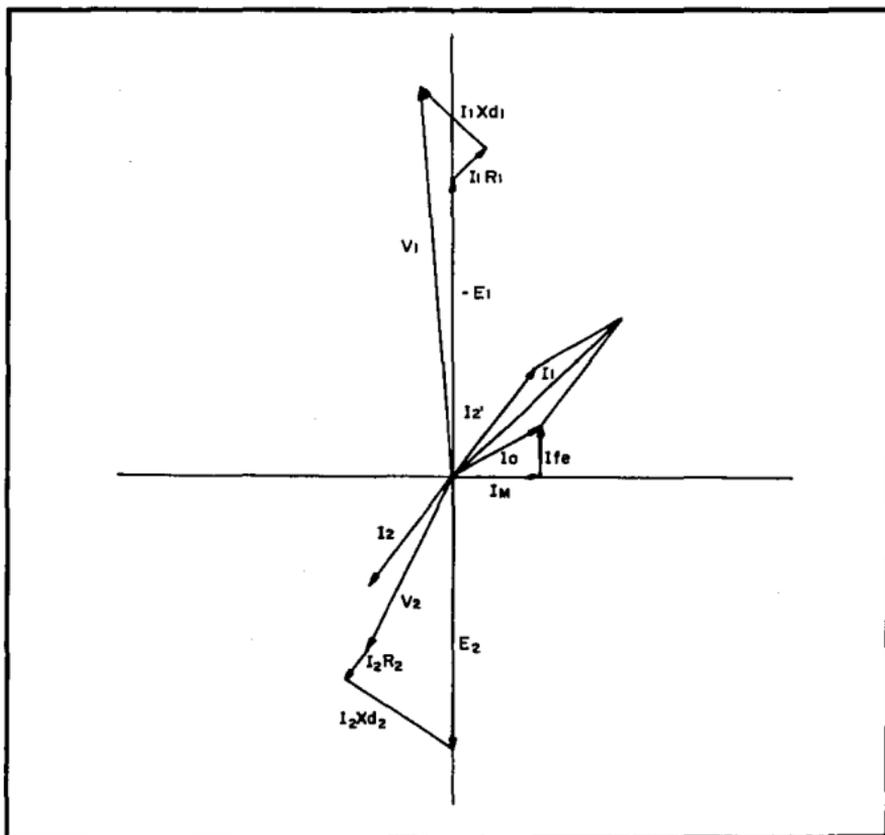


Figura 1.16. Diagrama vectorial con carga inductiva.

El tercer caso es cuando se trata de una carga capacitiva. Aquí hablaremos de una carga resistiva capacitiva.

En este diagrama se siguen los pasos anteriores, pero hay una diferencia y esta es que la corriente  $I_2$  se va a adelantar al voltaje  $V_2$ , el ángulo depende de la impedancia de la carga.

Por lo tanto el diagrama nos queda de la siguiente manera (figura 1.17).

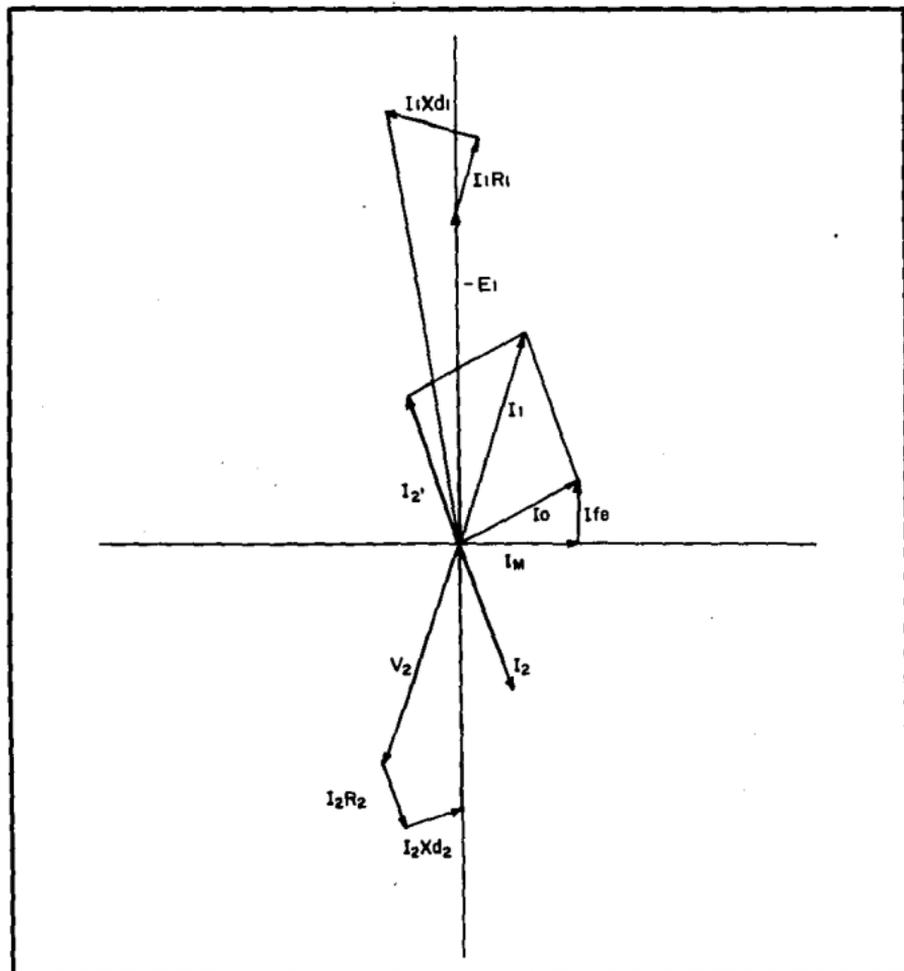


Figura 1.17. Diagrama vectorial con carga capacitiva.

## **CAPITULO II**

### **CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS DEL TRANSFORMADOR**

De acuerdo a los diferentes usos que tienen los transformadores de potencia y los requerimientos que exigen las condiciones de servicio, así como las situaciones económicas que se presentan, a continuación se indican las características constructivas de cada una de sus partes y la función que desempeñan:

#### **2.1. NUCLEO**

##### **2.1.1. Función.**

El núcleo sirve para formar el circuito magnético que permite la inducción de las fuerzas electromotrices por cuyo medio se puede transferir la energía de un circuito eléctrico a otro. Su función es la de conducir el flujo activo o sea que reduce la reluctancia (la oposición al flujo magnético) del circuito de flujo, debiendo tener gran permeabilidad magnética (facilidad de un material para magnetizarse), de manera que para inducir el flujo se requiere poca corriente.

##### **2.1.2. Construcción.**

Toda sustancia en la que aparece una gran inducción magnética al aplicarle un campo magnético determinado será siempre útil para la elaboración de un núcleo magnético.

Las propiedades se encuentran en cierta forma en el hierro y sus aleaciones con cobalto, wolframio, níquel, aluminio y otros metales por ser de fácil imanación, al emplear dichos materiales para núcleos se hace posible la obtención de inducciones magnéticas.

El núcleo del transformador de potencia se construye de tiras rectangulares de láminas de acero al silicio, cuya aleación es del 4 al 5% de silicio; éste tiene la propiedad de eliminar el efecto de envejecimiento, es decir, elimina el aumento gradual de las pérdidas en el núcleo.

Al aumentarse el porcentaje de silicio las pérdidas en el núcleo se reducen, pero el material se endurece y se vuelve más frágil.

El núcleo del transformador no puede hacerse de una pieza sólida, porque ésta actúa como si fuera una espira en corto circuito, permitiendo corrientes circulantes, causando así una pérdida muy alta, además de la elevación de la temperatura por el efecto de las corrientes y la resistencia del material del flujo.

Por este hecho el núcleo se hace de laminaciones aisladas entre sí o sus equivalentes para reducir esta pérdida.

En el ensamble de las laminaciones deberá estar bien formado el traslape de las juntas, de modo que la dispersión magnética y la reluctancia sean lo más bajas posibles.

Se utiliza un recocido para eliminar los esfuerzos residuales ocasionados por las operaciones de corta y manejo, y restaurar las propiedades magnéticas del material.

Para sujetar las laminaciones se emplean placas estructurales y pernos largos que no deben afectar la laminación. A estos pernos y toda la armazón se le denomina "prensa" y es necesario verificar su apriete y comprobar que se tiene una resistencia mecánica efectiva para soportar con seguridad los esfuerzos de corto circuito.

Los núcleos para transformadores se agrupan básicamente en las siguientes categorías:

- a) Tipo núcleo o de columnas.
- b) Tipo acorazado.

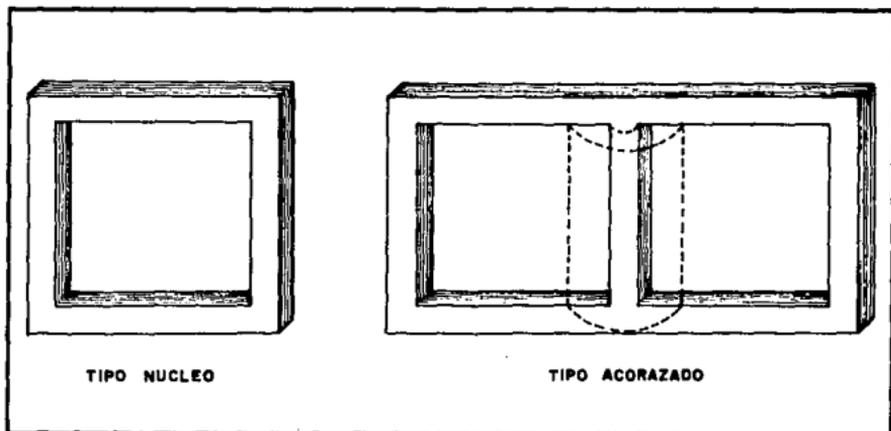


Figura 2.1. Tipo de núcleos.

### *a) Tipo núcleo o de columnas.*

Existen distintos tipos de núcleos tipo columnas, que están caracterizados por la posición relativa de las columnas y de los yugos.

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

**Núcleo Trifásico:** Se tienen tres columnas dispuestas sobre el mismo plano unidas en sus partes inferior y superior por medio de yugos. Sobre cada columna se incrustan los devanados primario y secundario de una fase. Las corrientes magnetizantes de las tres fases son distintas entre sí, debido principalmente a que el circuito magnético de las columnas externas es más largo que el correspondiente a la columna central.

### *b) Tipo Acorazado.*

Este tipo de núcleo acorazado, tiene la ventaja con respecto al llamado tipo columna, de reducir la dispersión magnética, su uso es más común en los transformadores monofásicos.

En el núcleo acorazado, los devanados se localizan sobre la columna central y cuando se trata de transformadores pequeños, las laminaciones se hacen en troqueles. Las formas de construcción pueden ser distintas y varían de acuerdo con la potencia. Como se puede ver en la Fig. 2.1.

### *2.1.3. Pérdidas en el hierro.*

El rendimiento de un transformador está determinado por las pérdidas eléctricas en el cobre de los devanados y por las pérdidas magnéticas en el núcleo.

Las pérdidas magnéticas en el núcleo se dividen en:

#### *A) Pérdidas por histéresis.*

El núcleo del transformador tiene la propiedad de tender a oponerse a la variación de la inducción magnética. A esta propiedad se le da el nombre de histéresis, que significa retraso, el lazo cerrado obtenido cuando el campo magnético  $H$  se varía de tal forma que tome todos los valores correspondientes a un ciclo cerrado, recibe el nombre de ciclo de histéresis.

Las pérdidas de histéresis se calculan con la siguiente fórmula:

$$P_h = n V f (B \text{ máx})^{1.6}$$

Donde:

**Ph = Pérdidas de potencia por corriente de histéresis.**

**n = Coeficiente de Steinmetz varía de 1.6 a 2.**

**V = Volumen del núcleo del material magnético.**

**f = Frecuencia de alimentación.**

**B máx. = Densidad de flujo máxima.**

**Exponente = Coeficiente de Steinmetz varía de 1.6 a 2.**

El trazo del ciclo de histéresis se forma con los valores de los parámetros de la variación cíclica del campo magnético aplicado (H) y de la inducción magnética resultante B.

La pérdida por histéresis es la energía convertida en calor a causa de una variación cíclica de fuerza magnetomotriz.

#### ***B) Pérdidas por corriente de Foucault.***

Cuando cambia el flujo en la laminación de un núcleo, se induce en ésta un voltaje y la corriente que fluye en respuesta a este voltaje, es conocida como corriente parásita o de Foucault, proporcional a  $I^2R$ .

Las pérdidas por corrientes de Foucault se calculan con la siguiente fórmula

$$P_e = P_c - P_h$$

Donde:

**Pe = Pérdidas por corrientes parásitas.**

**Pc = Pérdidas totales en el núcleo.**

**Ph = Pérdidas por histéresis.**

Para evitar los efectos de las corrientes de Foucault, éstas son reducidas empleando en la fabricación de núcleos, láminas muy delgadas y aisladas adecuadamente entre sí.

La función de los materiales aislantes es la de prevenir las corrientes de Eddy. El material más utilizado en la actualidad es el carlita.

Las pérdidas en un núcleo laminado causadas por las corrientes de Eddy son proporcionales al cuadrado del ancho de la placa e inversamente al valor medio de la resistencia de aislamiento por unidad de área.

## 2.2. DEVANADOS.

### 2.2.1. *Función.*

Los devanados están formados generalmente de dos bobinas de material conductor, las cuales están enlazadas por el Circuito Magnético o núcleo y en donde una de estas bobinas está conectada a la fuente y la otra a la carga. Los devanados constituyen los circuitos eléctricos del transformador, por un lado reciben la energía y por otro la entregan con sus parámetros de voltaje y corriente modificada.

Su función principal es la de crear un campo magnético con mínimas pérdidas en la energía.

### 2.2.2. *Construcción.*

En los transformadores de gran potencia se fabrican las bobinas con conductores de sección cuadrada o rectangular, los enrollados se efectúan en moldes, son cubiertos con cinta aislante, tratados al vacío para extraer hasta el último rastro de humedad y de aire, después se aplica el compuesto aislante caliente a presión hasta que queda bien impregnado, luego se meten a la estufa las bobinas para secarlas completamente y endurecer el compuesto aislante, hasta que queda una superficie lisa y dura para impedir la entrada de humedad.

El aislamiento que se usa es papel o tela recubierta con cinta de algodón.

Los devanados son diseñados con las características eléctricas y propiedades mecánicas lo mejor posible para soportar los esfuerzos de corto circuito y con la adecuada ventilación para evitar elevaciones de temperatura y puntos calientes.

Los devanados van colocados sobre las piernas del núcleo estando próximo a la laminación el devanado de B.T. y sobre éste el devanado de A.T., estando separados entre sí y del núcleo por barreras aislantes.

### 2.2.3. *Tipos de devanados.*

Los tipos de devanados son diseñados de acuerdo a su corriente y voltaje de aplicación, considerando además de las facilidades de fabricación y experiencia del personal.

1.- Tipo Helicoidal. Estas bobinas generalmente son usadas en bajos voltajes y altas corrientes; éstas se devanan en forma de hélice de diámetro constante.

2.- Tipo Capa de Alta Tensión. Estos devanados son comúnmente utilizados en voltajes arriba de 132 KV y pueden diseñarse para un rango amplio de corrientes.

3.- Tipo Disco. Las bobinas tipo disco son empleadas en devanados donde las tipo helicoidal dejan de ser económicas.

Las bobinas tipo disco consisten de un número de discos devanados alternadamente de adentro hacia afuera y de afuera hacia adentro y conectados en serie.

4.- Tipo Galleta. En los devanados con bobinas tipo galleta, la diferencia respecto a los devanados cilíndricos es que tanto el primario como el secundario está formado de bobinas en forma de galleta, y las cuales se colocan alternadamente en diferentes arreglos.

#### **2.2.4. Pérdidas en el cobre.**

Cuando se toma corriente del secundario de un transformador se produce calor (watts) en el conductor del devanado, igual a la corriente en amperes al cuadrado por la resistencia en ohms ( $I^2R$ ). De igual forma existe una pérdida de energía en el devanado primario.

Estas pérdidas son conocidas como pérdidas por "efecto Joule".

### **2.3 AISLAMIENTOS**

Los transformadores tienen una vida limitada y ésta depende de sus aislamientos; la gran cantidad y diversidad de factores que influyen sobre la vida de los aislamientos son muy complejos e interesantes en el diseño del transformador.

#### **2.3.1. Función del aislamiento.**

La función del aislamiento es limitar o controlar efectos eléctricos, teniendo otras dos funciones que es proveer soporte mecánico a los conductores y hacer posible la disipación del calor generado en ellos.

Debemos considerar las propiedades del aislamiento: dieléctricas, mecánicas y térmicas. Debido a que muchas de las fallas dieléctricas del transformador se deben a la pérdida gradual de propiedades mecánicas causadas por la operación continua a alta temperatura.

#### **2.3.2. Propiedades.**

En el estudio de comparación de unos dieléctricos con otros se tienen las siguientes propiedades:

a) Resistividad Dieléctrica. Definida como la resistividad volumétrica a corriente directa, medida en ohms-cm.

b) **Absorción Dieléctrica.** Es una acumulación de cargas eléctricas en el interior del material bajo la influencia de un campo eléctrico.

c) **Constante Dieléctrica.** Es la relación entre la capacitancia de un capacitor con un dieléctrico dado y la que tendría el mismo capacitor con aire como dieléctrico.

d) **F.P. del Aislamiento.** Es la relación entre la pérdida de energía en watts y la energía alimentada al sistema, considerado como un capacitor.

e) **Pérdida Dieléctrica.** Definida como la velocidad a la que se transforma la energía eléctrica en calor en un dieléctrico sometido a un campo eléctrico variable.

f) **Rigidez Dieléctrica.** Es el valor del voltaje que produce la ruptura del dieléctrico.

g) **Envejecimiento.** Entendido como pérdida gradual de las propiedades electromecánicas bajo ciertas condiciones de temperatura.

Los factores que afectan al aislamiento son:

1.- **Factor relativo al voltaje aplicado.** Forma de onda, magnitud, frecuencia, velocidad de variación, tiempo de aplicación, distribución a lo largo de los devanados.

2.- **Factores relativos a la disposición del aislamiento.** Forma de los electrodos, distancia entre ellos, forma del campo, naturaleza y forma de los dieléctricos.

3.- **Factores relativos a las condiciones de trabajo.** Temperatura, humedad y contaminación.

Los efectos notables de estos factores son:

Distribución de los esfuerzos dieléctricos.

Las pruebas a que sometían los transformadores se limitaban a las conocidas de baja frecuencia, basadas en el voltaje del sistema sin tomar en cuenta los transitorios probables y la coordinación de aislamiento a lo largo del mismo.

Los transformadores que pasaban las pruebas de voltaje aplicado y voltaje inducido eran considerados aceptables ya que la distribución de los esfuerzos dieléctricos es uniforme a lo largo de los devanados.

El desarrollo de los sistemas condujo a tomar en cuenta los posibles transitorios ocasionados por descargas atmosféricas, lo que originó las pruebas de impulso, las clases de aislamiento que originalmente se basaban en el valor nominal del voltaje entre fases, quedaron referidos a un nuevo valor llamado Nivel Básico de Impulso. (NBI).

En un nuevo avance se llegó a la conclusión de que eran más rigurosos los efectos de los transitorios causados por la operación de interruptores que por descargas atmosféricas. La distribución de los esfuerzos debidos a los transitorios depende de la distribución de la inductancia y capacitancia a lo largo de los devanados.

### *2.3.3. Disposición de los aislamientos.*

En el diseño de la estructura aislante al conocer la distribución de los esfuerzos dieléctricos a lo largo del devando, es preciso, además, colocar piezas aislantes del material adecuado, en la posición más conveniente.

– Para el diseño es importante conocer:

#### 1.– Falla dieléctrica.

La falla dieléctrica es cuando, por alguna razón un aislamiento se vuelve conductor, presentándose de dos maneras, una es por perforación o ruptura del aislamiento o por arrastre a través de su superficie.

#### 2.– Teorías de las fallas dieléctricas:

a) La teoría térmica. Las pérdidas dieléctricas sobre todo en aislamientos gruesos, calientan el material hasta un límite en el cual la disipación posible es igual al calor generado; si la generación de calor continúa más allá de la capacidad de disipación se produce la falla.

b) La teoría iónica. Se supone que el dieléctrico se comporta como un electrolito en que los iones se mueven bajo la acción del campo, disipando energía y produciendo nuevos iones, hasta que aparece la falla.

La posición de los aislamientos dentro de un campo eléctrico no es arbitraria, sino que depende de la forma del campo. De ahí la importancia al diseñar, ya que se parte de la disposición de los electrodos y el cálculo de la distribución de los esfuerzos dieléctricos transitorios, para definir la distribución de las superficies equipotenciales.

#### 3.– Principios usados en el diseño de estructuras aislantes.

a) El aislamiento sólido debe adaptarse, hasta donde sea posible a la forma del electrodo o de las superficies equipotenciales.

b) Debe evitarse que una pieza aislante conecte entre sí, puntos de distintas superficies equipotenciales.

c) Si en un lugar determinado del campo se emplean en serie 2 dieléctricos de distinta constante dieléctrica la distribución del voltaje es inversamente proporcional a la relación de constantes dieléctricas.

d) La rigidez dieléctrica de dos ductos llenos de aceite es mayor que la rigidez dieléctrica de un solo ducto de espesor igual a la suma de los dos.

#### 2.3.4. Clasificación térmica de los aislantes.

Las bases para asignar los límites de temperatura son:

1.- La clasificación de materiales aislantes en función de las temperaturas límites que se les puede asignar razonablemente.

2.- Elección de un valor adecuado de la temperatura ambiente límite, la cual al ser restada de las temperaturas límites, da los valores límites de aumento de temperatura.

3.- Establecer diferencias de temperaturas normales entre lecturas de temperaturas obtenidas en mediciones efectuadas y valores límites de aumento de temperatura adoptados.

4.- De ellas se derivan valores límites de los aumentos de temperatura observables, que son los valores límites utilizados para asignar la potencia a carga nominal.

Clasificación de Materiales Aislantes.

Clase O. Este aislante consiste en algodón, seda, papel y materiales orgánicos similares cuando no están impregnados ni sumergidos en un dieléctrico líquido.

Clase A. Este aislante consiste en: primero, algodón, seda, papel y materiales orgánicos similares impregnados o sumergidos en un dieléctrico líquido; segundo: en materiales moldeados o laminados, con relleno de celulosa, resinas fenólicas; tercero: Láminas y hojas de acetato de celulosa; cuarto: barnices (esmaltes) como los aplicados a conductores.

Clase B. Este aislante consiste en mica, amianto, fibra de vidrio y materiales inorgánicos, puede utilizarse poco material de la clase A pero únicamente para finalidad estructural.

Clase C. Consiste en: mica, vidrio, cuarzo y materiales inorgánicos similares.

Clase F. Consiste en materiales de mica, fibra de vidrio, asbesto, con sustancias adherentes adecuadas, se pueden incluir otros materiales no necesariamente inorgánicos.

Clase H. Consiste en: primero: mica, amianto, fibra de vidrio y otros materiales inorgánicos combinados con sustancias aglomerantes compuestas de silicones. Segundo: compuestos de silicones en goma o en sustancias resinosas,

pueden existir materiales de la clase A pero sólo en los puntos importantes durante la construcción.

### **SISTEMAS DE AISLAMIENTOS DE LOS TRANSFORMADORES.**

- 1.- Aislamientos Mayores.
- 2.- Aislamientos Menores.
- 3.- Aislamientos fase - fase
- I.- Aislamientos Externos:

- a) Porcelana
- b) Vidrio
- c) Sintético

#### **II.- Aislamientos Internos:**

##### **Orgánicos:**

- a) Algodón
- b) Papel:
- c) Seda
- d) Cartón
- e) Aceite, silicones
- f) Gases (SF<sub>6</sub>, etc.)
- g) Nieblas

##### **Inorgánicos:**

- a) Mica
- b) Fibra de vidrio
- c) Resinas epóxicas.

### **CRITERIOS BASICOS PARA LA COORDINACION DE AISLAMIENTOS.**

- 1.- Sobrevoltajes.
- 2.- Resistencia dieléctrica de los arreglos de aislamientos.
- 3.- Limitación de sobrevoltajes.
- 4.- Nivel de protección contra sobrevoltaje.

### 2.3.5. Temperaturas de aislamiento límites.

De las experiencias con aparatos en servicio y de las pruebas hechas en distintos materiales aislantes, se han asignado como norma, temperaturas de aislamiento límites (temperatura del punto más caliente). La temperatura del punto más caliente es el punto principal, de referencia, o la temperatura cota de referencia.

La vida de cualquier clase de aislamiento a la temperatura límite puede variar ampliamente con la calidad del material usado, con el cuidado con que está construido y la efectividad del soporte físico del aislante, la clase de servicio a que está destinado y las fuerzas físicas que tienden a destruirlo en servicio.

Valores límites del aumento de temperatura del aislamiento.

Los valores límites del aumento de temperatura del punto más caliente del aislamiento se obtienen restando 40°C (valor de la temperatura ambiente base), de la temperatura límite del punto más caliente.

#### TEMPERATURA GRADOS CENTIGRADOS

Material	Valor límite en el punto	
	más caliente	Aumento Límite
Clase O	90	50
Clase A	105	65
Clase B	130	90
Clase F	155	115
Clase H	180	140
Clase C	220	180

Los materiales empleados para la elevación de temperatura de 55°C, lo constituyen estructuras laminadas de papel pres pahn, telas barnizadas y varias clases de papel y aceite mineral.

Los aislamientos para transformadores sumergidos en aceite con una elevación de temperatura de 65°C, con los mismos materiales, derivados de la celulosa, pero sometidos a procesos químicos para incrementar la estabilidad térmica de los materiales.

## 2.4. ACEITE

### 2.4.1. *Función.*

El aceite tiene dos funciones:

1.- Uno de los medios más satisfactorios de refrigeración consiste en sumergir en aceite las partes funcionales del transformador.

2.- Como aislante, cuya fluidez le permite penetrar en todos los orificios del transformador.

### 2.4.2. *Tipos de aceites aislantes.*

#### a) Aceite artificial.

Son llamados comúnmente askareles y son compuestos sintéticos no inflamables, los cuales una vez descompuestos por arco eléctrico, solamente producen mezclas gaseosas no inflamables.

Por lo mismo son muy estables y difíciles de destruir; son contaminantes.

#### b) Aceite derivado del petróleo.

Este aceite es el que se usa en los transformadores de potencia, básicamente son dos tipos de aceites, los de base nafténica, que son los de importación y que proporcionan un aceite con características ideales, como su bajo punto de congelación, para usarlo en lugares en donde la baja temperatura es un factor importante para la operación de un equipo eléctrico; el otro tipo es el parafínico y que es la característica del aceite nacional.

El aceite nafténico es el de mejor calidad y es usado en equipo de alto voltaje y el aceite parafínico es de inferior calidad y sólo puede usarse en equipos de bajos voltajes como en transformadores de distribución.

### 2.4.3. *Propiedades del aceite.*

La vida de un transformador depende del estado de sus aislamientos, el aceite por lo tanto influye en gran parte en la conservación del mismo.

Para proveer condiciones óptimas de operación es necesario que al aceite que se va a usar en transformadores, se le efectúe un análisis con objeto de determinar la calidad de sus propiedades, posteriormente, durante la operación del aparato, es conveniente realizar al aceite pruebas periódicas de control, con el fin de verificar dichas propiedades y determinar la degradación que vaya sufriendo y así tomar medidas correctivas indicadas de acuerdo al deterioro.

Este deterioro puede ser debido a contaminación por mal sello del tanque, calentamientos, efecto corona o chisporroteo, presencia de humedad, oxidación, etc.

#### **2.4.4. Pruebas físicas.**

##### **1.- Densidad.**

La densidad de un aceite es la relación del peso de un volumen dado del mismo, al peso de un volumen igual de agua.

La densidad varía con la temperatura, de modo que se debe medir y hacer la corrección en tablas.

El dato de esta prueba sirve para identificación de la muestra, así como para la corrección de la tensión interfacial.

Con el resultado se puede determinar el tipo y origen del aceite, ya que el tipo nafténico tiene valores entre 0.880 a 0.890 y el tipo parafínico valores entre 0.840 a 0.860.

##### **2.- Viscosidad.**

Con esta prueba se mide la fluidez de un aceite, siendo necesaria para poder conducir el calor generado en el aparato y así actuar como refrigerante; un aceite con muy baja viscosidad contiene componentes volátiles y por ello el punto de inflamación será bajo.

En el aceite es importante la variación de la viscosidad de acuerdo a la temperatura, ya que el bajo índice de viscosidad indica grandes cambios de viscosidad con la temperatura.

##### **3.- Aspecto visual.**

El observar el aspecto del aceite puede ser de gran ayuda ya que fácilmente se determina su estado, que debe ser limpio, transparente y libre de sedimentos.

##### **4.- Temperatura de inflamación e ignición.**

La temperatura de inflamación es una indicación de los constituyentes volátiles del aceite, la especificación es de 145°C mínimo; una temperatura de inflamación baja, con una temperatura de ignición alta en un aceite usado puede indicar corona incipiente o de hecho arqueo dentro del equipo, también es una indicación de la presencia de productos de ruptura molecular volátiles presentes en el aceite.

### 5.- Temperatura de congelación.

Es la temperatura a la cual el aceite deja de fluir, una baja temperatura de congelación es necesaria para asegurar que el aceite fluya aun en temperaturas frías.

En aceites parafínicos la especificación es de 26°C como máximo y en aceites nafténicos -40°C como máximo.

### 6.- Tensión interfacial.

El deterioro de los aceites aislantes se cree que se debe a los efectos de la oxidación o de la presencia de impurezas disueltas del material con el cual el aceite tiene contacto, también de contaminación externa, esta prueba mide las impurezas polares solubles en el aceite capaces de orientarla en la cara aceite-agua.

### 7.- Contenido de partículas.

Esta prueba tiene por objeto determinar la cantidad de partículas que contiene una muestra de aceite, éste se pasa a través de un filtro calculándose el peso de impurezas detenidas y relacionándolas con el volumen previamente determinado.

## 2.4.5. Pruebas eléctricas.

### 1.- Tensión de ruptura.

Por definición la tensión de ruptura dieléctrica de un aceite aislante es una medida de su capacidad para soportar un esfuerzo eléctrico. Esta prueba es la más frecuentemente usada y una de las más importantes, la prueba es capaz de revelar dos cosas: La resistencia momentánea de una muestra de aceite al paso de la corriente y la relativa cantidad de agua libre, polvo, lodos o cualquier partícula conductora presente en la muestra.

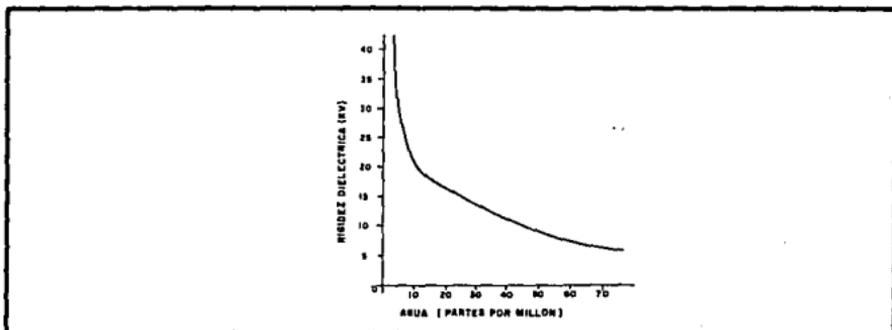


Figura 2.2. Efectos del agua libre sobre la rigidez dieléctrica del aceite aislante.

Para darnos una idea del efecto que tienen el agua libre sobre la rigidez dieléctrica del aceite aislante, en la Fig. 2.2. se presenta la curva característica.

Suponiendo que el aceite ha perdido o disminuido su propiedad aislante, debido al agua, polvo, lodo o partículas conductoras suspendidas en él, es lógico suponer que los materiales aislantes sumergidos en aceites pueden ser igualmente afectados.

## 2.- Factor de potencia.

Uno de los principales requisitos que debe cumplir un buen aceite aislante es la ausencia de agua.

Deben evitarse otros factores o compuestos de baja resistividad para evitar la degradación y la falla del aislante.

El factor de potencia alto encontrado en aceites aislantes que se encuentran dentro de transformadores sellados se atribuye a la formación de pequeñas cantidades de compuestos que generan iones o que conducen electrones; en estos compuestos siempre se han encontrado trozos de cobre; la presencia de corrosivos en el aceite que se usa en transformadores, produce reacción con el óxido cuproso presente en todas las superficies de cobre, formándose compuestos cuprosos solubles en el aceite y cantidades equivalentes de agua, esto eleva el factor de potencia, y son muy bajas las cantidades de cobre necesarias para elevar el factor de potencia.

Las condiciones para que el factor de potencia no se incremente es usar aceite no corrosivo.

El factor de potencia es una prueba de mucha importancia para evaluar la condición de un aceite, desde el punto de vista eléctrico el factor de potencia es la medida del coseno del ángulo que forman los vectores de la potencia real consumida en el aislamiento y la potencia aparente, correspondiente al efecto capacitivo del aislamiento, resultante del voltaje aplicado durante la prueba.

El incremento del factor de potencia de acuerdo a la temperatura no siempre es constante ya que los contaminantes del aceite son los que incrementan el valor a la temperatura.

## 2.5. BOQUILLAS.

### 2.5.1. Función.

Las boquillas o bushings son los dispositivos que se usan para pasar las conexiones internas del transformador hacia el exterior, a través de la tapa o pared

del tanque, proporcionando un camino conductor aislado adecuadamente para evitar fugas de corriente a tierra.

### 2.5.2. Tipos de construcción.

Existen diferentes tipos de boquillas, la aplicación de cada tipo depende de las características eléctricas y constructivas del transformador, siendo las siguientes:

a) Tipo macizo. La boquilla es una pieza de porcelana, compuesta de una brida de sujeción que divide las partes externa e interna; la parte externa se forma con varias campanas que sirven para dar la distancia de flameo y la parte interna, de forma cónica, longitudinalmente tiene un orificio que la atraviesa por donde se pasa el cable terminal de la bobina, ajustado con su aislamiento propio. Anteriormente el espacio libre entre cable y boquilla se rellenaba con alguna pasta aislante licuada, que no ofrecía un sello adecuado, ya que permitía la entrada de humedad y la salida de aceite a través del forro del cable, actuando como una mecha.

Actualmente se coloca en el interior de la boquilla un birlo de cobre duro, sujetado con tuercas en ambos extremos y empacado con corcho, con lo que se logra un sello correcto. (Ver figura 2.3a).

Este tipo de boquillas se usa en tensiones de 6 y 23 Kv.

b) Tipo relleno. El tipo anterior no es apto para tensiones elevadas por la presencia de aire entre la porcelana y el birlo, lo que ocasiona que las boquillas se comporten como dos condensadores en serie entre línea y tierra, uno de porcelana y uno de aire. La diferencia de capacitancias y rigideces hace que el gradiente eléctrico en la porcelana quede fuera de control y se produzcan concentraciones de campo en algunas puntas de la boquilla.

El tipo relleno tiene un gran espacio entre la porcelana y el birlo, pero este espacio no está ocupado por aire sino por aceite (Ver fig. 2.3b).

La boquilla llena de aceite consiste en una varilla conductora de un cierto número de cilindros delgados coaxiales de material aislante separados por separadores de madera dura tratada.

La varilla y los cilindros aislantes están soportados en el interior de dos conos huecos de porcelana y los espacios libres de la boquilla se llenan de aceite aislante.

En el exterior de los aisladores lleva campanas a fin de incrementar la distancia desarrollada entre las terminales y el tanque puesto a tierra. El cono inferior penetra bajo el nivel de aceite y requiere menos distancia desarrollada que el cono superior, que está expuesto a la intemperie.

La boquilla está proporcionada de manera que, a lo largo de su superficie, el gradiente de potencial sea casi uniforme. La parte superior está terminada por una caja cilíndrica, con una mirilla de vidrio que permite apreciar el nivel del aceite.

c) Tipo condensador. Esta boquilla se presenta en la figura 2.3, está constituida por capas alternadas de aislantes y hojas de metal arrolladas alrededor de una varilla conductora central.

La parte superior de este conjunto interno se monta en el interior de un cono hueco de porcelana. El extremo inferior penetra en el aceite del transformador. La misión de la hoja metálica es producir en el interior del aislante un gradiente de potencial casi uniforme.

Si se suprimiera la hoja metálica, el gradiente de potencial entre la varilla y la funda variaría aproximadamente en razón inversa a la distancia radial al eje de la varilla, por tanto, el gradiente en el aislante inmediato a la varilla sería mucho mayor que cerca de la funda, a menos que fuera muy grande el diámetro de la varilla.

La hoja metálica descompone al aislante en un cierto número de condensadores en serie. Las tensiones en los condensadores en serie son inversamente proporcionales a sus capacidades.

Si las capas de aislantes son todas de igual espesor, las capacidades de los condensadores son proporcionales al área de sus superficies. Si las capacidades son iguales, las tensiones entre capas de aislante son iguales.

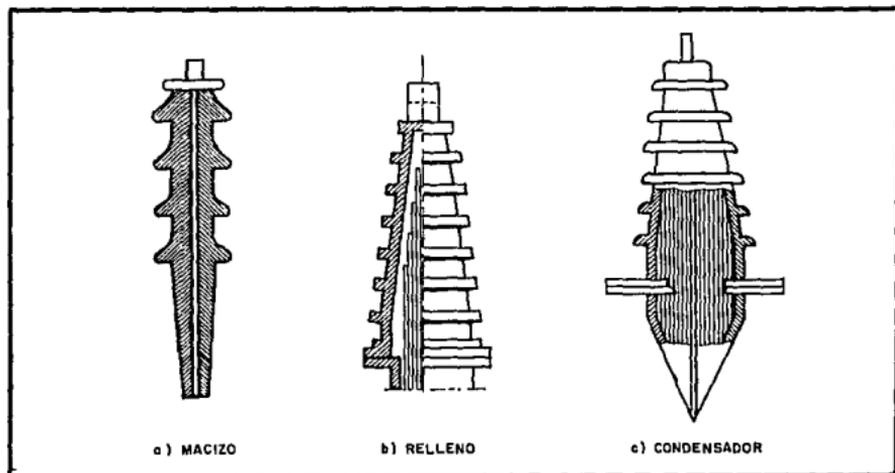


Figura 2.3. Tipo de boquillas.

Luego, si las longitudes axiales de las capas varían inversamente con sus diámetros, el esfuerzo máximo sobre el aislante en las fibras interiores de cada capa es aproximadamente el mismo.

Las boquillas tipo condensador se usan para tensiones elevadas.

Actualmente las boquillas para altas tensiones traen en su placa de datos el valor original de factor de potencia.

## 2.6. TANQUE.

### 2.6.1. *Función.*

Las principales funciones del tanque del transformador son:

a) Proporcionar protección mecánica a los elementos internos del transformador.

b) Contener el aceite aislante.

c) Disipar el calor generado en el interior, por radiación a través de su superficie expuesta al exterior o por medio de elementos auxiliares de refrigeración.

d) Tiene funciones estructurales, contando con ganchos, ojillos, topes, etc. para efectuar maniobras de levantamiento o arrastre en la transportación.

e) Facilita la fijación de dispositivos de detección, indicación y protección.

### 2.6.2. *Construcción.*

Dependiendo de la capacidad, los tanques y la tapa son construidos de lámina o planchas de acero de bajo porcentaje de carbón.

Todas las costuras son soldadas y donde es necesario llevan doble cordón de soldadura; en algunos transformadores también la tapa va soldada.

Anteriormente se construían remachando las uniones de las láminas, lo cual no proporciona un sello correcto del aceite y se tenían pequeñas filtraciones constantes.

Los transformadores modernos son diseñados para soportar presiones absolutas hasta de 0.01 mm. de mercurio sin tener deformación estando armados con boquillas, radiadores y tanque conservador.

Esto permite efectuar los procesos recomendados para el llenado de aceite y de extracción de humedad y gases.

También de acuerdo con la capacidad tienen registros de acceso para revisión interior; válvulas de llenado, drenado y muestreo de aceite, y conectores para puesta a tierra.

### COMPONENTES AUXILIARES

Los componentes auxiliares cubren funciones específicas para una operación correcta y segura, siendo las siguientes:

- a) Protección del equipo contra daños severos y descargas atmosféricas.
- b) Conservación del aceite y los aislamientos, protegiéndolos del medio ambiente.
- c) Vigilancia durante la operación para prevenir condiciones inseguras.
- d) Disipar el calor producido por el núcleo y los devanados para sostener las características de potencia de acuerdo al diseño del transformador.
- e) Adoptar la relación de transformación de acuerdo al nivel de voltaje que se tiene en el primario y al requerido en el secundario.

### 2.7. CAMBIADOR DE DERIVACIONES.

Su objetivo es adoptar el arrollamiento de alta tensión a la tensión dominante en la línea de alimentación, de manera de obtener una tensión secundaria apropiada y si es posible normal, aunque la tensión de alimentación difiera un porcentaje de la normal.

Los voltajes de las redes de transmisión, no siempre conservan un valor fijo debido a factores que afectan la regulación, por lo que eventualmente es necesario modificar la relación de espiras para corregir los niveles de voltaje a rangos adecuados.

Lo que se hace con el cambiador de derivaciones es suprimir o aumentar el número de vueltas o de bobinas de un devanado con lo que se obtiene un nivel aceptable.

El cambiador de derivaciones va generalmente colocado en el devanado de A.T., por ser éste el devanado exterior siendo el más fácil para la conexión y sin dificultad en cuanto al aislamiento.

Como el devanado de alto voltaje tiene un gran número de vueltas el derivador se puede ajustar para tener una mejor regulación de voltaje.

El cambiador en el lado de baja tensión no se recomienda debido a que los conductores del devanado son de mayor sección, llevando por ello una corriente considerable, que podría ocasionar calentamiento en las superficies de contacto.

Además este devanado normalmente está en la parte interna y representa dificultades de construcción.

### **CAMBIADOR DE DERIVACIONES SIN CARGA**

Son diseñados para ajustar la relación de transformación, variando el número de espiras activas de los devanados de A.T. o B.T., cuando el transformador puede desconectarse de la línea.

Este ajuste generalmente es manual y se hace para adaptar el transformador al voltaje promedio requerido.

### **CAMBIADOR DE DERIVACIONES CON CARGA**

Este cambiador se diseña para trabajar bajo carga; es decir, no es necesario desconectar el transformador para efectuar los cambios de derivaciones, ya que cuenta con los medios eléctricos y mecánicos para evitar interrupciones y arcos excesivos del flujo de corriente durante los cambios.

Este cambiador se puede operar manualmente y además cuenta con un control que envía la señal para alimentar un motor que opera el mecanismo del cambiador.

Por este hecho el cambiador cuenta con un dispositivo que permite puentear las dos derivaciones involucradas sin que esa parte de la bobina quede en corto circuito, previniendo así el excesivo flujo de corriente entre los derivadores.

## **2.8. INDICADORES.**

El transformador de potencia para tener un buen funcionamiento, es indispensable que cuente con dispositivos llamados indicadores, siendo los siguientes:

### **2.8.1. *Temperatura del aceite.***

El indicador es un instrumento tipo carátula, activado por un elemento bimetálico contenido dentro de una funda metálica, indica mediante la carátula, la temperatura del aceite en la parte superior del transformador. La graduación de la carátula es en grados centígrados, señalada mediante una aguja móvil. Tiene una aguja de máximas, señalando la temperatura máxima que alcanzó el aceite en un período de tiempo determinado; para restablecer esta aguja se utiliza un imán.

En el indicador de temperatura se tienen contactos que se usan para control de arranque de ventiladores y para enviar señal de alarma cuando la temperatura del aceite del transformador no sea la adecuada para una confiable operación.

## 2.8.2. Temperatura de los devanados.

Uno de los factores que afectan seriamente la vida de los aislamientos es la temperatura, cuyo límite permisible está fijado según la clase de materiales que lo constituyen.

Los aislamientos sólidos de un transformador están envolviendo directamente los devanados, que es precisamente donde se tiene la temperatura más elevada.

Debido a la inercia térmica, la temperatura del aceite no es un índice para determinar la temperatura en los devanados, siendo importante conocer esta temperatura para evitar sobrecalentamiento. Como no es posible colocar en el interior de las bobinas un detector de temperatura, se utiliza un termómetro similar al del aceite en el cual la caja del bimetalo está rodeada por el exterior del tubo, de un devanado de calefacción hecho sobre un tubo de micarta, el detector se ensambla en un tubo ciego que está montado en la pared del transformador proyectado dentro de la zona caliente del aceite.

La bobina calefactora recibe una corriente reducida proporcional a la corriente de carga, esta corriente la toma del secundario de un transformador de corriente que está montado en la guía terminal de uno de los devanados del transformador.

La bobina calefactora está dentro del aceite caliente y su devanado trabaja con la misma densidad de corriente que las bobinas principales.

Además el aislamiento del devanado de la bobina calefactora tiene una elevación de temperatura por encima de la temperatura del aceite, igual a la de las bobinas del transformador principal.

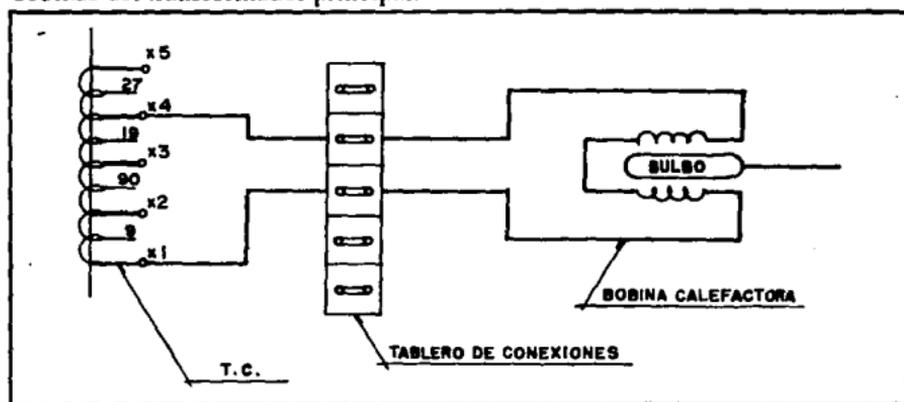


Figura 2.4.

Por estos medios la temperatura del interior de los devanados del transformador principal se reproducen en el área que rodea el elemento bimetalico del indicador (ver Fig. 2.4).

El indicador lleva integrados interruptores que están ajustados para operar a diferentes niveles de temperatura, los de nivel inferior operan los circuitos de control de los enfriadores y el del nivel superior controla el circuito de alarma cuando la temperatura excede el rango permitido.

La temperatura de los devanados se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$T_2 = \frac{R_2}{R_1} (234.5 + T_1) - 234.5$$

donde:

$R_2$  = Resistencia de los devanados a la temperatura  $T_2$ .

$R_1$  = Resistencia de los devanados a la temperatura  $T_1$ .

$T_1$  = Temperatura ambiente.

$T_2$  = Temperatura real del devanado.

Estos valores se comparan con las lecturas indicadas en el termómetro de los devanados, para determinar la corriente proporcional que se debe alimentar al calefactor para corregir el error, ajuste que se efectúa tomando una relación de transformación adecuada del transformador de corriente y si es necesario se intercala un autotransformador balanceador para conseguir un ajuste más preciso.

### 2.8.3. Indicador de vacio o manovacuómetro.

Indica la presión positiva o negativa dentro del transformador; normalmente debe marcar una presión cero o positiva, para evitar la entrada de aire del medio ambiente. Se usa en transformadores sellados con cámara inerte con presión regulada o sin regular.

### 2.8.4. Indicador de nivel.

Indica el nivel de aceite aislante en el tanque del transformador, mediante un flotador de corcho acoplado magnéticamente a una aguja indicadora. Tiene un contacto que se cierra para enviar una señal de alarma cuando el nivel baja el límite inferior que está marcado con "Lo" la marca del nivel normal es  $25^{\circ}\text{C}$  y como límite superior  $H_1$ .

### **2.8.5. Indicador de flujo del aceite.**

Este indicador se instala en el tubo de descarga de las bombas del sistema de enfriamiento y consiste de una parte interior y otra exterior, acopladas magnéticamente. La parte interior es una veleta metálica que cuando no hay flujo su posición es perpendicular al tubo y con flujo gira 90° quedando paralela al sentido del mismo; este movimiento se transmite por medio de la varilla de giro y un imán permanente al dispositivo exterior, controlando la aguja indicadora y un contacto normalmente cerrado en la posición de no flujo para enviar la señal de alarma.

Esta señal es controlada de modo que cuando la bomba no es alimentada por el circuito principal de control, queda bloqueada para enviar falsa alarma. La carátula lleva las marcas de "off" en la posición de no flujo y "on" en la de flujo correcto.

## **2.9. DISPOSITIVOS DE PROTECCION CONTRA FALLAS INTERNAS**

Los transformadores están expuestos a recibir tensiones muy elevadas y sobrecorrientes, que pueden ocasionar la reducción de su vida útil, así como daños, que pueden ser leves o severos. En ocasiones la falla puede producir la explosión del equipo haciendo que se incendie el aceite y los aislamientos, teniendo con esto un riesgo para las personas próximas al transformador.

Para prevenir las condiciones anormales y limitar los efectos de las fallas en los transformadores, se cuenta con dispositivos y circuitos de protección adecuados, siendo éstos los que a continuación se describen:

### **2.9.1. Relevador detector de gases (Buchholz).**

El relevador Buchholz es instalado en transformadores de potencia mayores de 10 MVA que cuentan con tanque conservador de aceite. Su instalación es intercalada en la tubería que comunica el tanque conservador con el tanque del transformador.

Este relevador tiene la función de detectar los desperfectos ocurridos en el interior del transformador que originan desprendimiento de gases.

En la Fig. 2.5. se muestra el esquema de un relevador Buchholz con sus elementos constitutivos siguientes.

1.- Cámara de acumulación de gases.

2.- Bridas de conexión, una para el lado del tanque del transformador y la otra del tanque conservador.

3.- Dos flotadores equipados con un bulbo de mercurio que sirve como interruptor en su operación, 3A sirve para alarma y 3D para disparo.

4.- Dos válvulas que sirven para purgar el buchholz y para evacuar los gases acumulados.

5.- Registro de cristal, sirve para verificar el nivel del aceite y cantidad de gases acumulados.

6.- Placa desviadora, sirve para obligar a los gases a pasar a la parte superior del recipiente.

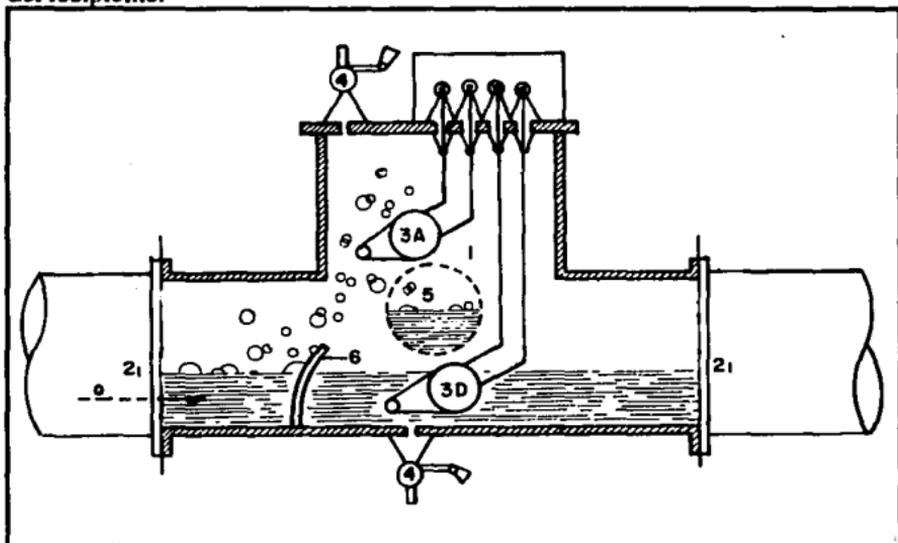


Figura 2.5.

La posición del flotador de alarma (3A), depende del nivel de aceite en la cámara (1), siendo este nivel función, a su vez, de la presión de los gases que contiene el aceite.

En cuanto al flotador de desconexión (3D), su posición depende de la velocidad del caudal de aceite y de gas que circula desde el transformador al depósito conservador.

El funcionamiento del relevador es el siguiente:

La cámara (1) normalmente llena de aceite, contiene los flotadores 3A y 3D, móviles alrededor de sus ejes de giro. Si a consecuencia de una falla incipiente o

poco importante, se producen pequeñas burbujas de gas, éstas se elevan en el tanque del transformador y se dirigen hacia el depósito conservador de aceite.

Estas burbujas al llegar al aparato, son acumuladas en la cámara (1), donde baja progresivamente el nivel de aceite a medida que se aumenta el volumen de gas.

Cuando la cantidad de gas es suficiente, la inclinación del flotador (3A) llega a cerrar su contacto, enviando la señal al cuadro de alarmas del tablero de la subestación (visual y sonora).

Si continúa el desprendimiento de gas, el nivel de aceite en la cámara (1) baja hasta que los gases pueden pasar a la tubería que los lleva hasta el tanque conservador.

Una observación de la cantidad y aspecto de los gases desprendidos permite localizar la naturaleza y la gravedad de la falla.

El color de los gases da una idea del lugar donde se tiene la falla, por ejemplo.

- Gases blancos = Proceden de la destrucción del papel.
- Gases amarillos = Proceden del deterioro de piezas de madera.
- Gases negros o grises = Proceden de la descomposición del aceite.

El flotador (3D) se conserva en reposo mientras el desprendimiento de gas es lento. Si la falla se acentúa, el desprendimiento se hace violento con lo que se forman grandes burbujas que provocan un flujo brusco de gas y aceite a través de la tubería, hacia el tanque conservador. Este flujo encuentra el flotador (3D) y lo acciona, activando el cierre de su contacto, con lo que se manda la señal de apertura de los interruptores de potencia del banco de transformación.

Se obtiene el mismo resultado, en caso de sobrecarga peligrosa para el transformador, porque la corriente de carga resulta demasiado elevada o a consecuencia de un corto circuito en la red secundaria, en este caso, a consecuencia del calentamiento de las bobinas, se producen gran cantidad de pequeñas burbujas, que actúan como si se tratara de algunas grandes, es decir, a manera de un choque que obliga a refluir el aceite, el cual acciona el flotador (3D).

Esta acción es tan rápida que el disparo de los interruptores se produce antes de que el transformador sea afectado por la sobrecarga.

La aparición de las pequeñas burbujas gaseosas, se manifiesta solamente cuando las temperaturas de las bobinas se elevan hasta el punto en que el aceite se volatiliza, que es alrededor de 150°C, por lo que la temperatura de las bobinas no puede elevarse mucho por encima de esta temperatura.

Según la clase de anomalía se produce gas en forma lenta, como por ejemplo, por corrientes parásitas, corto circuitos entre espiras, conexiones defectuosas o bien se produce gas en forma violenta, como por ejemplo, por arcos de gran energía entre fases o de fase a núcleo o tanque.

El empleo del relevador Buchholz reduce en forma importante el peligro de explosión e incendio del aceite, que puede producirse a consecuencia de una falla en el transformador.

### *2.9.2. Dispositivos de sobrepresión súbita.*

En casos especiales donde no se tiene tanque conservador en los transformadores, el relevador buchholz no se puede instalar. En estos casos se tienen instalados relevadores de sobrepresión súbita.

Este es un dispositivo mecánico compuesto por una compuerta aprisionada con un resorte que es vencido cuando la presión interna es de un valor de aproximadamente  $0.7\text{kg/cm}^2$ , una vez abierta la compuerta y descargada la sobrepresión vuelve a cerrarse.

En algunos dispositivos se cuenta con un microswitch para mandar la señal de alarma o de disparo y en otros se tiene también una señal fija visual que indica cuándo el dispositivo ha operado.

## 2.10. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.

Las pérdidas en el cobre y en el núcleo del transformador se convierten en calor que es necesario disipar al medio ambiente, para mantener la temperatura en el interior del transformador por debajo del máximo que puede soportar el aislamiento, sin reducir seriamente sus características mecánicas y dieléctricas.

El transformador de poca capacidad, tiene la superficie expuesta al exterior relativamente grande con respecto al volumen y el enfriamiento por radiación y por convección natural es suficiente para disipar el calor.

Pero al aumentar la capacidad del transformador, aumentan las pérdidas y tendría que colocarse en un tanque demasiado grande para tener la superficie de radiación necesaria.

Para evitar lo anterior, se tienen medios artificiales que facilitan la refrigeración, esto se logra dotando de conductos de ventilación a los devanados, aumentando la superficie de radiación del tanque, conservando dimensiones adecuadas y adicionando elementos que ayuden a una rápida disipación del calor.

Los refrigerantes empleados son: el aire, el aceite dieléctrico, el agua y otros líquidos dieléctricos.

El calor generado en los devanados se transmite al aceite en el cual se hallan sumergidos, éste a su vez lo transmite a los fluidos que sirven para enfriarlo como son el aire y el agua, lográndose esto a través del tanque o por medio de radiadores adaptados a éste.

Para hacer más eficiente la disipación del calor se tienen los siguientes sistemas de enfriamiento:

**OA:** Sumergido en aceite con enfriamiento natural.

Este es el enfriamiento más usado en transformadores de capacidad reducida, como son los de distribución, y resulta ser el más económico. El aceite circula por convección natural dentro de un tanque con paredes lisas o corrugadas o bien provisto de radiadores tubulares. (Fig. 2. 6).

**OW:** Sumergido en aceite, con enfriamiento por agua.

Este tipo de transformador está equipado con un cambiador de calor tubular colocado fuera del tanque o con un serpentín instalado dentro del mismo.

El agua de enfriamiento circula en el interior del serpentín y se drena por medio de una bomba independiente. El aceite fluye, estando en contacto con la superficie exterior del serpentín transmitiéndole el calor. El agua caliente se descarga en una pileta para su enfriamiento. La desventaja de este transformador es que no tiene capacidad propia sin circulación de agua y una ventaja importante es un costo menor. (Ver Fig. 2.7).

**OA/FA:** Sumergido en aceite con enfriamiento natural y con aire forzado.

Este transformador es básicamente una unidad OA a la cual se le han agregado ventiladores para aumentar la disipación del calor.

El arranque y paro de los ventiladores es controlado de acuerdo con las condiciones de la carga y temperatura del transformador, utilizando un contacto del termómetro del aceite, ajustado para cerrarse en un rango de temperatura de 55 a 60°C. Este tipo de enfriamiento se aplica principalmente a transformadores hasta de 30 MVA. (Ver Fig. 2.8).

**FOA:** Sumergido en aceite, con enfriamiento por aceite forzado, con enfriadores de aire forzado.

El aceite de este transformador es enfriado al hacerlo pasar por cambiadores de calor o radiadores colocados fuera del tanque.

Su diseño está destinado a usarse con los ventiladores y las bombas de aceite trabajando continuamente, para sostener la totalidad de su carga nominal. También este diseño puede trabajar de acuerdo con la temperatura de operación.

Su principal desventaja es que estos transformadores no tienen capacidad suficiente con el equipo de enfriamiento parado y necesitan por fuerza un servicio auxiliar de alimentación.

Las ventajas que se tienen es un costo menor, menor volumen y peso. Una aplicación importante es en transformadores de unidad en plantas generadoras con servicio propio seguro.

Para el control de enfriamiento, arranca en el momento de energizarse el transformador. (Ver Fig. 2.9).

**OA/FA/FA:** Sumergido en aceite, con enfriamiento natural, con enfriamiento forzado por dos grupos de ventiladores.

En este transformador se tienen dos grupos de ventiladores sobre los radiadores, uno se conecta a una temperatura y el segundo empieza a operar a una temperatura mayor.

La aplicación de estos transformadores de gran capacidad es en subestaciones aisladas donde se tiene poco mantenimiento.

**OA/FA/FOA:** Sumergido en aceite, enfriamiento forzado por dos grupos de ventiladores y con bombas de aceite.

Estos transformadores tienen válvulas T automáticas que permiten la circulación de aceite entre tanque y radiador por convección mientras no operan las bombas de aceite.

El primer paso de enfriamiento es exclusivamente con ventiladores, y apenas el segundo incluye las bombas de aceite.

Las desventajas que presenta este sistema es que requiere servicio propio para capacidad plena y también se tienen pérdidas mayores.

Una de las ventajas es que se tiene una capacidad propia reducida sin servicio propio y un costo menor.

El sistema es aplicado a transformadores de 100 MVA en adelante en subestaciones con operador.

**OA/FOA/FOA:** En aceite, enfriamiento forzado por dos grupos de bombas de aceite y ventiladores.

Estos transformadores tienen válvulas T automáticas que permiten la circulación de aceite entre tanque y radiador por convección mientras no operan las bombas de aceite. El control por temperatura arranca primero un grupo de bombas y ventiladores y si la temperatura sigue subiendo arranca también el segundo grupo.

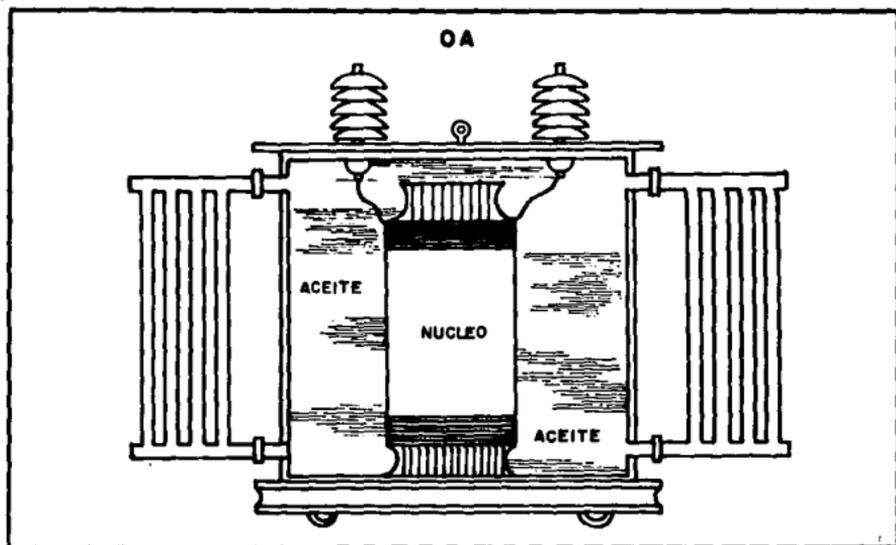


Figura 2.6.

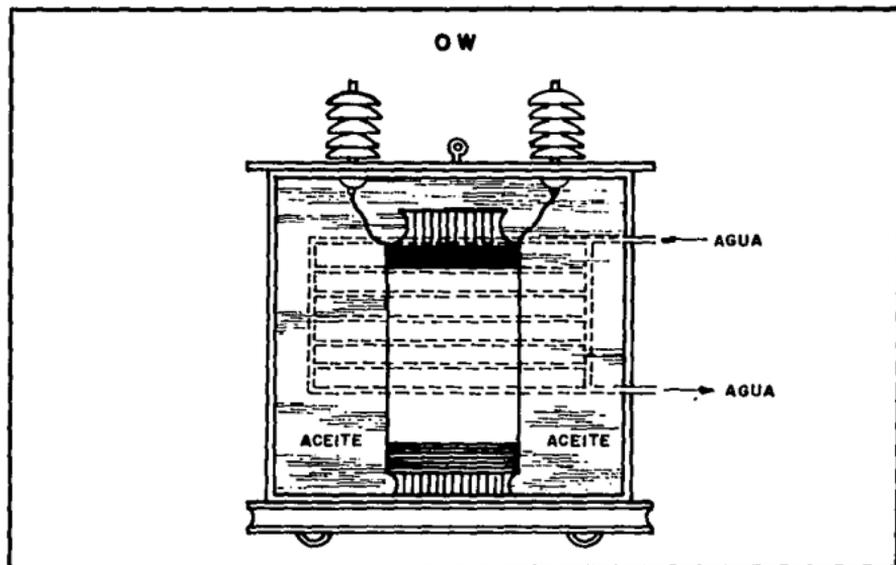


Figura 2.7.

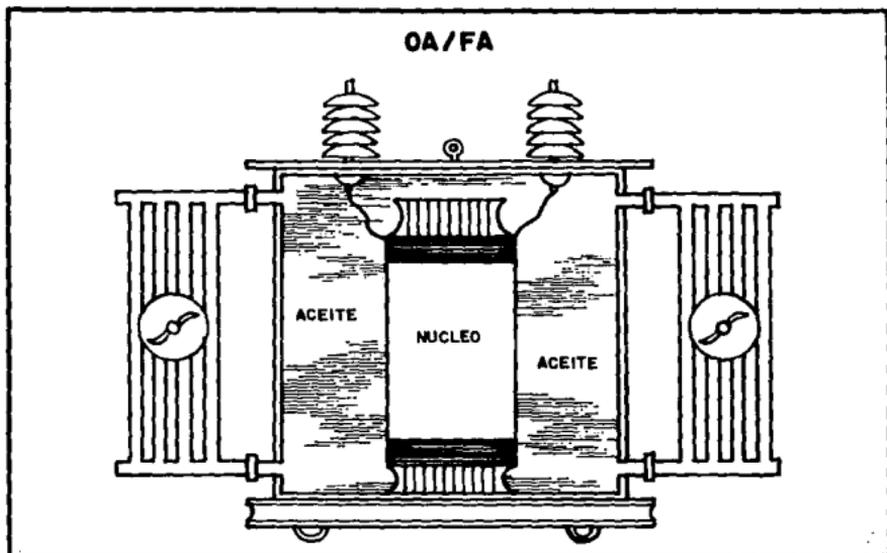


Figura 2.8.

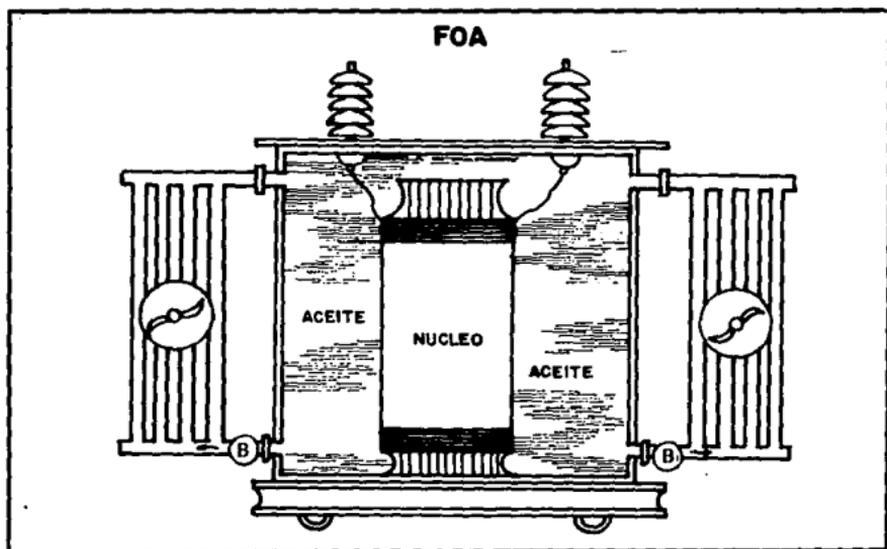


Figura 2.9.

Una de las principales desventajas es que requiere servicio propio para capacidad plena, siendo otra las pérdidas mayores.

Dos ventajas sobresalientes son: una capacidad propia (aunque reducida) sin servicio propio y la otra es; un costo menor, menor volumen y peso.

Este sistema es aplicado a transformadores de 100 MVA en adelante en subestaciones grandes con operador.

## **2.11. TANQUE CONSERVADOR.**

El tanque conservador es un depósito adicional dispuesto en la parte superior del tanque principal del transformador. Mediante este tanque y su combinación con otros dispositivos o sistemas de preservación, se logra reducir al máximo la oxidación y el deterioro del aceite, ya que se evita su contacto directo con la atmósfera.

Los sistemas con que se puede combinar el tanque conservador para preservar el aceite son:

a) Tanque conservador sellado, con espacio lleno de nitrógeno, sin regulación.

b) Tanque conservador sellado, con espacio lleno de nitrógeno, regulable automáticamente.

c) Tanque conservador con contacto directo a la atmósfera y "respiración" a través de equipos de deshidratación.

d) Tanque conservador con fuelle de expansión mediante el cual se evita el contacto directo del aceite con la atmósfera. Con esta combinación se elimina el nitrógeno en su equipo de regulación y/o los deshidratadores.

En todas las combinaciones el tanque conservador se instala con un relevador tipo buchholz que detecta la cantidad de gases y en caso de ser excesivos, envía una señal de disparo a los interruptores de A.T. y B.T. del transformador.

## **2.12. PLACA DE DATOS.**

La placa de características o de datos es una lámina de acero inoxidable en la cual están registrados los datos más importantes del transformador como son:

**MARCA DEL TRANSFORMADOR**

**TIPO DE ENFRIAMIENTO = TRANSFORMADOR EN ACEITE; TIPO**

**OA**

CAPACIDAD = KVA\_\_\_\_\_

NUMERO DE SERIE = SERIE\_\_\_\_\_

VOLTAJES DE ALTA Y BAJA TENSION = VOLTS\_\_\_\_\_

NUMERO DE FASES = FASES\_\_\_\_\_

FRECUENCIA = FREC. \_\_\_\_\_ HZ.

% DE IMPEDANCIA A TAL TEMPERATURA = IMP. \_\_\_\_\_% A \_\_\_\_\_ °C.

TEMPERATURA DE OPERACION = ELEV. \_\_\_\_\_ °C.

ALTITUD EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR = ALTITUD  
\_\_\_\_\_ M.S.N.M.

CLASE \_\_\_\_\_ KV

NIVEL BASICO AL IMPULSO EN ALTA TENSION = N.B.I. A.T. \_\_\_\_\_ KV.

NIVEL BASICO AL IMPULSO EN BAJA TENSION = N.B.I. B.T. \_\_\_\_\_ KV.

AÑO DE FABRICACION.

PESO DEL NUCLEO Y BOBINAS = NUCLEO Y BOBINAS \_\_\_\_\_ KGS.

LITROS DE ACEITE CONTENIDOS = LTS. ACEITE \_\_\_\_\_.

PESO TOTAL EN KILOGRAMOS.

NUMERO DE INSTRUCTIVO A CONSULTAR = INSTRUCTIVO No. \_\_\_\_\_

DERIVACIONES, VOLTAJES Y CORRIENTES:

POSICION	VOLTS	AMPERES
1	_____	_____
2	_____	_____
3	_____	_____
4	_____	_____
5	_____	_____

DIAGRAMA VECTORIAL.

DIAGRAMA DE CONEXIONES.

DIRECCION DE LA FABRICA QUE LO ELABORO.

En la Fig. 2.10. se muestra una placa de datos para una mejor comprensión.



# TRANSFORMADOR EN ACEITE

VOLTRAN

MARCA REG.

TIPO OA

KVA

SERIE

VOLTS.

FASES 3 FREQ. 60 Hz. IMP. \_\_\_\_\_ % A \_\_\_\_\_ °C

ELEV. \_\_\_\_\_ °C ALTITUD \_\_\_\_\_ M.S.N.M. CLASE \_\_\_\_\_ KV.

NIVEL BASICO IMPULSO A.T. \_\_\_\_\_ KV. B.T. \_\_\_\_\_ KV.

AÑO DE FABRICACION \_\_\_\_\_

NUCLEO Y BOBINAS \_\_\_\_\_ KGS. LTS. ACEITE \_\_\_\_\_

PESO TOTAL \_\_\_\_\_ KGS. INSTRUCTIVO No. 10M-01

## DERIVACIONES

POS.	CONECTAR	VOLTS	AMPERES
1	1 CON 2		
2	2 CON 3		
3	3 CON 4		
4	4 CON 5		
5	5 CON 6		
BAJA TENSION			

MATERIAL DEVANADO. A. T. COBRE B. T. COBRE

DIAGRAMA VECTORIAL

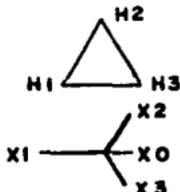
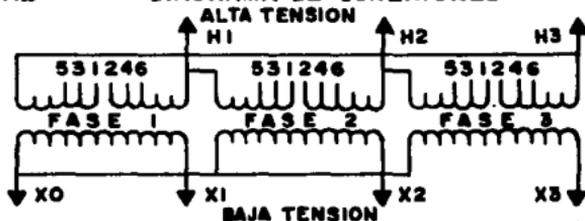


DIAGRAMA DE CONEXIONES



AUT. SEPAFIN DGN **NOM-** 89-05-18156 NP-001  
HECHO EN MEXICO POR VOLTRAN, S. A. de C.V.  
SANTA CLARA EDO DE MEXICO

Figura 2.10

# **CAPITULO III**

---

## **PRUEBAS A TRANSFORMADORES**

### **3.1. PRUEBAS A TRANSFORMADORES EN GENERAL**

Las pruebas que se realizan a los transformadores se deben a distintas circunstancias, como por ejemplo. En la fábrica se realizan pruebas para un control de calidad, antes de la instalación se realizan pruebas de puesta en servicio, etc.

A continuación se describen los pasos que sigue un transformador durante su vida útil, así como las pruebas y observaciones en cada uno de los siguientes casos.

#### *3.1.1. Pruebas en fábrica.*

Todas estas pruebas se realizan con base en las normas mundiales especificadas y autorizadas en el país por el Comité Consultivo Nacional de Normalización de la Industria Eléctrica (CCONNIE).

Estas pruebas son realizadas en el laboratorio de la fábrica; si un transformador pasa satisfactoriamente las mencionadas pruebas, se tendrá un equipo seguro en su operación y habrá confianza en él.

Si un transformador no se somete a estas pruebas, las posibilidades de falla por diseño, materiales o mano de obra aumentan considerablemente. Estas pruebas se clasifican en tres:

#### **1.- Pruebas preliminares.**

a) Prueba del número de espiras que tienen los devanados. Esto se realiza con el TTR encontrándose el transformador completo fuera del tanque, sin conectar aún sus terminales.

b) Verificación de las conexiones del cambiador de derivaciones y la segunda prueba de relación. También se realiza con el "TTR", encontrándose el transformador fuera del tanque, y realizadas todas sus conexiones.

c) Certificación de la estanqueidad del tanque, por medio de la prueba de presión.

**2.- Preparación del transformador que se va a probar y circuitos adecuados en el laboratorio de la planta**

Esta preparación consiste en instalar el equipo que se probará en el piso del laboratorio, hacer las conexiones necesarias de los aparatos de medición y dejar listo para principiar las pruebas.

**3.- Pruebas finales**

Para esto el transformador debe estar totalmente ensamblado, con todos sus accesorios y consisten en las siguientes pruebas:

- a) Prueba de resistencia de aislamiento.
- b) Prueba del líquido aislante.
- c) Prueba de potencial aplicada
- d) Resistencia óhmica
- e) Prueba de circuito abierto
- f) Prueba de corto circuito.
- g) Pérdidas en los conductores.
- h) Impedancia.
- i) Potencial inducido
- j) Relación de transformación.
- k) Prueba de temperatura.
- l) Prueba de impulso.

**3.1.2. Embarque.**

Para la transportación del transformador de la planta hacia el sitio donde es requerido, es recomendable seguir las siguientes instrucciones.

- a) Que el nivel del líquido aislante sea bajo.
- b) El transformador debe ser manejado preferentemente en posición vertical (normal), teniendo como máximo 15 grados de inclinación.
- c) Proteger las partes más susceptibles de dañarse como pueden ser las boquillas de alta tensión y baja tensión, utilizando para ello huacales de madera.

d) Se debe tener cuidado de prevenir golpes, daños o volcaduras.

e) No utilizar las boquillas como punta de apoyo para mover de un lado a otro el transformador.

### **3.1.3. Recepción.**

Dado que el transformador puede estar expuesto a problemas que en un momento determinado pueden estar fuera de control de la empresa, es necesario tomar en cuenta estas recomendaciones en cuanto el transformador llegue a su destino.

1.- Antes de que la unidad se baje del transporte, se debe realizar una inspección visual con mucha atención la cual consiste en:

a) Observar que los huacales de protección estén en su lugar correcto.

b) Verificar que las boquillas estén en un buen estado.

c) Verificar los instrumentos indicadores cuando los lleve.

d) Cerciorarse que no existan fugas de aceite por ninguna parte del transformador.

e) Verificar que no haya señales de trato brusco en el transformador (golpes en el tanque principal y en radiadores).

f) Verificar que lleve sus dispositivos de conexión a tierra.

g) Observar que lleve su placa de datos.

h) Verificar la operación del cambiador de derivaciones cuando sea de operación externa.

2.- Pruebas que deben realizarse en la planta del consumidor (pruebas de recepción).

a) Resistencia óhmica.

b) Resistencia de aislamiento

c) Relación de transformación.

d) Prueba de accesorios

e) Pruebas al aceite aislante.

f) Pruebas de presión.

### **3.1.4. Almacenaje.**

Si los transformadores no son puestos en servicio inmediatamente, es aconsejable colocarlos debidamente revisados en su sitio permanente. Si esto no es posible entonces deben de almacenarse en un lugar seco el cual no esté sujeto a fuertes variaciones de temperatura y protegidos contra golpes peligrosos que pueden dañarlos.

### **3.1.5. Puesta en servicio.**

Cuando el transformador es colocado en el lugar donde va a operar es recomendable hacer unas pruebas antes de la puesta en servicio. Estas pruebas son:

- a) Prueba de resistencia óhmica.
- b) Prueba de resistencia de aislamiento.
- c) Prueba de relación de transformación.
- d) Prueba de polaridad.
- e) Desplazamiento angular.
- f) Secuencia de fases.
- g) Prueba de aceite aislante.
- h) Prueba de factor de potencia.
- i) Prueba de accesorios.
- j) Prueba de presión (para verificar sellado).
- k) Rigidez dieléctrica.
- l) Pruebas de alambrado de control.

Los resultados de estas pruebas (excepto desplazamiento angular y secuencia de fases) deberán compararse con los protocolos de prueba del fabricante.

Cuando se le aplique el voltaje de operación al transformador, es recomendable que sea en incrementos graduales hasta el valor nominal, de tal forma que cualquier mala conexión u otro problema pueda ser descubierto antes de que esta acción dé como resultado un daño.

### *3.1.6. Operación del transformador.*

Para obtener el mejor rendimiento de un transformador en operación, es recomendable: Que su voltaje de alimentación esté dentro de los límites especificados, su carga no exceda su capacidad de diseño, mantener un nivel adecuado de aceite y esté ubicado de tal forma que su ventilación evite el sobrecalentamiento, además de esto, es necesario que todas las conexiones de las boquillas con los cables tengan un apriete suficiente para evitar sobrecalentamiento por conexiones defectuosas.

### *3.1.7. Mantenimiento del transformador.*

Debido a que los transformadores son partes vitales para la operación de las grandes empresas industriales y comerciales, es necesario que para su funcionamiento continuo y confiable debe proporcionársele una atención adecuada. Aun en los casos en que el uso dado a un transformador ha sido el adecuado, existen fallas que pueden afectar la vida del transformador y lo más importante es detectarlas mediante las "pruebas de mantenimiento" y corregirlas.

#### **PRUEBAS E INSPECCIONES DE MANTENIMIENTO**

Este es un programa de inspecciones y pruebas de rutina que se emplean en el mantenimiento del transformador de potencia.

##### **1.- Inspección diaria.**

- a) Corrientes y voltajes de carga.
- b) Nivel del líquido aislante, cuando lleve indicador externo.
- c) Detección de ruidos inusuales.
- d) Inspección de los dispositivos de control.

##### **2.- Inspección semanal.**

- a) Fugas en general.
- b) Nivel del líquido en el tanque.
- c) Checar la temperatura en los tubos de enfriamiento.

##### **3.- Mensual.**

- a) Inspección de todos los medidores.
- b) Inspección en las boquillas.

c) Fugas en el tanque, accesorios y tubos de enfriamiento.

4.- Trimestral.

a) Revisar la temperatura a la cual está operando el transformador.

b) Checar si no han disparado las válvulas de sobrepresión

5.- Semestral.

a) Rigidez dieléctrica del aceite.

b) Factor de potencia.

c) Inspección visual de boquillas, aisladores y apartarrayos, checando limpieza, contaminación, astilladuras, herrajes sueltos o flojos, fracturas, mal ángulo de inclinación.

d) Sistema de tierras, inspeccionar conexiones flojas, rotas o corroídas, medir la resistencia óhmica.

6.- Anual.

a) Rigidez dieléctrica del aceite.

b) Factor de potencia.

c) Limpieza de polvos en boquillas, eliminación de las corrosiones que se hayan formado.

d) Revisar que toda la tornillería tenga su apriete normal.

e) Revisar que todas las válvulas tengan un libre movimiento de "abierto a cerrado".

f) Revisar la conexión a tierra del tanque para asegurar que no exista corrosión.

g) Revisar que la porcelana no esté rota o con grietas.

h) Revisar la operación de los elementos de protección, control y de los accesorios.

i) Resistencia de aislamiento.

j) Resistencia óhmica.

7.- Cada dos años.

a) Rigidez dieléctrica del aceite.

- b) Factor de potencia.
- c) Color del aceite aislante.
- d) Prueba de potencial inducido.
- e) Prueba de potencial aplicado.

### 3.1.8. Reparación

Cuando en el mantenimiento del transformador se encuentran fallas en éste, es necesario repararlas. Los accesorios, como indicadores de nivel, termómetros, relevadores de sobrepresión, relevador Buchholz (posiblemente no sufran daño durante toda la vida del transformador), pueden ser cambiados en el campo sin ningún equipo especial, aprovechando los programas de mantenimiento.

Cuando el daño sea en equipo especial tal como boquillas, cambiador de derivaciones, parte viva, que ocasionen una suspensión de operación del transformador, es recomendable ponerse en contacto con el departamento de servicio técnico de la empresa suministradora para que ellos realicen la reparación.

Una vez arreglado el desperfecto, hacer las pruebas correspondientes antes de la puesta en servicio.

## 3.2. PRUEBAS EN EL LABORATORIO DE TRANSFORMADORES.

A continuación se describen las pruebas realizadas en el laboratorio de máquinas eléctricas correspondientes a la asignatura de transformadores que se imparte a nivel profesional en esta Facultad.

### 3.2.1. Resistencia óhmica.

La resistencia óhmica nos sirve para poder conocer las pérdidas por efecto Joule ( $RI^2$ ) y la elevación de temperatura en el cobre de los devanados a diferentes corrientes.

La resistencia óhmica es el grado de oposición al paso de la corriente directa más el paso de la corriente alterna que circula por un circuito, es decir:

$$R \text{ óhmica} = R_{C.D.} + R_{C. A.}$$

Así mismo la resistencia efectiva es el grado de oposición al paso de la corriente alterna.

Para una medición confiable de resistencia óhmica es recomendable realizar primero esta prueba, antes que ninguna otra, para garantizar que no ha habido causas de precalentamiento de los embobinados y así el valor medido corresponderá a la temperatura ambiente.

Antes de hacer esta prueba verificar que el transformador:

- No ha sido excitado durante un tiempo de cuatro horas antes de la prueba.
- Esté situado en un área donde la fluctuación de temperatura sea mínima.

Existen los siguientes métodos para realizar esta prueba:

- 1.- Puente de Wheatstone.
- 2.- Método de la caída de potencial.
- 3.- Puente de Kelvin.

En el laboratorio de transformadores utilizamos los dos primeros métodos.

Cuando la temperatura ambiente sea diferente a 30°C la elevación de temperatura del devanado se debe multiplicar por un factor de corrección; la temperatura promedio de un devanado puede determinarse por la siguiente ecuación.

$$T_2 = \frac{R_2}{R_1} (K + T_1) - K \dots (1)$$

Donde:

$T_2$  = Temperatura de elevación del transformador (80°C).

$T_1$  = Temperatura ambiente (30°C).

$K$  = 234.5 para cobre.

$K$  = 225 para aluminio.

$R_1$  = Resistencia inicial (en frío).

$R_2$  = Resistencia final (en caliente).

Despejado  $R_2$  de la ecuación (1) se obtiene:

$$R_2 = \frac{(234.5 + T_2) R_1}{234.5 + T_1}$$

Donde  $R_2$  es la resistencia óhmica de corriente directa corregida por la temperatura, esta resistencia se puede corregir a corriente alterna mediante la siguiente fórmula:

$$R_c. a. = 1.5 R_c. d.$$

Nota:

Las mediciones obtenidas para todas las fases y pasos de control adoptados, no deben diferir entre sí más del 2%.

La variación apreciable en las lecturas de las fases de un transformador, nos indican:

- 1.- Que existe un error en las vueltas de que consta el devanado de las fases.
- 2.- Que existe un corto circuito entre espiras y esta es la razón por lo cual varía apreciablemente el valor de la resistencia óhmica.

### MEDICION DE RESISTENCIA OHMICA AL TRANSFORMADOR MONOFASICO

a) Puente de Wheatstone.

#### MATERIAL Y EQUIPO:

- 1 puente de Wheatstone - YEW Tipo 2755
- 1 transformador monofásico - 5KVA, 440/127 V, 60 HZ.
- 1 fuente de poder monofásica - Feedback 0-125V, 5 AMP. A.C. Cables de conexión.

#### PROCEDIMIENTO

- 1.- Observar la carátula del puente de Wheatstone, identificar la perilla multiplicadora, así como las resistencias variables cuyas escalas son X 1000, X 100, X 10 y X 1.
- 2.- Conectar las terminales  $X_1$  y  $X_2$  a la entrada del puente de Wheatstone Rx como se muestra en la figura 3.1.
- 3.- Use las escalas medias del multiplicador (MULTIPLY).

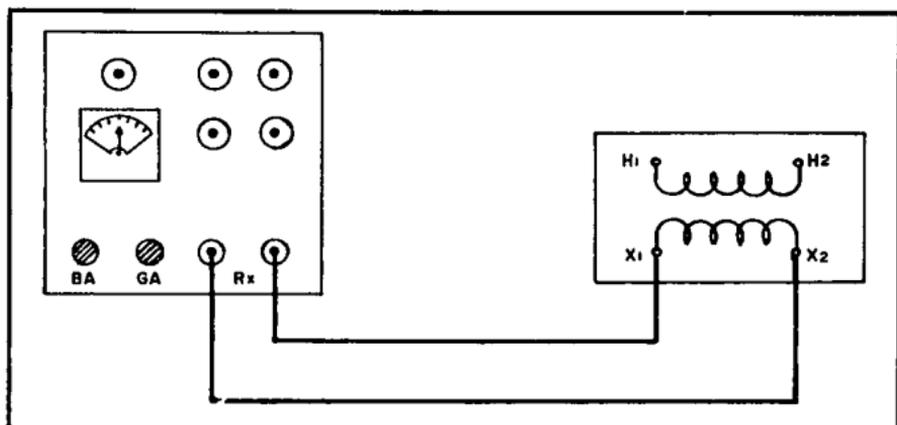


Figura 3.1.

4.- Oprimir primero BA (batería) después GA (galvanómetro) en este orden.

5.- Gire las resistencias variables para nivelar la corriente que circula por el galvanómetro (GA) en cero. Empiece por X 1000 y continúe con X 100, X 10, X1, sucesivamente, si la aguja se deflexiona hacia la izquierda es que se pasó de resistencia y si deflexiona hacia la derecha significa que le falta resistencia.

6.- Ya nivelado GA en cero, libere GA y posteriormente BA en este orden.

7.- La resistencia medida será:

$$R_1 = (\text{Factor multiplicador}) \times (X1000 + X100 + X10 + X1).$$

Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1

Terminales	Posición Derivador (tap)	$R_1 (\Omega)$ Medida	$R_2 (\Omega)$ Corregida por Temperatura	$R_2 (\Omega)$ Corregida a C.A. Multiplicada x 1.5
X <sub>1</sub> -X <sub>2</sub>		0.044	0.0523	0.0784
H <sub>1</sub> -H <sub>2</sub>	1	0.283	0.3364	0.5046
H <sub>1</sub> -H <sub>2</sub>	2	0.271	0.3222	0.4833
H <sub>1</sub> -H <sub>2</sub>	3	0.270	0.3210	0.4815
H <sub>1</sub> -H <sub>2</sub>	4	0.270	0.3210	0.4815
H <sub>1</sub> -H <sub>2</sub>	5	0.280	0.3320	0.4980

Estos resultados son el promedio de tres pruebas realizadas.

b) Método de caída de potencial.

La base de este método consiste en hacer circular una corriente directa por el devanado, cuyo valor debe medirse con la mayor precisión posible, a la vez se mide el voltaje de cd, aplicado al devanado.

Como se ilustra en la figura 3.2.

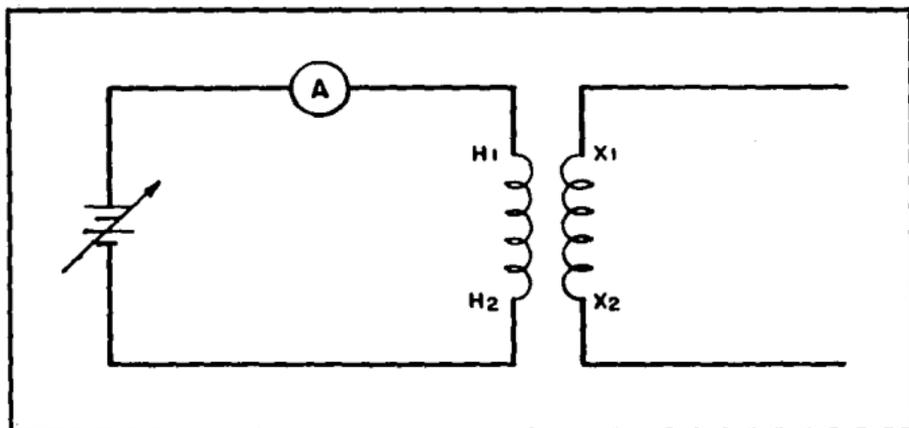


Figura 3.2.

La resistencia óhmica se calcula por la fórmula de la ley de ohm.

$$R_{cd} = \frac{V_{cd}}{I_{cd}}$$

dividiendo el voltaje aplicado entre la corriente que circula.

Es necesario tener en cuenta que al aplicar corriente directa en estado estable, no existen tanto inducción electromagnética como reactancia en el embobinado, por lo tanto la única limitante al paso de la corriente es la resistencia óhmica cuyo valor es muy pequeño y por lo tanto la tensión aplicada debe ser muy pequeña.

Una recomendación es que la corriente circulante sea menor o igual al 15% de la nominal, para evitar calentamiento en los devanados. Esta se calcula de la siguiente manera:

$$I_{NH} = \frac{Pot.}{V_{NH}} = \frac{5000 \text{ VA}}{440 \text{ V}} = 11.36 \text{ A}$$

$$I_H = 11.36 (0.15) = \underline{1.704 \text{ A}} \text{ recomendada}$$

$$I_{NX} = \frac{Pot}{V_{NX}} = \frac{5000 \text{ VA}}{127 \text{ V}} = 39.37 \text{ A}$$

$$I_X = 39.37 (0.15) = \underline{5.9 \text{ A}} \text{ recomendada}$$

En esta prueba armamos el circuito de la figura 3.2., alimentado el lado de alta tensión "teniendo la precaución de no alimentar más de 3 V cd".

## MATERIAL Y EQUIPO

1 transformador monofásico 5KVA, 440/127 V, 60 HZ.

1 fuente de poder FEEDBACK 0-125 V, 5 AMP. C.D.

1 amperímetro 0-5Acd

1 voltímetro 0-50 Vcd.

Cables de conexión

## PROCEDIMIENTO:

1.- Armar el circuito de la figura 3.2.

2.- Encender la fuente de poder en su mínimo valor.

3.- Girar la perilla de la fuente de poder para alimentar el circuito "teniendo precaución de no alimentar más de 3V cd".

4.- Tomar las lecturas de voltaje y corriente.

$$V = 1 \text{ Volt. Vcd.} \quad I = 2.6 \text{ Amp. Acd.}$$

5.- Desenergizar el circuito y apagar la fuente.

6.- Aplicar la ley de ohm.

$$R_{cd} = \frac{V_{cd}}{A_{cd}} = \frac{1 \text{ Volt.}}{2.6 \text{ Amp}} = 0.384 \text{ ohms}$$

Este valor difiere al resultado del puente de Wheatstone, debido a que el devanado sufre una elevación de temperatura al circular en éste una corriente de 2.6 Amp.

Nota: Se deben tomar en consideración las correcciones por temperatura.

## MEDICION DE LA RESISTENCIA OHMICA AL TRANSFORMADOR 3Ø (BANCO DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS)

En las líneas de distribución, se utilizan transformadores reductores trifásicos. Las líneas de distribución vienen con la conexión en delta, por lo tanto el lado

de alta tensión tiene que tener conexión delta y el de baja tensión en estrella para suministro.

## METODO DE PUENTE DE WHEATSTONE

En este caso se utilizan las instrucciones que vimos anteriormente para el manejo de éste.

## MATERIAL Y EQUIPO

3 transformadores monofásicos 5KVA, 440/127V, 60 HZ.

1 puente de Wheatstone

Cables de conexión

## PROCEDIMIENTO

1.- Armar los circuitos de la figura 3.3.

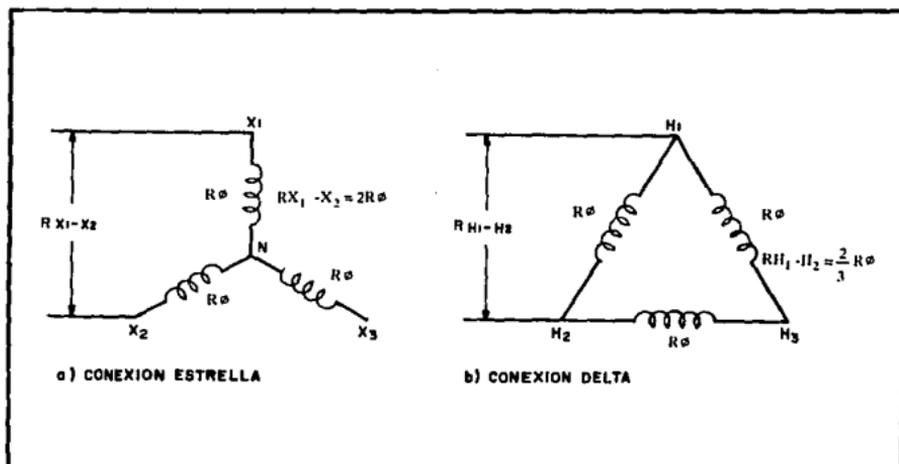


Figura 3.3

2.- Verificar que el lado de alta se conecte en delta y el lado de baja en estrella.

3.- Conectar el puente de Wheatstone en las diferentes fases del transformador  $3\phi$ . Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 3.2 y 3.3.

Tabla 3.2. Resistencia óhmica lado de baja tensión

Terminales	$R_{X_1-X_2}$	$R_{X_1-X_2}$ Corregida por temperatura	$R_{X_1-X_2}$ Corregida por C.A.	$R_{X_0-X_1}$	$R_{X_0-X_1}$ Corregida por temperatura	$R_{X_0-X_1}$ Corregida por C.A.
R	0.423	0.502	0.753	0.116	0.137	0.205

Tabla 3.3. Resistencia óhmica lado de alta tensión

Terminales	$R_{H_1-H_2}$	$R_{\emptyset}$ $R_{H_1-H_2}$ (3/2)	$R_{H_1-H_2}$ Corregida por temperatura	$R_{H_1-H_2}$ Corregida por C.A.
R TAP1	0.28	0.420	0.332	0.498
R TAP2	0.31	0.465	0.368	0.552
R TAP3	0.26	0.390	0.309	0.463
R TAP4	0.28	0.420	0.332	0.498
R TAP5	0.31	0.465	0.368	0.552

### 3.2.2. Resistencia de aislamiento.

Para el buen funcionamiento de un transformador, es necesario que exista un buen aislamiento entre los conductores que forman un devanado, para evitar que entren en contacto las espiras, las bobinas de alta y baja tensión, así como las bobinas y el núcleo, y de este modo evitar un corto circuito.

La calidad y el estado de los aislamientos son aspectos de especial interés en las pruebas de los transformadores, puesto que de ellos depende la vida útil del equipo. La prueba para detectar el estado de los aislamientos, es la medición de la resistencia de aislamiento.

La resistencia de aislamiento se define como la resistencia en megohms que ofrece un aislamiento a una tensión aplicada de corriente continua. La corriente resultante es la corriente de aislamiento, la cual se compone de:

- Corriente de conducción o de fuga, que es la corriente que fluye a través del aislamiento y sobre su superficie.
- Corriente de absorción dieléctrica.
- Corriente originada por el efecto capacitivo del aislamiento.

La prueba de medición de resistencia de aislamiento es una prueba no destructiva y nos da una indicación confiable del estado de los aislamientos de los devanados en el transformador y da información sobre: la cantidad relativa de humedad en el aislamiento, la corriente de fuga en las superficies húmedas o

sucias del aislamiento y detecta deterioro o fallas de los aislamientos de devanados.

La resistencia de aislamiento no es la medida definitiva del voltaje que un aislamiento puede soportar, pero permite estimar la confiabilidad de someterlo a un nivel de voltaje determinado.

El método para medir la resistencia de aislamiento de un transformador, es haciendo uso del instrumento llamado megger, que es un indicador de lectura directa y cuya escala está graduada en megaohms. Su principio se basa en aplicar un determinado voltaje de prueba al aislamiento y medir la corriente que proporciona, indicando la lectura en la escala graduada en megaohms.

La potencia para la medición la suministra un pequeño generador operado a mano o motorizado, siendo este último tipo el de más aceptación, debido a la uniformidad de la tensión aplicada.

El megger es un instrumento que genera altas tensiones, como 500, 2000 o 5000 volts, pero debe escogerse un rango de tensión que no sobrepase el valor nominal o la clase del devanado bajo prueba.

La temperatura tiene un efecto apreciable en la lectura, reduce el valor de la resistencia de aislamiento considerablemente.

En las mediciones periódicas de resistencia de aislamiento sería conveniente que cada evaluación se hiciera a la misma temperatura base, pero como no se cumple este requisito debido a los diversos factores que determinan la temperatura del transformador durante su disponibilidad para las pruebas, los valores obtenidos a la temperatura de prueba deben ser corregidos a la base, que usualmente en la práctica es de 20°C.

Se pueden utilizar los valores de corrección de resistencia de aislamiento referidos a 20°C establecidos por algunos fabricantes (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Factores de corrección por temperatura.

TEMPERATURA PROMEDIO °C	FACTOR DE CORRECCION	TEMPERATURA PROMEDIO °C	FACTOR DE CORRECCION
0	0.30	50	6.0
5	0.40	55	8.0
10	0.54	60	11.0
15	0.73	65	14.8
20	1.0	70	20.0
25	1.3	75	26.8
30	1.8	80	36.2
35	2.5	85	49.0
40	3.3	90	66.0
45	4.5	95	89.0

Los aislamientos se deben medir:

- Entre los devanados de alta y baja tensión.
- Entre el devanado de alta tensión y tierra.
- Entre el devanado de baja tensión y tierra.

## MATERIAL Y EQUIPO

3 transformadores monofásicos 5KVA, 440/127V, 60HZ

1 megger - Yokogawa tipo 3207 0-∞ M.

Cables de conexión

## PROCEDIMIENTO

1.- Identificar las terminales del megger, las cuales son:

L- Línea  
E- Tierra  
G- Guarda

2.- Cheque la batería del megger, poniendo la perilla selectora en "B", oprima el botón "push" y observe: la aguja indicadora debe caer a la zona azul de la escala, de no ser así reemplace las baterías del aparato.

3.- Colocar la perilla selectora en off.

4.- Conectar las terminales de los transformadores adecuadamente para formar un banco trifásico, el lado de alta tensión en delta y el de baja en estrella.

5.- Poner en corto circuito las terminales de alta tensión entre sí ( $H_1$ -  $H_2$ -  $H_3$ ) y las de baja tensión entre sí ( $X_1$ -  $X_2$ -  $X_3$ ).

6.- Verificar que el tanque esté conectado a tierra.

7.- Armar el circuito de la figura 3.4. (alta tensión contra baja tensión).

8.- Colocar la perilla selectora en la posición M.

9.- Oprimir el botón "push" (escuchará un zumbido y podrá leer directamente en la escala de resistencia de aislamiento en megaohms).

Resistencia medida = ∞

Anotando el resultado en la tabla 3.5.

10.- Armar los circuitos 3.5. y 3.6. registrando los resultados en la tabla 3.5.

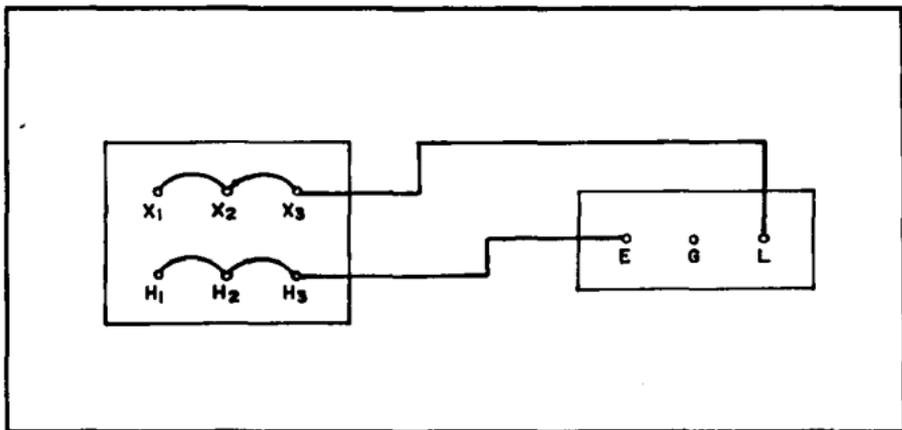


Figura 3.4. Alta tensión contra baja tensión.

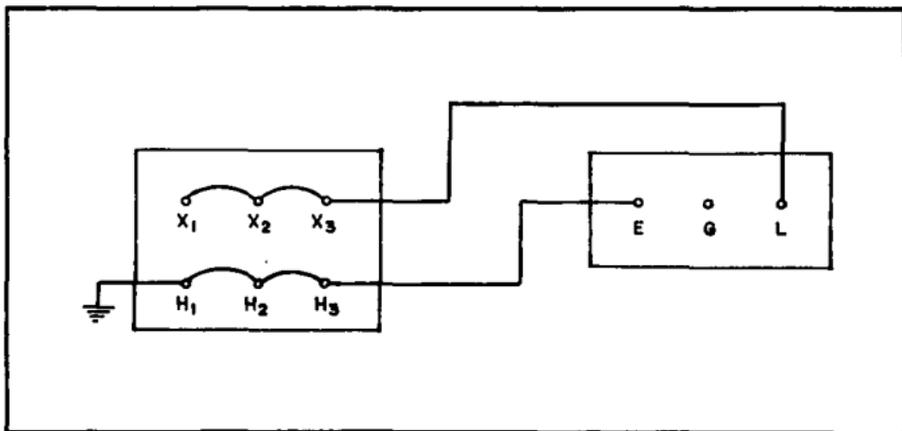


Figura 3.5. Alta tensión más tanque a tierra contra B.T.

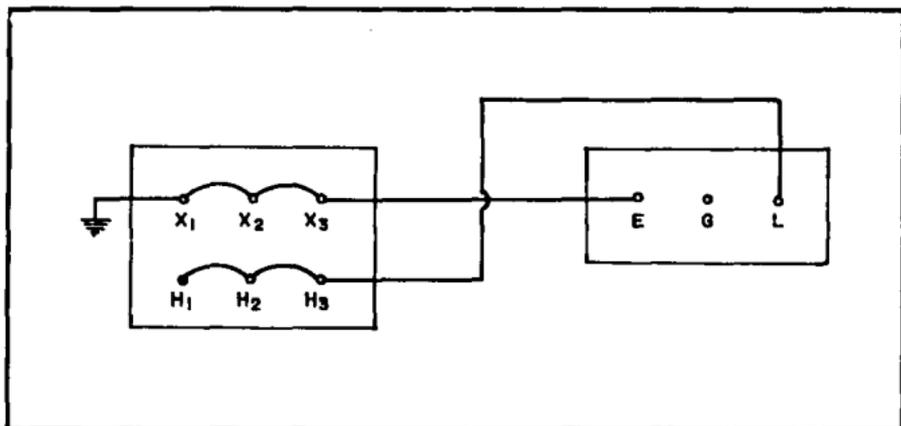


Fig. 3.6. Baja tensión más tanque a tierra contra A.T.

Tabla 3.5.

CIRCUITOS	RESISTENCIA DE AISLAMIENTO
A.T. contra B.T.	Tiende a infinito
B.T. contra A.T. más tanque a tierra.	Tiende a infinito
A.T. contra B.T. más tanque a tierra.	Tiende a infinito

**NOTA:** El devanado cuya resistencia se desea medir, se conecta a la terminal de línea L y el otro devanado más tanque se conectan a la terminal de tierra E.  
La terminal de guarda G, sirve para eliminar los efectos de pantalla de algún aislamiento que no se requiera incluir en la medición.

### 3.2.3. Relación de transformación.

Se define como la razón del número de vueltas del devanado de alta tensión al número de vueltas del devanado de baja tensión.

$$a = \frac{NH}{NX}$$

Para mayor información consultar la referencia 1.2.

La relación de vueltas debe determinarse para todas las derivaciones, así como para todas las posibles conexiones de los devanados del transformador.

La prueba de relación de transformación debe hacerse a tensión nominal o menor y a frecuencia nominal, también incluimos la necesidad de que el transformador se excite en vacío, es decir, sin carga, puesto que si existiera corriente en los devanados, las tensiones que mediríamos no serían iguales ni las fuerzas electromotrices inducidas, debido a que produciría caídas de voltaje en las resistencias y reactancias de dispersión.

Métodos utilizados en la prueba de relación de transformación.

- a) Método del transformador patrón (T.T.R.).
- b) Método de los voltímetros para el transformador monofásico.
- c) Método del potenciómetro de resistencia.

En el laboratorio de máquinas eléctricas se realizan los primeros dos métodos.

Los tres métodos consisten en aplicar a uno de los devanados una tensión alterna y detectar el valor del voltaje inducido en el otro devanado. En todos los casos es importante efectuar las conexiones respetando la polaridad de los devanados.

#### *a) Método del transformador patrón.*

El método del transformador patrón es el más conveniente para medir con precisión la relación de un transformador.

Para este método se dispone de un transformador cuya relación de transformación es conocida y por comparación, se obtiene la relación de transformación del transformador en prueba. Los transformadores patrón se clasifican en dos grupos:

#### 1.- Transformador patrón de relación constante.

Este es un transformador de potencial el cual tiene la relación de transformación constante. Si el transformador patrón tiene la misma relación de transformación que el transformador de prueba en ambos obtendremos las mismas lecturas de voltaje (tanto en el primario como en el secundario), esto se puede verificar con la ayuda de un voltímetro, si no tienen la misma relación de transformación, sólo se puede hacer una comparación de los voltajes obtenidos en cada transformador sin poder obtener un resultado de relación de transformación exacto.

## 2.- Transformador patrón de relación variable.

El transformador patrón de relación variable es conocido comercialmente con las siglas TTR (Transformer Turn-Ratio), el cual es más eficiente que el anterior, ya que es un instrumento que nos permite medir cualquier relación de transformación dentro de una escala de valores muy amplia. (Ver figura 3.7)

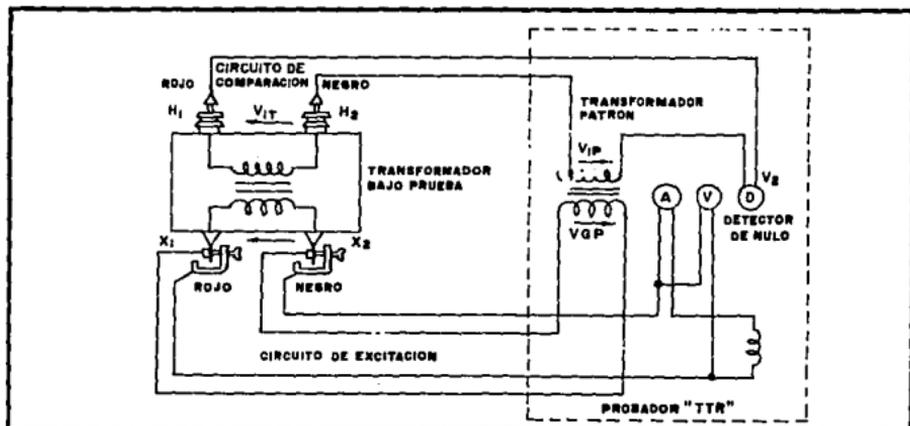


Figura 3.7. Probador de Relación de Transformación T.T.R.

Este equipo consta de:

- Un generador de corriente alterna, para excitar los devanados de baja tensión.
- Voltímetro y amperímetro para medir los valores de excitación.
- Un selector para cambiar el número de espiras en el devanado de alta tensión del transformador patrón, con objeto de igualar su relación con la del transformador en prueba. Este selector tiene un cuadrante en el cual indica la relación del transformador patrón.
- Un amperímetro que opera como detector de corriente nula en el momento que se han igualado las relaciones de transformación.

En el laboratorio de máquinas eléctricas el método utilizado es el transformador patrón con relación constante, por tal motivo nos enfocaremos hacia este método.

## MATERIAL Y EQUIPO

2 transformadores monofásicos 5KVA, 440/127V, 60Hz.

3 voltímetros.

1 fuente de poder feedback.

Cables de conexión.

### PROCEDIMIENTO:

Existen dos métodos utilizados en los transformadores patrón de relación constante.

a) El lado de A.T. del transformador de prueba se conecta en paralelo con el lado de A.T. del transformador patrón, en la misma posición de Tap. Se conectan 2 voltímetros a los secundarios para medir los voltajes en ambos embobinados.

Nota. Si los voltajes de los secundarios son iguales, esto significa que tienen la misma relación de transformación.

1.- Armar el circuito de la figura 3.8.

2.- Alimentar el circuito a 100 VCA.

3.- Tomar las lecturas.

$$V_1 = 28 \text{ VCA} \quad V_2 = 28 \text{ VCA}$$

$$\rightarrow V_1 = V_2$$

Esto significa que tienen la misma relación de transformación ya que

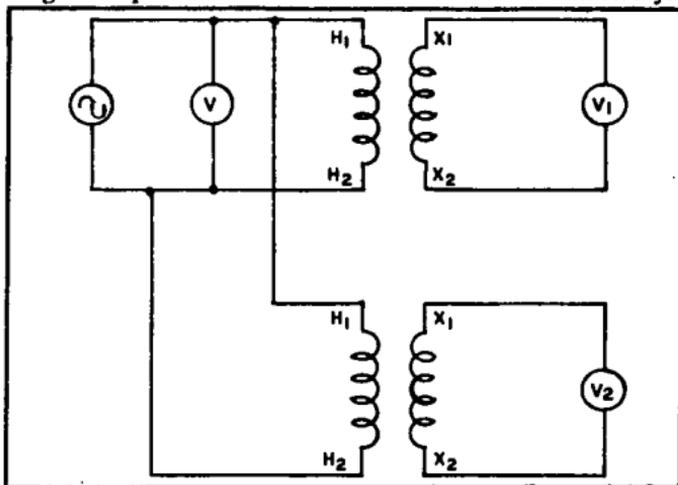


Figura 3.8.

$$a \text{ patrón} = \frac{100}{28} = 3.571$$

$$a \text{ prueba} = \frac{100}{28} = 3.571$$

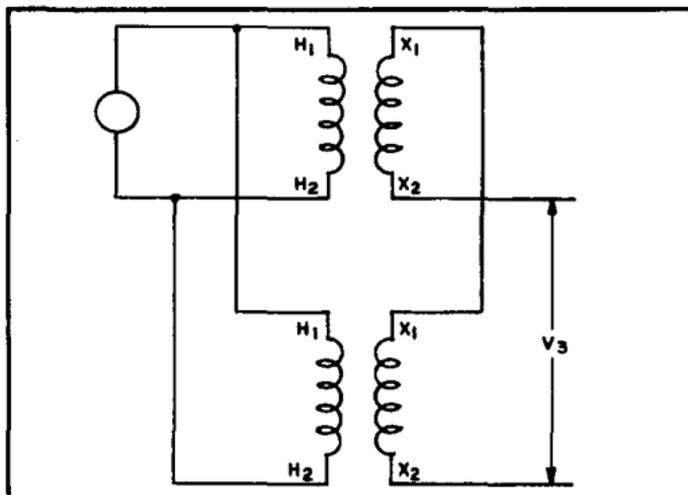


Figura 3.9.

Además los dos transformadores tienen los mismos datos de placa.

b). El transformador en prueba se excitará en paralelo con un transformador con los mismos datos de placa, conectando los secundarios en serie y midiendo los voltajes secundarios en cada transformador (considerando la polaridad). Deben estar en el mismo Tap.

#### PRIMER CASO.

- 1.- Armar el circuito de la figura 3.9.
- 2.- Excitar el circuito a 100 VCA y tomar la lectura.

$$V_3 = 0$$

Nota: Esto significa que ambos transformadores tienen la misma relación de transformación.

#### SEGUNDO CASO.

- 1.- Armar el circuito de la figura 3.10.
- 2.- Excitar el circuito a 100 VCA y tomar la lectura correspondiente.

$$V_1 = 28 \text{ VCA} \quad V_2 = 28 \text{ VCA} \quad V_3 = 56 \text{ VCA}$$

Esto significa que ambos transformadores tienen la misma relación de transformación.

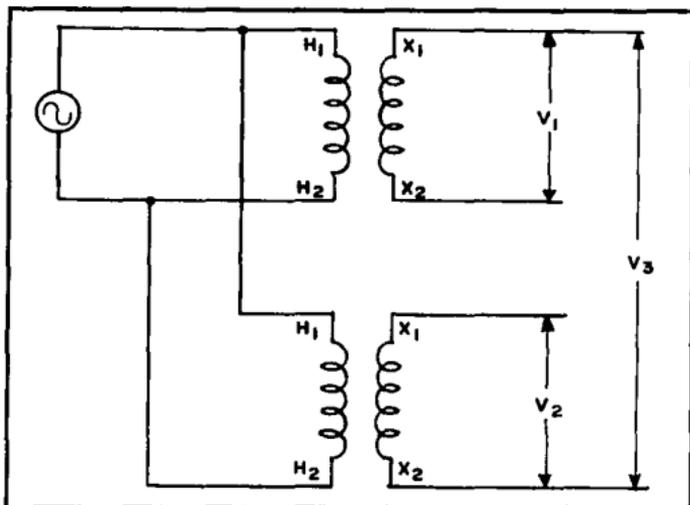


Figura 3.10.

#### b) Método de los voltímetros para el transformador monofásico.

Consiste en aplicar a uno de los devanados del transformador una tensión alterna, incluyendo un voltímetro para medir la alta tensión (VH) y otro para medir la baja tensión (VX).

Por razones de confiabilidad, se recomienda tomar ocho pares de lecturas, divididas en dos grupos de cuatro.

- 1) Lectura al voltaje nominal.
- 2) Lectura al 90% del voltaje nominal.
- 3) Lectura al 80% del voltaje nominal.
- 4) Lectura al 70% del voltaje nominal.

Posteriormente se intercambian los voltímetros para compensar errores de los aparatos y se repite la serie de cuatro lecturas. La relación se calcula para cada par de lecturas. Si los resultados no difieren más del 1%, la prueba es aceptable y se toma como relación de transformación, el promedio de todos los resultados.

Si la diferencia es mayor del 1%, es necesario repetir la prueba con otros instrumentos.

La relación de transformación se calcula de la manera siguiente:

$$a = \frac{V_H}{V_X} \text{ Para transformadores reductores.}$$

$$a = \frac{V_X}{V_H} \text{ Para transformadores elevadores.}$$

## MATERIAL Y EQUIPO

1 transformador monofásico 5KVA, 440/127, 60Hz.

2 multímetros Triplet Modelo 630-PLK Tipo 1.

Cables de conexión

## PROCEDIMIENTO:

- 1) Armar el circuito de la figura 3.11.

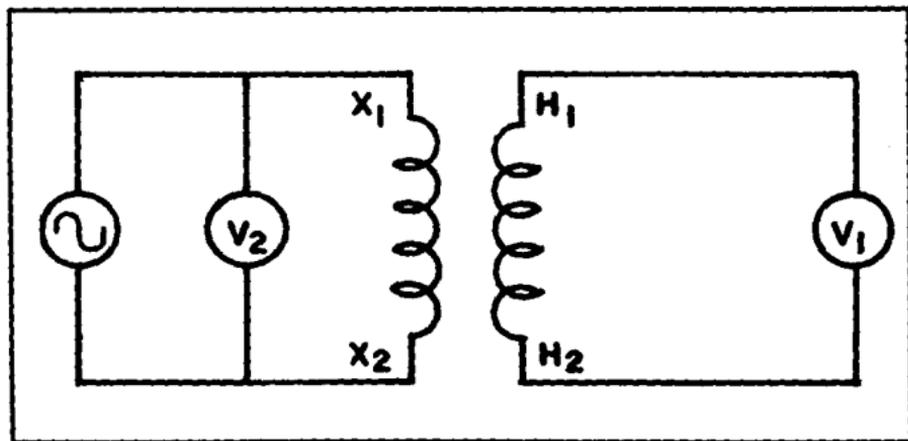


Figura 3.11.

- 2) Poner el derivador en la posición 1, energizar el circuito y registrar los resultados en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6.**

Tap	V1	V2	a
1	440	120	3.666
	396	105	3.771
	352	94	3.774
	308	82	3.756

3) Desenergizar el circuito.

4) Registrar en las tablas 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10. Las lecturas subsecuentes en cada una de las posiciones del derivador, realizando los cambios de taps después de desenergizar el circuito.

**Tabla 3.7.**

TAP	V1	V2	a
2	440	125	3.52
	396	110	3.6
	352	99	3.555
	308	87.5	3.52

**Tabla 3.8**

TAP	V1	V2	a
3	440	127	3.464
	396	119	3.327
	352	101	3.485
	308	90	3.422

**Tabla 3.9**

TAP	V1	V2	a
4	440	130	3.384
	396	117	3.384
	352	104	3.384
	308	92	3.347

**Tabla 3.10**

TAP	V1	V2	a
5	440	134	3.283
	396	120	3.300
	352	106	3.320
	308	95	3.242

### *c) Método del potenciómetro de resistencia.*

Consiste en aplicar al devanado de alta tensión del transformador en prueba, un voltaje alterno, y mediante interconexiones con el devanado de baja tensión a través de un potenciómetro; detectar una posición de éste en el que se anulan las corrientes circulantes.

Se requiere de un potenciómetro adecuado que no sufra calentamiento con el voltaje aplicado y que tenga una graduación precisa de la resistencia variable.

Al deslizar el contacto móvil ( $R_1$ ) del potenciómetro, debe aparecer una posición en donde el detector (Amperímetro) marque corriente nula. Para esta posición, la relación de transformación será:

$$a = R / R_1$$

Donde:

A = Relación de transformación.

R = Resistencia total del potenciómetro (contactos fijos).

$R_1$  = Resistencia parcial o total del potenciómetro (contactos móviles).

Este método no es utilizado en el laboratorio de máquinas eléctricas.

### *3.2.4. Polaridad.*

La polaridad de un transformador depende del sentido como se encuentran enrolladas las bobinas en el núcleo del transformador, los flujos pueden sumarse o restarse, teniendo 2 clases de polaridad; aditiva y sustractiva.

Los transformadores de potencia tienen normalmente la polaridad sustractiva.

En los transformadores monofásicos es factible identificar entre sus cuatro terminales (dos de alta tensión y dos de baja tensión) dos de ellas que corresponden a la misma polaridad, en cambio en transformadores trifásicos que tienen de seis a ocho terminales según el tipo de conexiones, resulta bastante confuso identificar pares de terminales de la misma polaridad instantánea, por lo que en este caso se recurre al concepto de secuencia de fases.

Así asociamos el concepto de polaridad a los transformadores monofásicos y el de secuencia de fases a los transformadores trifásicos.

Es indispensable conocer la polaridad de un transformador para poder efectuar la conexión adecuada en paralelo o en un banco de transformadores.

En la figura 3.12 se representan 2 transformadores monofásicos de (a) polaridad sustractiva y (b) polaridad aditiva.

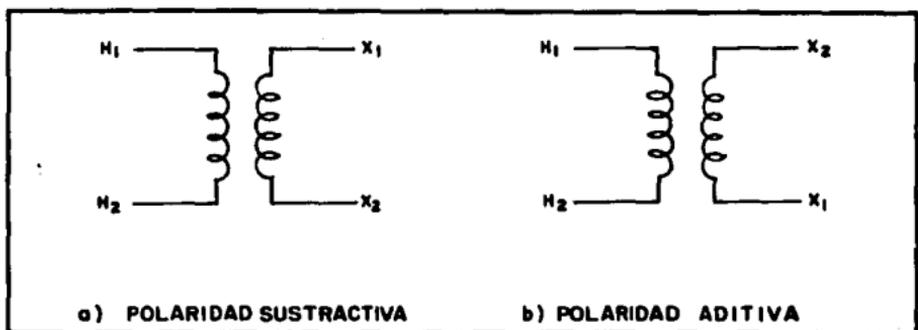


Figura 3.12.

Los métodos más comúnmente usados para determinar la polaridad son:

- a) Método visual
- b) Prueba con tensión alterna
- c) Transformador patrón
- d) Impulso inductivo con corriente directa.

a) Método visual.

Para poder utilizar este método es necesario que las terminales del transformador ( $H_1$ ,  $H_2$ ,  $X_1$  y  $X_2$ ) estén identificadas.

Cuando el observador se coloca frente a las dos terminales de baja tensión, si  $H_1$  queda a su izquierda y  $X_1$  a su derecha se dice que el transformador tiene polaridad aditiva, si  $H_1$  y  $X_1$  quedan a su izquierda se dice que tiene polaridad sustractiva ( $H_1$  y  $X_1$  son terminales de la misma polaridad). Esta regla se ilustra en la figura 3.13.

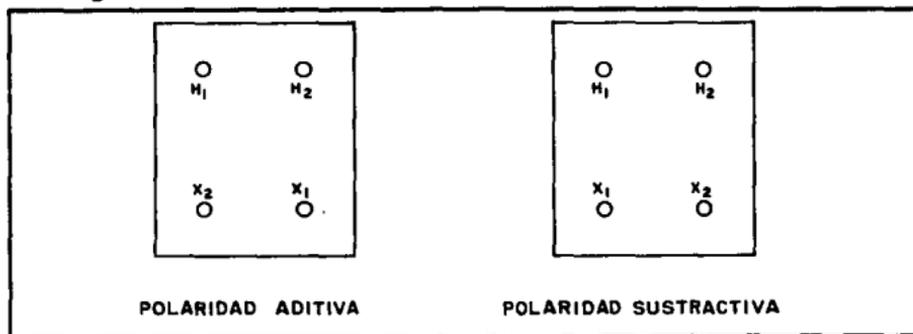


Figura 3.13.

## b) Prueba con tensión alterna.

Este método resulta ser muy sencillo y eficaz, ya que consiste en corto-circuitar una terminal de alta tensión con una de baja tensión ( $H_x - X_x$ ) y conectar un voltímetro en las otras dos terminales ( $H_y - X_y$ ), además se conecta un voltímetro en las terminales de alta tensión y se le aplica un voltaje alterno como se muestra en la figura 3.14.

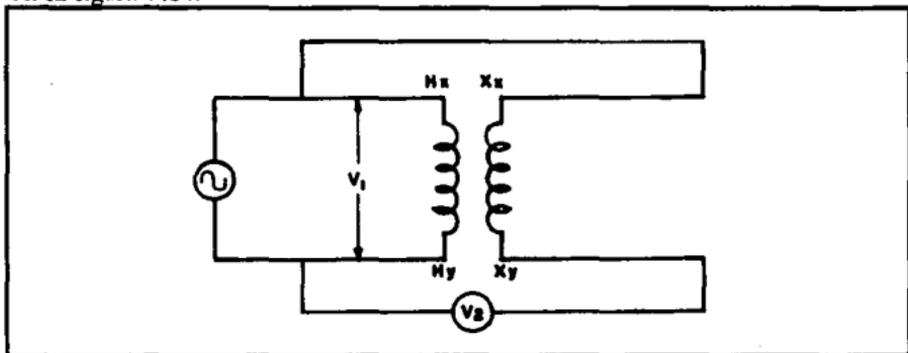


Figura 3.14.

Si la lectura del voltímetro  $V_2$  es mayor que la tensión aplicada  $V_1$ , la polaridad es aditiva y si es menor, la polaridad es sustractiva.

## MATERIAL Y EQUIPO

- 1 transformador monofásico 5 KVA, 440/127, 60Hz.
- 2 multímetros 0-250 VCA.
- 1 fuente de poder monofásica 0-125 VCA, 5 AMP. CA.
- Cables de conexión.

## PROCEDIMIENTO.

1.- Armar el circuito de la figura 3.15 con la condición de que el subíndice  $X = 1$  y  $Y = 2$ .

2.- Alimentar el circuito a 60 VCA.

3.- Tomar las lecturas de  $V_1$  y  $V_2$ .

$V_1 = 60$  Volts VCA  $V_2 = 43$  Volts VCA

$$V_2 < V_1$$

Por lo tanto el transformador es sustractivo

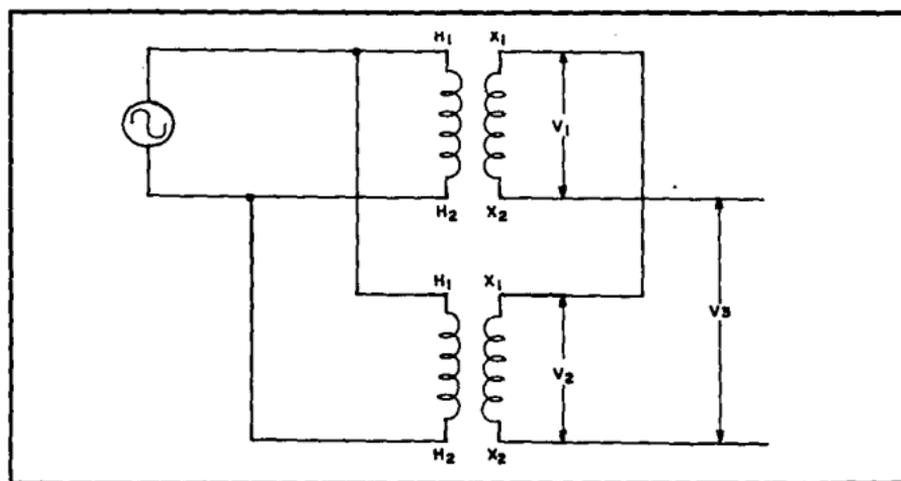


Figura 3.15.

4.- Desenergizar el circuito.

c) Transformador patrón.

La polaridad de un transformador se puede verificar por comparación con un transformador patrón de polaridad conocida, de manera similar a la prueba de relación por el método del transformador patrón como se indica en la figura 3.15.

NOTA: También se puede identificar la polaridad con el TTR.

Si  $V_3 = V_1 + V_2$  la polaridad es aditiva.

Si  $V_3 < V_1 + V_2$  la polaridad es sustractiva.

**MATERIAL Y EQUIPO**

2 transformador monofásico 5 KVA, 440/127, 60Hz.

3 voltímetros 0-250 VCA.

1 fuente de poder monofásica 0-125 VCA, 5 AMP. CA.

Cables de conexión.

## PROCEDIMIENTO

- 1.- Armar el circuito de la figura 3.15.
- 2.- Energizar el circuito con 100 Volts VCA.
- 3.- Tomar las lecturas correspondientes de voltaje.

$$V_1 = \underline{28 \text{ Volts VCA}} \quad V_2 = \underline{28 \text{ Volts VCA}} \quad V_3 = \underline{0 \text{ Volts VCA}}$$

$$V_3 < V_1 + V_2$$

Por lo tanto la polaridad es sustractiva.

- 4.- Desenergizar el circuito.

### d) Impulso inductivo con corriente directa.

Para determinar la polaridad de este método es necesario conectar una fuente de C.D. de potencial adecuado para no exceder la corriente nominal del embobinado de alta tensión y al mismo tiempo se intercalará un voltmetro en las terminales de baja tensión como se ilustra en la figura 3.16.

Se debe tomar en cuenta que:

$$I_H = 11.36 \text{ AMP. Apartado 3.2.1 b}$$

$$R_H = 0.271 \Omega \quad \text{Apartado 3.2.1 a}$$

$$V = (11.36)(0.271) = 3.078 \text{ VCD.}$$

Esto implica no exceder de 3 VCD.

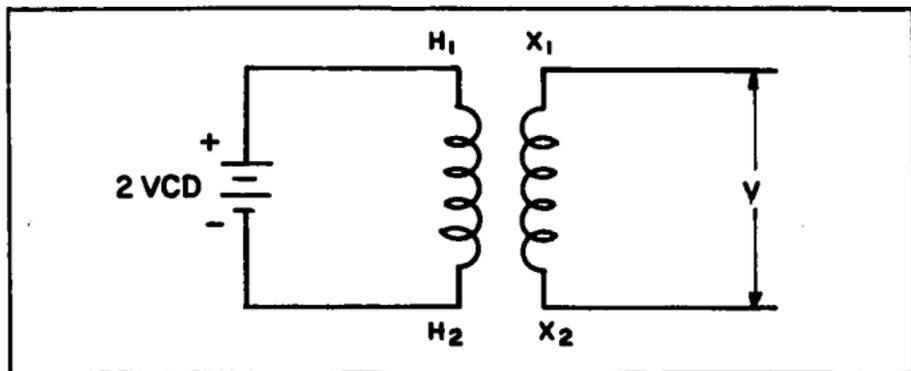


Figura 3.16.

Conectar el voltmetro en forma correcta para que la aguja se deflexione hacia la derecha. Las terminales del voltmetro darán la polaridad del transformador.

Nota: Dar un pulso rápidamente de voltaje y desenergizar el circuito.

## MATERIAL Y EQUIPO

1 transformador monofásico 5 KVA, 440/127V, 60Hz.

1 voltímetro 0-10 VCD.

1 fuente de poder monofásica 0-120 VCD.

Cables de conexión.

## PROCEDIMIENTO.

1.- Armar el circuito de la figura 3.16.

2.- Alimentar un pulso de corriente directa no excediendo de 3 Volts VCD y ver la deflexión de la aguja.

3.- Si la aguja deflexiona hacia la izquierda, intercambiar las puntas del voltmetro y repetir el punto 2.

4.- Una vez deflexionada la aguja ver qué polaridad tienen las terminales del voltmetro.

Resultado:

X1 = *Terminal positiva*

X2 = *Terminal negativa*

Por lo tanto el transformador tiene polaridad sustractiva.

### 3.2.5. Prueba de circuito abierto.

Como sabemos el transformador no es una máquina ideal y presenta pérdidas tanto en el núcleo como en los devanados. Las pérdidas en el núcleo (también llamadas pérdidas de excitación) se pueden determinar por la prueba de circuito abierto a la cual también llaman prueba de vacío del transformador.

Al excitar un transformador en vacío, es decir con el secundario (en el laboratorio de máquinas eléctricas es con el primario) en circuito abierto, el transformador no entrega energía, y por lo tanto, desde un punto de vista teórico es ideal, no debería consumir energía, pues equivale a conectar una inductancia

pura, en donde la corriente circulante estaría desfasada 90 grados con respecto al voltaje. De esta manera, la potencia real sería.

$$P = VI \cos 90^\circ = 0$$

Sin embargo, este resultado difiere del caso del transformador real debido a dos condiciones del núcleo, que son:

a) El efecto de histéresis.

El efecto de histéresis se puede representar mediante una curva a una escala adecuada, en coordenadas corrientes de excitación - flujo como lo muestra la figura 3.17.

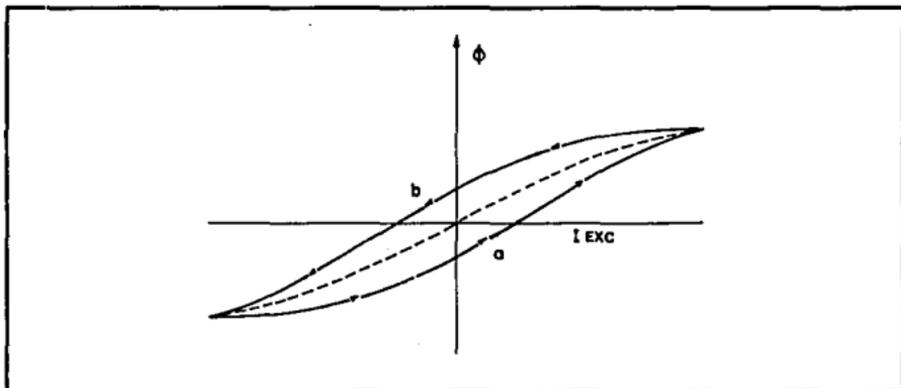


Figura 3.17.

Observamos en la curva de histéresis que cuando la corriente de excitación es creciente, el flujo aumenta siguiendo la trayectoria "a" hasta alcanzar cierto grado de saturación, mientras que cuando la corriente es decreciente el flujo disminuye siguiendo la trayectoria "b" hasta la región simétrica a la anterior.

Este comportamiento del material del núcleo produce ciertos efectos sobre la corriente de magnetización, como son:

1.- Distorsión. En vista que la onda de flujo debe ser senoidal la onda de corriente es afectada por el fenómeno de saturación y por tanto su forma difiere de la senoidal, esto lo podemos apreciar en la figura 3.18.

2.- Desplazamiento. La onda de corriente también sufre un ligero desplazamiento respecto a su posición ideal, de manera que su ángulo de fase con respecto al voltaje es menor que 90 grados, lo cual también puede apreciarse en la figura 3.18. Esto da lugar a que la potencia real

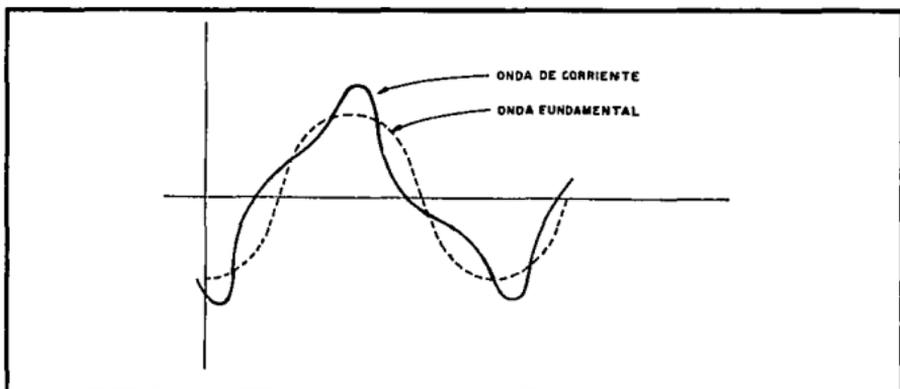


Figura 3.18.

$$P = VI \cos \theta$$

tenga un cierto valor, lo cual se conoce como pérdidas de histéresis.

b) Circulación de corrientes parásitas (llamadas también corrientes de Eddy o de Foucault) que no es posible eliminar, dado que el acero del núcleo es conductor eléctrico.

Debemos tener en cuenta que el acero es un material conductor de la electricidad y desde el punto de vista del comportamiento eléctrico se constituye como una infinidad de pequeños anillos que rodean las líneas de flujo magnético y como este flujo es variable con respecto al tiempo, se inducen fuerzas electromotrices en circuito cerrado, lo que da lugar a la circulación de corrientes circulantes en circuitos resistivos, lo cual provoca calentamiento del núcleo y por consiguiente una pérdida más.

A continuación se describe al cálculo de estas pérdidas.

En la figura 3.19 se muestra una vista ampliada de una lámina del núcleo del transformador donde las dimensiones de ésta son  $h$ ,  $L$  y  $W$ , haciendo notar que físicamente  $h$  y  $L$  son mucho mayor que el espesor de la lámina  $W$ .

Considerando una tira delgada en forma de anillo rectangular dentro de la sección transversal de la lámina, dichos anillos están colocados simétricamente con respecto al eje  $X$  y que los lados mayores estén a una distancia  $X$  del eje  $Y$ . El espesor de la tira es  $dx$ .

Este anillo lleva una corriente  $i_x(t)$  y encierra un flujo  $\Phi_x(t)$ . Este flujo es distribuido sobre un área de  $2xh$  entonces:

$$\Phi_x(t) = b(t) \cdot 2xh$$

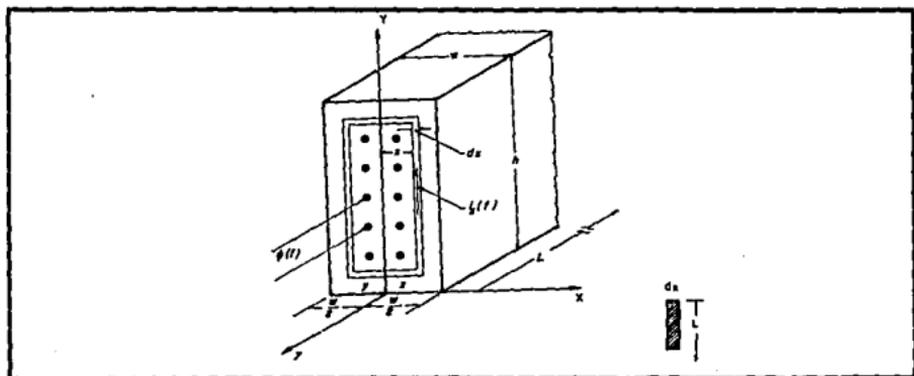


Figura 3.19.

donde el voltaje inducido es

$$e_x(t) = \frac{d \Phi_x(t)}{dt} = \frac{d}{dt} (b(t) \cdot 2xh)$$

$$e_x(t) = 2xh \frac{db(t)}{dt}$$

donde la resistividad del material es:

$$\rho_x = \frac{A_x R_x}{L_x}$$

despejando la resistencia

$$R_x = \frac{L_x \rho_x}{A_x}$$

donde

$L_x$  = Circunferencia del anillo

$A_x$  = Area de la sección transversal

sabemos que

$$L_x = 2h + 4x = 2h \quad \text{como } h \gg x$$

$$a = L \cdot dx$$

Por lo tanto

$$R_x = \frac{2h \rho_x}{L dx}$$

Por la ley de ohm sabemos

$$POT = \frac{V^2}{R}$$

análogamente

$$dPe(t) = \frac{[ex(t)]^2}{Rx}$$

donde

$$Pe(t) = \int_0^{w/2} dPe(t)$$

Integrando

$$Pe(t) = \frac{W^2}{12\rho} \left( \frac{db}{dt} \right)^2$$

como

$$\frac{db}{dt} = \frac{1}{NA} c(t)$$

$$Pe(t) = \frac{w^2 [c(t)]^2}{12(NA)^2 \rho}$$

Si se supone que el voltaje y el flujo son funciones periódicas del tiempo, la pérdida de potencia promedio debida a las corrientes parásitas puede ser calculada al integrar, por ambos lados, la ecuación anterior sobre un ciclo completo y dividiendo por el período del ciclo. Si T es el período en segundos de e (t) y  $\Phi(t)$ , la pérdida de potencia promedio está dada por

$$Pe (\text{promedio}) = \frac{w^2}{12 \rho N^2 A^2} \frac{1}{T} \int_0^T [c(t)]^2 dt$$

$Pe (\text{promedio}) = K_e E^2 e f$
--------------------------------------

donde

$$K_e = \frac{w^2}{12 \rho N^2 A^2}$$

porque

$$\frac{1}{T} \int_0^T [e(t)]^2 dt = E^2 ef$$

El conjunto de pérdidas por histéresis y corrientes parásitas se conoce con los nombres de pérdidas magnéticas o pérdidas de excitación. Su magnitud puede reducirse al mínimo por medio de un núcleo laminado y un tratamiento térmico adecuado posterior al proceso de troquelado.

Por consiguiente las pérdidas totales en el núcleo están compuestas por las pérdidas de histéresis y las pérdidas por corrientes parásitas.

$$P_c = P_h + P_e \text{ (Watts)}$$

Donde:

$P_c$  = Pérdidas totales en el núcleo.

$P_h$  = Pérdidas por histéresis.

$P_e$  = Pérdidas por corrientes parásitas.

Con esta prueba también se puede conocer la corriente de magnetización.

Tanto la corriente de magnetización como la pérdidas en el núcleo (también llamadas pérdidas en el hierro) se consideran constantes.

Las pérdidas magnéticas se miden prácticamente excitando el transformador por cualquiera de sus devanados, a voltaje y frecuencia nominales y con una onda senoidal (sin distorsión), mientras que el otro embobinado permanece en circuito abierto.

Las variaciones de temperatura del transformador no afectan sensiblemente a las pérdidas de excitación y por lo tanto no se hacen correcciones por este concepto.

## MATERIAL Y EQUIPO.

1 transformador monofásico 5 KVA, 440 - 127V.

1 wattímetro monofásico Yokogawa 120 watts.

1 amperímetro de CA. 0-0.5-1.5-5 AMP.

1 fuente de alimentación C.A. 0-120 VCA.

2 multímetros Triplett.

Cables de conexión.

## PROCEDIMIENTO:

Debido a que el wattímetro utilizado no admite una tensión alta es conveniente utilizar el lado de baja tensión como primario y el de alta tensión como secundario.

1.- Armar el circuito representado en la figura 3.20.

2.- Alimentar el circuito y llenar la tabla 3.11 a los rangos de voltaje que nos piden.

Tabla 3.11

	$V_x$	$V_H$	$I_x$	$w$
25% VN	31.75	106	0.08	1.0
50% VN	63.5	216	0.145	5.0
75% VN	93.75	320	0.245	12.4
100% VN	127.0	440	0.9	26.0

## INTERPRETACION DE RESULTADOS.

$I_x$  representa la corriente de excitación.

$I$  excitación nominal = 0.9 Amp.

$w$  representa las pérdidas en el núcleo.

pérdida nominal en el núcleo = 26 watts.

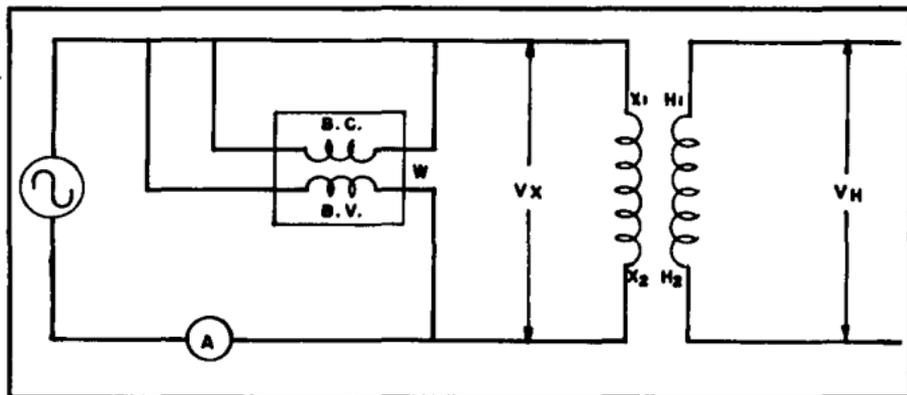


Figura 3.20.

Nota: Usar rangos de voltaje adecuados

### 3.2.6 Prueba de corto circuito.

Cuando circulan corrientes por los devanados de un transformador se originan unas pérdidas (llamadas pérdidas eléctricas en el cobre) debido a que estos arrollamientos tienen un valor de resistencia, los devanados sufren un calentamiento, cuya energía se disipa al medio ambiente, constituyendo una pérdida.

Estas pérdidas suelen llamarlas también pérdidas de carga, su magnitud se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$PCU = R_H I_H^2 + a^2 R_X I_H^2$$

Donde:

PCU = Pérdidas totales en el cobre.

R<sub>H</sub> = Resistencia en el lado de alta tensión.

R<sub>X</sub> = Resistencia en el lado de baja tensión.

I<sub>H</sub> = Corriente en el lado de alta tensión.

También se pueden calcular por la ecuación.

$$PCU = R_{eqH} I_{ccH}^2$$

Donde:

R<sub>eqH</sub> = Resistencia equivalente referida al lado de A.T.

I<sub>ccH</sub> = Corriente de corto circuito en el lado de A.T.

La prueba consiste en poner en corto circuito el lado de baja tensión y alimentando el transformador por el lado de alta tensión dando un voltaje reducido de manera que circule la corriente nominal a la frecuencia nominal.

Usualmente el voltaje de alimentación está en el rango de 1% al 15% del voltaje nominal.

La corriente primaria medida (I<sub>cc</sub>) no debe exceder al valor nominal de la corriente del devanado alimentado (primario), la aplicación del voltaje se hace regulada (en forma gradual) para evitar sobre calentamiento y en consecuencia un cambio rápido en la resistencia del devanado. Directamente de la prueba se miden los valores de las pérdidas en los devanados P<sub>cu</sub>, la corriente de corto circuito o nominal del devanado alimentado (I<sub>cc</sub>) y la caída de voltaje por impedancia o voltaje de corto circuito V<sub>cc</sub>; a partir de estas cantidades se pueden calcular las siguientes constantes.

La impedancia equivalente referida al devanado alimentado (primario).

$$ZEP = \frac{V_{cc}}{I_{cc}}$$

Donde:

ZEP = Impedancia equivalente referida al primario expresada en ohms.

V<sub>cc</sub> = Voltaje de corto circuito en el primario expresada en volts.

I<sub>cc</sub> = Corriente de corto circuito en el secundario expresada en amperes.

La resistencia equivalente referida al devanado alimentado (primario).

$$REP = \frac{P_{cu}}{I_{cc}^2}$$

Donde:

REP = Resistencia equivalente del primario.

P<sub>cu</sub> = Pérdidas en el cobre (watts).

I<sub>cc</sub> = Corriente de corto circuito en el secundario (amp.)

La reactancia equivalente referida al primario y expresada en ohms.

$$XEP = \sqrt{ZEP^2 - REP}$$

El rendimiento es el trabajo útil que puede desempeñar una máquina y se define como la relación de la potencia de salida a la potencia de entrada, lo que es decir

$$\eta = \frac{\text{Pot. Salida}}{\text{Pot. Entrada}} \times 100$$

Como pot. Entrada = Pot. Salida + Pot. pérdida (cobre + núcleo)

$$\eta = \frac{\text{Pot. Salida}}{\text{Pot. Entrada} + \text{Pot. pérdida}} \times 100$$

Donde:

XEP = Reactancia equivalente (ohms).

## MATERIAL Y EQUIPO.

1 fuente de alimentación C.A.

1 multímetro Simpson.

1 wattímetro monofásico 120 W.

- 1 amperímetro de C.A. 1-60 Amp. (Gancho)
- 1 amperímetro de C.A. 0- 0.5 - 1.5 - 5 Amp.
- 2 transformadores monofásicos 5 KVA.
- 1 transformador de corriente 30/5 Amp.
- Cables de conexión.

## PROCEDIMIENTO:

Para realizar esta prueba se conectará un transformador adicional  $T_1$ , para elevar la corriente de la fuente de alimentación (puesto que ésta entrega 5 amp) a un valor de 11.36 amp. en el primario del transformador  $T_2$ . Además se utiliza un transformador de corriente TC para regular la corriente que circula por el wattímetro.

1.- Armar el circuito de la figura 3.21

2.- Alimente el primario del transformador de acuerdo a la tabla 3.12, midiendo y registrando los resultados en dicha tabla.

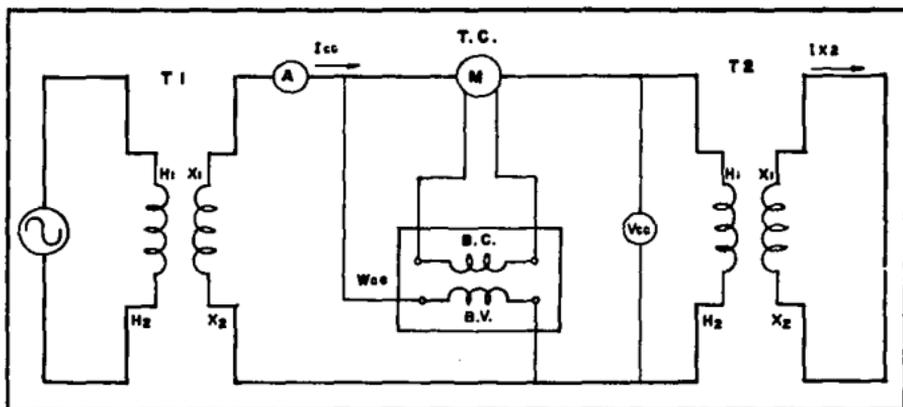


Figura 3.21.

Nota: El puente para poner en corto circuito el lado de baja tensión debe ser de sección igual o mayor que la de las terminales correspondientes; debe ser lo más corto posible y no atravesar campos magnéticos. Las terminales deben estar limpias y apretadas.

Tabla 3.12

	I <sub>cc</sub>	V <sub>cc</sub>	I <sub>x1</sub>	P <sub>cu</sub> Watts
25% IN	2.84	3 V	10 A	0.8
50% IN	5.68	6 V	19 A	4
75% IN	8.52	9 V	29 A	10
100% IN	10.0	10 V	35 A	12

Pérdidas nominales en el cobre (P<sub>cu</sub>) = 12 Watts

### 3.2.7. Conexiones trifásicas

La conexión de los primarios de un banco de transformadores monofásicos se pueden realizar en delta ( $\Delta$ ) o estrella (Y), de forma similar puede hacerse con el lado secundario, éstos a su vez, pueden conectarse a una fuente de alimentación o una carga respectivamente. Para conectar un banco de transformadores y así obtener alguna transformación polifásica se debe cumplir con ciertas condiciones, como son:

a) Tener la misma capacidad en KVA.

b) El voltaje primario de cada transformador deberá ser igual, así como el del lado secundario.

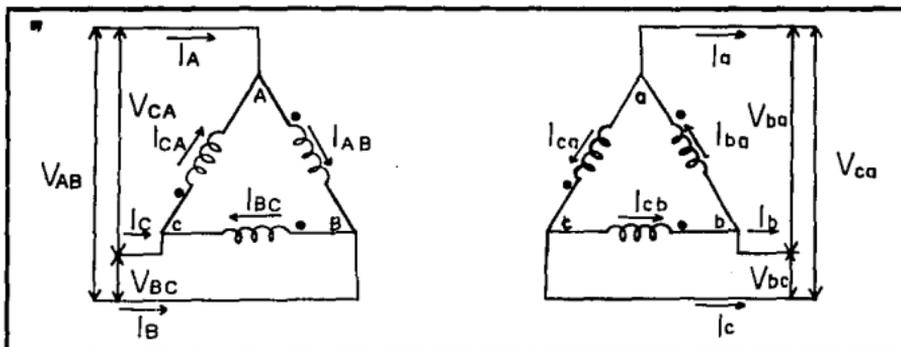
c) La relación de transformación en los transformadores debe ser igual.

d) Polaridad idéntica.

Por último, se recomienda que los transformadores a conectarse sean del mismo fabricante.

#### Conexión $\Delta - \Delta$

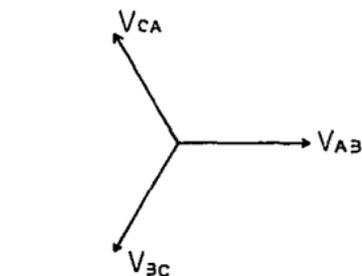
La configuración delta-delta de transformadores monofásicos se usa generalmente en sistemas cuyos voltajes no son muy elevados, es satisfactoria para



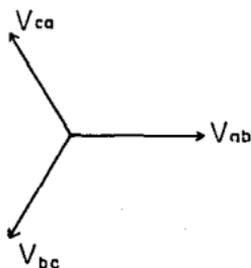
cargas balanceadas y desbalanceadas, pero tiene una desventaja, no cuenta con una tierra neutra.

Los anteriores diagramas (1 y 2) nos muestran las siguientes relaciones:

Los voltajes de línea como de fase son idénticos en magnitud por lo que su diagrama vectorial es:

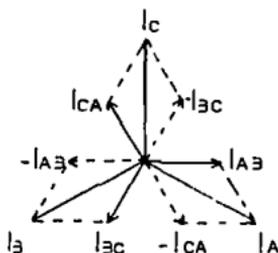


$$\begin{aligned} \bar{V}_{AB} &= \bar{V}_A & \bar{V}_{ab} &= \bar{V}_a \\ \bar{V}_{BC} &= \bar{V}_B & \bar{V}_{bc} &= \bar{V}_b \\ \bar{V}_{CA} &= \bar{V}_C & \bar{V}_{ca} &= \bar{V}_c \end{aligned}$$

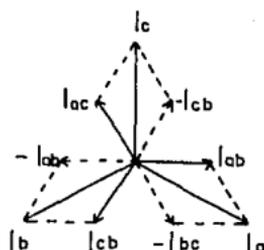


$\bar{V}_A, \bar{V}_B, \bar{V}_C$  son los voltajes primarios  
 $\bar{V}_a, \bar{V}_b, \bar{V}_c$  son los voltajes secundarios

Para cargas balanceadas el diagrama vectorial es el correspondiente.



$$\begin{aligned} \bar{I}_A &= \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA} \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB} \\ \bar{I}_C &= \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \bar{I}_a &= \bar{I}_{ba} - \bar{I}_{ac} \\ \bar{I}_b &= \bar{I}_{cb} - \bar{I}_{bc} \\ \bar{I}_c &= \bar{I}_{ac} - \bar{I}_{cb} \end{aligned}$$

$\bar{I}_A, \bar{I}_B$  e  $\bar{I}_C$  son las corrientes de línea en el primario,  $\bar{I}_a, \bar{I}_b$  e  $\bar{I}_c$  son las corrientes del lado secundario.

Para obtener el valor de la corriente de línea se aplica la ley de los cosenos, por lo que:

$$\bar{I}_A = \sqrt{\bar{I}_{AB}^2 + \bar{I}_{BC}^2 - 2 \bar{I}_{AB} \bar{I}_{BC} \cos 120^\circ}$$

Suponiendo nuestro sistema balanceado tenemos que  $\bar{I}_{AB} = \bar{I}_{BC}$  entonces,

$$I_A = \sqrt{2I_{AB}^2 + 2I_{AB}^2 (1/2)} = \sqrt{2I_{AB}^2 + I_{AB}^2}$$

$$I_A = \sqrt{3} I_{AB} \angle -30^\circ$$

$$I_A = \sqrt{3} I_{AB} \angle -30^\circ$$

en conclusión, las corrientes de línea, tanto en el primario como en el secundario, son mayores que las corrientes de fase por  $\sqrt{3}$  y difieren por un ángulo de  $30^\circ$ .

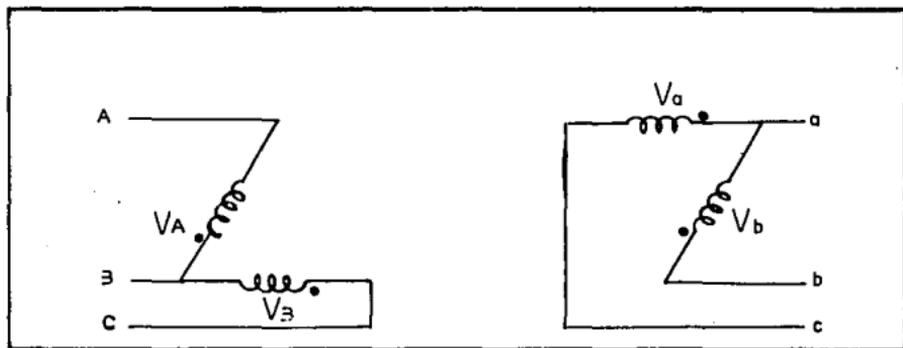
La potencia total obtenida por el banco de transformadores es;

$S = 3I_p V_p = \sqrt{3} V_L I_L$  Cabe destacar que esto se cumple para bancos de tres transformadores monofásicos y no para dos.

### Conexión delta abierta-delta abierta

Como en un sistema trifásico la suma de dos voltajes es igual a un tercer voltaje, existe la posibilidad que en la conexión delta-delta se retire un transformador y se siga obteniendo potencia trifásica.

La corriente por las líneas y los voltajes del banco difieren  $30^\circ$ . Como los voltajes y las corrientes tienen entre sí ángulos distintos, las potencia total que se puede proveer se deduce de esta forma:



$$V_A = V \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_B = V \angle 120^\circ \text{ V}$$

Para el transformador 1, el voltaje tiene un ángulo de  $150^\circ$  y la corriente de  $120^\circ$ , de tal manera que la expresión de su máxima potencia es:

$$\begin{aligned} P_1 &= V_p I_p \cos(150^\circ - 120^\circ) \\ &= V_p I_p (\cos 30^\circ) \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} V_p I_p \end{aligned}$$

En el transformador 2 la tensión está a  $30^\circ$  y la corriente a  $60^\circ$ , así que su máxima potencia es

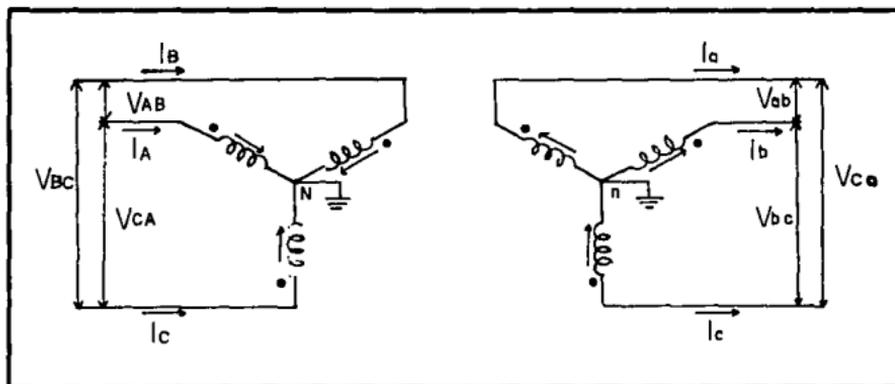
$$\begin{aligned}
 P_2 &= V_p I_p \cos(30^\circ - 60^\circ) \\
 &= V_p I_p \cos(-30^\circ) \\
 &= \frac{\sqrt{3}}{2} V_p I_p
 \end{aligned}$$

por lo tanto, la potencia máxima del banco en V - V es.

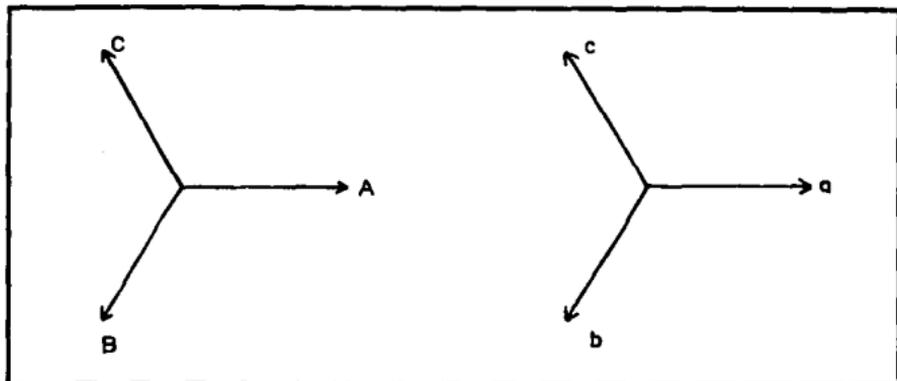
$$P = \sqrt{3} V_p I_p$$

### Conexión Y-Y

Aunque su uso es poco común, se utiliza en sistemas que operan con tensiones elevadas y en algunas instalaciones de potencia de cuatro hilos, da un servicio eficiente sólo en cargas balanceadas, ya que un desbalance podría causar un desplazamiento del neutro lo que provocaría que sólo dos de los tres voltajes existieran. Otros problemas adicionales serían: en caso de fallar un transformador no se puede contar con transformación trifásica, cuando la estrella no se encuentra aterrizada se tiene el problema de que para la tercera armónica no existe en forma de corriente debido a que no hay regreso por ella dando como resultado distorsión de las formas de ondas de flujo como del voltaje inducido.

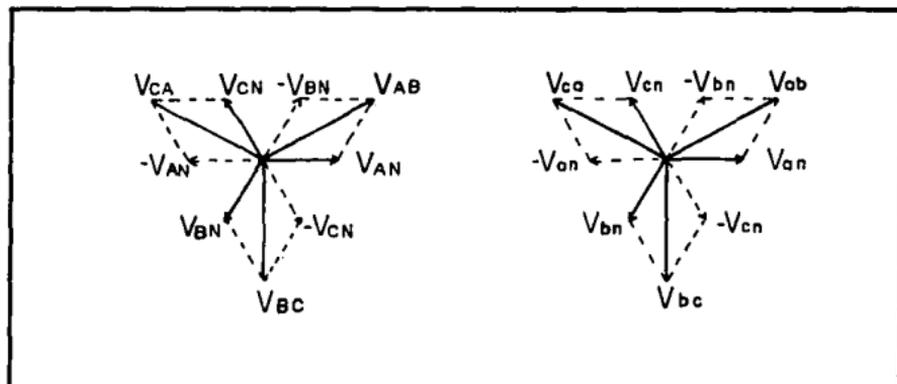


Las relaciones de magnitudes son las siguientes:



$$\begin{aligned} \vec{I}_A &= \vec{I}_{AN} & \vec{I}_{a0} &= \vec{I}_0 \\ \vec{I}_B &= \vec{I}_{BN} & \vec{I}_{b0} &= \vec{I}_0 \\ \vec{I}_C &= \vec{I}_{CN} & \vec{I}_{c0} &= \vec{I}_0 \end{aligned}$$

por lo que se concluye que, las corrientes de línea son igual a la corriente de fase en el lado primario; en el secundario es similar.



Las relaciones vectoriales existentes son:

$$\begin{aligned} \vec{V}_{AB} &= \vec{V}_{AN} - \vec{V}_{BN} & \vec{V}_{ab} &= \vec{v}_{an} - \vec{v}_{bn} \\ \vec{V}_{BC} &= \vec{V}_{BN} - \vec{V}_{CN} & \vec{V}_{bc} &= \vec{v}_{bn} - \vec{v}_{cn} \\ \vec{V}_{CA} &= \vec{V}_{CN} - \vec{V}_{AN} & \vec{V}_{ca} &= \vec{v}_{cn} - \vec{v}_{an} \end{aligned}$$

Para obtener el valor del voltaje de línea se obtiene aplicando la ley de los cosenos:

$$\bar{V}_{AB} = \sqrt{\bar{V}_{AN}^2 + \bar{V}_{BN}^2 - 2\bar{V}_{AN}\bar{V}_{BN}\cos 120^\circ}$$

ya que el sistema debe de estar balanceado, se tiene que  $\bar{V}_{AN} = \bar{V}_{BN}$

$$\bar{V}_{AB} = \sqrt{2\bar{V}_{AN}^2 + 2\bar{V}_{AN}^2 (1/2)}$$

$$\bar{V}_{AB} = \sqrt{2\bar{V}_{AN}^2 + \bar{V}_{AN}^2} = \sqrt{3}\bar{V}_{AN}$$

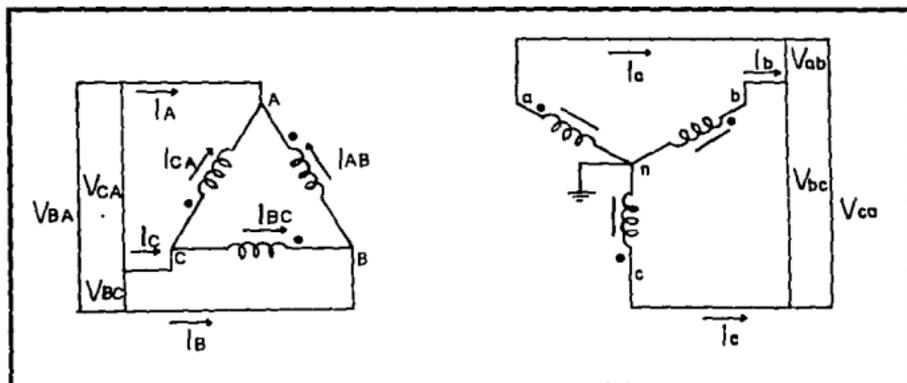
$$\bar{V}_{AB} = \sqrt{3}\bar{V}_{AN}$$

De igual manera para el lado secundario y en general para todos los voltajes de línea.

### Conexión $\Delta - Y$

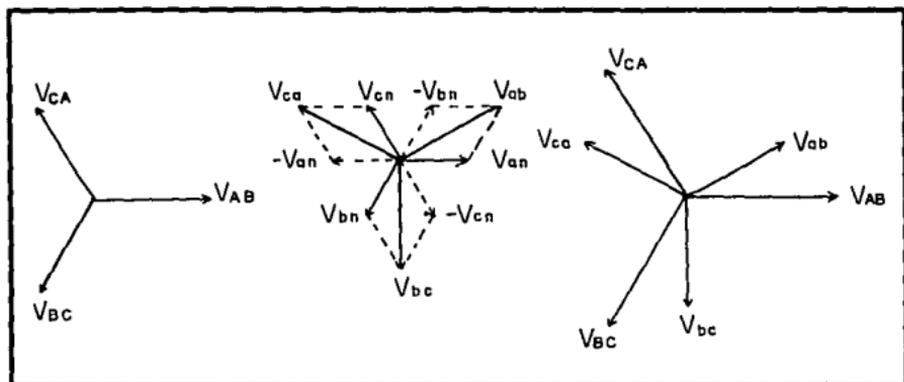
La conexión  $\Delta - Y$  es de las más utilizadas y se usa frecuentemente en los sistemas de distribución, hace eficiente la elevación de voltaje de línea a línea. Los devanados de alta tensión presentan menores esfuerzos en su aislamiento, por otra parte se cuenta en el lado secundario con neutro para poder contar con alimentación trifásica o monofásica, por último el sistema se acomoda tanto para cargas balanceadas como desbalanceadas.

Los siguientes diagramas nos muestran las siguientes relaciones:

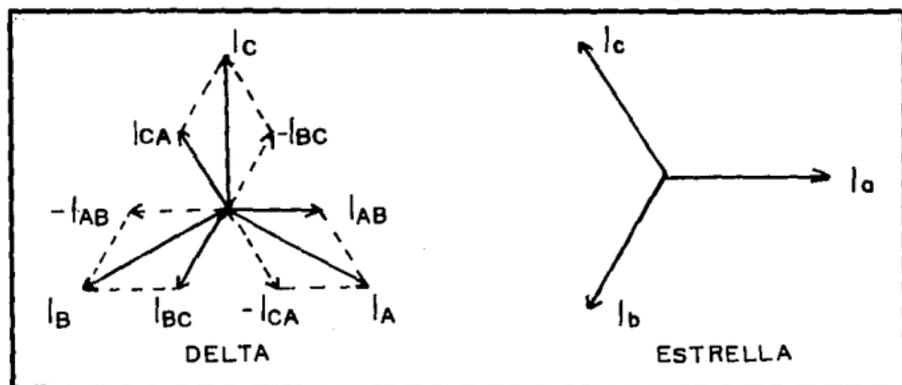


$$\begin{aligned} \bar{V}_{AB} &= \bar{V}_A & \bar{V}_{ab} &= \sqrt{3} \bar{V}_{an} \angle 130^\circ \\ \bar{V}_{BC} &= \bar{V}_B & \bar{V}_{bc} &= \sqrt{3} \bar{V}_{bn} \angle 130^\circ \\ \bar{V}_{CA} &= \bar{V}_C & \bar{V}_{ca} &= \sqrt{3} \bar{V}_{cn} \angle 130^\circ \end{aligned}$$

En el siguiente diagrama vectorial se muestra el defasamiento existente entre el voltaje primario y el secundario:



Para las corrientes sus diagramas vectoriales son los siguientes.



$$\bar{I}_A = \sqrt{3} \bar{I}_{AB} \angle -30^\circ$$

$$\bar{I}_B = \sqrt{3} \bar{I}_{BC} \angle -30^\circ$$

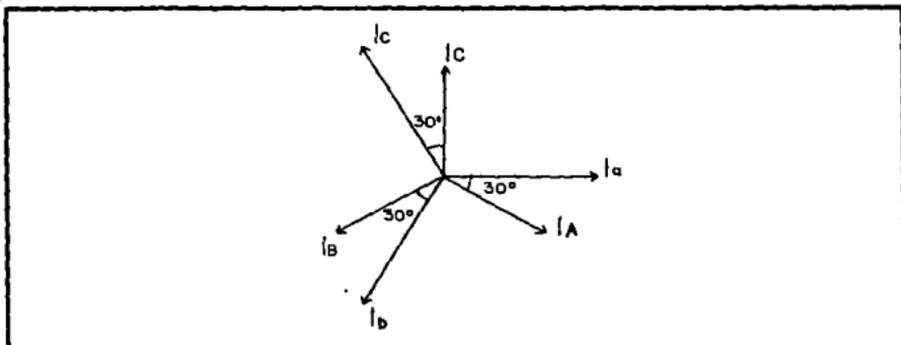
$$\bar{I}_C = \sqrt{3} \bar{I}_{CA} \angle -30^\circ$$

$$\bar{I}_{aA} = \bar{I}_a$$

$$\bar{I}_{bB} = \bar{I}_b$$

$$\bar{I}_{cC} = \bar{I}_c$$

En este caso el defasamiento existente en las corrientes del lado primario con las corrientes del lado secundario se muestra a continuación:

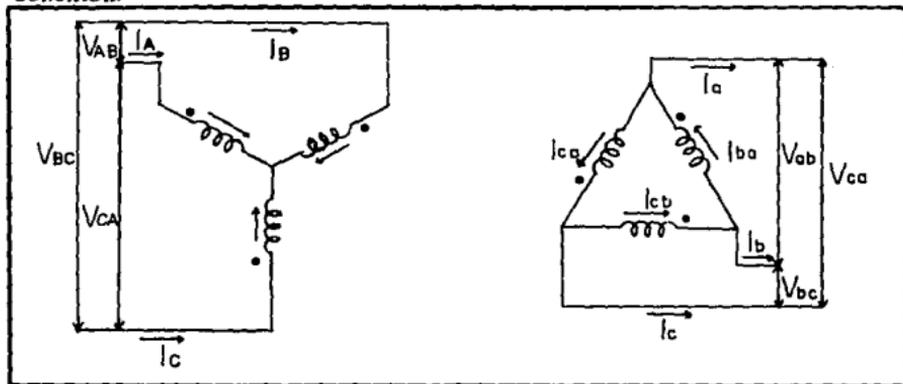


En contraste con las configuraciones  $\Delta - \Delta$  y  $Y - Y$  la relación de voltaje de línea a línea ya no es  $\sqrt{3}$  sino  $\frac{1}{\sqrt{3}}$ , los voltajes de línea y las corrientes correspondientes no están en fase, están separados a  $30^\circ$ .

### Conexión Y- $\Delta$

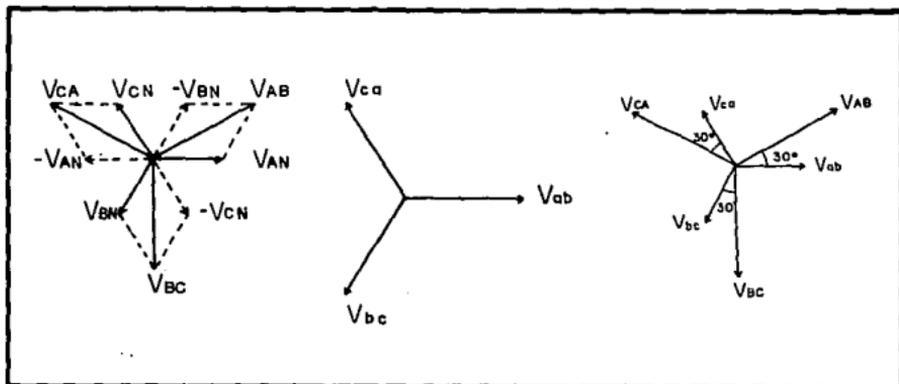
Si la conexión  $\Delta - Y$  se utiliza frecuentemente para elevar voltajes, por el contrario, la conexión  $Y - \Delta$  se utiliza para reducirlos, cabe aclarar que su uso en sistemas de distribución es poco común, el lado en estrella se conecta al circuito de más alto voltaje por razones de aislamiento.

En las siguientes figuras se muestran los diagramas existentes para esta conexión.

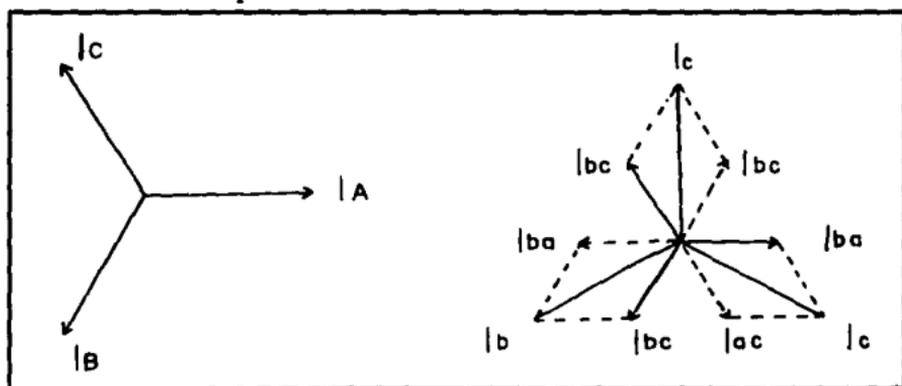


$$\begin{aligned} \bar{V}_{AB} &= \sqrt{3} \bar{V}_{AN} \underline{30^\circ} & \bar{V}_{ab} &= \bar{V}_a \\ \bar{V}_{BC} &= \sqrt{3} \bar{V}_{BN} \underline{30^\circ} & \bar{V}_{bc} &= \bar{V}_b \\ \bar{V}_{CA} &= \sqrt{3} \bar{V}_{CN} \underline{30^\circ} & \bar{V}_{ca} &= \bar{V}_c \end{aligned}$$

El defasamiento existente entre los voltajes primarios y secundarios se muestra en el siguiente diagrama fasorial:

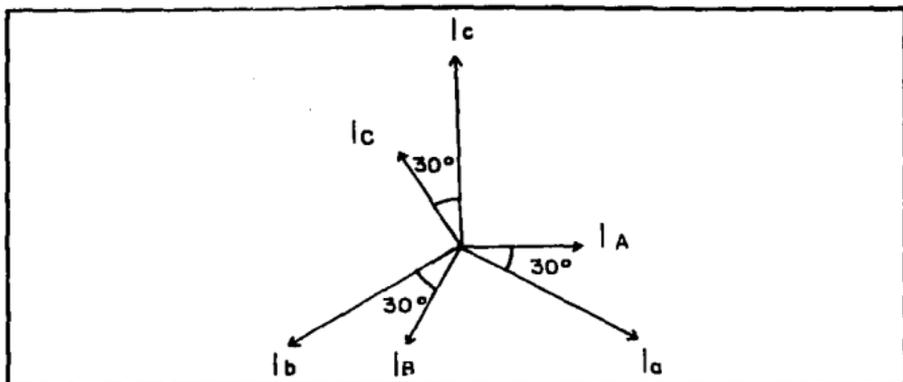


Las relaciones para las corrientes son:



$$\begin{aligned} \bar{I}_A &= \bar{I}_{AN} & \bar{I}_a &= \sqrt{3} \bar{I}_{ba} \angle 30^\circ \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_{BN} & \bar{I}_b &= \sqrt{3} \bar{I}_{cb} \angle 30^\circ \\ \bar{I}_C &= \bar{I}_{CN} & \bar{I}_c &= \sqrt{3} \bar{I}_{ac} \angle 30^\circ \end{aligned}$$

El defasamiento existente entre la corriente primaria y secundaria se observa en el siguiente diagrama vectorial

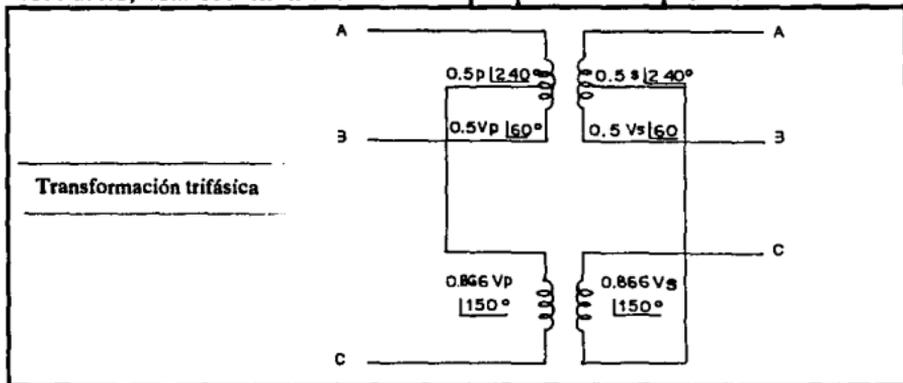


La relación de transformación de línea a línea es:

$$\frac{V_{\Delta B}}{V_{ab}} = \frac{\sqrt{3} V_{AN}}{V_{ab}}$$

### Conexión T - T

Existe otra conexión que se realiza con dos transformadores que tienen como característica derivaciones del 50% y 86.6% tanto en el primario como en el secundario, esta conexión fue realizada por primera vez por C.F. Scott. En el



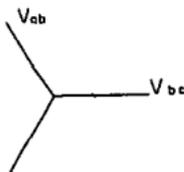
siguiente esquema se ilustra la forma de conectarse.

Como resultado de su transformación trifásica su relación de transformación es  $a_1 = a$ .

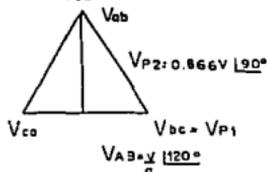
Los diagramas pertenecen a la conexión trifásica T - T.

32, 33, 34 y 35

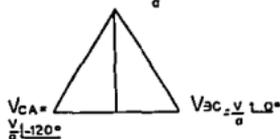
Voltajes trifásicos de alimentación



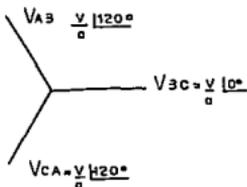
Voltajes sobre los arrollamientos primarios



Voltajes sobre los arrollamientos secundarios



Voltajes trifásicos resultantes del secundario



### 3.2.8. Desplazamiento angular

Los transformadores monofásicos que se encuentran en el laboratorio nos permiten ensayar diversas conexiones trifásicas para comprobar el desplazamiento angular que existe en ellas.

En la tabla 3.13 (ver página siguiente) se ilustran las diferentes conexiones enmarcadas en grupos, debido a su desplazamiento angular que tienen y las mediciones de prueba que se practican.

A continuación se realizarán las comprobaciones del desplazamiento angular de las conexiones delta-delta y estrella-delta.

### MATERIAL Y EQUIPO

3 Transformadores monofásicos de 5 kva, 440/127, 60 hertz

1 Fuente de poder trifásica

## 1 Multímetro

### Conexión delta-delta

#### PROCEDIMIENTO

1. Arme el circuito de la figura 3.22.

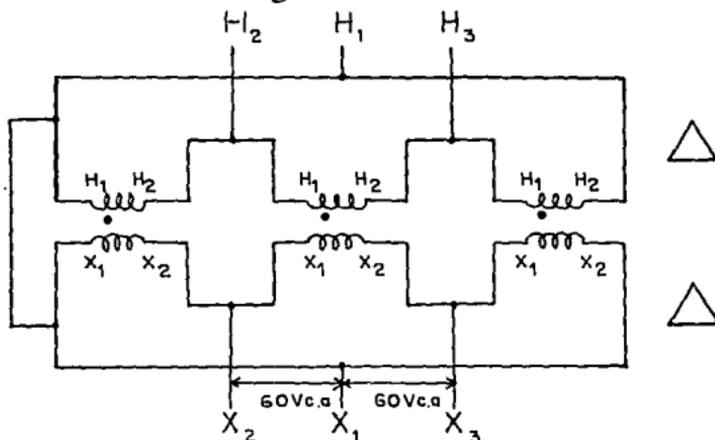


Figura 3.22.

2. Interconecte  $H_1$  con  $X_1$

3. Alimente con 60 volts en el lado primario (baja tensión).

$$H_3 - X_3 = 150 \text{ volts}$$

$$H_2 - X_2 = 150 \text{ volts}$$

$$H_2 - X_3 = 180 \text{ volts}$$

$$H_1 - H_2 = 215 \text{ volts}$$

$$H_3 - X_2 = 180 \text{ volts}$$

Si las siguientes relaciones son correctas el desplazamiento angular es de  $0^\circ$ .

(1)  $H_3 - X_2 = H_2 - X_3$

(2)  $H_3 - X_2 < H_1 - H_2$

(3)  $H_2 - X_2 < H_1 - H_2$

(4)  $H_2 - X_2 < H_1 - H_2$

Si son correctas, por lo tanto el desplazamiento angular es de  $0^\circ$ .

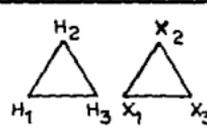
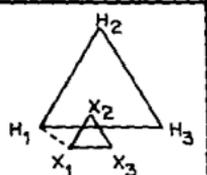
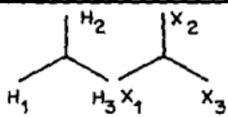
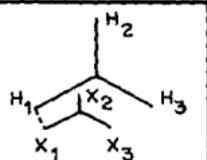
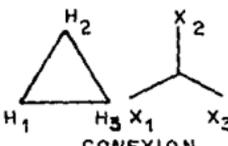
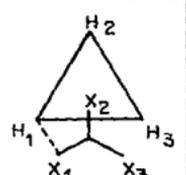
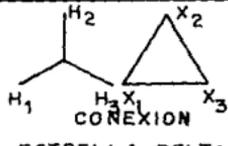
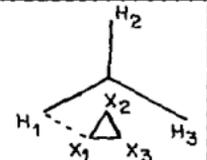
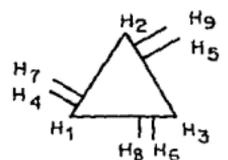
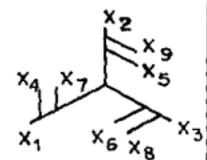
GRUPO 1	DESPLAZAMIENTO ANGULAR	DIAGRAMA DE MEDICIONES PARA	MEDICIONES DE PRUEBA
DESPLAZAMIENTO ANGULAR	 <p>CONEXION DELTA-DELTA</p>		<p>CONECTAR <math>H_1-H_1</math> MEDIR</p> <p><math>H_2-X_2, H_3-X_2</math> <math>H_1-H_2, H_2-X_3</math> <math>H_2-X_3</math></p>
	 <p>CONEXION ESTRELLA ESTRELLA</p>		<p>RELACIONES DE TENSION</p> <p>(1) <math>H_2-X_3 = H_3-X_2</math> (2) <math>H_2-X_2 &lt; H_1-H_2</math> (3) <math>H_2-X_2 &lt; H_2-X_3</math> (4) <math>H_2-X_2 = H_3-X_3</math></p>
2 DESPLAZAMIENTO ANGULAR	 <p>CONEXION DELTA ESTRELLA</p>		<p>CONECTAR <math>H_1-X_1</math> MEDIR</p> <p><math>H_3-X_2, H_3-X_3</math> <math>H_1-H_3, H_2-X_2</math> <math>H_2-X_3</math></p>
	 <p>CONEXION ESTRELLA DELTA</p>		<p>RELACIONES DE TENSION</p> <p>(1) <math>H_3-X_2 = H_3-X_3</math> (2) <math>H_3-X_2 &lt; H_1-H_3</math> (3) <math>H_2-X_2 &lt; H_2-X_3</math> (4) <math>H_2-X_2 &lt; H_1-H_3</math></p>
EN 30 GRADOS	 <p>TRANSFORMADOR TRIFASICO CON DERIVACIONES</p>		

Tabla 3-13.

## Conexión estrella-delta

### PROCEDIMIENTO

1. Arme el circuito de la figura 3.23.

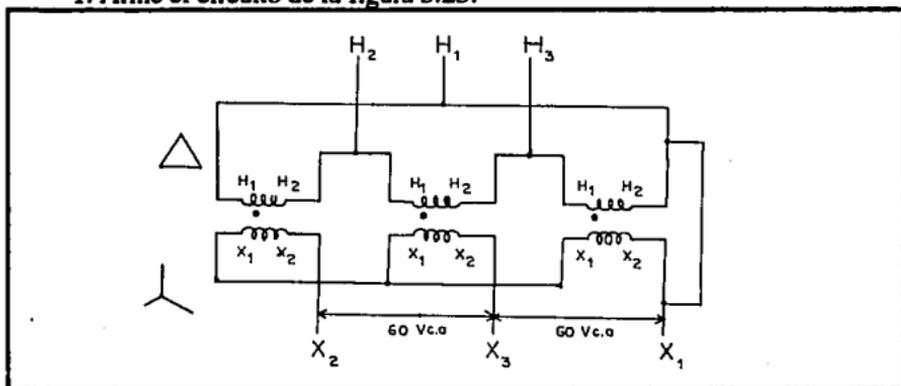


Figura 3.23.

2. Conecte  $H_1$  con  $X_1$ .

3. Alimente con 60 volts y realice las siguientes mediciones.

$$\begin{aligned}H_3 - X_2 &= 75 \\H_3 - X_3 &= 75 \\H_2 - X_2 &= 135 \\H_2 - X_3 &= 110 \\H_1 - H_3 &= 125\end{aligned}$$

Si las siguientes relaciones son correctas el desplazamiento angular es de  $30^\circ$ .

- (1)  $H_3 - X_2 = H_3 - X_3$
- (2)  $H_3 - X_2 < H_1 - H_3$
- (3)  $H_2 - X_2 < H_2 - X_3$
- (4)  $H_2 - X_2 < H_1 - H_3$

Si son correctas, por lo tanto el desplazamiento angular es de  $30^\circ$ .

### 3.2.9. Secuencia de fases.

Como sabemos los sistemas trifásicos como su nombre lo dice tiene 3 fases, defasadas entre sí 120 grados eléctricos, como se muestra en la figura 3.24.

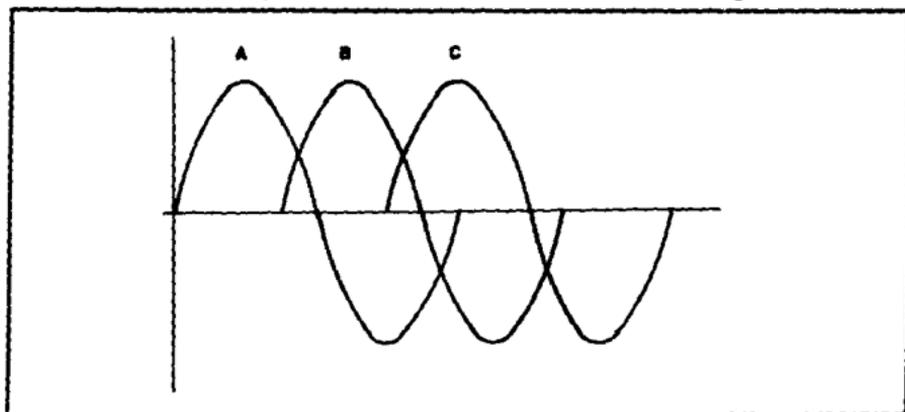


Figura 3.24.

En la figura 3.24, se describe una secuencia positiva A B C donde aparece en primer lugar el voltaje A y respectivamente el voltaje B y C, y así se repite constantemente con la rapidez de la frecuencia del sistema.

Una secuencia negativa sería que apareciera en primer lugar el voltaje de B y consecuentemente el voltaje A y C.

Debemos considerar que una secuencia B C A y C A B, es una secuencia positiva, así como una secuencia A C B y C B A es una secuencia negativa.

Si conectamos los devanados de alta tensión  $H_1 - H_2 - H_3$  del transformador en prueba al secuencímetro en sus líneas trifásicas  $L_1 - L_2 - L_3$ , obtendremos de éste un sentido de giro dado y conectando después los devanados de baja tensión  $X_1 - X_2 - X_3$ , en las líneas trifásicas  $L_1 - L_2 - L_3$ , del secuencímetro y

éste presenta el mismo sentido de giro que el anterior (devando de alta tensión), se dice que tiene una secuencia normal.

Existen varios tipos de secuencímetros, siendo los más comunes el secuencímetro indicador y el motor de inducción.

#### SECUENCIMETRO INDICADOR.

Es un instrumento de prueba que trabaja con el principio del motor de inducción. Sus tres conexiones están identificadas en orden, y cuando la secuencia del sistema al que se conecta tiene ese mismo orden, se observa que el indicador de carátula gira en sentido positivo según indicaciones de la misma carátula.

#### MOTOR DE INDUCCION TRIFASICO.

Un motor de inducción trifásico sirve como secuencímetro, identificando previamente el orden de sus conexiones con un sentido de giro.

#### MATERIAL Y EQUIPO.

3 transformadores monofásicos 5 KVA, 440/127 VCA.

1 secuencímetro.

1 motor de inducción trifásico 1/4 HP.

1 fuente de alimentación trifásica.

1 vóltmetro 250 VCA.

Cables de conexión.

#### PROCEDIMIENTO.

NOTA: Estas pruebas se efectúan para obtener un sentido de giro deseado.

##### a) Método del secuencímetro.

1.- Armar el circuito de la figura 3.25, para obtener un transformador trifásico Y-Y.

2.- Armar el circuito de la figura 3.26 alimentando el lado de alta tensión con 200 VCA.

3.- Observar el sentido de giro del secuencímetro.

sentido de giro = DERECHA

secuencia = NEGATIVA

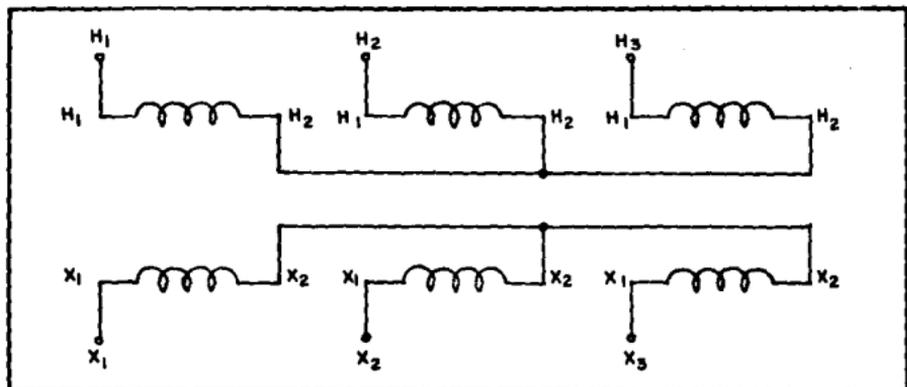


Figura 3.25.

4.- Desenergizar el circuito e intercambiar 2 líneas, en este caso  $X_1 - S$ , -  $X_2 - R$  y  $X_3 - T$ .

5.- Energizar nuevamente el circuito con 220 VCA y observar el sentido de giro del secuencímetro.

sentido de giro = IZQUIERDA

secuencia = POSITIVA

b) Método del motor de inducción trifásico.

1.- Armar el circuito de la figura 3.25.

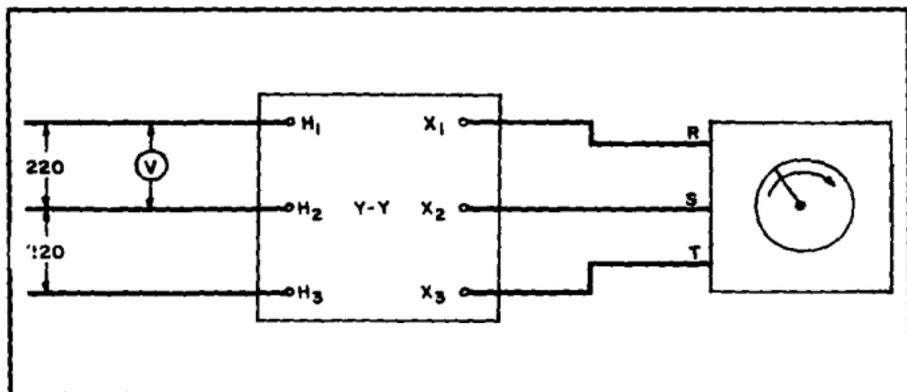


Figura 3.26.

2.- Alambrear el circuito de la figura 3.27.

3.- Energizar el circuito con 220 VCA y observar el sentido de giro del motor.

sentido de giro = DERECHA

secuencia = NEGATIVA

4.- Desenergizar el circuito e intercambiar 2 líneas, en este caso  $X_1 - L_3$ ,  $X_3 - L_1$  y  $X_2 - L_2$ .

5.- Nuevamente energizar el circuito con 220 VCA y observar el sentido de giro del motor.

sentido de giro = IZQUIERDA

secuencia = POSITIVA

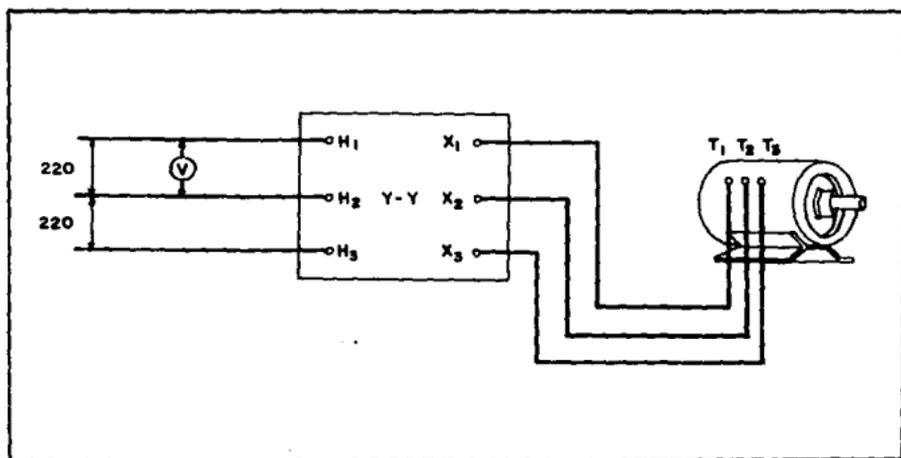


Figura 3.27

### 3.2.10 *Medición de resistencia óhmica al transformador trifásico.* \_\_\_\_\_

La resistencia óhmica ya la analizamos en el capítulo anterior (punto 3.2.1.) y también vimos que los transformadores trifásicos de distribución son reductores. Por lo tanto su devanado de alta tensión tiene una conexión delta y el devanado de baja tensión tiene una conexión estrella.

En este capítulo se describen algunas pruebas que se podrían anexar en las prácticas de laboratorio de máquinas eléctricas.

### 3.2.11 *Método del puente de Wheatstone.*

En este subtema se propone la utilización del transformador trifásico con que se cuenta en el laboratorio de máquinas eléctricas, el cual tiene los siguientes datos de placas.

POTENCIA 5 KVA.  
TENSION = 2300 - 220/127 VCA.  
TEMPERATURA DE OPERACION = 80 °C.  
FASES = TRES FASES.  
FRECUENCIA = 60 HZ.

### MATERIAL Y EQUIPO.

- 1 transformador trifásico 5 KVA, 2300-220/127VCA, 60 HZ.
- 1 puente de Wheatstone.
- Cables de conexión.

### PROCEDIMIENTO.

- 1).- Conectar el puente de Wheatstone como se muestra en la Figura 3.3.

2).— Conectar el puente de Wheatstone en las diferentes fases del transformador  $3\emptyset$ . Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 3.14. y 3.15.

Tabla. 3.14. Resistencia óhmica en el lado de baja tensión.

Terminales R	$X_1 - X_0$	$RX_1 - X_0$ Corregida por temperatura	$RX_1 - RX_0$ Corregida por c.a.	$RX_0 - X_1$	$X_0 - X_1$	$RX_0 - X_1$ Corregida por temperatura
	0.200	0.237	0.356	0.205	0.243	0.365

Tabla 3.15. Resistencia óhmica lado de alta tensión.

Terminales	$RH_1 - H_2$	$R\emptyset$	$RH_1 - H_2$ Corregida por temperatura	$RH_1 - H_2$ Corregida por c.a.
R TAP 1	29.42	44.13	34.981	52.471
R TAP 2	24.36	36.54	28.964	43.446
R TAP 3	24.52	36.78	29.155	43.732
R TAP 4	24.12	36.18	28.679	43.018
R TAP 5	36.20	54.30	43.043	64.564

### 3.2.12 Método de la caída de potencial.

En el capítulo anterior (punto 3.2.1.b) vimos el caso de un transformador monofásico, el método para el transformador trifásico es muy semejante al monofásico.

Para transformadores trifásicos los cuales tienen alojados y conectados los embobinados en el interior del tanque, ya sea en circuito delta o en circuito estrella, se calcula la resistencia de una fase según sea el caso, alimentando un devanado con una fuente de alimentación de corriente directa, dando un voltaje

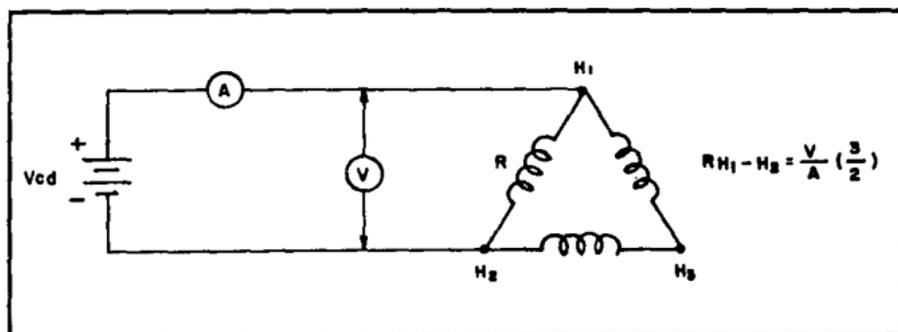


Figura 3.28. Medición de la resistencia óhmica en una conexión delta.

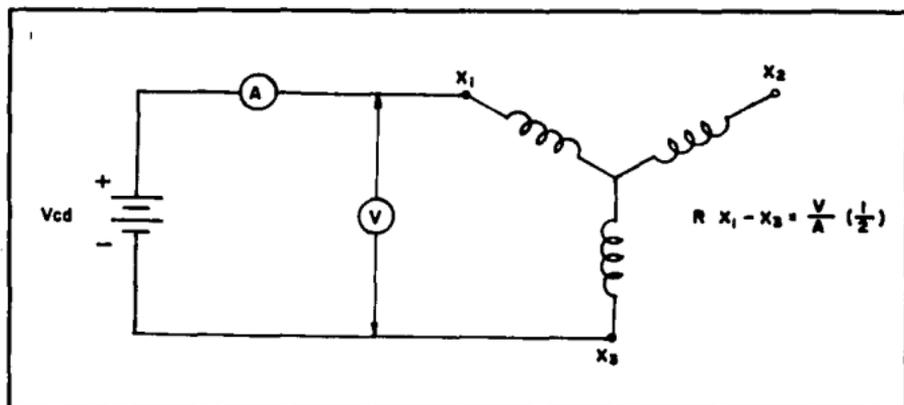


Figura 3.29. Medición de la resistencia óhmica de línea en una conexión estrella.

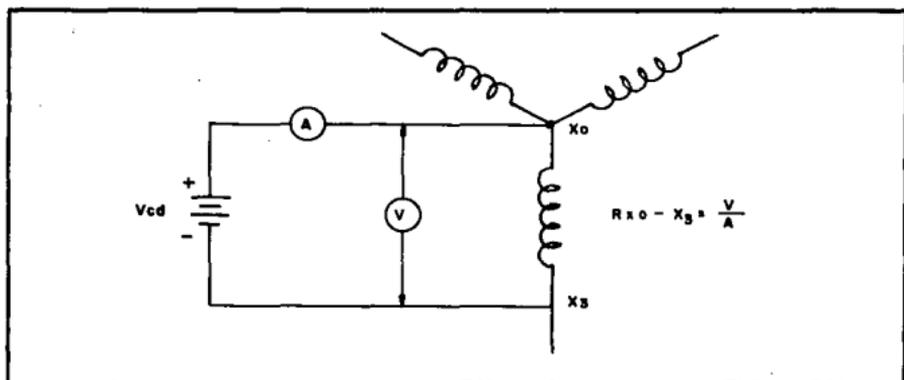


Figura 3.30. Medición de la resistencia óhmica de fase en una conexión estrella.

Nota: Al efectuar esta prueba es necesario tener en cuenta que la circulación de corriente por el devanado almacena energía en el núcleo del transformador. Antes de cortar la corriente es necesario retirar el voltímetro (o milivoltímetro) del circuito para evitar que la energía almacenada se descargue a través de este aparato.

de C.D. muy pequeño y midiendo tanto el voltaje como la corriente que pasa por el devanado como se muestra en las figuras 3.28, 3.29 y 3.30.

Si el embobinado tiene derivaciones es necesario que se haga esta prueba para cada una de las derivaciones.

### 3.2.13 Emparalelamiento del transformador.

Existen 2 formas de conectar los arrollamientos de 2 o más transformadores, las cuales son:

#### a) Conexión en serie.

Esta conexión consiste en unir en serie los devanados secundarios de los transformadores como se muestra en la figura 3.31.

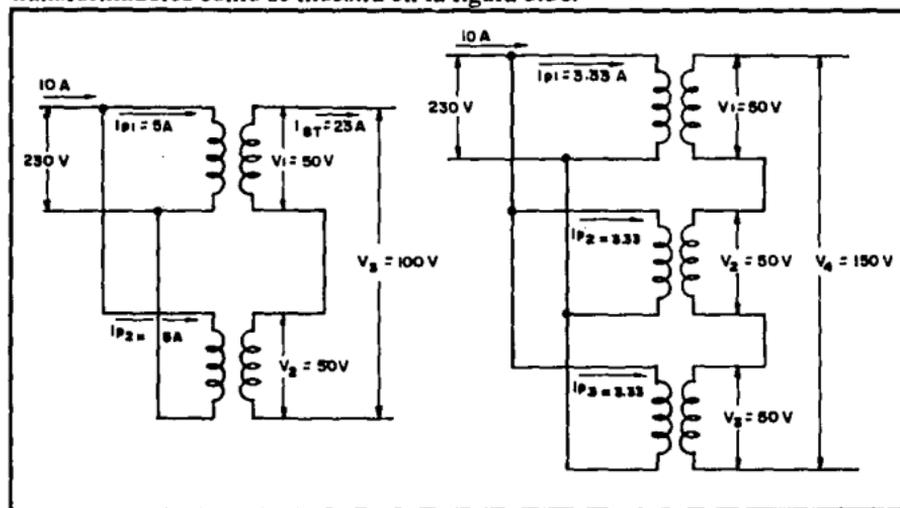


Figura 3.31. a) Dos transformadores conectados con el primario en paralelo y el secundario en serie.

b) Tres transformadores conectados con el primario en paralelo y el secundario en serie.

Cabe mencionar que se pueden realizar las siguientes conexiones en serie.

- 1.- Los primarios en serie y secundarios en paralelo.
- 2.- Los primarios en serie y secundarios en serie.
- 3.- Los primarios en paralelo y secundarios en serie.

En la Fig.3.31a se muestran dos transformadores con sus primarios conectados en paralelo y sus secundarios conectados en serie, sus características son las siguientes:

Transformadores reductores 230/50 VCA.

$f = 60\text{ Hz}$ .

Polaridad sustractiva.

Ambos tienen la misma relación de transformación.

$$a = \frac{V_p}{V_s} = \frac{230 \text{ v}}{50 \text{ v}} = 4.6$$

Son excitados con una fuente de alimentación de 230 Volts, la cual suministra una corriente de 10 Amp. Por lo tanto esta corriente se divide en ambos primarios.

$$I_{p1} = I_{p2} = 5 \text{ Amp.}$$

Como las bobinas de los secundarios se conectan en serie y se une una terminal de una bobina de polaridad positiva con otra de polaridad negativa, los voltajes en los secundarios se suman.

Por lo tanto:

$$V_3 = V_1 + V_2$$

$$V_3 = 50\text{v} + 50\text{v}$$

$$V_3 = 100\text{v}$$

Si se conectan al revés, las tensiones inducidas se oponen entre sí y se anularían.

La corriente  $I_s$  que circula por el secundario de ambos transformadores, se calcula de la siguiente manera:

$$a = \frac{I_s}{I_p}$$

$$I_s = a (I_p)$$

$$I_s = 4.6 (5)$$

$$I_s = 23 \text{ Amp.}$$

En el caso de aumentarle al circuito un transformador más (con las mismas características de los anteriores) como se muestra en la figura 4.4b tendrán cambios en el voltaje y corriente de salida.

En el primario la corriente de entrada de 10 Amp. se divide en 3.

$$I_{p1} = I_{p2} = I_{p3} = 3.333 \text{ Amp.}$$

Por lo tanto la corriente que circula en el secundario es:

$$a = \frac{I_s}{I_p}$$

$$I_s = a (I_p)$$

$$I_s = 4.6 (3.333)$$

$$I_s = 15.333 \text{ Amp.}$$

Los voltajes de los secundarios se suman.

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V_4 = 50\text{v} + 50\text{v} + 50\text{v.}$$

$$V_4 = 150\text{v}$$

Con estos ejemplos podemos concluir que en conexión serie el voltaje aumenta y la corriente disminuye.

#### b) Conexión en paralelo.

En este tipo de conexión se unen tanto los primarios como los secundarios (de 2 o más transformadores) en paralelo, como se ilustra en la figura 3.32.

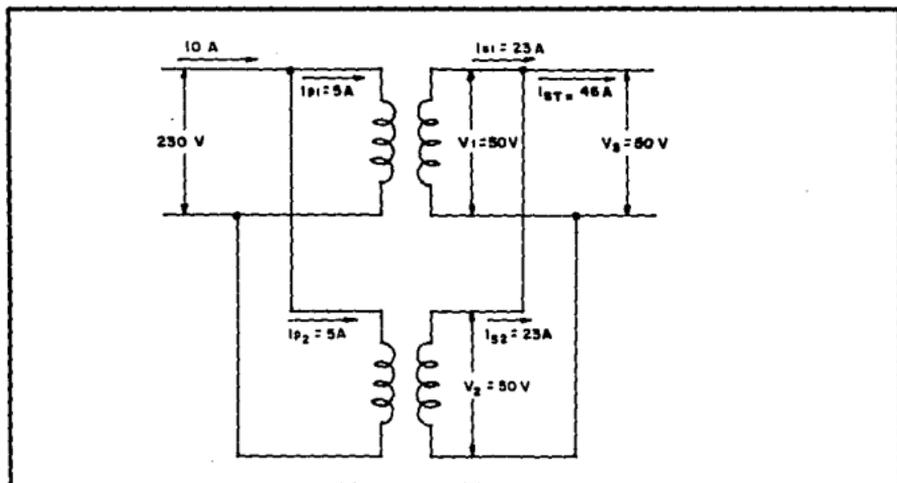


Figura 3.32. 4.5. Transformadores emparejados.

Los transformadores de la figura 3.32 tienen las mismas características que los transformadores de la figura 3.31, esto quiere decir que tienen los siguientes datos:

Transformadores reductores 230/50VCA.

$f = 60 \text{ Hz.}$

Polaridad sustractiva.

$$I_{p1} = 5A$$

$$I_{p2} = 5A$$

$$a = 4.6$$

Tienen una alimentación de 230v y 5A.

La corriente que circula en cada uno de los secundarios es:

$$I_{s1} = aI_p$$

$$I_{s1} = (4.6) (5) = 23 \text{ Amp.}$$

$$I_{s1} = I_{s2} = 23 \text{ Amp.}$$

Aplicando la ley de corrientes.

$$- I_{s1} - I_{s2} + I_{sT} = 0$$

$$I_{sT} = I_{s1} + I_{s2}$$

$$I_{sT} = 23 + 23$$

$$I_{sT} = 46 \text{ Amp.}$$

Como los transformadores están conectados en paralelo los voltajes en sus secundarios son:

$$V_{s1} = V_{s2} = V_{s3} = 50v.$$

Con estos resultados nos damos cuenta que en una conexión en paralelo el voltaje permanece constante y la corriente aumenta.

El emparalelamiento (también llamado en paralelamiento) es la conexión utilizada debido a que en los problemas prácticos siempre se requiere de un voltaje de cierto valor (127, 220, 440 etc.) constante y lo que se necesita es aumentar la corriente en el caso de incrementar carga al sistema eléctrico que supere la corriente nominal del transformador.

Para poder efectuar el emparalelamiento de transformadores trifásicos es necesario que éstos cumplan con las siguientes condiciones:

- 1.- Que sus voltajes, tanto primario como secundario, sean iguales, aceptándose una variación de 0.5%.
- 2.- Que sus impedancias a plena carga sean las mismas aceptándose un 7.5% de diferencia.
- 3.- Que los transformadores tengan la misma capacidad en amperes.
- 4.- Que tengan idéntica polaridad.

- 5.- Que tengan la misma frecuencia.
- 6.- Que tengan el mismo desplazamiento angular.
- 7.- Que estén conectados a las mismas tomas de derivación o taps.

# CAPITULO IV

## TRANSFORMADORES DE MEDICION

### 4.1. INTRODUCCION.

Los transformadores de medición transforman el valor de la magnitud que se va a medir. Se utilizan para separar circuitos de medición de alta tensión.

Con sus primarios conectados en alta o baja tensión, según corresponda, transforman las magnitudes que se desea medir, en corrientes y tensiones moderadas en el secundario (que por motivos de seguridad puede conectarse a tierra) en un valor utilizable (por ejemplo 5 Amp o 110 V).

Los objetivos principales de los transformadores de medida son:

1.- Aislar o separar los circuitos y aparatos de medida, protección, etc., de la alta tensión.

2.- Evitar perturbaciones electromagnéticas de las corrientes fuertes, y reducir corrientes de cortocircuito a valores admisibles en aparatos de medida.

3.- Obtener intensidades de corrientes, o tensiones proporcionales a las que se desea medir o vigilar, y transmitir las a los aparatos apropiados.

Los transformadores de corriente y tensión se subdividen en clases, según su precisión de medición.

Clase	0.2	Para mediciones precisas.
Clase	0.5	Para mediciones precisas.
Clase	1.0	Para mediciones de funcionamiento.
Clase	3.0	Para relevadores de tensión o sobrecarga.

#### 4.1.1. El transformador de corriente

En este tipo de transformadores el campo eléctrico generalmente se encuentra repartido entre dos electrodos perfectamente bien definidos.

En los transformadores de corriente herméticos los embobinados secundarios están alojados dentro de una coquilla de aluminio la cual está conectada interiormente a la base del aparato. El aislamiento formado por papel impregnado

en aceite se encuentra localizado entre la coquilla y una pantalla equipotencial que está conectada a un extremo del embobinado primario. Fig. 4.1a.

Las conexiones primarias de los transformadores de corriente se determinan con K y L. Las secundarias con k y l. Por ende, los transformadores de corriente se deben colocar en las líneas, de tal forma que la dirección de transmisión de energía se dé en el orden alfabético de los bornes.

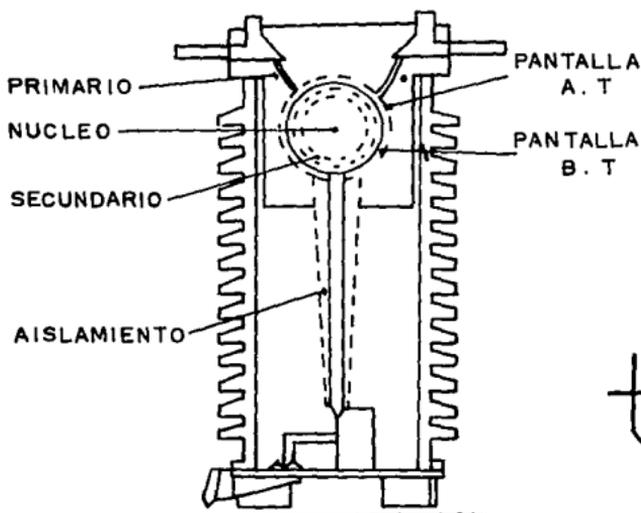


Figura 4.1a.  
Transformador de corriente hermético



Figura 4.1b.  
Representación del T.C.

#### 4.1.2. El transformador de potencial

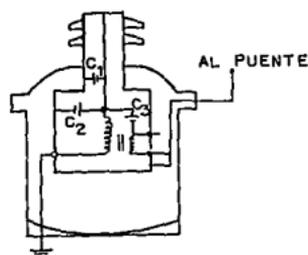
A partir de 34.5 KV la gran mayoría de los transformadores de potencial son de aislamiento reducido. Una terminal del devanado primario debe conectarse directamente a tierra y por lo tanto, el aislamiento de alta tensión está constituido en su mayor parte por el aislamiento entre capas de la bobina primaria.

Por otro lado, el primario entre la bobina primaria y la bobina secundaria no está sometido en servicio a alta tensión.

Desde el punto de vista de su construcción, los transformadores de potencial pueden clasificarse en dos tipos.

El primer tipo se refiere a los transformadores en los cuales la parte activa está alojada en una cuba metálica con el acceso a la bobina a través de una boquilla según la figura 4.2. En estos aparatos el campo eléctrico está limitado al interior de la cuba.

El segundo tipo se refiere a los transformadores tipo cascada como es el caso de los transformadores herméticos. En este tipo de transformadores el núcleo se encuentra a una fracción del potencial aplicado y la bobina primaria está dividida en dos o más partes (Fig. 4.3), la bobina secundaria y la terciaria se encuentran montadas encima de la bobina primaria inferior. El campo eléctrico no está limitado al interior del aislador, ya que gran parte de las líneas de fuerza atravie-



Figuras 4.2. Transformador de potencial. Parte activa en cuba metálica. hermético.

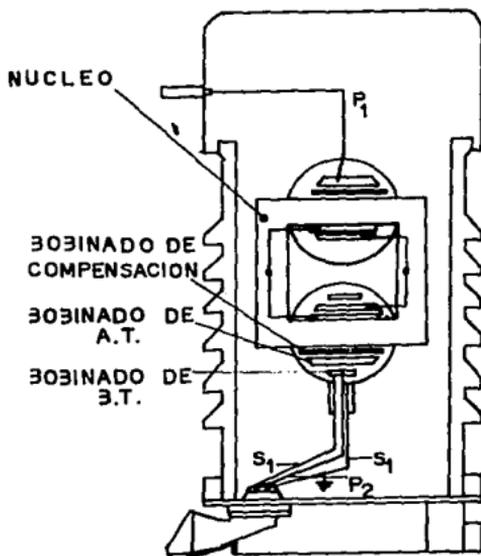


Figura 4.3. Transformador de potencial

san la porcelana y el factor de disipación medido dependerá de las pérdidas del aislador y sobre todo de su estado superficial.

Los bornes primarios y secundarios de los transformadores de tensión reciben la misma nomenclatura que los transformadores monofásicos. Fig. 4.4.

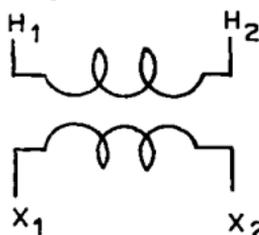


Figura 4.4. Representación del T.P.

## 4.2. CLASIFICACION DE PRUEBAS

Antes de salir de fábrica, todos los transformadores de medición se someten a una serie de pruebas destinadas a verificar si garantizan una seguridad de funcionamiento suficiente para resistir las diversas exigencias eléctricas, mecánicas o térmicas que pueden ocurrir normalmente en su lugar de utilización.

Otras pruebas se enfocan especialmente a verificar la aptitud para cumplir su función, o sea, proporcionar en el secundario una imagen fiel de la tensión o de la corriente primaria.

En la siguiente tabla, se da un resumen de las diferentes pruebas. Entre estas pruebas algunas son de Rutina, que se efectúan sistemáticamente en cada transformador, otros son de Prototipo, que se efectúan en aparatos modelo, y finalmente algunas son Especiales por no estar incluida en alguna norma, o bien simplemente para verificar alguna característica particular.

	Tensión aplicada entre los devanados de A.T. y B.T. a tierra <b>R</b>
	Tensión aplicada entre devanado de B.T. y tierra <b>R</b> .
	Tensión aplicada entre devanados de B.T. <b>R</b> .
	Tensión inducida <b>R</b>
	Prueba de impulso <b>P</b>
	Descargas parciales <b>E</b>
	Factor de disipación ( $\delta$ ) <b>E</b>
	Verificación de la corriente térmica <b>P</b>
	Verificación de la corriente dinámica <b>P</b>
Pruebas de cortocircuito	·C.C. En las terminales secundarios de los transformadores de potencial <b>P</b>
Pruebas dieléctricas para verificar la calidad del aislamiento	

Prueba de circuito abierto	En los T.C. <b>P</b>
Prueba de calentamiento	Elevación de la temperatura con carga real o simulada <b>P</b>
Pruebas de precisión	En condiciones normales (verificación del error de relación y de fase) <b>R</b>
	Para los T.C. para protección en condiciones anormales <b>R</b>
	Polaridad <b>E P</b>
Complementarias	Resistencia <b>E P</b>
	Corriente de excitación <b>E P</b>
	Pérdidas en vacío y en C.C. <b>E P</b>
	Impedancia en cortocircuito <b>E P</b>

#### 4.2.1 Pruebas de precisión

##### **Verificación de la precisión de los transformadores para medición.**

Estas pruebas están destinadas a verificar si el transformador está dentro de alguna clase de precisión con una determinada carga.

Estas pruebas están basadas en las normas ANSI, que son adoptadas en la mayor parte de las normas mexicanas.

##### **Transformadores de corriente**

La norma ANSI define a las clases de precisión mediante paralelogramos colocados en un sistema de ejes cartesianos donde la ordenada está en términos del factor de corrección de la relación (FCR) y la abscisa en función del ángulo de fase 0.3, 0.6 y 1.2 (Figuras 4.5 y 4.6).

El factor de correlación de relación se define como:

$$FCR = \frac{K_r}{K_n}$$

en que  $K_r$  es la relación real del transformador y  $K_n$  es la relación nominal.

El FCR está relacionado con el error de relación como sigue:

$\epsilon = FCR - 1$  y por lo tanto es positivo, si la corriente secundaria real es menor a la nominal.

Para mediciones de potencia o de energía en las que intervienen al mismo tiempo los vectores de corriente y tensión el error (E) que el transformador de corriente introduce está dado por

$$E = 100 (1 - FCR) + 0.29 \beta \operatorname{tg} \phi$$



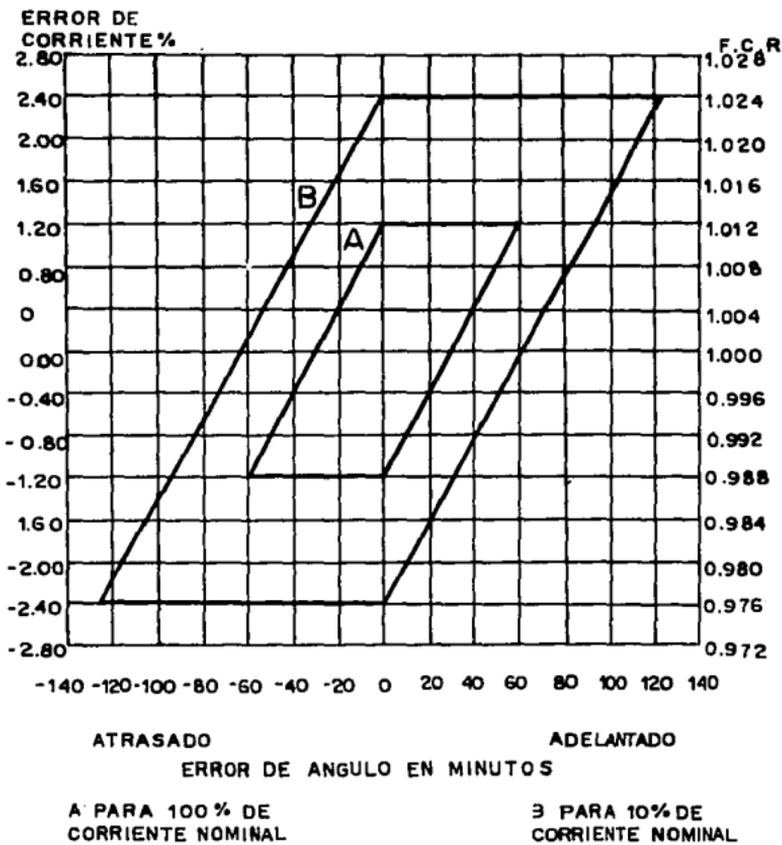


Figura 4.6. Clases normales de precisión 1.2 para transformadores de corriente utilizados en medición.

Para cada clase de precisión existen dos paralelogramos: uno interior que da los límites para la corriente nominal y otro exterior que señala los límites cuando se opera el transformador a un 10% de su corriente nominal. Las cargas se designan con una B seguida del valor de su impedancia; su equivalencia en VA y su f.p. se dan en la tabla 4.4.

#### Designación ANSI

p/medición	p/protección	VA	f.p.
BO.1	C o T-10	2.5	0.9
BO.2	C o T-20	5	0.9
BO.5	C o T-50	12.5	0.9
B1	C o T-100	25	0.5
B2	C o T-200	50	0.5
B4	C o T-400	100	0.5
B8	C o T-800	200	0.5

Tabla . 4.1. Cargas nominales para T.C.

#### Transformadores de potencial

En forma análoga al caso de los transformadores de corriente, la norma ANSI designa a la clase de precisión por el máximo error admisible, en %, que el transformador de potencial pueda introducir en la medición de potencia. Existen también tres clases de precisión: 0.3, 0.6, 1.2.

Se puede demostrar que el error (E) que el transformador de potencial introduce en la medición de potencia está dado por

$$E = 100(1 - FCR) - 0.029\beta \operatorname{tg} \phi$$

El paralelogramo correspondiente del transformador de potencial está dado por la figura 4.7 su equivalencia en Va y su factor de potencia se dan en la tabla 4.2.

Designación	VA	f.p.
W	12.5	0.1
X	25.0	0.7
Y	75.0	0.85
Z	200.0	0.85
ZZ	400.0	0.85

Tabla 4.2. Cargas nominales para T.P.

Existen varios métodos y aparatos para determinar el factor de corrección de relación (o el error de relación) y el error de fase.

Se distinguen básicamente dos tipos de medición.

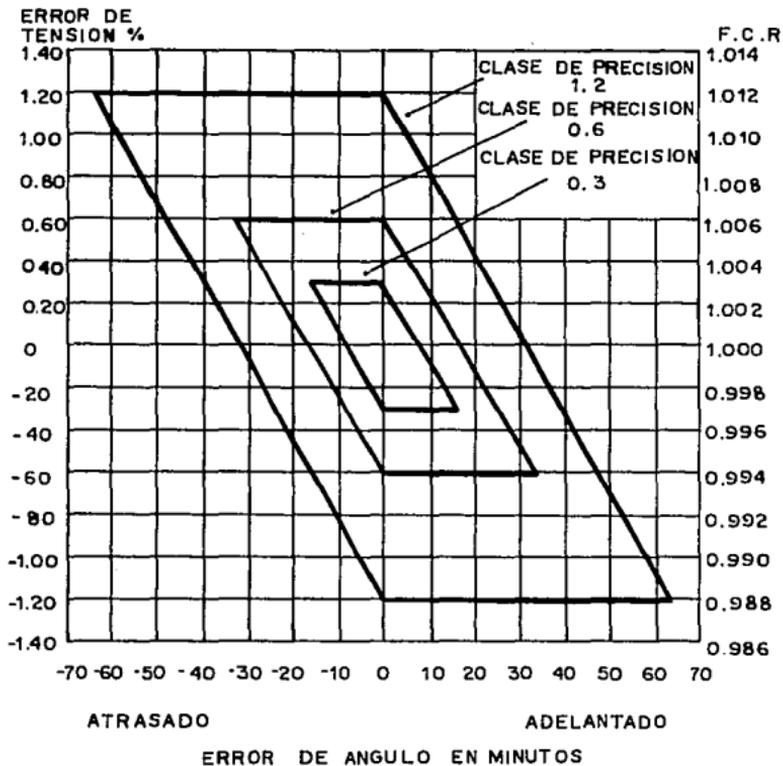


Figura 4.7. Clases de precisión normales para transformadores de potencial utilizados en medición.

-Medición absoluta en las que se parte de magnitudes eléctricas simples, medidas directamente para determinar los errores por cálculo.

-Contraste relativo en el que se hace intervenir en la determinación una comparación entre el aparato a probar y otro similar llamado patrón.

Para aprovechar la alta sensibilidad de los aparatos indicadores de cero, generalmente se efectúa esta comparación por el método cero, que consiste en poner en oposición en un puente de calibración la señal secundaria del transformador a probar con la señal secundaria del transformador patrón Fig. 4.8.

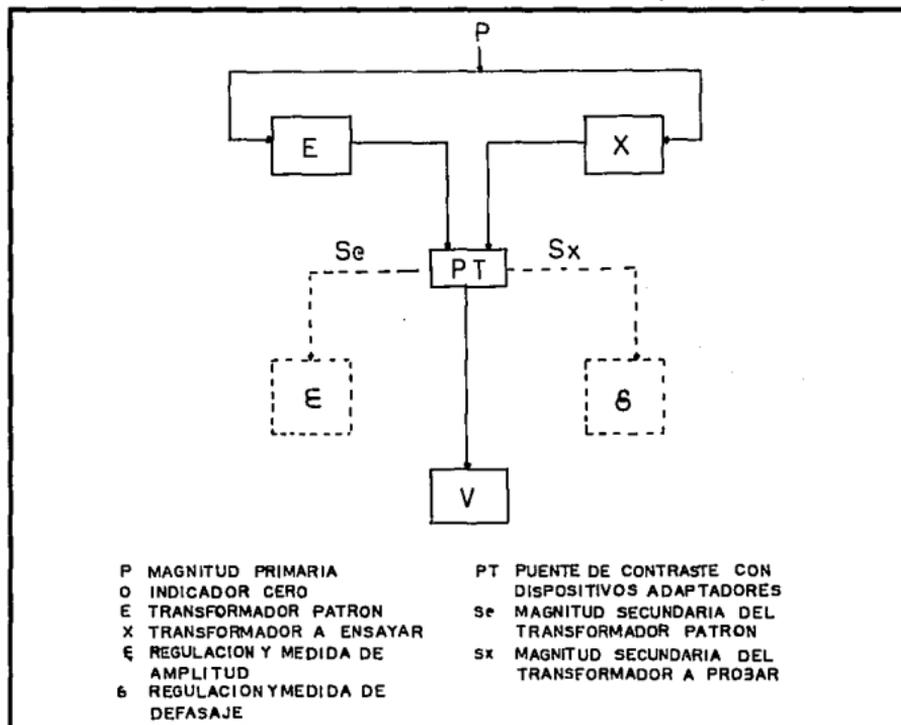


Figura 4.8. Esquema de principio de un puente de calibración.

Dentro de los puentes de calibración que utilizan el método cero, se pueden distinguir dos tipos:

1.- Método diferencial, en el cual la relación teórica del transformador a probar debe de ser igual a la del transformador patrón.

2.- Método por comparación, que permite una gama mayor de transformadores a probar un patrón de relación gracias a un dispositivo adaptador.

Debe hacerse una distinción entre:

**Precisión de lectura** (o sea la mínima división de las perillas del puente) que necesariamente debe ser igual o menor  $\pm 0.01\%$  y  $\pm 1$  min.

**Precisión de la medición**, que toma en cuenta la precisión de los elementos del puente de calibración, del indicador cero de las cargas, del transformador patrón, de la temperatura, y debe ser igual o menor  $\pm 0.1\%$  y  $\pm 3$  min.

**Las cargas nominales de precisión** deben permanecer lineales para la frecuencia y tensiones de prueba. La variación en los valores de resistencia y reactancia debe de ser menor a 3%.

#### 4.2.2. Descripción de los puentes de calibración.

##### Transformador de corriente

El transformador a probar X y el transformador patrón P son alimentados en serie con una corriente adecuada. Las corrientes secundarias  $I_x$ ,  $I_p$ , atraviesan los primarios de dos inductancias mutuas, sin núcleo, idénticas y teniendo cada una de ellas un devanado secundario de 1,000 espiras; el secundario correspondiente al transformador a probar está fraccionado en centenas, decenas, unidades y décimas.

Estos dos secundarios son puestos en oposición sobre un galvanómetro G, cerrándose por medio de una resistencia variable R atravesada por la corriente secundaria del patrón. Figura 4.14.

Las corrientes  $I_x$  e  $I_p$  inducen en los secundarios de las inductancias mutuas fuerzas electromotrices  $E_1$  y  $E_2$  en cuadratura con las corrientes que les dieron origen.

$$E_1 = 2\pi f M_1 I_p$$
$$E_2 = 2\pi f M_2 I_x$$

Si, por el momento, se desprecia el defasamiento entre las dos corrientes, el equilibrio del puente se obtiene ajustando  $M_2$  gracias a las tomas del secundario.

$$\frac{I_p}{I_x} = \frac{2\pi f M_2}{2\pi f M_1} = \frac{\text{No. de espiras de } M_2}{1000}$$

Para obtener el equilibrio completo, será necesario además, compensar la ligera diferencia vectorial entre las tensiones  $E_1$  y  $E_2$ , debida al defasamiento. Esto se obtiene ajustando la resistencia variable R en cuyas terminales aparece una tensión  $E_3$  en fase con  $I_p$  y que tiene por valor:  $E_3 = RI_p$ .

Se tiene entonces que:

$$\tan \delta = \frac{E_3}{E_1} = \frac{R I_p}{2\pi f M_1 I_p} = \frac{R}{2\pi f M_1} = \text{cte} \cdot R$$

La resistencia puede graduarse directamente en minutos para una frecuencia dada.

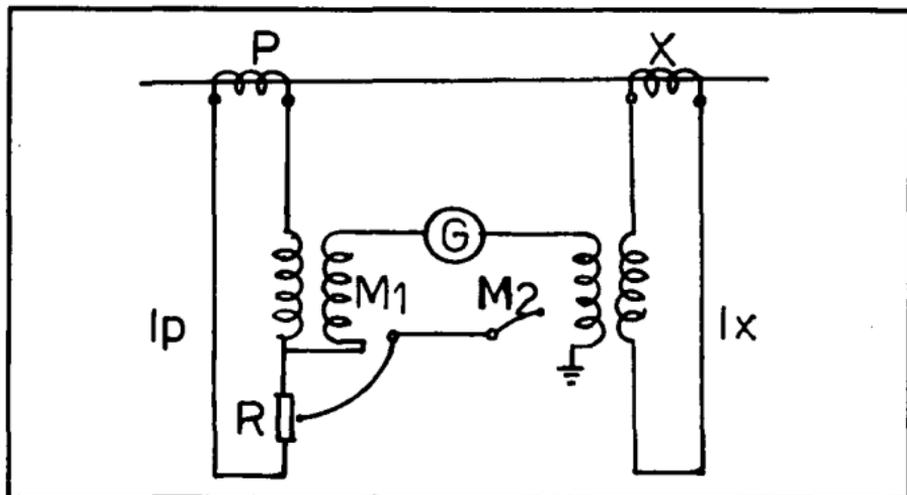


Figura 4.9. Diagrama de principio. Puente de calibración para transformadores de corriente. Método de oposición.

### Transformadores de potencial:

El primario del transformador P y del transformador X se alimentan en paralelo. Las tres resistencias R son idénticas y valen cada una 10,000Ω. La resistencia r es una resistencia de década de 11,100Ω ajustable a 1. Fig. 4.15

El puente está en equilibrio cuando las tensiones  $v_1$  y  $v_2$  son iguales, pero estas tensiones están ligadas a  $V_P$  y  $V_X$  por las relaciones en equilibrio.

$$v_1 = V_P \frac{R}{R+r} \quad v_2 = \frac{V_X}{2}$$

En el equilibrio

$$v_1 = v_2; \quad \frac{V_P}{V_{X_X}} = \frac{R+r}{2R}$$

Hasta aquí, se ha supuesto, implícitamente, que  $V_X$  y  $V_P$ , estaban en fase. Generalmente existe un defasamiento con un ángulo  $\delta$  entre  $V_X$  y  $V_P$ .

La capacitancia variable permite el equilibrio completo del puente. Como para los valores de la magnitud usual de  $\delta$  se tiene que:

$$\delta = 1/2 \tan 2\delta = \frac{2\pi fRC}{2}$$

La capacitancia puede entonces graduarse directamente en minutos, para una frecuencia dada.

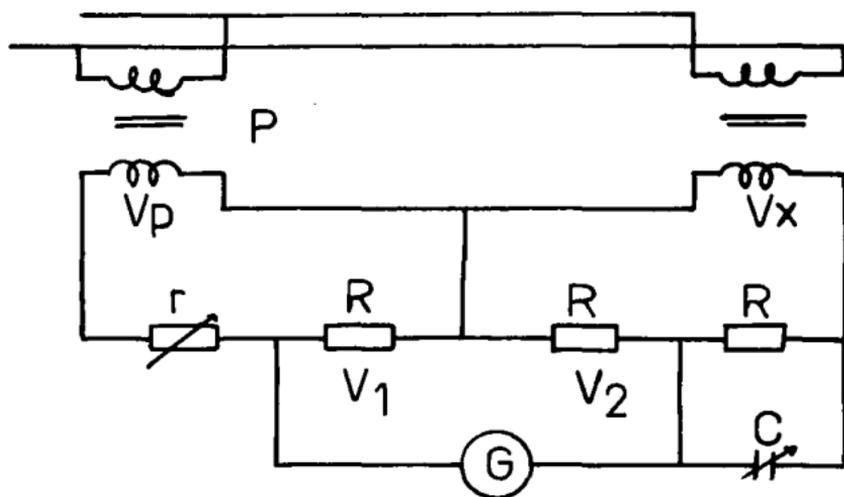


Figura 4.10. Diagrama de principio. Puente de calibración para transformadores de potencial. Método de oposición.

# APENDICE

## Equipo y material con que se elaboraron las pruebas

UNIDAD	CONCEPTO	DESCRIPCION
3	TRANSFORMADORES MONOFASICOS	MANUFACTURERA FAIRBANKS MORSE, S.A. 5KVA. SERIE X 2Ñ-2996 440/127 VOLTS. 60HZ, IMP 2.4 - AT. 20°C. CLASE AA, NBI 10KV. AT-10KV BT. DERIVACIONES POSICION <span style="float: right;">VOLTS.</span> 1 <span style="float: right;">462</span> 2 <span style="float: right;">451</span> 3 <span style="float: right;">440</span> 4 <span style="float: right;">429</span> 5 <span style="float: right;">418</span>
1	TRANSFORMADOR DE CORRIENTE	CURRENT TRANSFORMER TIPO 2255 CLASE 1.0 3/5 A, 15VA, 50.60 HZ. LINEA MAXIMA 3.45 KV.
2	MULTIMETROS	TRIPLETT MODELO 630-PLK TIPO 7 RESISTENCIA 0-1000, 10,000. 0-1MΩ-100MΩ VOLTAJE CD-CA 0-3, 10, 50, 250, 1000 AMPERES 0-100 A 250 mV. 0-10, 100, 1000 mA. a 250 mV. 0-10A
1	PUNTE DE WHEATSTONE	YEW, TIPO 2755.
1	AMPERIMETRO DE GANCHO	YOKOGAWA 0-15, 30, 75, 150, 300 AMP.
1	SECUENCIMETRO	NORMA 100.. 400.. 500V 16.. 65.. 400 Hz
1	MEGGER	YOKOGAWA, TIPO 3207, 0-∞M 0-15, 30, 75A
1	MOTOR DE INDUCCION JAULA DE ARDILLA	LAB-VOLT, 1/4 HP, 1760 RPM 208 V, 1.2A, 60Hz, 3 FASES.
1	FUENTE DE PODER MONOFASICA	FEEDBACK, 0-125V, 5AMP CA. 0-120V, 5AMP. CD. MACHINE CONTROL PANEL MCP 182
1	FUENTE DE PODER TRIFASICA	DIDACTA ITALIA, AC. P-4 KVA. COD. 900110, 220 V TRIFASICO. DO 1234, 0-450V TRIFASICO.
	WATORIMETRO MONOFASICO	YOKOGAWA 0-150 WATTS
	CABLES DE CONEXION	

## **CONCLUSIONES**

Quando sometemos un transformador a las diversas pruebas de laboratorio podemos conocer con certeza su estado físico general y prevenir los posibles daños que puede tener y si son factibles de reparación y con qué grado de confiabilidad podrá seguir operando. Para realizarlas nos debemos basar en las normas, ya sea de SECOFI, CONNIE o los manuales aprobados por el proveedor, así como en las experiencias adquiridas por el ingeniero a través de las pruebas realizadas a otros transformadores.

Es fundamental en la realización de estas pruebas que el ingeniero o técnico tenga el conocimiento teórico y práctico de los equipos y aparatos a utilizar, así como el máximo cuidado para obtener los resultados correctos.

Cabe mencionar que se debe contar con el historial de pruebas realizadas en fábrica por el proveedor, para poder comparar esos resultados con los de las pruebas posteriores que se realicen al transformador para así poder determinar el grado de deterioro que pueda registrar.

Las pruebas estudiadas (relación de transformación, polaridad, resistencia de aislamiento, secuencia de fases, etc.) son aplicables a todos los transformadores de potencia, pero normalmente estas pruebas se aplican a transformadores trifásicos ya que éstos generalmente son los que suministran la energía eléctrica. Estas pruebas pueden realizarse tanto a un transformador nuevo como a uno usado que ha sido reparado para su operación.

Por último, una recomendación especial será observar que los accesorios e indicadores del transformador se encuentren en buen estado.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Enríquez Harper, Gilberto. *Curso de transformadores y motores trifásicos de inducción*. Tercera edición. Editorial Limusa.
- Enríquez Harper, Gilberto. *El ABC de las máquinas eléctricas*. 1. Transformadores. Editorial Limusa.
- Etuff, E.E. *Circuitos Magnéticos y Transformadores*. - M.I.T. Editorial Reverté.
- Gourishankar, Verbu. *Conversión de energía electromecánica*. Representaciones y servicios de Ingeniería, S.A.
- H. Kuhlmann, John. *Diseño de aparatos eléctricos*. Octava Impresión. Cía. Editorial Continental, S.A. de C.V., México.
- J. Chapman, Stephen. *Máquinas Eléctricas*. Primera edición. Mc. Graw - Hill.
- J. Thaler, George y Milton L. Wilcox. *Máquinas eléctricas*. Tercera reimpresión - primera edición. Editorial Limusa.
- Kosow L., Irving. *Máquinas eléctricas y transformadores*. PH. D. Editorial Reverté S.A., 1980.
- Liwschitz Michael, Garik. Clyde C. Whipple, E. E. *Máquinas de corriente alterna*. Decimotercera impresión. Marzo de 1987. Cía. Editorial Continental, S.A. de C.V.
- Manual de transformadores Deemsa*. Empresa: Diseño y Equipos Eléctricos de México, S.A. de C.V.
- Méndez Albores, Raúl. *Aceites aislantes para transformadores e interruptores*.
- Normas de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI) Año 1987.
- Norma para transformadores de distribución. Comité Consultivo Nacional de Normalización de la Industria Eléctrica (CCONNIE).
- Pérez Amador, Víctor. *Pruebas de equipo eléctrico*. Transformadores de distribución y potencia. Editorial Limusa.
- Ras Oliva, Enrique. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. 6a. Edición. Marcombo Boixareu Editores.