

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO DE LA FABRICACION, MONTAJE, PRUEBAS Y
CONTROLES DE TRANSFORMADORES DE 400/230 KV.

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

presentan:

LUIS RENE AYALA LAGARDA
ARTURO MANUEL MIRAMONTES MARTINEZ
LUIS PEREZ GARCIA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

CAPITULO I

Página

·FUNCIONAMIENTO, ANALISIS Y CLASIFICACION DE TRANSFORMADORES.

I.1	.- Definición de transformador	1
I.2	.- Principio de operación del transformador	1
I.2.1	.- Transformador ideal	3
I.3	.- Transformador real	4
I.4	.- Ecuaciones de voltaje de un transformador real	10
I.5	.- Circuito equivalente exacto de un transformador real	15
I.5.1	.- Inductancia de magnetización	15
I.5.2	.- Transformador con núcleo ferromagnético	15
I.5.3	.- Circuito aproximado equivalente	18
I.6	.- Diagrama vectorial	19
I.7	.- Clasificación de los transformadores	20
I.8	.- Componentes de un transformador	22
I.9	.- Transformador trifásico y banco trifásico	22
I.10	.- Conexiones trifásicas de transformadores	25
I.11	.- Autotransformador	29

CAPITULO II

CONSTRUCCION Y PRUEBAS EN FABRICA

2.1	.- Núcleo	32
2.2	.- Devanados	37
2.3	.- Aislamiento	40
2.3.1	.- Aislamiento para el núcleo	40
2.4	.- Temperatura de operación de los transformadores	41
2.5	.- Boquillas terminales	42
2.6	.- Tanque	45
2.7	.- Cambiador de derivaciones	45
2.8	.- Medio refrigerante	45
2.9	.- Sistemas de disipación de calor desprendido por el núcleo y devanados	50
2.10	.- Preparación de los aparatos para las pruebas	54
2.11	.- Prueba de resistencia de aislamiento	55
2.12	.- Prueba de factor de potencia al aislamiento	57
2.13	.- Medición de la resistencia óhmica de los devanados	62
2.14	.- Prueba de temperatura	65

	Página
2.I5	68
2.I6	72
2.I7	76
2.I8	77
2.I9	78
2.20	83
2.2I	87
2.22	I00
2.23	I02

CAPITULO III

TRANSPORTE, EMBARQUE Y DESEMBARQUE DE TRANSFORMADO- RES DE POTENCIA.

3.I	II2
3.2	II7
3.3	II7
3.4	II9
3.5	I20
3.6	I2I
3.7	I2I
3.8	I24
3.9	I26
3.I0	I27
3.II	I28

CAPITULO IV

INSTALACION, PUESTA EN SERVICIO Y MANTENIMIENTO

4.I	I34
4.2	I35
4.3	I35
4.4	I36
4.5	I39

	Página	
4.6	.- Tiempo de exposición de los devanados al ambiente sin llegar a ser crítico	140
4.7	.- Montaje de accesorios	142
4.8	.- Secado del transformador después de la revisión interna	144
4.9	.- Eliminación de las burbujas que permanecen en el aceite	146
4.10	.- Pruebas	147
4.11	.- Puesta en servicio	154
4.12	.- Pruebas finales	156
4.13	.- Mantenimiento general del transformador	157

CAPITULO V

DISPOSITIVOS DE PROTECCION Y CONTROL PARA TRANSFORMADORES.

5.1	.- Termómetro para aceite	162
5.2	.- Termómetro de devanados	163
5.3	.- Termostato	163
5.4	.- Relevador buchholz	164
5.5	.- Indicador magnético de nivel	165
5.6	.- Indicador de flujo de aceite	166
5.7	.- Deshumidificador	166

INTRODUCCION

En los sistemas eléctricos de potencia la energía eléctrica es indispensable en todo momento, ya que una interrupción en su suministro es el problema más crítico para la empresa que la proporciona ya que afecta directamente a la industria y a todos los servicios que dependen de ésta. Para que exista continuidad en el servicio un aspecto importante involucrado es la función de transformación mediante la cual se hace una buena transmisión y distribución de la electricidad. Ahora bien, cuando se comenzó a utilizar ésta, las tensiones y capacidades eran bajas en parte debido a una industria incipiente y a limitaciones técnicas, sin embargo hemos visto a medida que pasa el tiempo, que los sistemas eléctricos de potencia se han favorecido con los nuevos adelantos tecnológicos. Dichos adelantos han sido en gran medida originados entre otras causas por el crecimiento de las ciudades y por tanto de las industrias.

Por lo anteriormente descrito se desprende que posteriormente las capacidades y tensiones fueron aumentando paulatinamente para satisfacer las necesidades requeridas. Además se ha demostrado que el factor económico se ve favorecido al generar potencia, transformarla y transmitirla a una tensión muy elevada, obteniéndose una mejor eficiencia en el sistema.

Como es ya conocido posteriormente la tensión se tiene que -- transformar a un voltaje más bajo para alimentar a los diversos centros de consumo como son: Industria, transporte, doméstico etc. Para efectuar dicho cambio de tensión de un valor - alto a uno bajo o viceversa se emplean transformadores de potencia de muy alta tensión. Dichos aparatos o máquinas son los principales elementos de una subestación y también los más costosos, representando una inversión considerable, por lo que - una falla prematura en estos causará fuertes pérdidas a la empresa generadora.

Lo antes mencionado es una razón muy poderosa por - lo que dichos aparatos deben estar en condiciones óptimas de operación, esto se respalda con los siguientes puntos: una -- buena selección, conocimiento de su construcción, funcionamiento, además del cumplimiento y control del programa de transporte, instalación y puesta en servicio del transformador.

El presente trabajo tiene como objetivo presentar - las técnicas de transporte, pruebas, instalación y puesta en servicio de transformadores de extra altos voltajes. Cabe -- aclarar que la pretensión de éste trabajo no es la de normalización de las técnicas, ya que existe una gran variedad de fabricantes e instituciones con diferentes criterios, sin embargo lo aquí expuesto es usado y se fundamenta en la experiencia de las personas que se dedican a esto. Habiendo aclarado-

lo anteriormente descrito pasaremos a desarrollar el trabajo, el cuál se ha dividido en cinco capítulos, en los cuáles su contenido es el siguientes:

En el primer capítulo se hace una descripción de un transformador y sus componentes, funcionamiento, principio de operación, circuitos equivalentes, ecuaciones de voltaje, diagrama vectorial y principales conexiones.

Las pruebas en fábrica principales que se deben realizar al transformador para garantizar al usuario que está haciendo una buena inversión se presentan en el capítulo segundo, ya que de un buen resultado de dichas pruebas se deriva la aceptación o rechazo del transformador.

En el tercer capítulo se describen los cuidados que se deben tener en el transporte del transformador, que en la mayoría de los casos es mixto, o sea marítimo y terrestre -- por ferrocarril o por carretera, ya que el 80% de los transformadores de potencia que se han comprado en la última década se obtuvieron de diferentes países, teniendo como resultado que el 60% de dichos equipos sufrió daños internos originados por el trato rudo durante el transporte y como consecuencia no fué posible instalarlo de inmediato en los lugares -- asignados, si no que fué necesario repararlos para después -- instalarlos en forma definitiva, éste problema persiste y con secuentemente causa retrasos en la puesta en servicio de su--

bestaciones y por tanto grandes pérdida económica.

En el capítulo cuarto se describen las indicaciones para la instalación y puesta en servicio de los transformadores, ya que no obstante el fabricante siempre suministra las instrucciones, y en general no responden todas las interrogantes que se le presentan al montador durante el proceso de instalación; con respecto a lo anterior cabe hacer notar que algunos fabricantes mañosamente no envían información completa y algunas veces ésta es confusa, con lo cuál, pretenden que el usuario acepte asesoría de un montador que devenga honorarios excesivos y que en la mayoría de las veces es un técnico que no aporta nada nuevo, por eso es importante que cuando se requieran instrucciones especiales para la instalación, el usuario mande personal a la fábrica para recibir las indicaciones respectivas y así evitar la presencia del técnico que en algunas ocasiones desconoce técnicas mejores que ya se emplean en México,

En el capítulo cinco describimos algunos de los dispositivos de protección y control más usuales, los cuales dependen de la capacidad del transformador y de la red a la que está interconectado. El objetivo de estos dispositivos es el de evitar daños en el transformador y en la red, causados por fallas internas y externas en el transformador.

C A P I T U L O I

FUNCIONAMIENTO, ANALISIS Y CLASIFICACION DE TRANSFORMADORES.

I.1 Definición de transformador

Transformador.- Es una máquina eléctrica estática --- empleada para transferir energía eléctrica de un circuito de corriente alterna a otro, sin cambiar de frecuencia. Esta --- transferencia la hace por el principio de inducción electro-- magnética y tiene circuitos aislados entre sí que son eslabonados por un circuito magnético común.

I.2 Principio de operación del transformador

La parte esencial de un transformador, sin duda es el circuito electromagnético, el cual está formado por un núcleo cerrado de láminas de hierro y dos bobinas o grupo de bobinas.

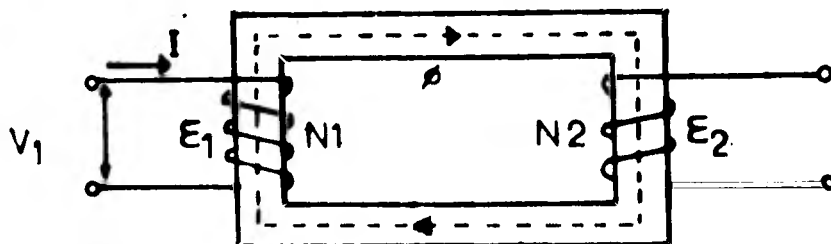


fig. 1.1

Las bobinas o grupo de bobinas se clasifican en dos grupos, que son:

- a) Bobinas del devanado primario
- b) Bobinas del devanado secundario

Las bobinas se muestran en la figura I.1

Se considerará al transformador como un dispositivo ideal, para facilitar la comprensión de su funcionamiento y - para obtener modelos más sencillos, que no obstante, nos conducirán a resultados de satisfactoria aproximación. Este dispositivo quedará constituido por un núcleo ferromagnético de alta permeabilidad y por dos embobinados con una resistencia eléctrica tan pequeña, que motivan una caída de voltaje totalmente despreciable.

Al tener dos embobinados en el dispositivo ideal los identificaremos como: Devanado primario aquel al cuál se le entrega potencia de una fuente externa; el devanado secundario es el que está conectado a la carga; y su funcionamiento es de la siguiente forma:

Al aplicar un voltaje variable con el tiempo al embobinado primario, la corriente I_1 variable con el tiempo generará un campo magnético cuyo flujo también variable circulará por el circuito magnético y al atravesar las N_1 vueltas -- del devanado primario induce un voltaje alterno E_1 por el efecto faraday. De igual manera al cruzar el flujo las N_2 vueltas

del devanado secundario se inducirá un voltaje E_2 .

Entonces en la bobina primaria tenemos:

$$V_1 = -E_1 = -\frac{d\phi}{dt} N_1 \quad (1)$$

En la bobina secundaria tenemos:

$$V_2 = -E_2 = -\frac{d\phi}{dt} N_2 \quad (2)$$

Dividiendo 1 en 2 tenemos:

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

Al cociente $\frac{N_1}{N_2} = a$, lo denominamos relación de transformación. Si V_2 es mayor que V_1 , el transformador se llamará elevador; si V_2 es menor que V_1 el transformador se llamará reductor.

1.2.1. Transformador Ideal.

Consideremos un transformador como el de la figura 1.2, un transformador de éste tipo posee un flujo mutuo común a las bobinas primaria y secundaria.

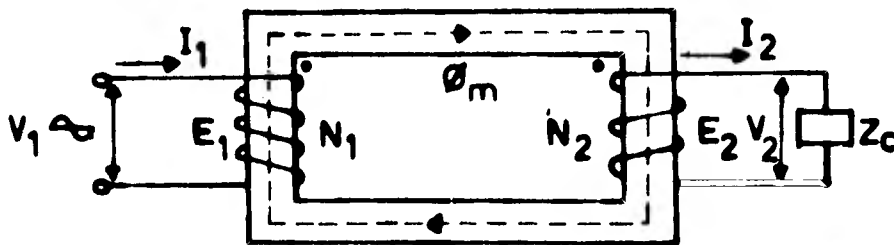


fig12

Cuando V_1 es positiva en un instante dado, como se muestra en figura 1.2, la corriente primaria I_1 da lugar a -- un flujo mutuo con el sentido indicado. La tensión primaria-- inducida E_1 de acuerdo a la convención de punto de polaridad-- y la ley de Lenz, da lugar a una polaridad positiva en la parte superior de la bobina primaria que en cada instante se opone a la tensión aplicada V_1 . De manera parecida, en el secundario para el sentido indicado de ϕ_m que se muestra, la polaridad positiva de E_2 debe ser tal que cree un flujo desmagnetizante que se oponga a ϕ_m (Ley de Lenz).

Una carga conectada en los bornes del secundario da lugar a una intensidad secundaria I_2 que circula en respuesta a la polaridad de E_2 y origina un flujo desmagnetizante.

Estamos ahora en condiciones de comprender cualitativamente como un transformador desarrolla potencia en el secundario y transfiere energía del primario al secundario, lo hace de la siguiente forma:

a) Supóngase un circuito abierto ó carga nula en el secundario, por lo tanto $I_2 = 0$.

b) Como resultado del flujo alterno mutuo ϕ_m (creado por la tensión aplicada) se producen E_1 y E_2 que tienen -- polaridad instantánea que se indica respecto a ϕ_m (fig. 1.2).

c) Incluso cuándo el transformador está sin carga, -- debe circular una pequeña corriente por el primario I_m , cono-

cida como corriente de magnetización. La corriente es pequeña por que la tensión inducida en el primario E_1 , se opone a la tensión aplicada V_1 , en cada instante. El valor de I_m es función principalmente de la reluctancia del circuito magnético y del valor máximo de ϕ_m para un número de espiras en el arrollamiento primario.

d) La figura 1.2.a muestra cómo el pequeño valor de I_m se retrasa 90° con respecto a la tensión del primario V_1 y produce ϕ_m .

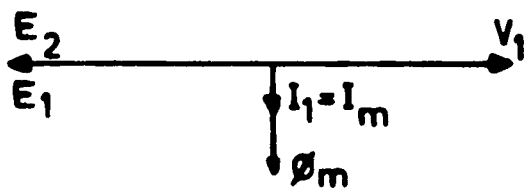


fig 1.2a

El ϕ_m a su vez, induce E_1 y E_2 retrasadas 90° ; éstas fems están en fase debido a que son producidas ambas por ϕ_m . Obsérvese que E_1 se opone a V_1 (ley de Lenz).

e) Supóngase una carga inductiva conectada en los bornes del secundario del transformador ideal, una carga de éste tipo produce una intensidad I_2 que retrasa un ángulo θ_2 respecto a E_2 como se muestra en la figura 1.2.b.

f) Los amper-vueltas secundarias $I_2 N_2$ tienden a producir un flujo desmagnetizante que reduce instantáneamente el flujo mutuo ϕ_m y las fem inducidas E_2 y E_1 . La reducción-

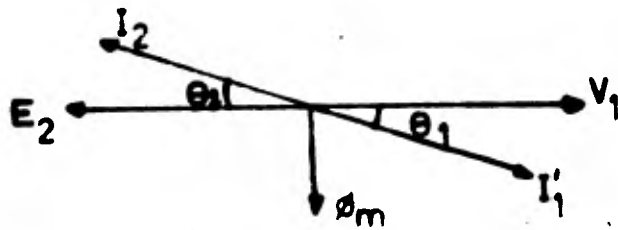


fig. 12b

de E_1 hace que circule una componente primaria de la componente de carga I_1' , por el circuito primario de manera que $I_1'N_1 = I_2N_2$, llevado ϕ_m a su valor original. En la figura 1.2.c se muestra que I_1' retrasa θ_1' respecto a V_1 mientras que I_2 retrasa θ_2 respecto a E_2 de manera que $\theta_1' = \theta_2$. La última igualdad es necesaria para que los amperevueltas magnetizantes del primario $I_1'N_1$ compensen a I_2N_2 amperevueltas desmagnetizantes de la carga.

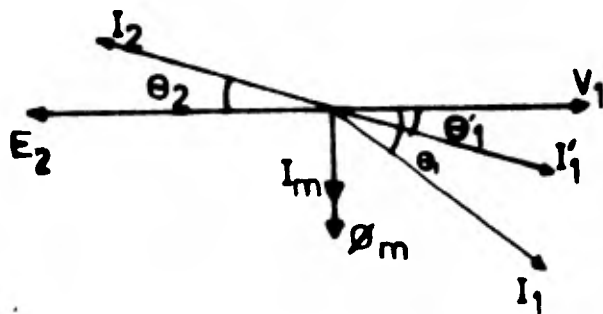


fig. 12c

El efecto de la componente primaria de la corriente de carga I_1' puede verse en la figura anterior en la que la intensidad en el primario I_1 es el vector suma de I_m e I_1' . En relación con el factor de potencia del circuito primario en ésta figura se pueden destacar dos puntos:

1) El ángulo del factor de potencia del primario ha disminuído en relación a su valor original sin carga de 90° a su ángulo con carga θ_1 .

2) El ángulo de fase del circuito primario no es -- exactamente el mismo que el del circuito secundario (para carga inductiva θ_1 es mayor que θ_2).

La igualdad entre la fuerza magnetomotriz de desmagnetización $I_2 N_2$, y la componente de carga de la fuerza magnetomotriz $I_1' N_1$, tal como se ha descrito en el punto anterior puede resumirse y disponerse con sigue.

$$I_1' N_1 = I_2 N_2 \quad (3)$$

$$\text{Donde como ya dijimos } I_1 = I_1' + I_m \quad (4)$$

En nuestras condiciones ideales, la corriente de -- magnetización representa un pequeño valor respecto a la corriente alta adicional motivada por la carga, ya que el núcleo tiene alta permeabilidad que basta con un ínfimo valor de I_m para hacer llegar al secundario el flujo magnético. Podemos -- entonces despreciar a I_m , por lo que $I_1 = I_1'$ llegando a la ecuación $N_1 I_1 = N_2 I_2$ por tanto..

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (5)$$

La impedancia Z_2 del embobinado secundario es muy pequeña comparada con la impedancia de carga Z_C por lo que podemos despreciarla, entonces tenemos:

$$Z_C = \frac{V_2}{I_2} = \frac{V_1/a}{I_1 a} = \frac{V_1}{I_1 a^2} \quad \text{de aquí despejamos } Z_1$$

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = a^2 Z_C \quad \text{o sea } Z_1 = a^2 Z_C \quad (6)$$

La ecuación 6 la interpretamos como la impedancia de carga del secundario referida al primario.

I.3 Transformador real.

Un transformador real contará con las siguientes pérdidas:

- a) Pérdidas de energía por flujos de dispersión.
- b) Pérdidas de energía por corrientes parásitas
- c) Pérdidas de energía por histéresis.
- d) Pérdidas de energía por efecto joule en los devanados.

Flujo de Dispersión.- debido a las reluctancia del material que constituye a los núcleos reales, a la presencia de entrehierros, algunas líneas de flujo generado en el embobinado primario no llegan al secundario.

Este pequeño flujo que no alcanza a enlazar al secundario se denomina flujo de dispersión del primario ϕ_{f_1} .

Al fluír corriente de carga en el secundario, tendrá también un flujo de dispersión secundario ϕ_{f_2} que no cogtará al primario.

La manera de reducir éstos flujos indeseables es -- devanando los embobinados primario y secundario lo más adheridos posibles al núcleo y muy juntos entre sí. Además, -- utilizando material de alta permeabilidad magnética en el núcleo y con amplia sección transversal del mismo.

Corrientes Parásitas.- La sección transversal de un núcleo ferromagnético podemos imaginárnosla como una serie de circuitos de hierro cuadrangulares encerrados uno dentro de otro en forma progresiva; cuando fluye por ellos un flujo magnético variable serán cortados perpendicularmente por líneas de flujo, induciéndose voltajes por efecto faraday e iniciándose la circulación de corrientes por los circuitos supuestos.

Estas corrientes son llamadas de varias formas, siendo las usuales: corrientes circulantes, corrientes de torbellino (eddy), corrientes de Foucault y corrientes parásitas.

Al circular éstas por los circuitos de hierro, tendremos una significativa pérdida de potencia por efecto joule, la cual puede reducirse si disminuimos la magnitud de las co-

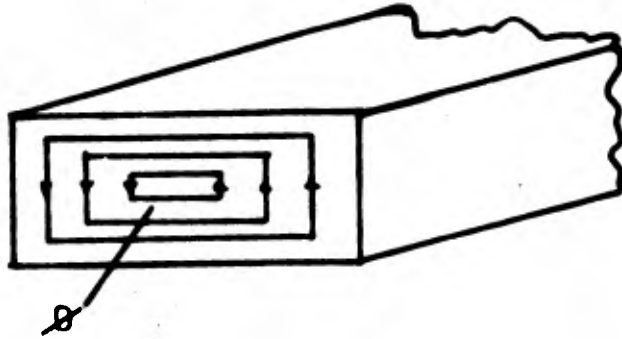
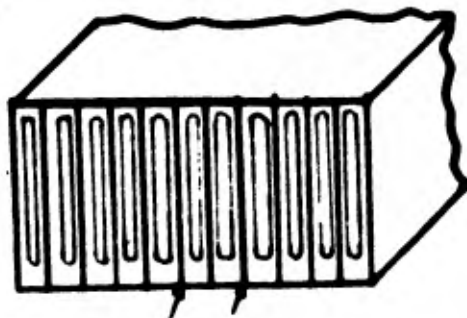


fig. 1.3

corrientes parásitas. Para ello, se incrementa la resistencia del medio físico en donde circulan, laminando el núcleo, y - aislándolo con barniz dieléctrico en sus laminaciones.



CAPAS DE BARNIZ

fig. 1.4

Histéresis.- En la frecuencia eléctrica usual de generación y distribución (60 HZ), el campo magnético sobre el núcleo se invierte 120 veces en un segundo, cambiando los dominios magnéticos con su orientación igual número de veces. Por fricción interna desarrollan entonces cierta cantidad de calor, que representa una pérdida de energía. Además, dependiendo del material usado en la construcción del núcleo, para un ciclo de histéresis particular se requerirá mayor o menor fuerza coercitiva al eliminar el magnetismo remanente.

Se puede reducir la pérdida de energía si usamos materiales con un ciclo de histéresis estrecho como acero al 4% de silicio y diseñado el núcleo para que el punto de inversión de los dominios sea antes de la rodilla de la curva de saturación, logrando con esto que se estreche aún más el lazo de histéresis.

Efecto Joule.- Las pérdidas por calor dependen del calibre y tipo de material usado en los embobinados.

El cobre que es de baja conductividad y bajo costo, nos da una pérdida por efecto joule relativamente baja en comparación con otros conductores y se reducen las pérdidas aumentando la sección transversal del conductor.

I.4 Ecuaciones de voltaje de un transformador real.

La figura 1.5 representa a un transformador real -

con carga, con núcleo de hierro, aunque hay un buen acoplamiento debido al núcleo de hierro, además del flujo mutuo -- mostrado se producen pequeños flujos de dispersión o de fuga en los arrollamientos del primario y del secundario dichos flujos los llamaremos ϕ_{f1} al del devanado primario y ϕ_{f2} al del devanado secundario. Además los enrollamientos del devanado primario y secundario están devanados con cobre que tiene una cierta resistencia, la resistencia interna del devanado primario la llamaremos R_1 y a la del secundario R_2 .

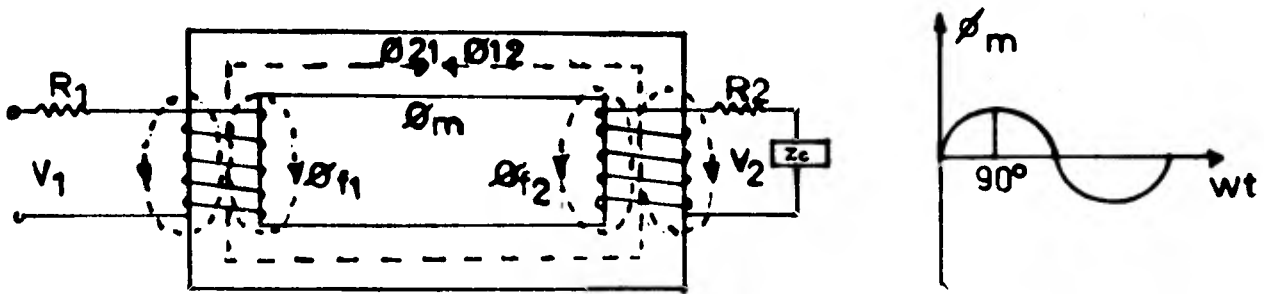
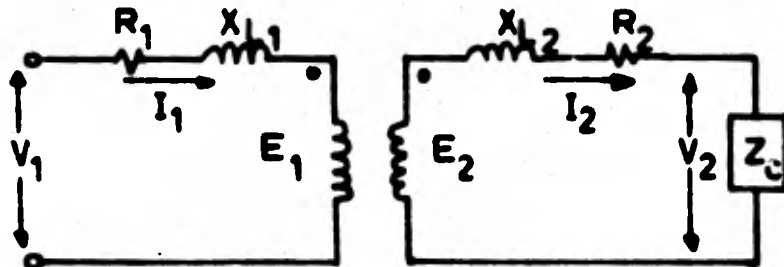


fig.15.

Los flujos de dispersión mostrados en la figura -- producen reactancias inductivas de tal forma que ϕ_{f1} produce X_{L1} y ϕ_{f2} produce X_{L2} .

De tal manera que podemos representar al transformador real como se muestra en la figura 1.5.a.



transformador
ideal
fig.1.5a

Ahora pasaremos a encontrar las ecuaciones del transformador, para eso nos basaremos en la figura 1.5.

Consideremos el momento que el flujo originado por la corriente de magnetización crece de 0° a 90° en la onda senoidal.

Para fines de análisis podemos suponer que el flujo total en el embobinado 1 es la diferencia del flujo propio generado por la corriente I_1 , y el flujo que llega a el embobinado 1 debido a la corriente que circula por el embobinado 2. A su vez, el flujo propio en el embobinado 1 se compone del flujo de fuga f_1 y el flujo que se dirige a cortar al embobinado 2 (ϕ_{21}).

$$\phi_I = \phi_{f1} + \phi_{21} - \phi_{I2}$$

donde: $\phi_m = \phi_{21} - \phi_{I2}$

$$\phi_1 = \phi_{f1} + \phi_m \quad (7)$$

Analogamente en el devanado secundario tenemos:

$$\phi_2 = -\phi_{f2} - \phi_{12} + \phi_{21} \quad (8)$$

$$\phi_2 = -\phi_{f2} + \phi_m$$

En cualquier instante supuesto, las ecuaciones de voltaje según la ley de Kirchhoff son:

$$V_1 = R_1 I_1 + N_1 \frac{d\phi_1}{dt} = R_1 I_1 + N_1 \frac{d\phi_{f1}}{dt} + N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (9)$$

$$V_2 = -R_2 I_2 + N_2 \frac{d\phi_2}{dt} = -R_2 I_2 - N_2 \frac{d\phi_{f2}}{dt} + N_2 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (10)$$

La inductancia de fuga es:

$$L_{f1} = \frac{N_1 \phi_{f1}}{I_1} \quad (11) \quad L_{f2} = \frac{N_2 \phi_{f2}}{I_2} \quad (12)$$

Sustituyendo estas en las ecuaciones 9 y 10

$$V_1 = R_1 I_1 + L_{f1} \frac{dI_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi_m}{dt} = R_1 I_1 + L_{f1} \frac{dI_1}{dt} + E_1$$

$$V_2 = -R_2 I_2 - L_{f2} \frac{dI_2}{dt} + N_2 \frac{d\phi_m}{dt} = -R_2 I_2 - L_{f2} \frac{dI_2}{dt} + E_2$$

Donde E_1 y E_2 son fuerzas electromotrices, las anteriores ecuaciones representadas en forma vectorial.

$$V_1 = (R_1 + j\omega L_{f1}) I_1 + E_1 = (R_1 + jX_{f1}) I_1 + E_1$$

$$V_2 = -(R_2 + j\omega L_{f2}) I_2 + E_2 = -(R_2 + jX_{f2}) I_2 + E_2 \quad (13)$$

I.5 Circuito equivalente exacto de un transformador real

I.5.1 Inductancia de magnetización

Cuando se utiliza un núcleo ferromagnético de alta permeabilidad y amplia sección transversal, podemos considerar que no hay flujo de dispersión. En este caso tendremos un acoplamiento perfecto de $K = 1$.

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} = \sqrt{\frac{K_1 K_2}{I_1 I_2}} \quad \text{por lo que } K_1 = I_1 \text{ y } K_2 = I_2$$

$$\text{donde: } K_1 = \frac{aM}{L_{11}} \quad \text{y} \quad K_2 = \frac{M}{aL_{22}}$$

por lo tanto tenemos que:

$$L_{11} = aM \quad \text{y} \quad L_{22} = \frac{M}{a}$$

El producto aM , representa la inductancia mutua vista desde el lado primario, y lo llamaremos inductancia de magnetización y se indica como L_m .

Por tanto, idealmente se cumple que $L_{11} = aM = L_m$ y de las ecuaciones I3 y sabiendo que la corriente de entrada I_1 es la suma vectorial de la corriente de magnetización y la corriente de carga, podemos elaborar el siguiente circuito equivalente, figura 1.6.

I.5.2 Transformador con núcleo ferromagnético.

Si al circuito obtenido anteriormente le añadimos una

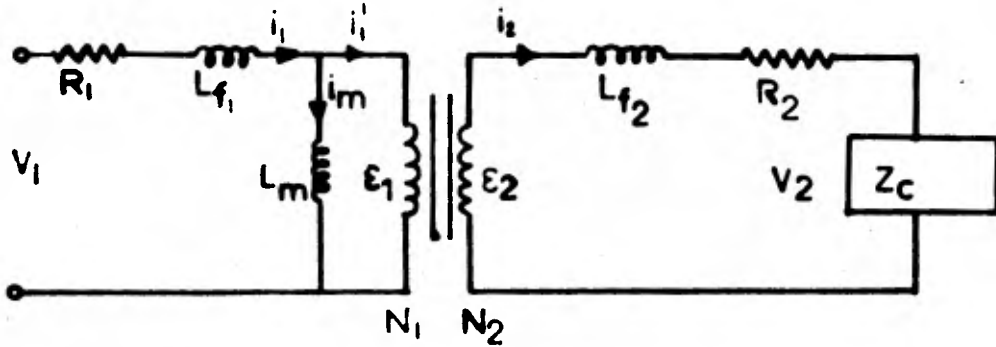


fig. 1.6

resistencia eléctrica conectada en paralelo con la inductancia L_m , podemos hacer que la energía térmica disipada al circular una corriente por la resistencia, sea equivalente a las pérdidas de potencia por histéresis y corrientes parásitas - que se presentan en los núcleos ferromagnéticos.

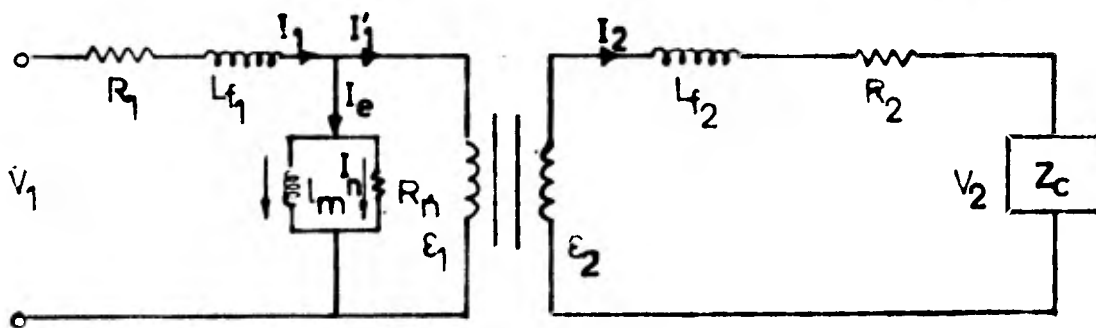


fig. 1.7

La suma de I_m e I_n la llamamos corriente de excitación I_e , y por definición es aquella corriente que circula en un transformador real con núcleo de hierro, cuando el embobinado secundario está abierto y se aplica al primario el voltaje especificado por el fabricante como voltaje de operación.

Si representamos los parámetros del circuito en forma vectorial y además, para facilidad de análisis indicamos -- los del secundario como si los viéramos desde el primario, obtendremos el circuito equivalente exacto del transformador con núcleo de hierro.

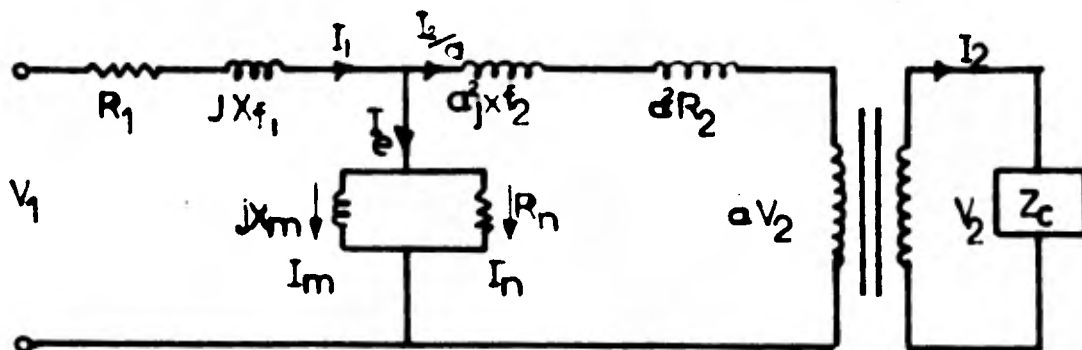


fig. 1.8

Si deseamos, podemos incluir a Z_c del lado primario pasándola como a^2Z_c .

Los términos que aparecen en el circuito anterior -

son:

a = Relación de transformación

V_1 = Voltaje aplicado al primario

V_2 = Voltaje obtenido en el secundario

R_1 = Resistencia eléctrica del devanado primario

R_2 = Resistencia eléctrica del devanado secundario

X_{f1} = Reactancia de dispersión en el devanado primario

X_{f2} = Reactancia de dispersión en el devanado secundario

R_n = Resistencia equivalente a las pérdidas del núcleo

X_m = Reactancia de magnetización

I_1 = Corriente de entrada al primario

I_2 = Corriente de carga

I_e = Corriente de excitación

I_m = Corriente de magnetización

I_n = Corriente de pérdidas en el núcleo

Recordamos que el circuito anterior no es el circuito de un transformador real, sino el circuito que equivale a las pérdidas que se presentan en un transformador real.

1.5.3 Circuito aproximado equivalente

En virtud del pequeño valor de la corriente de excitación con respecto a la de plena carga, la caída de voltaje motivada por aquella en $R_1 + jX_{f1}$ es despreciable.

Por ello podemos desplazar la rama que nos representa al núcleo, hacia el extremo izquierdo del circuito equiva-

lente visto, o sea, hacia el primario, y obtener un nuevo diagrama que llamaremos circuito aproximado equivalente, referido al lado primario, en donde, $R_{eq1} = R_1 + a^2 R_2$ y $X_{eq1} = X_{f1} + a^2 X_{f2}$

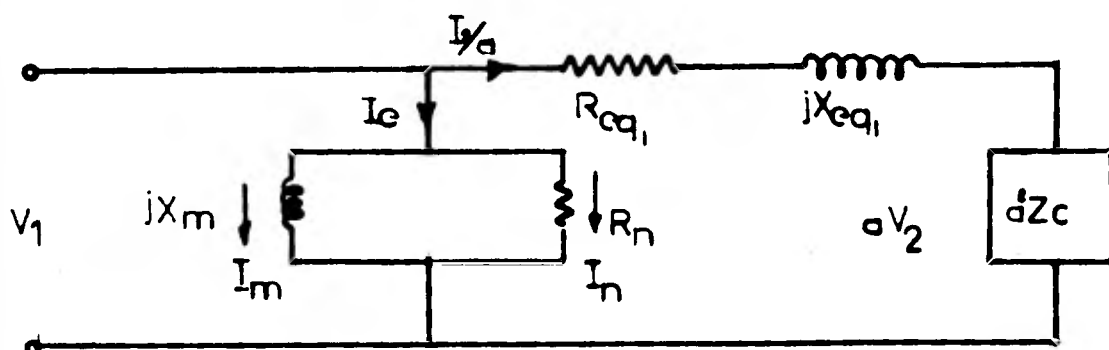


fig.1.9

Desplazando ahora la rama del núcleo hacia el extremo derecho del circuito equivalente exacto, que correspondera al secundario. Todos los parámetros los representamos como si fuesen vistos de éste lado, donde $R_{eq2} = \frac{R_1}{a^2} + R_2$ y $X_{eq2} = \frac{X_{f1}}{a^2} + X_{f2}$

Este circuito se denomina circuito aproximado equivalente, referido al secundario.

I.6 Diagrama Vectorial

El siguiente diagrama vectorial, representa al circuito equivalente exacto de un transformador real, con una carga --

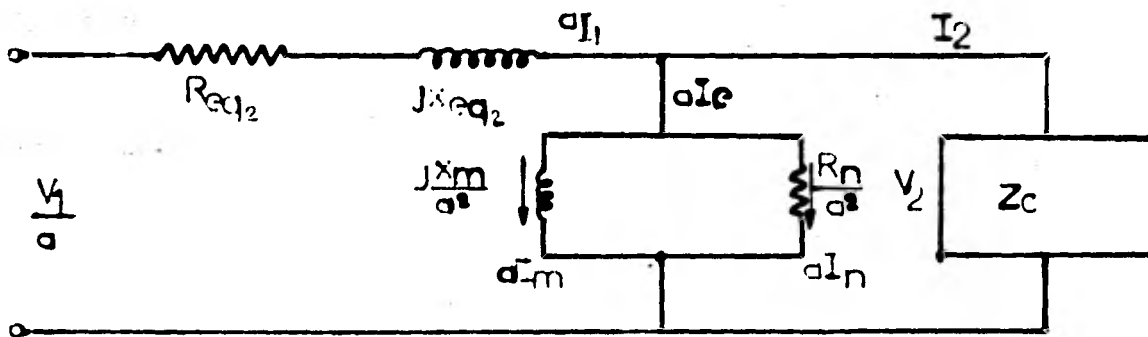


fig.1.10

resistiva inductiva conectada al secundario, y factor de potencia atrasado.

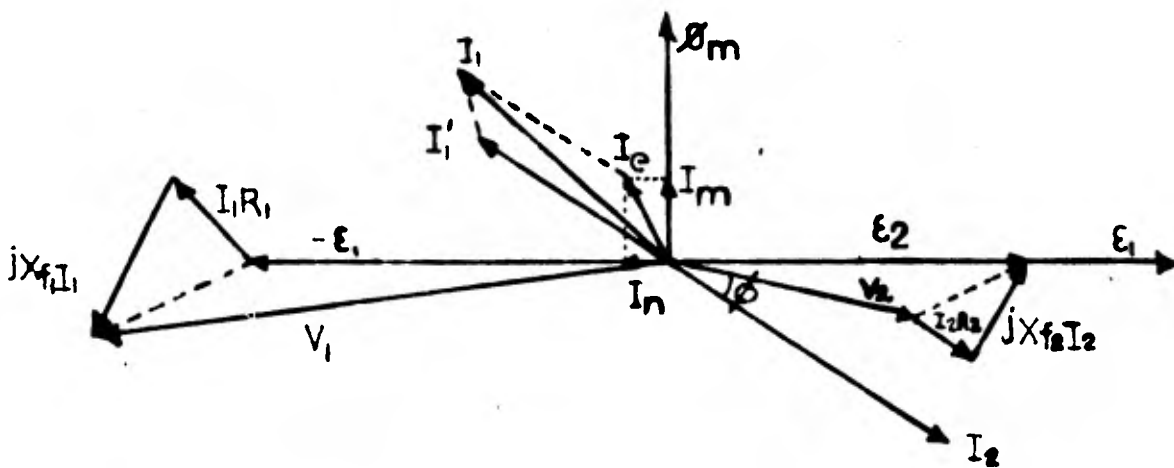


fig. 1.11

1.7 Clasificación de los transformadores

Los transformadores pueden ser clasificados de dig

tintas maneras según se tome como base la construcción o la operación en cada uno de sus aspectos. La primera clasificación y de mayor trascendencia, se refiere a la forma y proporciones del núcleo, dividiéndose los transformadores en dos categorías:

a) Transformadores de tipo núcleo

b) Transformadores acorazados

Transformadores de tipo núcleo.- Estos transformadores están constituidos por bobinas dispuestas concéntricamente, y alojadas en las piernas del núcleo, es decir, las bobinas envuelven al núcleo. Siendo el caso contrario al tipo acorazado; asimismo, los transformadores de este tipo son generalmente más voluminosos; la siguiente figura 1.12, muestra la posición del núcleo y los devanados de un transformador tipo núcleo.

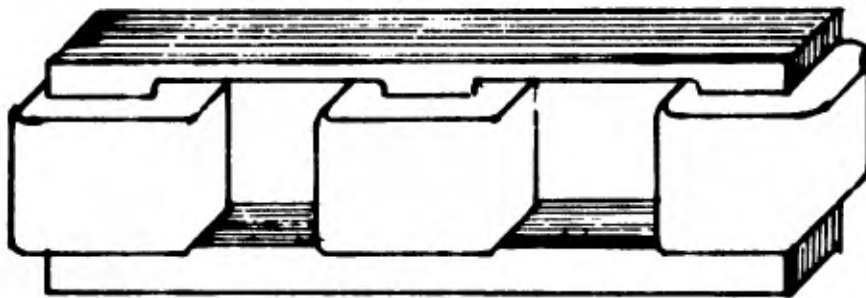


fig. 1.12

Transformador Acorazado.- Estos transformadores están contruidos en forma compacta, de tal modo, que los embobinados están envueltos por la laminación; las bobinas son en forma de paquetes planos con el fin de reducir tanto dimensiones como peso. El tanque es ajustado a la estructura soporte de laminación y devanados para lograr que estos transformadores puedan soportar los esfuerzos mecánicos ocasionados por cortos circuitos externos, la fig. I.13 muestra un transformador tipo acorazado.

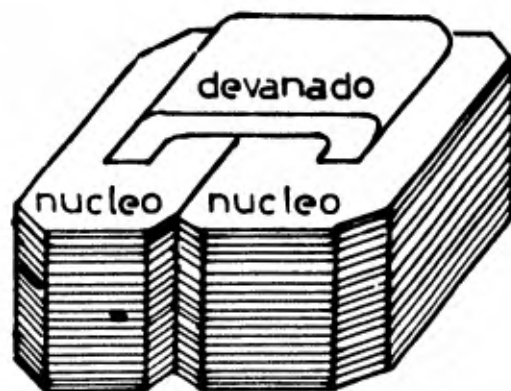


fig. 1.13

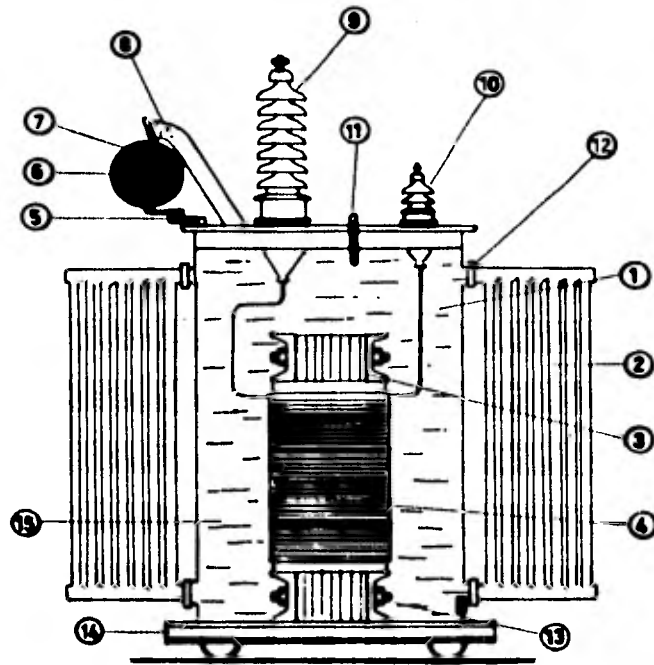
I.8 Componentes de un transformador

Las partes de que se compone un transformador son numerosas, fig. I.14; pero las esenciales y más importantes son las mostradas en la figura.

I.9 Transformador trifásico y banco trifásico

Un transformador trifásico es aquel dispositivo que

EL TRANSFORMADOR



PARTES ESENCIALES DEL TRANSFORMADOR

1. Tanque.
2. Tubos radiadores.
3. Núcleo (circuito magnético).
4. Devanados.
5. Relé de protección Buchholz.
6. Tanque conservador (8 o 10% del volumen del tanque).
7. Indicador del aceite.
8. Tubo de escape en caso de explosión.
9. 10. Bequillas o aisladores de potencia.
11. Termómetro.
12. Conexión de los tubos radiadores al tanque.
13. Tornillos opresores para dar rigidez al núcleo.
14. Base de volar.
15. Refrigerante.

fig. 114

consta de tres embobinados de alta tensión y tres de baja tensión, arrollados sobre un núcleo común a manera de formar una sola estructura. Recibe y cede potencia eléctrica trifásica, a la misma frecuencia y a diferentes voltajes, la figura I.15 -- muestra el arreglo de los embobinados en un transformador trifásico.

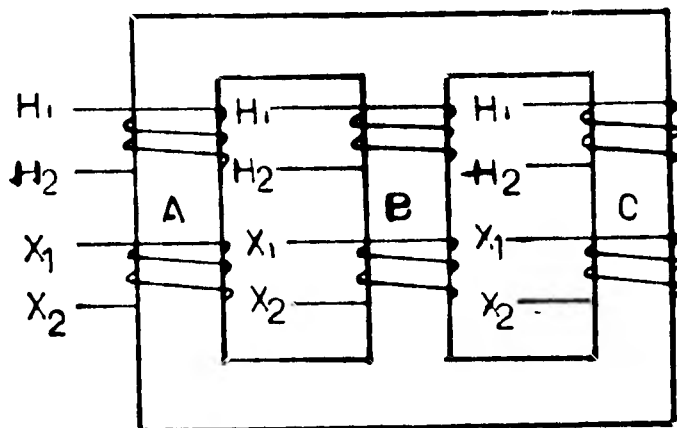


fig.1.15

Un banco trifásico es aquel arreglo que consta de tres transformadores monofásicos independientes, que se interconectan a manera de formar un sistema que recibe potencia -- eléctrica trifásica, a la misma frecuencia y a diferentes voltajes.

a) Ventajas del transformador trifásico

1.- Ahorro considerable de espacio

2.- Compacto

3.- Más económico que un banco, para los mismos valores de placa.

4.- Confiable

b) Ventajas del banco trifásico

1.- Puede haber un 4º transformador de reserva para no afectar el servicio en un 100% en caso de falla.

2.- Se puede trabajar a tensiones muy elevadas al tener las fases separadas.

En las instalaciones industriales es muy utilizado - el transformador trifásico, pero si por alguna razón se requiere instalar un banco, hay que procurar que los tres transformadores monofásicos sean de igual capacidad, iguales tensiones - en el primario y secundario, igual %Z e idéntica polaridad.

También es recomendable que los transformadores usados en un banco sean de un mismo fabricante.

I.10 Conexiones trifásicas de transformadores

En los sistemas de potencia, es necesario a menudo - instalar bancos de transformadores monofásicos en conexiones - trifásicas, de acuerdo con las necesidades que se presenten.

En sistema trifásicos, pueden usarse dos o tres --- transformadores en bancos para este fin. Hay cuatro formas normales de conectar un banco trifásico.

a) Conexión Delta-Delta

b) Conexión Estrella-Estrella

c) Conexión Delta-Estrella

d) Conexión Estrella-Delta

Conexión Delta-Delta.- De transformadores monofásicos se usa generalmente en sistemas cuyos voltajes no son muy elevados; especialmente en aquellos casos en que debe mantenerse la continuidad de un sistema. Esta conexión se emplea tanto para elevar la tensión como para reducirla.

En caso de falla o reparación la conexión delta-delta se puede convertir en una conexión delta abierta-delta -- abierta. En la figura I.16 se ilustra el diagrama de conexiones.

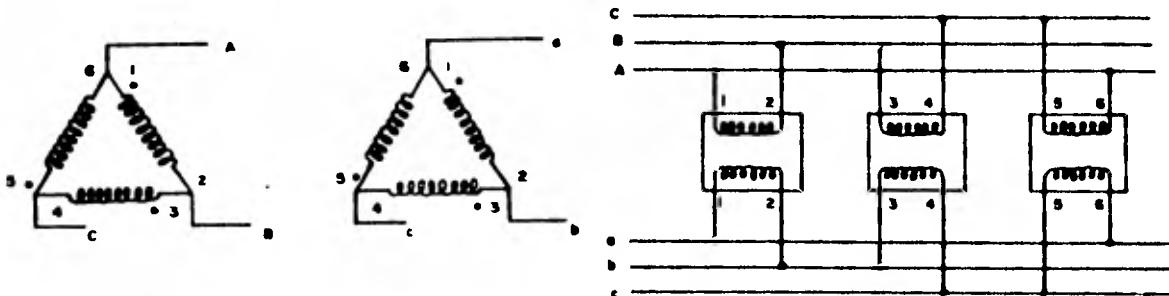


FIG. II 6

Conexión Estrella-Estrella.- Da un servicio satisfactorio únicamente en las cargas trifásicas balanceadas; cuando la carga se desbalancea, el neutro eléctrico estará en el centro exacto de un punto que hará desigual los tres voltajes de línea a neutro.

Esta conexión se emplea en sistemas que operan con-

tensiones relativamente elevadas, y en instalaciones de potencia a cuatro hilos; en la figura I.17 se ilustra el diagrama de conexiones.

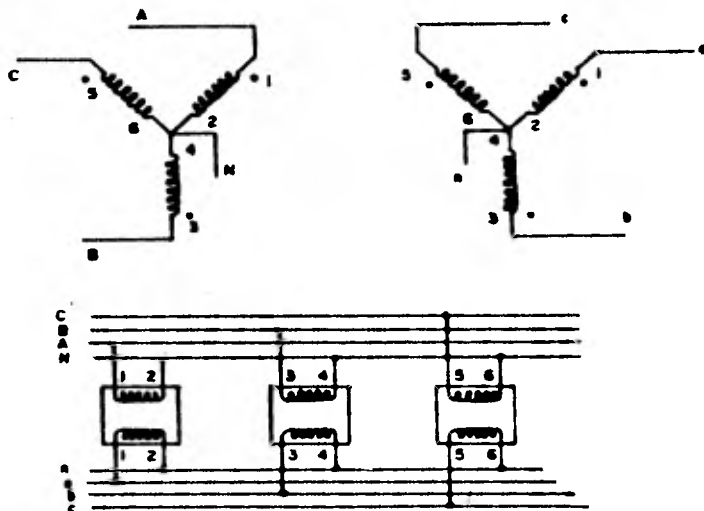


fig.1.17

Conexión Delta-Estrella.- De las más empleadas, se utiliza en los sistemas de potencia para elevar voltajes de generación o de transmisión, en los sistemas de distribución a cuatro hilos para alimentación de fuerza y alumbrado. En la siguiente figura I.18 se ilustra el diagrama de conexiones.

Conexión Estrella-Delta.- Es contraria a la conexión delta-estrella, por ejemplo en sistemas de potencia, la conexión delta-estrella se emplea para elevar los voltajes y la conexión estrella-delta para reducirlos. En ambos casos, los bobinados conectados en estrella se conectan al circuito de más alto voltaje, fundamentalmente por razones de aislamiento. En-

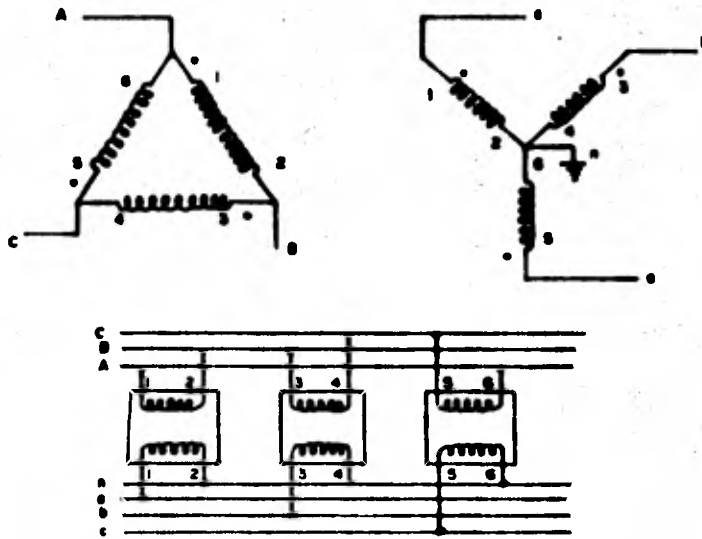


fig.1.18

sistemas de distribución esta conexión es poco usual, salvo en algunas ocasiones para distribución a tres hilos. En la figura I.19 se ilustra el diagrama de conexiones.

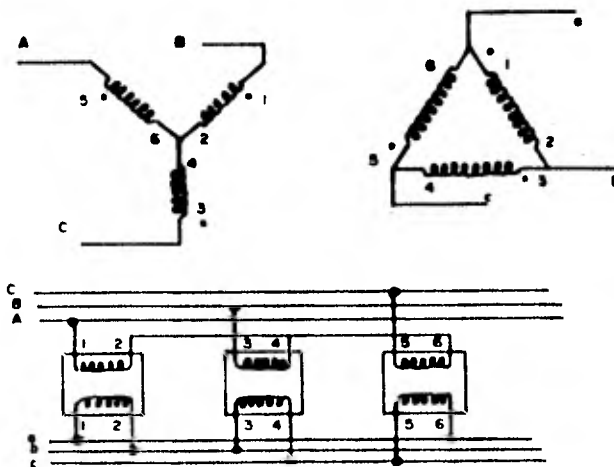


fig.1.19

I.II Autotransformador

El autotransformador es un aparato que funciona - en forma semejante al transformador, sólo que la transferencia de energía se hace por inducción magnética y conducción-eléctrica, debido a que los devanados están unidos eléctricamente.

El estudio del autotransformador se hace por lo general a partir del transformador, el circuito representativo del autotransformador es el siguiente, figura I.20.

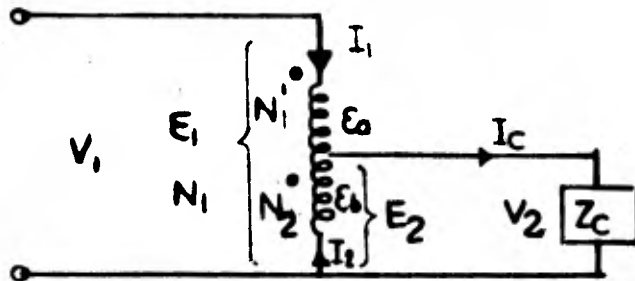


fig.120

$$\text{donde: } I_c = I_1 + I_2 \quad (14)$$

La capacidad nominal es:

$$VA \text{ nominales} = V_1 I_2 = V_2 I_c \quad (15)$$

Los voltajes inducidos son:

$$E_1 = 4.44fN_1\phi \times 10^{-8} \text{ volts}$$

$$E_2 = 4.44fN_2\phi \times 10^{-8} \text{ volts}$$

$$\text{por lo tanto: } \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (16)$$

$$V_I = E_a + E_b \quad (I7)$$

La potencia de un transformador cuando se conecta - como autotransformador.

$$P_{aut} = \frac{V_I}{V_I - V_2} P_t \quad (I8)$$

Las conexiones más comunes son:

- a) Conexión delta
- b) Conexión Estrella
- c) Conexión delta abierta- delta abierta

En su construcción hay pocas pero importantes diferencias, con el transformador. Puede ser de columnas o acorazado, monofásico o polifásico, en aire o en aceite, pero se distinguen en que el peso, volumen, superficie ocupada, pérdidas y regulación son menores que las correspondientes a un transformador de diseño normal, en que uno de los devanados está conectado en serie con el circuito, ya sea éste del generador o de la carga, y el otro está en paralelo. Todas las pruebas que se hacen en los transformadores se efectúan en forma semejante en los autotransformadores.

Las aplicaciones más comunes del autotransformador-son las siguientes:

- a) Arranque de motores (arranque a voltaje reducido)
- b) Interconexión de líneas
- c) Bancos de tierra
- d) Como regulador de voltaje

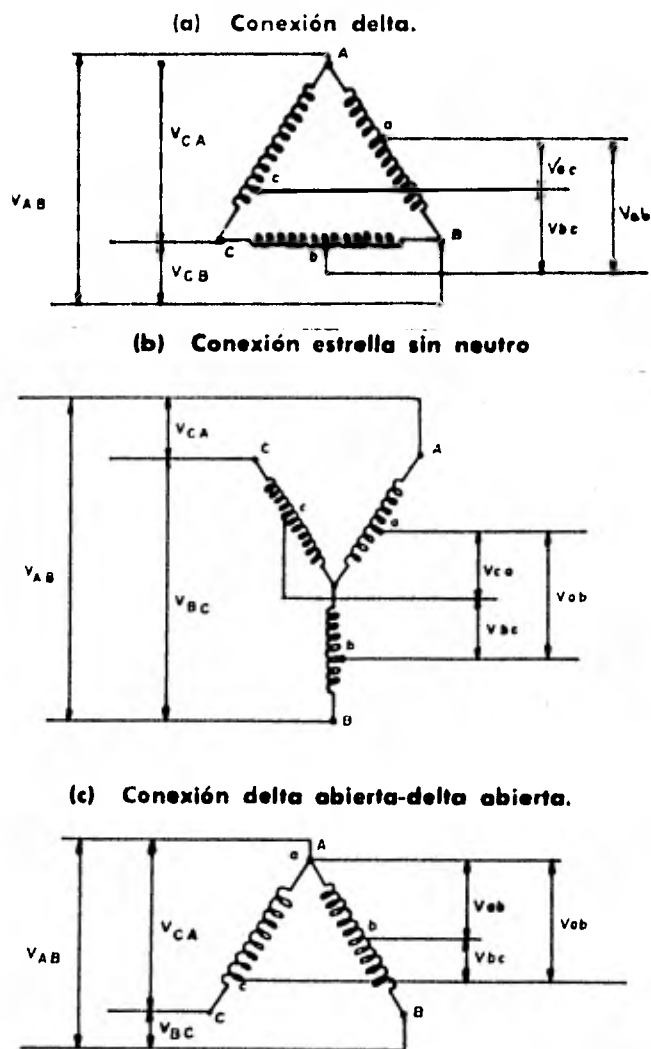


fig.1.21

C A P I T U L O II

CONSTRUCCION Y PRUEBAS EN FABRICA

2.I Núcleo

En la construcción de núcleos, se emplea en su mayoría láminas de acero con 4% de silicio, este tipo de láminas se emplea por las ventajas que presenta en lo referente a costo, facilidad de manipulación, pérdidas pequeñas por histéresis y por corrientes parásitas y gran permeabilidad a inducciones magnéticas relativamente altas.

Generalmente los transformadores en alta tensión y para potencia, son de tipo núcleo. En éstos, la sección recta del núcleo suele ser cuadrada o rectangular en los transformadores pequeños, pero en los grandes se aprovecha más eficientemente la abertura circular de las bobinas, agrupando las láminas en capas de anchura variable, formando así un núcleo escalonado.

Para reducir las corrientes parásitas se siguen distintos caminos; las tiras de laminación son barnizadas con barniz a prueba de aceite en ambas caras, en otras ocasiones se provoca la formación de una delgada capa de óxido sobre la lámina por vía química; pero tal vez el sistema más notable consiste en depositar sobre la lámina una delgada capa de celulosa que es comprimida y endurecida posteriormente; se emplea también papel interpuesto entre las láminas, aunque la sección

útil del núcleo se reduce entonces considerablemente, si no se usa papel de fabricación muy especial.

Las siguientes figuras nos dan una idea de la forma en que se corta la lámina para núcleos pequeños de tipo acorazado. La figura 2.Ia es de una sola pieza; pero no es difícil doblar con suavidad las partes marcadas con a hacia arriba y acomodar la lámina de manera que b quede dentro del hueco de la bobina, previamente enrollada, con sus dos circuitos y su aislamiento adecuado.

Una vez que ha entrado b se desdoblan las alas a y se coloca otra lámina encima de la primera, pero con las alas en sentido contrario, de tal manera que las separaciones que existen entre a y b queden en la posición indicada con líneas de puntos. Alternando así la posición de las láminas se evita que se forme un entrehierro continuo a todo lo largo del núcleo.

La forma de la figura 2.Ib, está hecha de dos partes y no necesita doblez en las alas para acomodarse dentro de la bobina. La parte grande a entra por un lado y la b por el otro lado hasta casi tocar la a; en la hilada siguiente la a entra en lugar de la b y viceversa, de manera que el hierro quede alternado y además el núcleo no tiende a desarmarse.

Cuando se trata de dimensiones mayores no es económico recortar la lámina en formas complicadas porque se des--

perdicia hierro y se requiere un troquel costoso y de corta-duración. Es preferible entonces cortar tiras simples de di-versos tamaños que se combinan para formar los núcleos nece-sarios. En caso de usar hierro de veta orientada el corte de-be ser a lo largo de la veta.

La figura 2.1 c demuestra que con dos tamaños de -lámina, sóloamente, es posible armar un núcleo de dos columnas, colocando las juntas alternativamente para evitar entrehie--rros contínuos. En la siguiente hilada las juntas quedan en-la posición indicada con líneas punteadas.

Cuando se usa laminación en tiras, de veta orienta-da, se puede hacer un rollo en espiral sobre el molde, cortar en dos mitades ese rollo, y colocarlas dentro de las bobinas concéntricas AA', BB', figura 2.Id., uniendo las superficies cortadas, en una junta tope de cada lado, marcada CC'.

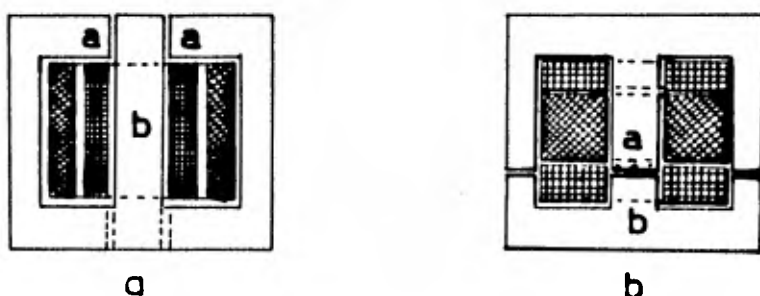


figura 2.1

En transformadores de dos, tres y seis fases se en-cuentran las formas de columnas y la acorazada. En la prime-ra se encuentran de tres a cinco columnas según el número de

fases.

En la figura 2.1e se muestra un núcleo de tres columnas, siendo la central 41.4% más ancha que las extremas, - para un transformador de dos fases. Las juntas deben ir alternadas y la hilada siguiente debe verse tal como quedaría la figura si se le diera media vuelta.

En este caso las bobinas de la fase A rodean la columna izquierda y las de la fase B rodean la columna derecha. La central sirve para regreso a los dos flujos, que se suman o restan pero cuya resultante es siempre mayor que cualquiera de los flujos separados en la proporción de 1.414 a 1.

En la figura 2.1f se ve un núcleo de tres columnas iguales para tres fases. Esta formado con tiras de 4 tamaños diferentes, numerados de 1 a 4, pero ahora en una hilada entran dos tamaños solamente (1 y 2), y en la que sigue entran las otras dos únicamente (3 y 4). Cuando las dimensiones del núcleo lo exijan, se dejará un pequeño espacio en cada junta para permitir la dilatación por temperatura.

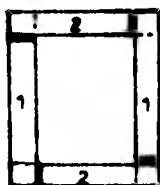


fig.2.1c

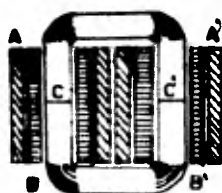


fig.2.1d

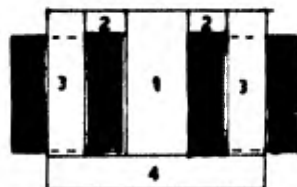


fig.2.1e

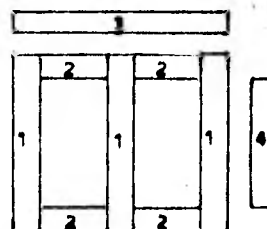


fig.2.1f

La construcción acorazada para 3 fases es mostrada en la figura 2. Ig la cual indica el plano de una hilada con todas las juntas en dirección norte-sur y empleando 4 tamaños de tiras. Las tiras 1, 2, y 3 son del mismo ancho, mientras que la 4 es de doble ancho.

Aunque las tiras 2 llevan el flujo de dos fases al mismo tiempo, se han dispuesto las corrientes de tal manera que se produce en dichas tiras la suma de los flujos, cuyo valor absoluto es igual al de uno de ellos por haber una diferencia de fase de 120 grados. Para tal fin la fase central tiene las terminales intercambiadas y la corriente positiva gira en sentido contrario respecto a las otras fases, de este modo la densidad en la parte común a dos flujos tiene el valor nominal.

En transformadores de gran potencia, tipo de columnas, se emplean tiras de anchos graduados con objeto de aprovechar mejor el espacio destinado al hierro dentro de un cilindro aislante figura 2. Ih.

Además se forman grupos con las láminas y esos grupos quedan separados entre sí por piezas aislantes. En los espacios que quedan puede circular con facilidad el aceite o fluido refrigerante, de abajo a arriba, y transporta el calor desarrollado en el centro de las columnas.

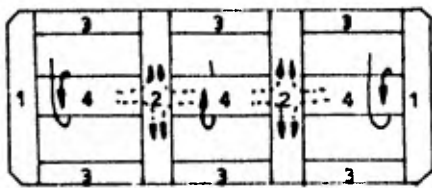


fig. 2.1g

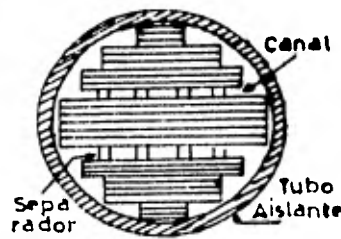


fig. 2.1h

2.2 Devanados

Los devanados consisten de bobinas fabricadas sobre formas y cubiertas de cinta aislante tratadas al vacío, impregnadas de barniz aislante y cosidas. En los transformadores pequeños para baja tensión, se emplea hilo redondo, pero en los transformadores grandes, los conductos suelen ser barras rectangulares. Si la sección recta de un conductor macizo es grande o la frecuencia es alta, la resistencia de un conductor a la corriente alterna puede ser considerable. Para reducir las pérdidas adicionales, debidas a la distribución no uniforme de la corriente en el interior de los conductores, los grandes conductores suelen dividirse en varios hilos aislados entre sí y transpuestos adecuadamente.

Los devanados van colocados sobre las piernas del núcleo, estando más proximo a la laminación el devanado de menor voltaje (B.T.) y sobre éste el devanado de mayor voltaje (A.T.), estando separados entre sí y del núcleo por barras aislantes. En los transformadores con núcleo escalonado de sección circular, se emplean bobinas de sección circular, las cuales -

son fáciles de aislar y tienen gran resistencia mecánica.-- Cada una de las bobinas de B.T., puede devanarse en forma de hélice continúa, pero si la tensión por bobina es de algunos miles de volts, suele dividirse el devanado. En tal caso se emplean bobinas en forma de disco circular, los discos suelen llevar entre ellos, separadores de madera para facilitar la refrigeración.

El enrollamiento se realiza en forma de bobinas hechas en máquina, de alguno de los siguientes tipos:

I) Discoidal, construídas con cinta o solera de cobre, enrollada en espiral. La cinta esta habitualmente cubierta de tela aislante y se tienen dos espesores de aislamiento entre las espiras contiguas. A veces se interpone entre espiras una tira de cartón aislante, un poco más ancha que la cinta de cobre y que es enrollada junto con ésta. -- Después se recubre la bobina con tela aislante de un espesor apropiado.

La figura 2.1.1. muestra un disco circular (a) y uno rectangular (b), siendo el primero para un transformador



fig. 2.1.1a



fig. 2.1.1b

de columnas y el segundo para un tipo acorazado.

2) Anulares hechas con alambre aislante, o barra de cobre, enrollado en un carrete desarmable y conteniendo varias capas, cada una con varias espiras.

Una vez terminado el enrollamiento se recubre de tela aislante y luego se desarma el carrete y se retira del anillo.

La forma puede ser circular, figura 2.1.1(c) para transformadores de columna y rectangular (d) para columnas rectangulares.



fig.2.1.1c

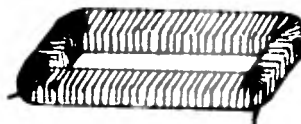


fig.2.1.1d

c) Cilíndricas, construidas con barras de cobre de sección rectangular, generalmente enrolladas en hélice de una sola capa o de un número corto de capas.

Aparte del aislamiento propio de la barra, se disponen cartones entre capa y capa, y en ocasiones, tiras entre espiras y espiras. Finalmente se recubre el cilindro con tela aislante en cantidad apropiada y se retira del carrete en que se hizo.

La figura 2.1.1 (e) corresponde a una bobina cilíndrica, para transformador de columnas y (f) para un tipo acorazado.



fig.2.1.1e

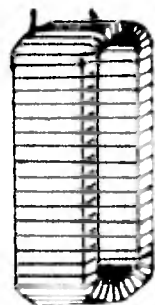


fig.2.1.1f

2.3 Aislamiento

El aislamiento en los transformadores, está formado por varios elementos que van colocados para dar un perfecto aislamiento entre las partes componentes del núcleo, entre los devanados, y entre el núcleo y los devanados; así también se prevee un aislamiento entre las partes conductoras y el tanque.

2.3.1 Aislamiento para el núcleo.

El aislamiento empleado para aislar los elementos del núcleo, dependen de la capacidad del transformador; así en transformadores pequeños, la laminación está aislada entre si únicamente por una película de óxido por cada lado de la lámina y en los mayores la laminación tiene una capa de barniz que cubre la laminación. Los birlos o elementos que sujetan mecánicamente la laminación, van aislados del núcleo por medio

de tubos de micarta.

2.4 Temperatura de operación de los transformadores

La buena operación y vida activa de cualquier equipo eléctrico, está en función de la relación que existe entre la temperatura de diseño del equipo y la temperatura a la cual operará normalmente; siendo esta última resultante de la temperatura del medio ambiente más la que se generará en el interior del transformador durante su funcionamiento.

Para seleccionar adecuadamente la temperatura de operación debe conocerse y considerarse lo siguiente:

a) Incremento de temperatura permisible es la temperatura máxima de operación normal permisible por el tipo de aislamiento y está dada por la temperatura generada en el interior del transformador y por lo tanto excede a la del medio ambiente. Este incremento permisible va de 55° a 150° C sobre la temperatura ambiente dependiendo de la clase de aislamiento y la altura de operación del equipo.

El medio ambiente y la sobrecarga de los transformadores provoca un aumento de temperatura; esto provoca sobrecalentamiento que ocasiona un envejecimiento prematuro y acentuado del aislamiento que puede repercutir en una falla completa de los devanados del transformador.

b) Clase de aislamiento es el termino usado en las-

normas NEMA y ASA para especificar la temperatura de operación de los tipos de aislamiento. Estos están designados por letras, y así tenemos;

Clase A, incremento de temperatura 55°C sobre el ambiente, B, 80°C. F, 115°C y H, 150°C. Los aislamientos modernos pueden operarse con seguridad con incrementos hasta en 20°C. - sobre los valores mencionados.

c) Corrección de incremento de temperatura permisible al variar la altura de operación.

1) Cuando se hace una prueba a una elevación sobre el nivel del mar que no excede de 1 000 metros, no debe hacerse ninguna corrección a la temperatura por la variación de altitud.

2) Para aparatos standard enfriados por aire, probados a alturas sobre el nivel del mar mayores de 1 000 metros, deben hacerse las siguientes correcciones por cada 100 metros arriba de los 1 000 metros;

Transformadores autoenfriados en aceite-----	0.4%
Transformadores tipo seco-----	0.5%
Transformadores en aceite, ventilación forzada-	0.6%
Transformadores con ventiladores-----	1.0%

2.5 Boquillas terminales

Para conectar los enrollamientos interiores de un -

transformador con las líneas externas, a travéz de la tapa - o tanque se emplean elementos conductores llamados boquillas, cuya construcción obedece a uno de los siguientes tipos.

a) Tipo Macizo.- La boquilla es una pieza de porce lana o bakelita, en forma de aislador de poste, con una brida de sujeción y campanas por la parte externa, cuando es pa ra intemperie, fig. 2.2a.

Tiene una perforación a lo largo por la cual puede pasar el cable terminal del enrollamiento, ajustado, con su aislamiento propio, siendo en este caso un tubo de protección. Pero es preferible colocar en su interior un birlo de cobre-duro, con tuercas en ambos extremos y empacadura de corcho,- con lo cual se impide la entrada de humedad y la salida de aceite. Este tipo no se utiliza para tensiones elevadas.

b) Tipo Relleno.- El tipo relleno tiene un gran espacio entre la porcelana y el birlo, pero este espacio no es tá ocupado por aire sino por aceite, fig. 2.2.b.

Las boquillas rellenas de aceite están hechas generalmente de un cuerpo de porcelana formado de varios segmentos anulares segmentados entre sí, con una brida de acero en la parte media, para sujetar la boquilla a la tapa, y remata do por una caja cilíndrica de vidrio que permite apreciar - el nivel del aceite.

El birlo tubular mantiene comprimidas las partes,-

y sirve de conductor, o en su interior pasa un cable de cobre para disminuir la resistencia.

c) Tipo de condensador.- Estas boquillas son construídas con papel especial que se impregna de bakelita al momento de ser enrollado sobre el birlo tubular, empleando una gran tensión en el papel. Cuando se ha alcanzado un cierto espesor se coloca sobre el papel una hoja delgada de aluminio, un tanto menos larga que el birlo y cubriendo una vuelta completa. Hecho ésto se prosigue el enrollado y cuando se llega a un espesor doble se dispone otra hoja de aluminio cubriendo una vuelta como la anterior, pero de dos tantos menos larga que el birlo. Se continua enrollando el papel y cuando se tenga un espesor triple se coloca una tercera hoja, tres tantos menos larga que el birlo, y así sucesivamente, hasta terminar. Si la construcción es correcta, la brida debe tener un tanto menos de largo que la última hoja de aluminio y los bordes de la brida y de todas las hojas intermedias deben quedar en línea recta. Las hojas deben tener una superficie constante, lo que se logra disminuyendo su longitud a medida que aumenta su diámetro, fig. 2.2c.

Las hojas de aluminio dividen al cuerpo de la boquilla en condensadores concéntricos de igual capacidad, y por lo mismo de igual tensión.

Las boquillas tipo de condensador no necesitan cubierta de porcelana para uso interior porque el papel bakelizado no absorbe humedad del aire. Para uso externo es indispensable colocar una cubierta de porcelana semejante a la que forma el tipo relleno.



fig. 22a

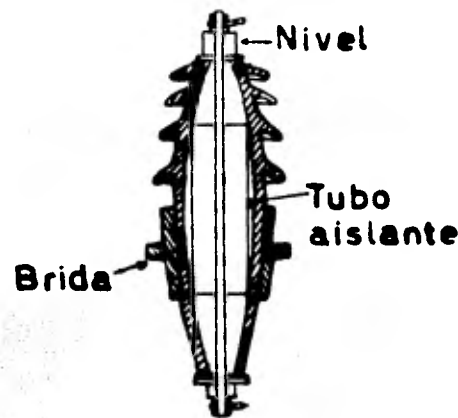


fig. 22b

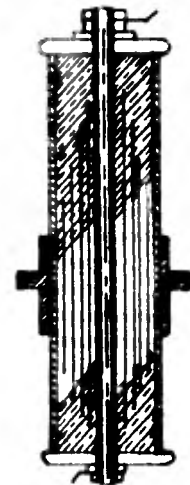


fig. 22c

2.6 Tanque

Los transformadores que emplean como medio refrigerante los líquidos, deben tener su núcleo y devanados necesariamente encerrados en tanques que eviten las pérdidas del refrigerante. Estos tanques se construyen de láminas o placas de acero soldadas y pueden tener forma circular, ovalada o rectangular. El tanque tiene espacio suficiente para permitir

la dilatación y contracción térmicas del aceite.

En transformadores grandes, ésto se logra montando-- sobre el tanque un tambor horizontal llamado Conservador de -- aceite que se conecta al tanque atravez de un tubo. Estos ---- transformadores estan llenos de aceite por completo y paricial mente el conservador. En la parte superior de éste, existe una abertura de respiración a la atmósfera.

Este respiradero va equipado con filtro químico "sili- ca gel", que filtra el aire quitándole impurezas y humedad.- También se provee al transformador de una tubería protectora - cerrada por un diafragma delgado de seguridad que puede romper se en caso de una presión excesiva, evitando con ello la explo sión del tanque.

2.7. Cambiador de derivaciones

El cambiador de derivaciones se emplea para suprimir o aumentar el número de vueltas o de bobinas de un devanado, - con lo que se obtiene un nivel más o menos estable de la ten-- sión requerida.

Los derivadores son generalmente colocados en el de- vanado de alta tensión, por ser este el devanado exterior y -- consecuentemente la conexión de derivadores puede hacerse fá-- cilmente y sin dificultad por cuanto al aislamiento. Del mismo modo, como el devanado de alto voltaje tiene un gran número de vueltas el derivador puede ajustar estas para tener una mejor-

regulación en el voltaje.

Los derivadores en el lado de baja tensión no se recomiendan, pues los conductores de los devanados son de mayor sección, que podría ocasionar arcos durante el cambio. Además este devanado normalmente está en la parte interna, y presentará dificultades de construcción.

La posición física de los derivadores en el devanado de alta tensión, está determinada por consideración de voltaje, amper vuelta, balanceo en cada posición del derivador y variación de la impedancia sobre el rango del cambiador.

Previendo lo anterior se acostumbra conectar los contactos de los derivadores en el centro de devanados divididos, como se muestra en la figura 2.2d.

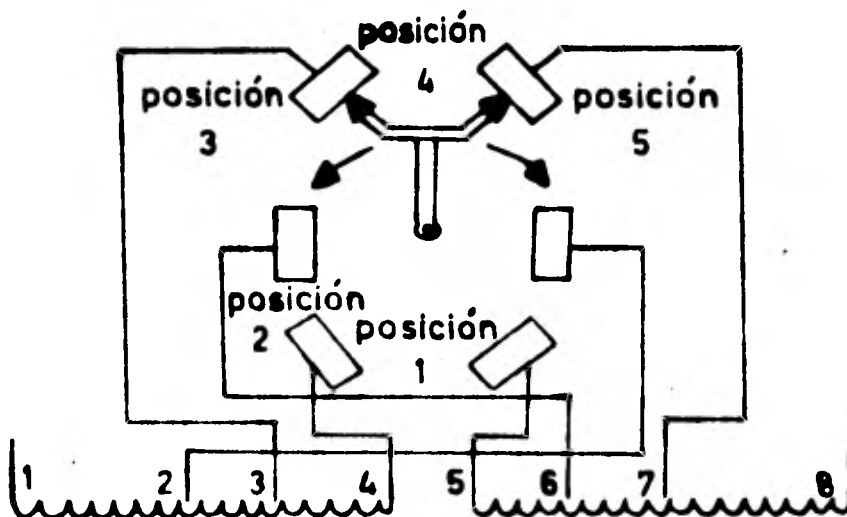


figura 2.2d

Los cambiadores de derivaciones se clasifican en dos grupos que son:

- a) Cambiador de derivación sin carga
- b) Cambiador de derivación con carga

Los cambiadores de derivaciones sin carga son aquellos diseñados para ajustar la relación del transformador, en forma poco frecuente, cuando el transformador puede desconectarse de la línea. Este ajuste generalmente es manual y se hace para adaptar el transformador al voltaje promedio existente en la localidad del transformador.

Cambiador de derivadores con carga se diseña para -- trabajar bajo carga; puesto que se debe alimentar continuamente la carga aún en el período cuando el derivador está cambiando. Por este hecho cada dos derivaciones deben estar punteadas en el mismo camino durante el cambio del derivador.

Los cambiadores básicamente está formado por:

- 1.- Mecanismo operador del cambiador
- 2.- Contactos del cambiador
- 3.- Manivela o perilla (colocada en la parte superior del tanque).

Los cambiadores bajo carga, cuentan además con un -- control que envía la señal para alimentar un motor que opera -- el mecanismo del cambiador.

2.8 Medio Refrigerante

En los transformadores pequeños la superficie es - relativamente grande frente al volumen. La refrigeración por radiación y por convección natural suele ser suficiente para mantener la temperatura de funcionamiento por debajo del máximo que puede soportar el aislamiento sin reducir seriamente su duración. Sin embargo, al aumentar el tamaño de un objeto, - el volumen crece con el cubo de sus dimensiones lineales, -- mientras que el área de su superficie lo hace con el cuadrado. Con ésto se ve que al aumentar el tamaño, o hay que aumentar el área de la superficie o hay que proveer medios artificiales para facilitar la refrigeración, esto se logra dotando de conductos de ventilación a los devanados, aumentando las dimensiones de radiación del tanque y adicionando elementos que ayuden a una rápida disipación de calor.

Los refrigerantes más empleados, son: El aire, el-aceite dieléctrico, líquidos dieléctricos no inflamables y - el agua.

La refrigeración por circulación de aire natural o forzada, se utiliza generalmente en transformadores de poca-capacidad, cuando se quiere evitar el peligro de incendio -- por causas del transformador,

Aceite dieléctrico para transformadores.- La expe-riencia ha demostrado que uno de los mejores medios de refrigeración es el aceite dieléctrico, pues al tiempo que facilita

ta la extracción de calor del núcleo y del devanado proporcionando cualidades aislantes apreciables. El aceite debe tener -- gran rigidez dieléctrica, poca viscosidad, punto de congelación bajo y punto de ignición elevado, debiendo estar exento de ácidos corrosivos, álcalis y azufre.

Líquidos dieléctricos no inflamables.- Cuando las necesidades de refrigeración son elevadas y se desea evitar - peligro de incendio por causa del medio refrigerante del transformador, se utilizan compuestos químicos conocidos comercialmente como Pyranol, Inerteen o Chlorextol. Estos compuestos - no son volátiles, ni combustibles, ni explosivos y son suficientemente fluidos para circular libremente en torno a los devanados. Tienen gran rigidez dieléctrica sirviendo por ello al mismo tiempo de aislante y refrigerante.

2.9 Sistemas de disipación de calor desprendido por el núcleo y devanados.

La energía convertida en calor en el circuito magnético y en los devanados de un transformador se transmite al aceite en el cual éstos se hallan sumergidos, éste a su vez lo transmite a los fluidos que sirven para enfriarlo como son el aire y el agua, logrando ésto a través del tanque o por medio de radiadores adaptados a este.

Para lograr lo anterior en forma eficiente se hace uso de varios sistemas de enfriamiento. La selección del sis-

tema de enfriamiento de un transformador es de primordial importancia.

Aparte de las características eléctricas, se debe tomar en cuenta los factores que influyen sobre los costos -- iniciales y de operación, el ciclo de carga, espacio disponible, facilidad de manejo y limitaciones en el transporte. Estos factores, junto con el mantenimiento de la unidad determinan el tipo mas económico de enfriamiento.

De acuerdo a las normas americanas para transformadores establecida por la American Standards Association y empleadas en la Industria Eléctrica en México para la fabricación de transformadores, los métodos básicos de enfriamientos para transformadores sumergidos en líquidos son los siguientes.

I) OA: Sumergido en aceite, con enfriamiento natural.

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

Los tanques con superficie lisa se usan en transformadores de distribución pequeños: pero debido a que al aumentar el tamaño en KVA, las pérdidas aumentan más rápidamente que -

el área del tanque, resulta que un transformador mayor de 50-- KVA, tendría que colocarse en un tanque desmesurado para tener la superficie de radiación necesaria; para aumentar esta área los tanques se construyen con superficies corrugadas o con altas al rededor del tanque, llegándose así hasta 150 KVA.

La construcción de tipo tubular fijo suele usarse -- hasta unos 3 000 KVA. Los enfriadores tubulares están formados por tubos soldados a cabezales fijos en las paredes del tanque. El aceite aislante circula en el interior de los tubos haciendo que la disipación de calor aumente considerablemente.

Debido a que estos transformadores se entregan totalmente montados, el tamaño queda limitado por las restricciones de transporte, pues únicamente pueden quitarse los aisladores de paso, cuando la altura lo exige.

Arriba de 3 000 KVA, los transformadores se suministran normalmente con radiadores desmontables colocados sobre las paredes laterales del tanque. El aceite al pasar a través de los radiadores los cuales están conectados al tanque por medio de tuberías con válvulas en las conexiones superior e inferior. Para el transporte se quitan los radiadores y los aisladores de paso para reducir el volumen y la altura de la unidad.

El transformador de construcción OA se considera como el tipo fundamental y sirve de norma para la designación de tamaños y precios de los otros tipos.

2) OA/FA: Sumergido en aceite con enfriamiento propio/
con enfriamiento de aire forzado.

Este tipo de transformador es básicamente una unidad OA a la cual se le han agragado ventiladores para aumentar la disipación del calor en las superficies de enfriamiento, y por lo tanto, aumentar los KVA de salida del transformador. El empleo del sistema OA/FA es apropiado cuando la unidad debe soportar sobrecarga durante períodos cortos, pero cuya ocurrencia se espera con cierta frecuencia dentro de las condiciones normales de trabajo, y que deben ser toleradas sin afectar el funcionamiento normal del transformador. El enfriamiento forzado puede también usarse cuando se desea aumentar la carga permanente de un transformador, pero es necesario calcular cuidadosamente la elevación de temperatura para no acortar la vida del aparato.

3) OA/FOA/FOA: Sumergido en aceite con enfriamiento propio/ con enfriamiento de aceite forzado - aire forzado/ -- con enfriamiento de aceite forzado - aire forzado.

El régimen del transformador tipo OA, sumergido en aceite puede ser aumentado por el empleo combinado de bombas y ventiladores.

En la construcción se usan los radiadores desprendibles normales con la adición de ventiladores montados sobre dichos radiadores y bombas de aceite conectadas a los cabezales-

de los radiadores. El aumento de la capacidad se hace en dos pasos: en el primero se usan la mitad de los radiadores y la mitad de las bombas, para lograr un aumento de 1.333 veces - sobre el diseño OA; en el segundo se hace trabajar la totalidad de los radiadores y bombas con lo que se consigue un aumento de 1.667 veces el régimen OA. El arranque y parada de los ventiladores y de las bombas son gobernados por la temperatura del aceite, por medio de controles automáticos que seleccionan la secuencia de la operación al aumentar la carga del transformador.

Normalmente se fabrican en tamaños de 10 MVA monofásicos o 12 MVA Trifásicos y mayores, con base en el régimen OA.

4) FOA: Sumergidos en aceite, con enfriamiento por aceite forzado con enfriadores de aire forzado.

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

PRUEBAS A TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Aquí se hablará de las pruebas eléctricas que se hacen a los transformadores para comprobar que cumplen con los requisitos de calidad en su fabricación y en la operación a la que se verá sujeto.

2.10 Preparación de los aparatos para las pruebas

Es recomendable que el transformador esté ensamblado en su totalidad, con todas las guías y las boquillas terminales en su lugar.

En las unidades de potencia, normalmente se tienen accesorios tales como el tanque conservador, los transformadores de corriente y potencial que se utilizan para protección e instrumentación, las palancas y volantes de los cambiadores de derivaciones, válvulas, que deberán estar instalados durante las pruebas dieléctricas ya que es necesario tener la presencia de estos accesorios para comprobar que se han observado las distancias dieléctricas durante el diseño y la fabricación del aparato.

Si se requiere efectuar pruebas de temperatura en el aparato, la ubicación de este debe ser tal que se tengan los espacios o claros suficientes alrededor del aparato, para permitir el acceso fácil a éste y para tener una buena radiación y disipación del calor generado en la prueba.

La distancia entre el aparato en prueba y cualquier

otro obstáculo, aparato o pared, debe ser aproximadamente -- igual a la dimensión más grande del propio aparato o mayor.

El tanque del transformador deberá estar lleno de aceite que previamente debió haberse inyectado bajo vacío y el indicador de nivel de aceite debe marcar el nivel normal. La temperatura debe ser lo más cercana posible a 25°C (temperatura ambiente).

Los transformadores que llevan tanque conservador, deben llenarse de aceite hasta el nivel requerido indicado - en dicho tanque.

Debe hacerse una inspección de la rigidez de todas las conexiones, y checar las distancias entre partes vivas - y de partes vivas al tanque.

En síntesis, antes de iniciar las pruebas a los -- transformadores, estos deben estar totalmente terminados y - ensamblados así como vestidos con sus accesorios.

2.II Prueba de resistencia de aislamiento

La medición de la resistencia de aislamiento sirve para darnos una idea del estado en que se encuentran los aislamientos, para saber si están en condiciones de soportar los esfuerzos dieléctricos que se originan durante la excitación o en trabajo normal.

El obtener valores bajos no indica en forma decisiva que el aislamiento sea deficiente (en su diseño o aplica-

ción), si no hay suciedad o humedad en los aislamientos, ésta prueba junto con la medición del factor de potencia de los aislamientos nos permite conocer la humedad que guardan todos los aislamientos del transformador.

Esta prueba consiste en encontrar el valor óhmico del aislamiento del transformador, el cuál es diseñado para el voltaje y la corriente a la que van a operar, así como a su medio externo de operación. La resistencia de aislamiento varía directamente con el espesor del aislamiento e inversamente con el área del aislamiento bajo prueba.

El aislamiento debe probarse pues es factible que se haya dañado en el proceso de fabricación y ensamble ó que esté contaminado con partículas metálicas o humedad.

La medición de la resistencia de aislamiento se efectúa por lo general con un aparato denominado Megger, que consta básicamente, de una fuente de C.D. y un indicador de megohms. La capacidad de la fuente de C.D. generalmente es baja, ya que la finalidad es ver el estado en que se encuentra un aislamiento; es decir ésta es una prueba indicativa no destructiva, de tal forma que si un aislamiento está débil no lo agrave.

Las consideraciones más importantes para ésta prueba son, que el transformador debe estar a una temperatura cercana a la ambiente y limpias las partes aislantes tales como las porcelanas de las boquillas.

ción), si no hay suciedad o humedad en los aislamientos, ésta prueba junto con la medición del factor de potencia de los aislamientos nos permite conocer la humedad que guardan todos los aislamientos del transformador.

Esta prueba consiste en encontrar el valor óhmico del aislamiento del transformador, el cuál es diseñado para el voltaje y la corriente a la que van a operar, así como a su medio externo de operación. La resistencia de aislamiento varía directamente con el espesor del aislamiento e inversamente con el área del aislamiento bajo prueba.

El aislamiento debe probarse pues es factible que se haya dañado en el proceso de fabricación y ensamble ó que esté contaminado con partículas metálicas o humedad.

La medición de la resistencia de aislamiento se efectúa por lo general con un aparato denominado Megger, que consta básicamente, de una fuente de C.D. y un indicador de megohms. La capacidad de la fuente de C.D. generalmente es baja, ya que la finalidad es ver el estado en que se encuentra un aislamiento; es decir ésta es una prueba indicativa no destructiva, de tal forma que si un aislamiento está débil no lo agrave.

Las consideraciones más importantes para ésta prueba son, que el transformador debe estar a una temperatura cercana a la ambiente y limpias las partes aislantes tales como las porcelanas de las boquillas.

Antes de conectar el megger al transformador bajo prueba y por supuesto antes de aplicar tensión, debe operarse el megger en vacío para ajustar la lectura en infinito. Los meggers tienen varios rangos de tensión, debe escogerse un rango de tensión que no sobre pase el valor nominal o la clase de aislamiento del devanado bajo prueba. Se ha comprobado que con una tensión de 1000 volts en transformadores de potencia se obtiene una buena estabilización en las lecturas de resistencia.

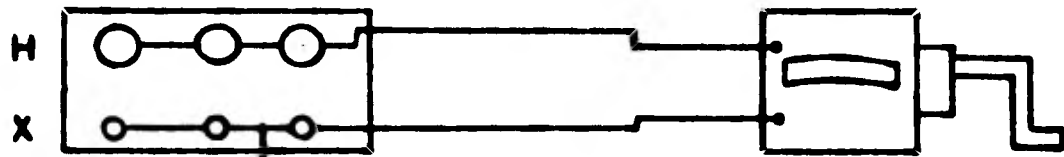
Las resistencias de aislamiento a determinar en un transformador, son la resistencia que presenta un devanado con respecto al otro y la que presenta un devanado con respecto al núcleo y con respecto al tanque; es decir las lecturas de resistencia de aislamiento que se forman de la siguiente manera:

En la fig. 2.3 se pueden observar las conexiones del transformador.

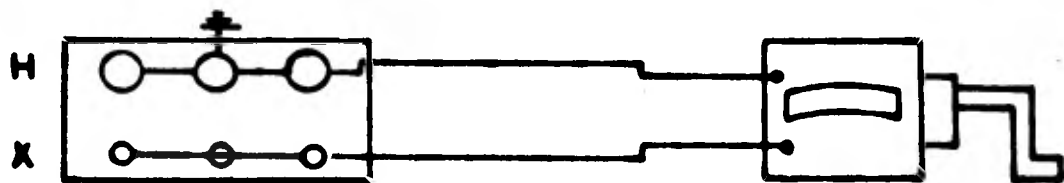
Una vez conectado el megger, se comienza a tomar lecturas de la resistencia de aislamiento minuto a minuto hasta cubrir diez minutos. Se apaga y se desconecta el megger y se procede a medir la temperatura del aparato con un termómetro que se introduce en el aceite en la parte superior del aparato. Esto se hace así porque de acuerdo a las normas es válido considerar que la temperatura de los aislamientos es



Devanado de alto voltaje VS bajo voltaje



alto voltaje VS bajo voltaje + tanque a tierra



alto voltaje + tanque a tierra VS bajo voltaje

figura 2.3

aproximadamente igual a la temperatura promedio del aceite de los transformadores.

Todos los valores obtenidos en las pruebas deberan corregirse a 20°C, multiplicando el valor medido por el factor de corrección correspondiente a la temperatura del transformador. La tabla nos muestra los factores de corrección de temperatura para las lecturas del megger.

Transformadores llenados en aceite	Temperatura	
	°C	°F
0.30	0	32
0.40	5	41
0.54	10	50
0.73	15	60
1.00	20	68
1.30	25	77
1.80	30	86
2.50	35	95
3.30	40	104
4.50	45	113
6.00	50	122
8.10	55	131
11.00	60	140
14.80	65	149
20.00	70	158
26.80	75	167

2.12 Prueba de factor de potencia al aislamiento

Dentro de las pruebas de resistencia de aislamiento, normalmente se efectúa la prueba de factor de potencia de los aislamientos. Esta prueba es también una prueba no destructiva y los valores de factor de potencia son independientes del área o espesor del aislamiento y dependen únicamente de la humedad y temperatura; por lo tanto son más fáciles de interpretar que los valores de resistencia de aislamiento que adicionalmente dependen del área y espesor del aislamiento.

Por lo tanto el factor de potencia de un aislamiento es la medida de pérdidas dieléctricas y no de resistencia dieléctrica.

Las conexiones para hacer esta prueba son las mismas que las descritas para la prueba de megger, con la unidad lle-

nada de aceite, boquillas instaladas, radiadores, ventiladores y bombas completas.

El instrumento más utilizado y preferido por su gran precisión es el llamado MEU o puente Double Engineering. En este instrumento se toman lecturas de miliwatts y milivots-ampere y de estas lecturas se obtiene el factor de potencia de los aislamientos.

De la misma manera que el megger, se conecta el MEU al devanado cuyo factor de potencia se desea medir. Con las lecturas de mW y mVA se obtiene que:

$$F.P. = \frac{mW}{mVA} \times 100$$

Se debe tomar la temperatura del aceite, la cual se considera igual a la del aislamiento.

La corrección por temperatura para el factor de potencia depende de los materiales aislantes, la estructura del aislamiento el contenido de humedad y otros factores.

No existe un conjunto de valores de corrección que puedan aplicarse a todos los transformadores, sin embargo, para transformadores de potencia se pueden utilizar los factores que aparecen en las normas ANSI C57.12.90 que son las siguientes:

Temperatura °C	Factor de corrección K
10 - (50°F)	.80
15 - (59°F)	.90

Temperatura °C	Factor de corrección K
20 - (68°F)	1.00
25 - (77°F)	1.12
30 - (86°F)	1.25
35 - (95°F)	1.40
40 - (104°F)	1.55
45 - (113°F)	1.75
50 - (122°F)	1.95
55 - (131°F)	2.18
60 - (140°F)	2.42
65 - (149°F)	2.70
70 - (158°F)	3.00

El valor corregido del factor de potencia es:

$$F.P.(20^{\circ}C) = \frac{F.P.(T^{\circ}C)}{K}$$

A causa de los muchos factores de los que depende - el factor de potencia no es posible fijar los límites para -- considerar aceptable el factor de potencia de los aislamientos de un transformador de potencia. Pero sin embargo un buen valor de factor de potencia es menor de 1%.

2.13 Medición de la resistencia ohmica de los devanados

El objeto de esta medición es calcular las pérdidas por efecto joule. Se realiza por temperatura, para obtener -- por comparación de resistencias el calentamiento de los devanados.

Las mediciones de la resistencia deben hacerse con la mayor exactitud posible, al igual que la de la temperatura a la cual se hace la medición ya que como se sabe, la resistencia del cobre varía con la temperatura. Para conocer la temperatura que tiene el cobre en el momento de la medición, se mide la temperatura del aceite en el que están sumergidas las bobinas; debe tenerse cuidado de que por esas bobinas no haya pasado corriente en un período de seis horas, cuando menos. Así mismo es conveniente que las mediciones se efectúen cuando no existan fuertes variaciones de temperatura en el ambiente.

Para medir la resistencia óhmica de los embobinados se emplea generalmente el puente de Kelvin para mediciones de resistencia menores de 1 ohm ó el puente de wheatstone para resistencias mayores de 1 ohm.

Desarrollo de la pruebas

Una vez realizada la conexión de acuerdo a la fig. 2.4, para leer la resistencia en el puente utilizado, se moverá la resistencia variable de éste hasta que el galvanómetro marque cero. Una vez obtenida esta condición se podrá leer directamente el valor de la resistencia. De esta forma se medirán las resistencia tanto del embobinado de alta como de baja tensión.

Cuando el transformador es monofásico no es necesario hacer ninguna consideración adicional a la resistencia me-

dida, pero si el transformador es trifásico, y debido a que las conexiones de sus devanados son internas existen dos casos.

a) Devanado en conexión estrella

Para éste caso la resistencia por fase del transformador es igual a la resistencia medida entre las terminales dividida entre 2.

b) Devanado en conexión delta

Para éste caso la resistencia por fase del transformador es igual a la resistencia medida entre las terminales multiplicada por 1.5.

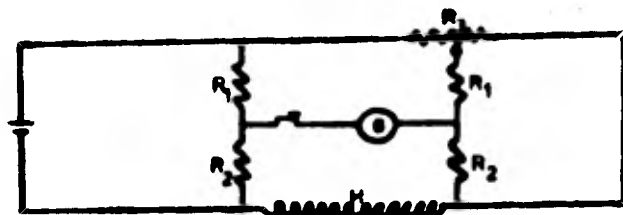
Los valores de resistencia óhmica de los devanados corregidos a una temperatura T_2 se determinan a partir de la igualdad.

$$K = \frac{234.5 + T_2}{234.5 + T_1} \quad \therefore R_{T_2} = KR_{T_1}$$

Donde: T_1 es la temperatura a la cual se realizó la prueba.

T_2 es la temperatura a la cual se desea corregir la resistencia.

Se mide primero el devanado de alta tensión después el de baja tensión. Al momento de hacer la primera medición se debió un instante antes haber desconectado la alimentación al transformador, se toman todas las lecturas posibles en un



Terminales del embobinado

Diagrama de conexion del puente y embobinado

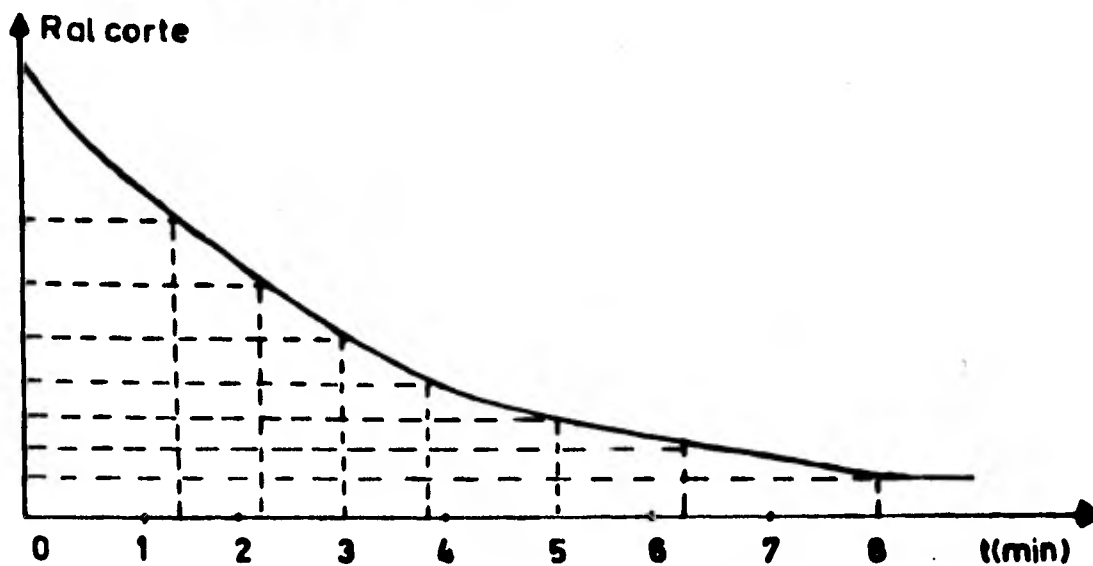
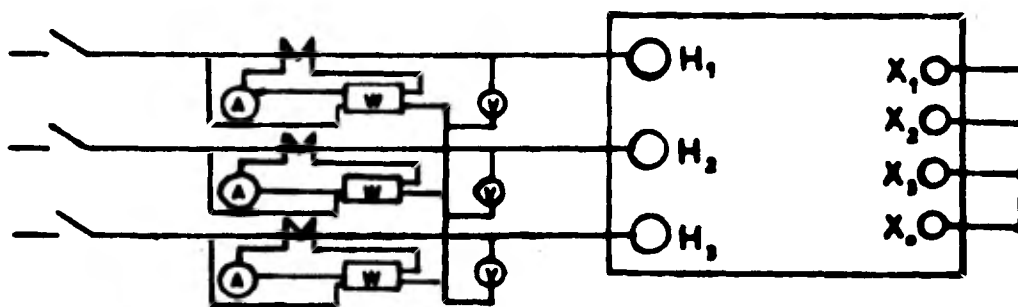


figura 2.4

tiempo de 8 minutos.

Con estos valores se traza una curva de resistencia-tiempo, trazando en el eje de las ordenadas el valor de la resistencia medida y en el eje de las abscisas el tiempo.

Por extra polación de la curva es posible obtener el valor de la resistencia en el instante del corte de la alimentación. La fig. 2.4 nos muestra las conexiones para realizar la prueba y la curva resistencia- tiempo.

2.I4 Prueba de temperatura

La vida de los aislamientos de los transformadores se ve afectada por la temperatura, entre muchos factores.

Cuando se tienen temperaturas mayores de 105°C , la tendencia de los aislamientos a volverse quebradizos se acelera y como en operación se tienen que soportar esfuerzos mecánicos, aumenta la probabilidad de que los aislamientos se rasquen propiciando fallas dieléctricas y cortos circuitos.

Por esta razón, es importante comprobar que el transformador bajo prueba no exceda la temperatura garantizada cuando se tiene la carga nominal. Por lo cual el objetivo de esta prueba es el de comprobar éstos valores.

Existen varios métodos para efectuar ésta prueba, pero el método utilizado para transformadores de potencia es el de carga simulada por corto circuito; método que permite utilizar las mismas conexiones y circuitos de la prueba de la medición -

de pérdidas en el cobre.

Normalmente se pone en corto circuito el devanado de baja tensión y se alimenta por el devanado de alta tensión con cables suficientemente gruesos para soportar una corriente superior a la de carga nominal, ya que se alimenta al transformador con sus watts totales de pérdidas magnéticas y eléctricas.

Este método tiene la ventaja de permitir la medición directa de las pérdidas y de la corriente durante la prueba de elevación de temperatura.

Se deben tener funcionando todos los tipos de enfriamiento como son radiadores, ventiladores y bombas.

Esta prueba no se hace en todos los transformadores que se fabrican sino a petición del comprador o cuando se trate de un diseño nuevo o se realicen modificaciones y si hay -- duda respecto a la temperatura que se tendrá en operación. El transformador debe tener aceite hasta el nivel adecuado y si la unidad tiene conservador, éste debe estar lleno hasta su nivel. La temperatura del medio ambiente se puede medir con varios termómetros colocados en diferentes puntos alrededor de la unidad a una distancia de 2 m y a una altura un poco mayor de la mitad de la altura de la unidad. También se registrara la temperatura del aceite en la parte superior de la unidad -- con un termómetro, el cual se sumerge unos 5 cm en el aceite.-- Es buena práctica utilizar otros termómetros para checar las --

lecturas y para cerciorarse del buen funcionamiento de éstos.

Para lograr en un tiempo menor una temperatura estable en la unidad, se recurre a una sobre carga o restringiendo su sistema de enfriamiento, cerrando las válvulas de los radiadores o dejando sin operar los ventiladores y bombas. Debe tenerse cuidado de que la sobre carga eléctrica no exceda el 150% de la capacidad del transformador para evitar un daño -- por calentamiento excesivo.

El calentamiento forzado se prolonga hasta tener -- una temperatura de aproximadamente 45°C en el aceite superior, para cuando la unidad está diseñada para elevación de 55°C o cuando la elevación esperada sea de 65°C .

Cuando ya se llegó a la temperatura estable se reduce la corriente de carga a su valor nominal y se conserva durante 2 Hrs., transcurridas estas se quita la alimentación y se procede a hacer las mediciones, empezando primero por el devanado de alta tensión y después el de baja tensión.

2.15 Prueba de relación de transformación

Esta prueba se realiza con el objeto de comprobar -- la relación numérica entre los voltajes primario y secundario, relación que debe guardarse también entre el número de vueltas del devanado primario y devanado secundario.

De acuerdo a las normas CCONNIE, 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 debe hacerse a tensión nominal o menor y a frecuencia nominal o mayor y sin carga.

Métodos de prueba de relación

a) Método de los vóltmetros

Se deben usar dos vóltmetros, con transformadores de potencial si es necesario, uno para medir la tensión del devanado de alta tensión y el otro para el devanado de baja tensión.

Se deben leer los dos vóltmetros simultáneamente. Para compensar los errores de los instrumentos, se debe tomar un segundo grupo de lecturas con los vóltmetros intercambiados. - La relación de transformación se determina con el promedio de las lecturas.

Cuando se usen transformadores de potencial, sus relaciones deben ser tales, que den lecturas en los vóltmetros - aproximadamente iguales.

Se deben hacer cuando menos 4 series de pruebas con tensiones distintas que difieran en aproximadamente 10%. Si -- las relaciones calculadas con los valores anteriores, no difieren en más de 1%, el promedio de ellas es la relación de transformación. En caso contrario, las pruebas deben repetirse con otros instrumentos.

La tensión aplicada será:

- 1) 60% del voltaje de placa
- 2) 70% del voltaje de placa
- 3) 80% del voltaje de placa
- 4) 90% del voltaje de placa
- 5) 100% del voltaje de placa

En la fig. 2.5 se muestra la conexión para la medición de la relación de transformación por el método de los --
vóltmetros.

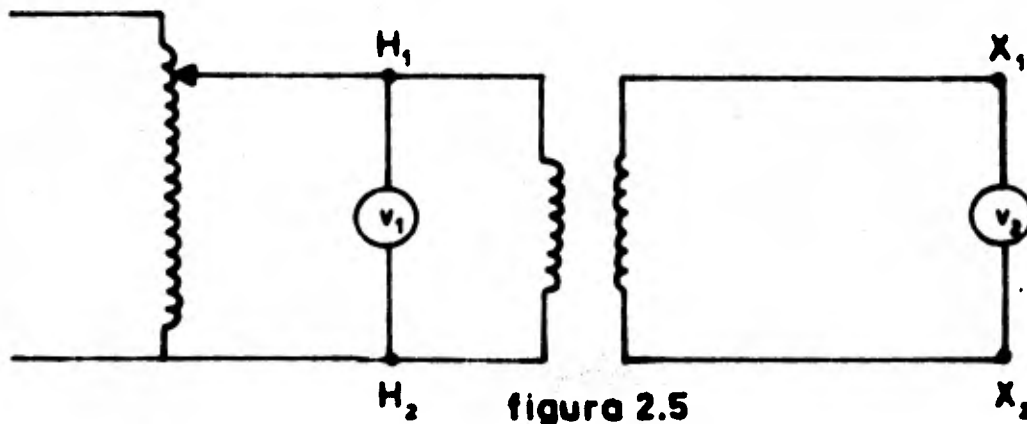


figura 2.5

b) Método del transformador patrón

Por el método de los vóltmetros es necesario aplicar casi voltaje nominal para asegurar adecuados resultados -- y esto es una limitación fuerte para transformadores de potencia, y si solo se usa un pequeño porcentaje del valor nominal del voltaje, la caída de tensión provocada por el instrumento medidor puede introducir un error apreciable.

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

El transformador que se va a probar, se excita en paralelo con un transformador patrón de la misma relación nominal y los otros dos devanados se conectan en paralelo, intercalándose un voltmetro o un detector entre dos terminales de igual polaridad.

Desde luego cabe la posibilidad de que el transformador patrón pueda variar a voluntad su relación y entonces tenemos que, construido en un mismo aparato de medición, dispongamos de transformador patrón, de detector e inclusive del generador para alimentar los aparatos. Este dispositivo es conocido comúnmente como T.T.R. (Transformer turn ratio) es el aparato más utilizado para pruebas de relación de transformación, e inclusive se utiliza para determinar la polaridad y la secuencia de fases.

Este dispositivo T.T.R. es el equipo más completo, incluye generador, transformador patrón de polaridad conocida y relación variable, ampérmetro, voltmetro y un galvanómetro que da la indicación de voltaje en el devanado de alta tensión y que normalmente se usa como detector de cero, el diagrama eléctrico y la conexión de éste dispositivo para medir polaridad y relación en una unidad monofásica se muestra en la --

fig. 2.6.

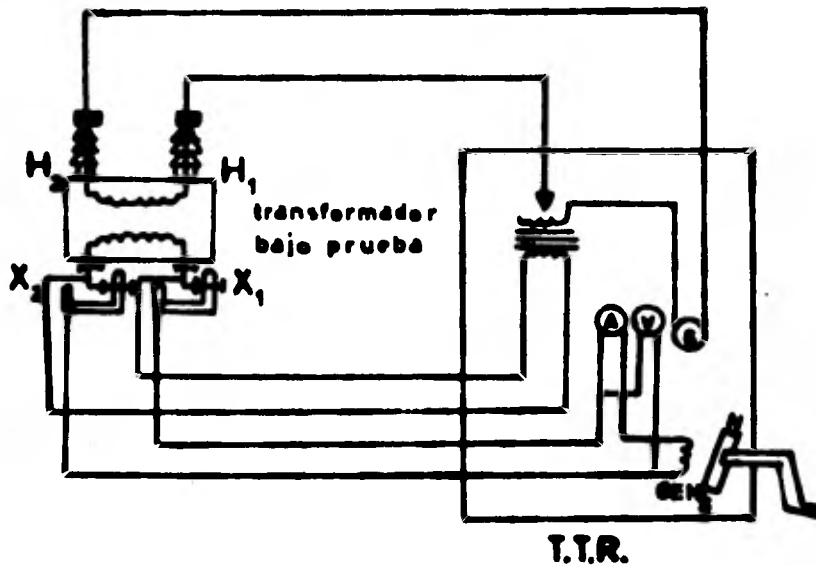


figura 2.6

2.16 Prueba de polaridad

El conocer las terminales de igual polaridad es un dato necesario y definitivo para poder efectuar las conexiones adecuadas de bancos de transformadores.

La ASA (American Standards Association) ha determinado que las terminales de alto voltaje se marcan con H y las de bajo voltaje con X, debiendo utilizar un mismo subíndice numérico en ambas letras cuando las terminales correspondientes sean de igual polaridad.

En la fig. 2.7 se indican los arreglos de los devanados correspondientes a una polaridad sustractiva y a una polaridad aditiva.

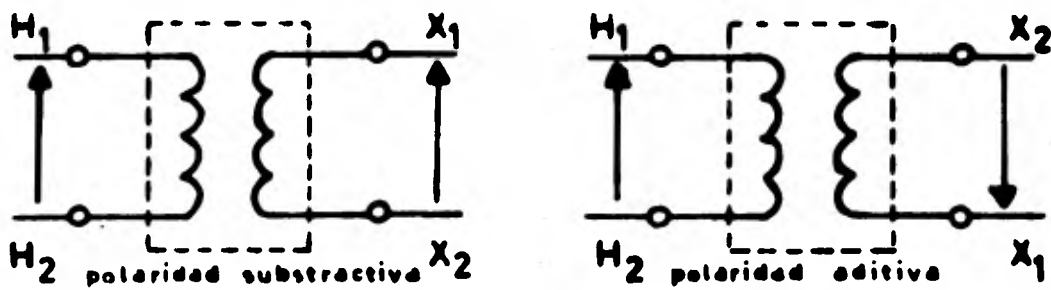


figura 2.7

Si las marcas de polaridad están borradas, manchadas, equivocadas o no vengán impresas, se pueden determinar por:

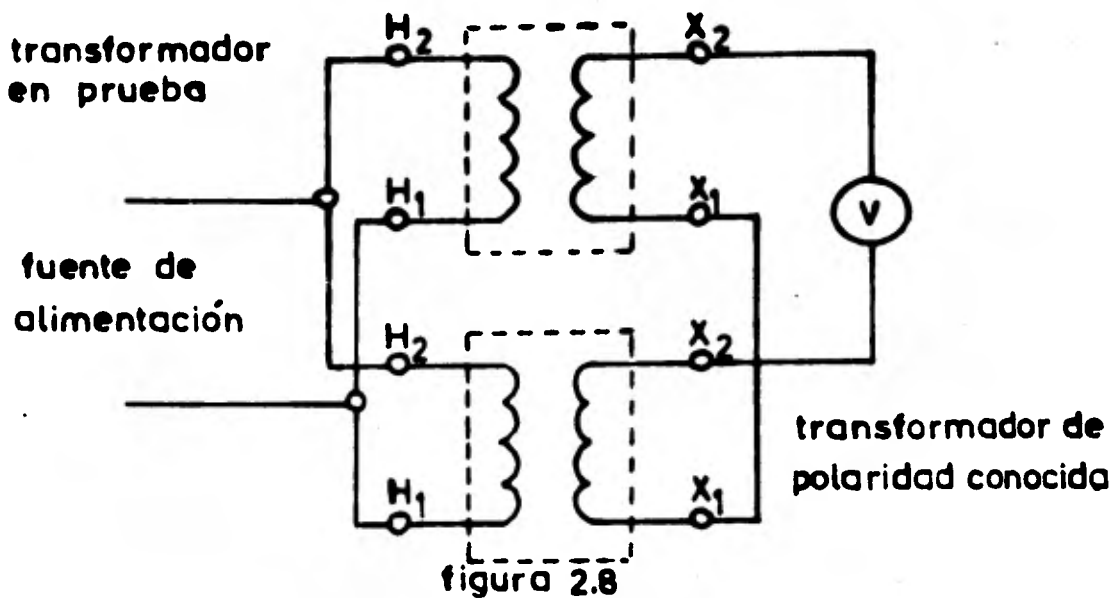
a) Comparación con un transformador patrón

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 de transformación, como se indica en la fig. 2.8.

Con las conexiones mostradas en la figura se aplica una tensión reducida en los devanados de alta tensión.

Cuando se utiliza un voltmetro, éste indica la diferencia de las 2 tensiones secundarias, si la polaridad de los dos transformadores son iguales o indica la suma de las mismas si la polaridad es diferente.

Cuando se utiliza un detector es recomendable que las relaciones de los transformadores sean iguales. La polari



dad de los dos transformadores es idéntica si la indicación -- del instrumento es cero o apenas perceptible.

b) Método de golpe inductivo

En la fig. 2.9 se ilustra la conexión para esta prueba.

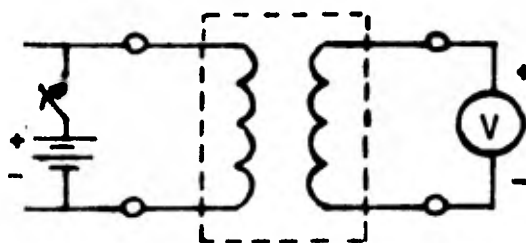


figura 2.9

1) Si al cerrar el interruptor, el voltímetro marca -

dentro de la escala, significa que le fue aplicado a su borne (+) una tensión cuya polaridad era positiva con relación a su otro borne; esto quiere decir que se tiene una polaridad sustractiva.

2) Una deflexión en sentido contrario a la escala nos indica que al borne (-) del voltmetro le fue aplicado un voltaje (+) esto quiere decir que se tiene una polaridad aditiva.

c) Con una fuente de voltaje alterno

En la fig. 2.10 se ilustra la conexión para esta prueba.

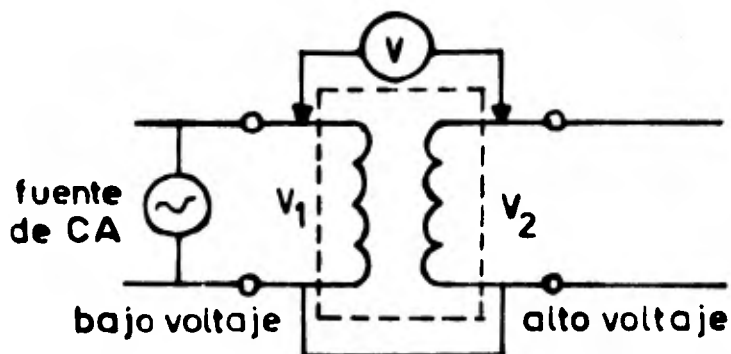


figura 2.10

1) Si el voltaje medido en el voltmetro tiene un valor igual a $V_1 + V_2$ su marca de polaridad será aditiva, y las terminales que están en contacto con V deben tener diferentes polaridades.

2) Si el voltaje medido en el vóltmetro tiene un valor de $V_1 - V_2$, su marca de polaridad será sustractiva, y las terminales que estan en contacto con V deben tener la misma -- polaridad.

La polaridad de cada fase de una unidad trifásica, - se determina de la misma manera como se ha descrito para trans formadores monofásicos y se aplican las mismas limitaciones.

2.17 Prueba de corto circuito

La prueba de corto circuito tiene como fin encontrar las pérdidas en el cobre, ó pérdidas por efecto joule que tienen lugar en los embobinados.

Se trata de establecer las corrientes nominales o de placa en los embobinados del transformador, para lo cual se podría conectar una carga en el transformador por probar para -- que circularán las corrientes eléctricas nominales, pero tendríamos el inconveniente de;

1) Dilatar demasiado tiempo en encontrar la carga -- justa que hiciera circular las corrientes nominales.

2) Se desperdiciará energía cuantiosa por efecto joule en la carga seleccionada mientras dure la prueba.

3) En transformadores de extra alto voltaje se complicaría más la selección de la carga, además muy costoso el - suministro de voltaje nominal y peligroso.

El procedimiento de esta prueba es poner en corto --

circuito al lado que demanda más corriente (baja tensión) y alimentar por el lado de alta tensión (demanda menos corriente).

Si aplicamos voltaje nominal, circularán corrientes tan altas que quemarían los embobinados; por lo tanto es obvio entonces que debe haber un valor de voltaje entre 0 y nominal que haga circular las corrientes nominales, este valor fluctúa entre el 3 y 7% del voltaje nominal. El diagrama siguiente nos ilustra las conexiones para esta prueba, fig. 2. II.

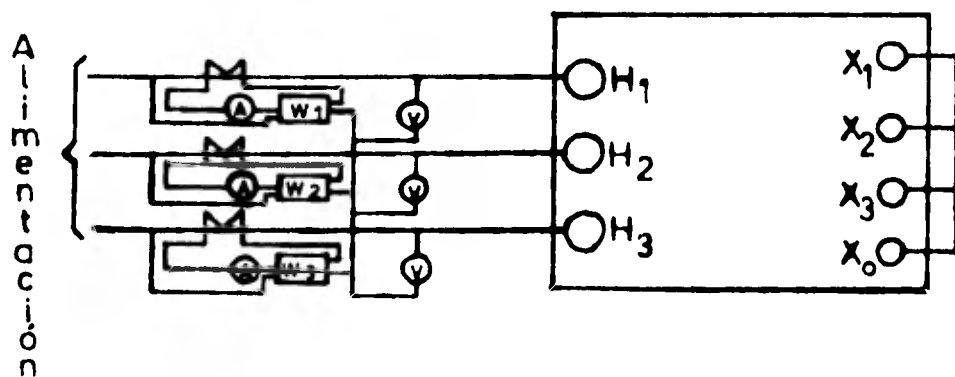


figura 2.11

2.18 Prueba de circuito abierto

La prueba de circuito abierto nos sirve para determinar de una manera sencilla y precisa, las pérdidas magnéti-

cas o del núcleo y para obtener los parámetros del circuito-equivalente que representa al transformador.

Se denomina circuito abierto porque el embobinado-secundario no tiene carga conectada por lo que tendremos circulando solamente la corriente de excitación la cuál representa aproximadamente del 2 al 6% de la corriente nominal y circulará exclusivamente por el núcleo. Las pérdidas en el núcleo están en función del flujo magnético y la frecuencia, - por lo que será necesario que la prueba se realice a voltaje nominal para obtener así el flujo nominal.

Los instrumentos de medición se conectan del lado de baja tensión porque:

- a) Es más fácil el suministro de voltaje
- b) Existe mayor seguridad para el personal
- c) Los aparatos quedan protegidos ya que operan con corrientes pequeñas y voltaje de baja tensión.

En la fig. 2.I2 se ilustra la conexión para esta prueba.

2.I9 Prueba de potencial aplicado

Esta prueba se considera dentro de las dieléctricas y es una prueba destructiva, cuyo propósito es determinar el estado de los aislamientos del transformador y determinar que estos han sido diseñados para soportar las pruebas del aislamiento especificado.

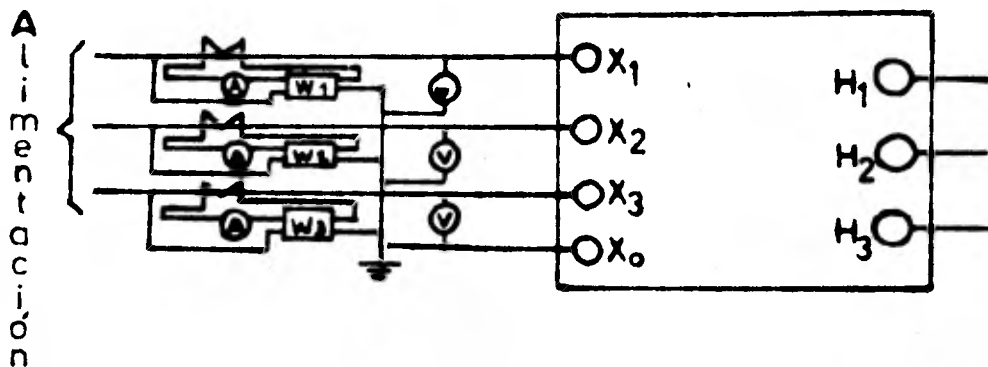


figura 2.12

Esta prueba por ser destructiva no se debe efectuar cuando los aislamientos han envejecido, por otro lado al igual que la prueba de resistencia de aislamiento, sirve para detectar la humedad que puede tener el aislamiento. Además se verifica que la tensión aplicada según la norma establecida no rompa el dieléctrico durante el tiempo que dure la prueba.

Antes de iniciar la prueba debe tenerse cuidado de - que el tanque del transformador esté aterrizado, de que la unidad esté llena de aceite hasta el nivel normal y que todas las terminales de los transformadores de corriente estén conectadas en corto circuito entre sí y aterrizadas. El aceite debe haber estado en reposo un mínimo de 4 Hrs, si tienen boquillas con -

aceite se deben purgar éstas.

Existe una norma que dice que un transformador debe tener una resistencia mínima de 1 megaohm por cada KV de clase del transformador a 60°C o clase de aislamiento, en la tabla 2.I se indica la tensión aplicada para cada clase de aislamiento.

Las conexiones para esta prueba se efectúan en la misma forma que para la prueba de resistencia de aislamiento, sólo que en vez de ser el megger la fuente de potencial, es un transformador elevador.

La prueba en si consiste en aplicar durante 60 seg. una tensión de acuerdo a la clase de aislamiento, entre un devanado y los demás devanados y tierra, a una frecuencia de 60 HZ y verificar con esto que el aislamiento se encuentra en buenas condiciones.

Para esto se hace uso de un transformador elevador, que permita aplicar la tensión gradualmente desde un valor --cero hasta el valor de prueba.

El procedimiento para medir el voltaje que debe aplicarse es utilizar un voltmetro de esferas calibrado para una abertura entre esferas correspondiente al voltaje de prueba --de la clase de aislamiento.

Al aplicar tensión e ir la aumentando paulatinamente llega un instante en el cual sobreviene una descarga entre --ellos cuya tensión de aparición es proporcional al diámetro --

de las mismas, y la separación entre ellas, los puntos sobre las esferas que están más cercanos uno del otro se llaman puntos de flameo, en la práctica el flameo entre esferas puede ocurrir entre otros puntos vecinos, la superficie en estas esferas debe estar libre de barniz, grasa y conservarse limpias y secas pero no necesariamente pulidas. En la tabla 2.1 se muestran los valores correspondientes de apertura de esferas para pruebas de potencial aplicado, las que se utilizan para pruebas de fabrica en México son las esferas de 500 mm de diámetro.

Una vez conectado el transformador bajo prueba, el transformador de prueba y las esferas previamente separadas al valor requerido, se inicia la aplicación de la tensión de prueba desde el valor menor posible y se va incrementando gradualmente hasta el instante en que sobreviene el flameo en las esferas. La tensión para la cual ocurrió el flameo es la tensión real de prueba y es la que debe aplicarse durante 60 seg.

Para la realización de esta prueba, debe evitarse que la razón de incremento de tensión sea menos de 3 KV/seg., porque de otra forma se puede lograr una ionización del aire entre las esferas y el arco puede ocurrir en un valor de tensión relativamente bajo que originaría una prueba falsa.

Cuando ocurre una falla en el aislamiento, normalmente se aprecian burbujas en el aceite y se puede escuchar -

un fuerte ruido en el interior del aparato. En ocasiones hay fallas que son originadas por burbujas de aire atrapadas en el interior del aceite, para evitar esto se aplican voltajes reducidos menores del 50% del valor de prueba durante un lapso que puede ir de 1 a 5 minutos, después se procede a la prueba.

Cuando la falla ocurra entre devanados, además del ruido tiene la característica que el transformador vomita aceite, debido a la sobrepresión originada por la falla.

Para transformadores de capacidad mayores de 100 KVA probados con tensiones mayores de 50 KV, la medición de la tensión de prueba se debe hacer con un voltmetro de esferas, para tensiones menores es aceptable realizar la prueba con la medición de un voltmetro conectado através de un transformador de potencial.

Si el transformador presenta una clase de aislamiento reducida, situación que se presenta en transformadores con neutro disponible para aterrizar, la tensión de prueba es la correspondiente al aislamiento del neutro. El hecho de que la prueba se efectúe a una tensión menor que la correspondiente a las terminales de línea no implica que éstas no estén diseñadas y construidas para aislamiento completo.

En la fig. 2.13 se ilustra el diagrama de conexiones para esta prueba. Aquí podemos ver que el transformador bajo-

prueba se puede representar, como una capacitancia cuyo dieléctrico está constituido por aceite, cartones, papel, cintas de algodón, micarta, madera, porcelana, etc.

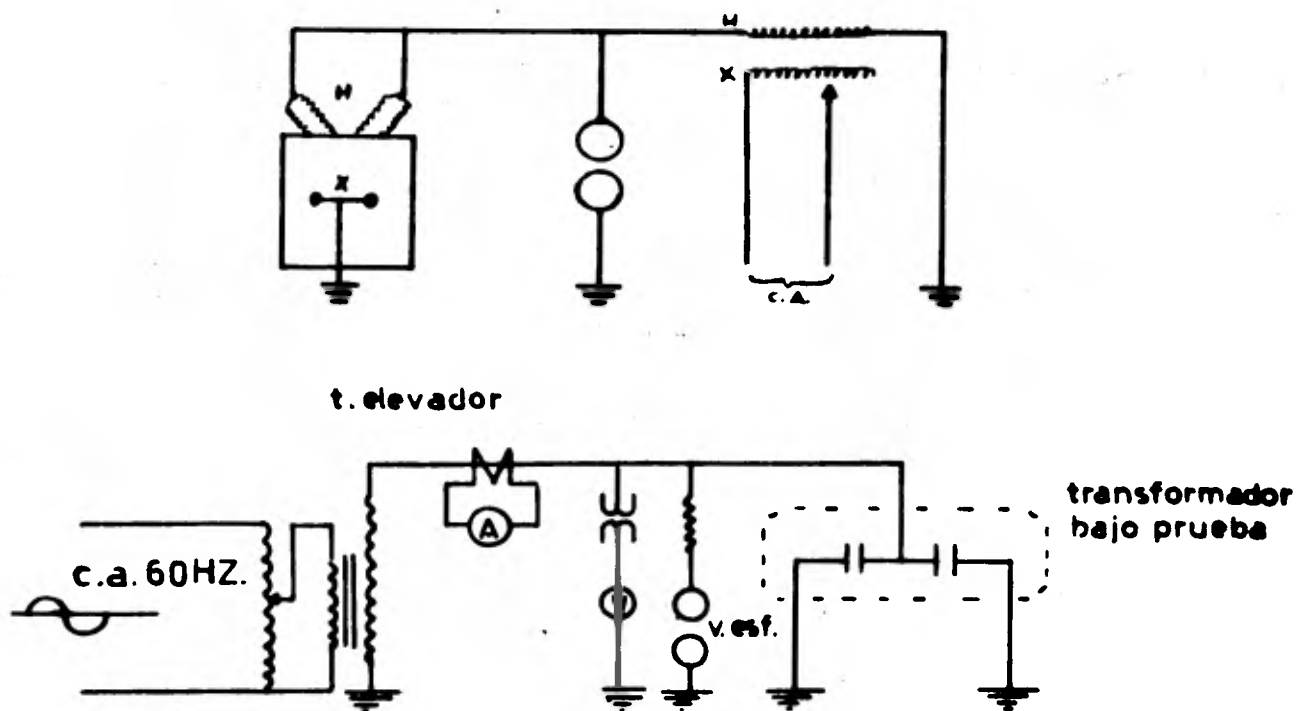


figura 2.13

2.20 Prueba de potencial inducido

Esta prueba es considerada también como prueba dieléctrica, y se realiza con el propósito de verificar que la calidad del aislamiento entre vueltas de los devanados sea aceptable y determinar si en alguna de las pruebas anteriores a las que se ha sometido el transformador a tensiones entre

devanados y tierra, han dañado al aislamiento.

La prueba de potencial inducido consiste básicamente en inducir en los devanados del transformador una tensión de -- 200% de la tensión nominal.

Generalmente los transformadores están diseñados para trabajar cerca de la zona de saturación y la tensión inducida solo puede aumentar con la frecuencia.

Por lo cual la frecuencia de la tensión de prueba debe ser como mínimo el doble de la nominal y con esto se logra limitar la densidad de flujo y no se satura al núcleo.

A medida que es mayor la frecuencia la severidad de la prueba aumenta, por lo que se ha establecido que la duración de la prueba no sea mayor de 7200 ciclos.

Sin embargo si se usan frecuencias más altas de 120-HZ la severidad de la prueba se incrementa y por esta razón, - la duración debe reducirse.

El voltaje se comienza a aplicar desde un mínimo posible y se va incrementando paulatinamente hasta el valor completo de la prueba en no menos de 15 seg.

Se sostiene el valor por el tiempo especificado y se reduce hasta el valor mínimo en no menos de 5 seg.

La corriente de carga incrementada correspondiente - a la alta frecuencia y al alto voltaje de la prueba de potencial inducido en los transformadores, puede producir una eleva

ción grande de voltaje ya que la reactancia del transformador es incrementada por la frecuencia. De aquí que para una onda impresa de voltaje de forma senoidal el voltaje inducido en el devanado de alta tensión puede ser mayor que el correspondiente a la relación de transformación. A causa de esto se conecta un voltmetro de esferas entre la terminal de alta tensión y tierra, el cual sirve para conocer la tensión de prueba correcta, además si se le da una calibración en la apertura de un 10% más puede utilizarse durante la prueba como explosor contra sobre tensiones.

A continuación tenemos en la fig. 2.14 el diagrama eléctrico para ésta prueba.

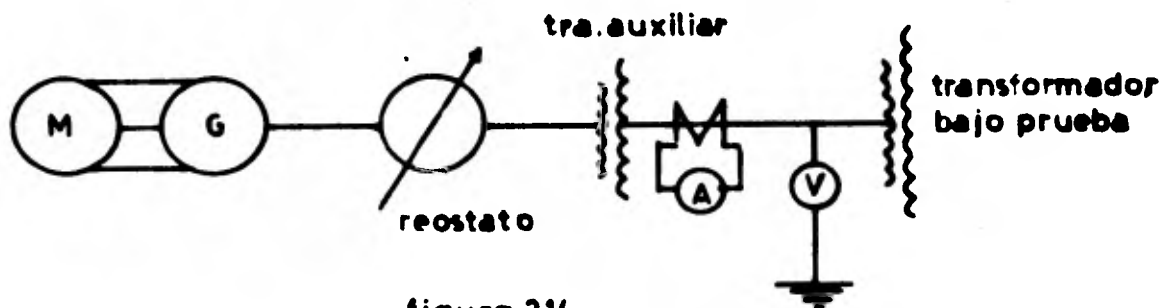


figura 2.14

Es importante después de ésta prueba hacer un chequeo de la relación de transformación para asegurarse que los esfuerzos dieléctricos no hayan dañado o abierto alguna conexión que pudiera haber estado floja o débil.

VALORES DE PRUEBA DIELECTRICA TRANSFORMADORES SUMERGIDOS EN ACEITE Y SEPARACION DE ESFERAS CORREGIDO A 2200MSNM A 25°C

CLASE de Aislamiento (KV)	Prueba a baja frec. (aplicado) (KV)	IMPULSO			Separación esferas en mm para prueba a baja frecuencia			
		Ondacom. (GIL) KV cresta	KV cresta	Tiempo min corte Apog	Esferas de 300 mm	Esferas de 250 mm	Esferas de 200 mm	Esferas de 150 mm
12	10	45	54	1.5	—	—	—	5.3
25	15	60	69	1.5	—	—	—	8.5
50	19	75	88	1.6	—	—	—	11.2
87	26	95	110	1.8	—	16.0	—	15.0
15	34	110	130	2.0	—	21.0	—	21.6
19	40	125	145	2.25	—	25.0	—	26.2
25	50	150	175	3.0	—	32.0	—	36.5
36.5	70	200	230	3.0	47.35	45.8	—	—
46	95	250	290	3.0	65.5	66.0	—	—
69	140	350	400	3.0	99.0	107.0	—	—
92	185	450	520	3.0	135.2	169.0	—	—
115	230	550	630	3.0	177.5	205.0	—	—
138	275	650	750	3.0	238.0	—	—	—
161	325	750	865	3.0	318.5	—	—	—
180	360	825	950	3.0	406.0	—	—	—
196	395	900	1035	3.0	516.0	—	—	—
215	430	975	1120	3.0	645.0	—	—	—
230	460	1050	1210	3.0	775.0	—	—	—
260	520	1175	1350	3.0	—	—	—	—
267	575	1300	1500	3.0	—	—	—	—
315	630	1425	1640	3.0	—	—	—	—
345	690	1550	1780	3.0	—	—	—	—
375	750	1675	1925	—	—	—	—	—
400	800	1800	2070	—	—	—	—	—
430	860	1925	2220	—	—	—	—	—
460	920	2050	2360	—	—	—	—	—
490	980	2175	2500	—	—	—	—	—
500	1040	2300	2650	—	—	—	—	—
575	1090	2425	2800	—	—	—	—	—

NORMAS DGN-1-116 (CCONNIE)

Tabla 2.1

2.2I Prueba de impulso

Ya mencionamos anteriormente que el aislamiento es parte vital en los transformadores de potencia y que una buena medida es su respuesta a los esfuerzos eléctricos.

Hasta 1937 se les sometía a pruebas de potencial -- aplicado e inducido solamente, pero a medida que se han estudiado los fenómenos de sobre voltaje producidos por perturbaciones atmosféricas y maniobras en los sistemas eléctricos, se ha llegado al convencimiento de que el transformador puede -- quedar sujeto a distribuciones internas de tensión que no guardan un comportamiento lineal definido por la relación de volts por vuelta, sino que presentan también distribuciones que son función inicialmente de las capacidades de los devanados y finalmente de las inductancias de los mismos.

Estos conceptos han originado la prueba llamada de impulso cuyo objetivo consiste en someter al transformador al efecto de una onda de muy alto voltaje, que sea semejante al efecto de una descarga atmosférica.

El aislamiento de los devanados de un transformador es seleccionado de acuerdo a un nivel básico de aislamiento, para soportar los voltajes residuales de origen atmosférico.

De acuerdo a lo anterior los transformadores están diseñados para resistir descargas atmosféricas y esto se comprueba a través de la prueba de impulso.

Para esta prueba se ha establecido una onda patrón-normalizada a un valor de 1.5×40 microsegundos, lo cual significa 1.5 microseg., para alcanzar el nivel máximo de la onda y 40 microseg., para decrecer a la mitad de su valor. El valor de cresta, es lo que se conoce como "Nivel Básico de aislamiento" (B.I.L.), en la fig. 2.15a se representa este tipo de onda, de la cual se requiere que los transformadores, conforme a éstos valores deban soportar el valor de prueba para su correspondiente clase de aislamiento.

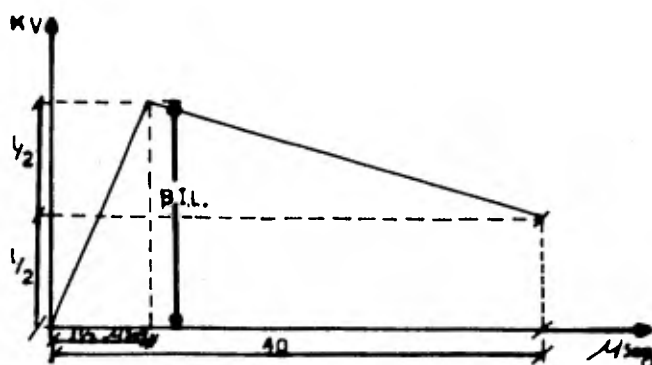
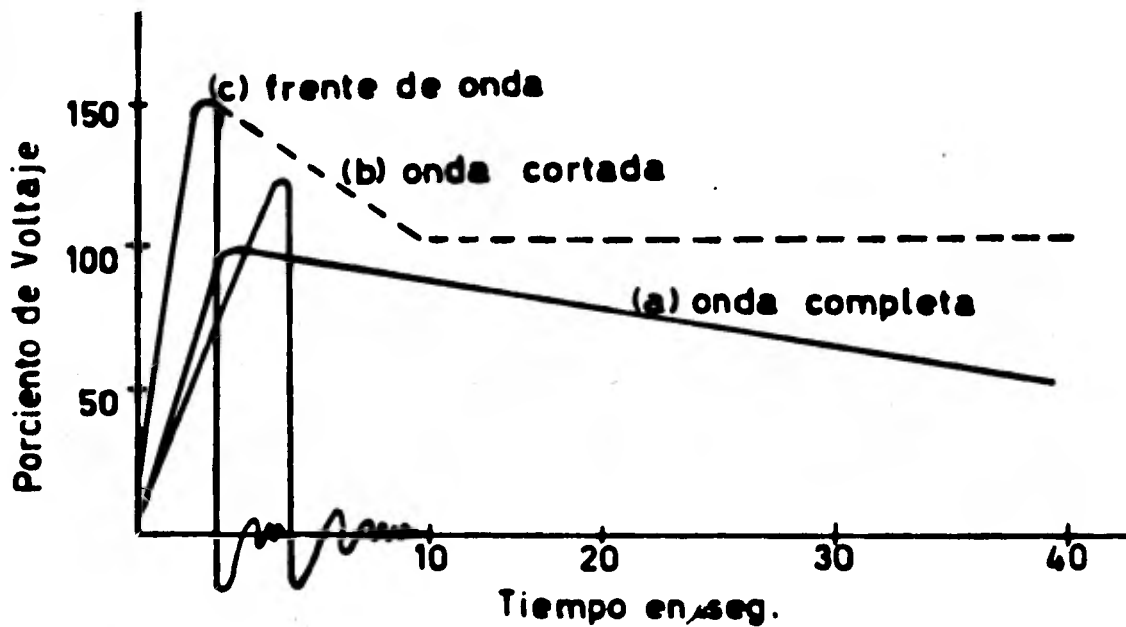


figura.2.15a

De lo anterior lo que más cuidado y atención requiere es el transitorio que puede presentarse por tres formas de onda básicas, onda completa, onda cortada y frente de onda. - En la fig. 2.15b se representan éstas formas en su magnitud y tiempo aproximados.

Si una perturbación atmosférica viaja por una línea y llega al transformador su forma de onda se aproxima a la de onda completa. Esta es una onda que se eleva desde cero hasta un



Formas de Onda de Impulso

figura 2.15b

valor de cresta en 1.2 microsegundos y decae a un valor igual a la mitad de la cresta en 50 microsegundos.

La onda anterior crea un arco entre partes vivas y tierra después de alcanzar la cresta se asemeja con la onda recortada que se escoge un 15% mayor en magnitud que la onda completa.

Si se tiene una descarga muy severa directamente o muy cerca de una terminal del transformador, el sobrevoltaje se puede elevar pronunciadamente hasta que ocurre el flameo que provoca un colapso brusco y repentino de la tensión, ésta condición la representa el frente de onda.

Estas ondas son muy diferentes en duración y en velocidad de variación del voltaje, y consecuentemente, producen diferentes reacciones en los devanados del transformador. La onda completa por su duración relativamente larga, permite que se desarrollen oscilaciones mayores en el devanado y esfuerzo no sólo entre vueltas y secciones, sino también altos voltajes entre devanados y tierra.

La onda recortada, por su poca duración produce esfuerzos en las terminales de los devanados debido a su amplitud y debido a su cambio brusco crea esfuerzos mayores entre vueltas y secciones.

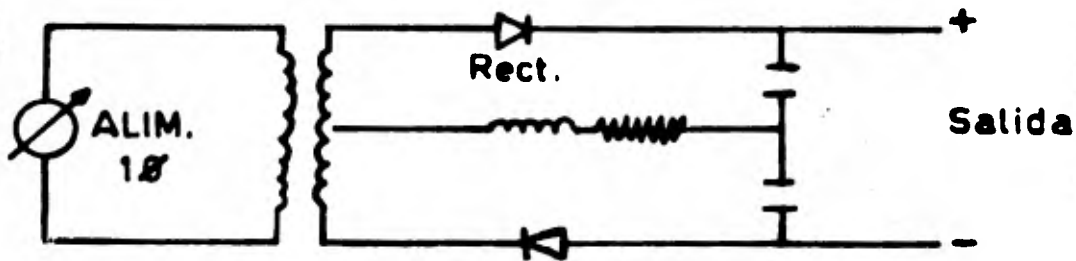
La onda cortada en el frente, es aún más corta de duración y produce voltajes muy elevados en los extremos de los devanados y de los devanados y tierra y por su corte brusco crea esfuerzos muy elevados entre vueltas y secciones y en los extremos de los devanados.

Las pruebas de impulso se deben hacer solamente cuando se solicite y sólo en los devanados que se especifiquen, estando el transformador sin excitación.

En general cada una de las terminales se debe probar por separado y las terminales del devanado que no este en prueba, debe conectarse directamente a tierra o a través de una resistencia a fin de limitar el voltaje en los mismos.

Las ondas para la prueba de impulso las genera un -

dispositivo llamado generador de impulso que consiste esencialmente de capacitores arreglados para conexiones serie-paralelo que se cargan con corriente directa mediante rectificadores y se descarga a través de una red cuya función es dar forma a la onda de descarga. La fuente de C.D. para cargar los capacitores es un rectificador doble, cuyo circuito básico se ilustra en la fig. 2.16.



Rect.
figura 2.16

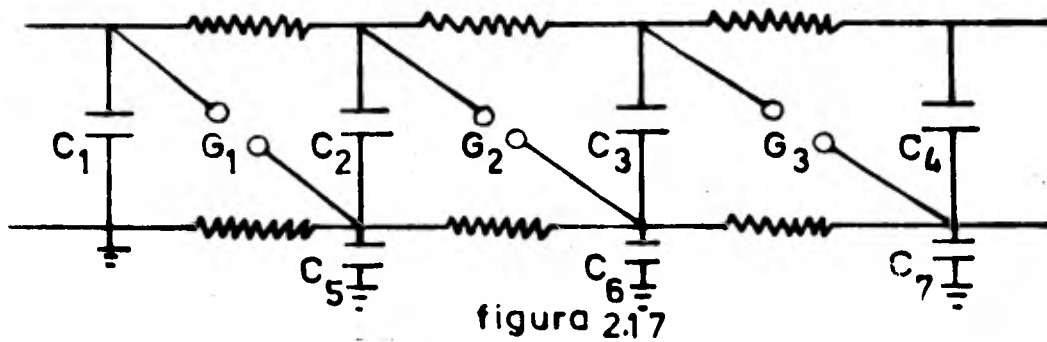
Durante $1/2$ ciclo uno de los capacitores se carga -- con el voltaje secundario del transformador y durante el otro siguiente $1/2$ ciclo se carga el otro capacitor, entonces el voltaje total de circuito abierto a tierra es el doble del voltaje del secundario del transformador, éste voltaje puede ajustarse variando el voltaje del primario del transformador.

Pueden incluirse resistores en el circuito entre los diodos y los capacitores para limitar el valor de pico de la corriente.

La presencia de éstos resistores en el circuito de carga del generador significa que se requiere un tiempo apre--

ciable para cargar el mismo. Debe tenerse cuidado de asegurarse que la descarga no se inicie antes que el generador alcance su plena carga.

El arreglo preferido para voltajes de cualquier magnitud es el llamado circuito MARX que es el que se muestra en la fig. 2.17.



Para la función de carga, los capacitores están en paralelo, a través de resistores que separan cada banco. La carga es progresiva, el capacitor más cercano al rectificador alcanza el voltaje pleno primero, y posteriormente el siguiente capacitor y así sucesivamente hasta que el más lejano quede con el voltaje pleno. Cuando el circuito, se dispara, todos los pasos quedan en serie mediante los explosores mostrados.

Disparar un generador tipo Marx puede presentar problemas, considerando el circuito anterior. Los capacitores C_1 , C_2 , C_3 , C_4 son los principales del generador, C_5 , C_6 , C_7 son capacitores parásitos a tierra del generador. Aunque todas las partes del generador presentan capacitancias a tierra, éstas

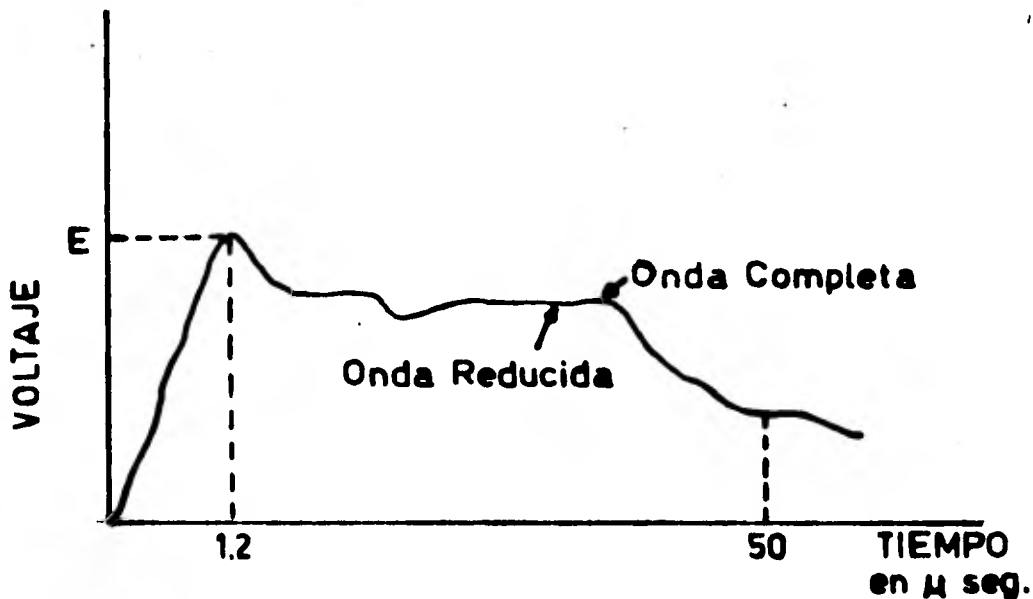
son las importantes en el disparo. Cuando los capacitores están completamente cargados el lado superior de todos los capacitores está a +V y el lado inferior a potencial de tierra. - Ahora disparando el primer paso el extremo inferior de C_2 se va a +V y el superior a + 2V, ahora el extremo inferior de C_3 estaba inicialmente a 0V y se encuentra cerca de tierra mediante la capacitancia C_6 , ésta se pone a + 2V a través del explosor cuando flamea G_2 , entonces la parte superior del capacitor C_3 ve + 3V y así continúa el proceso a través del resto del generador, si G_2 no flamea inmediatamente C_6 se carga a +V y queda sólo a +V a través de G_2 y el proceso falla. Por esto es muy importante que los primeros explosores estén ajustados cuidadosamente, ésta situación no es tan crítica en los demás explosores.

INTERPRETACION DE LOS OSCILOGRAMAS DE TENSION DE LA ONDA COMPLETA.

La onda completa es la prueba más útil para detección de fallas. El voltaje aplicado en ésta onda es el correspondiente al nivel de aislamiento. Antes de tomar el oscilograma, se dispara al transformador bajo prueba una onda de voltaje igual en forma a la onda completa pero a un valor de tensión reducida, ésta onda reducida nos sirve como punto de referencia y comparación con las ondas completas.

Al comparar éstos oscilogramas para un mismo devana

do y obtenemos una correspondencia casi perfecta de las ondas, es decir que si al superponer la onda completa reducida con la onda completa al 100% se obtiene una correspondencia casi exacta, puede considerarse que el devanado del transformador está en perfectas condiciones y ha pasado la prueba, ver la fig. 2.18.



Oscilogramas de las formas de onda de voltajes completa y reducida obtenidas con una superposición perfecta. El devanado soportó la secuencia completa de la prueba de impulso.

Figura 2.18

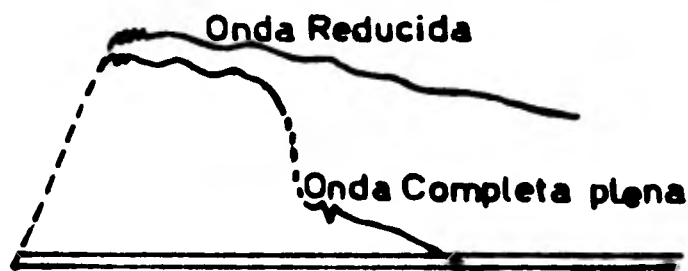
Tomando como referencia éstas dos ondas podemos asegurar si el transformador está en buenas condiciones no solamente de embobinados si no que no tiene materiales extraños, - y que sus derivaciones no han fallado, de igual manera sus --

terminales de línea, o sus ductos de aceite.

Cuando aparecen desviaciones en las formas de ondas, aunque sean muy leves o aun pequeñas oscilaciones al azar sobre la cola de la onda, puede ser indicio de falla en el transformador.

Las fallas más notorias se aprecian por la aparición de humo, burbujas, ruidos y cambios notables en las oscilaciones, cualquier discrepancia en la comparación de las ondas significa falla en el devanado probado.

Las fallas grandes generalmente las podemos observar como un decaimiento que aparece en la onda completa plena antes de alcanzar los 50 microsegundos. En las siguientes figuras -- tenemos ilustrados diversos tipos de fallas.



En ésta curva tenemos el cambio típico producido por una falla entre una parte cercana a la terminal de línea y tierra.

Figura 2.19

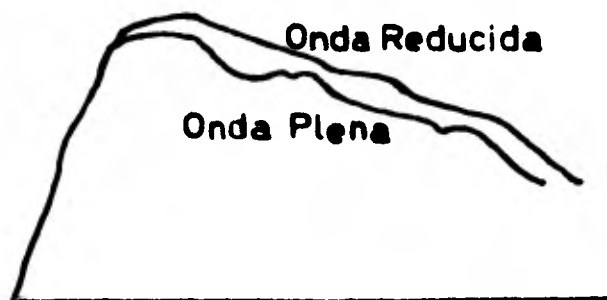
En la figura 2.20 se muestra una falla de una porción de devanado localizada aproximadamente a la mitad de la terminal de línea, aquí al tenerse un corto circuito parcial en el-



Figura 2.20

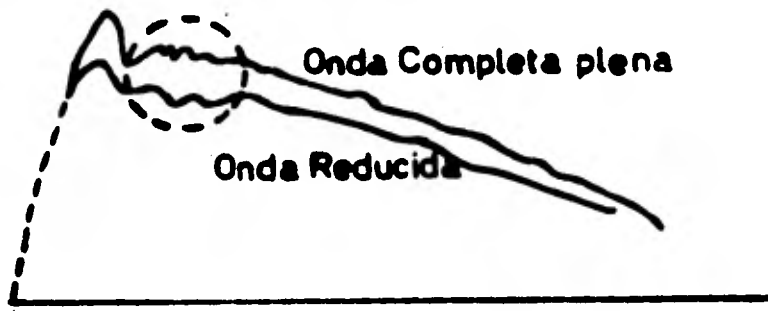
devanado se reduce la impedancia del mismo y se acorta la cola de la onda.

Cuando se presenta una desviación hacia abajo en la onda completa una vez pasado el pico tendencia que no aparece en la onda reducida, es signo de una falla interna, a continuación se mostrará el oscilograma de algunas de éstas fallas, que como se podrá observar es similar al primer oscilograma donde también tenemos una falla interna.



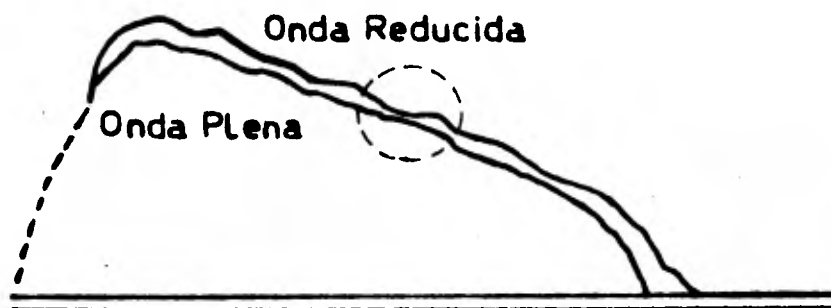
Falla bobina-bobina, o por efecto corona interno muy intenso.

Fig. 2.21



Falla entre Bobina-Bobina

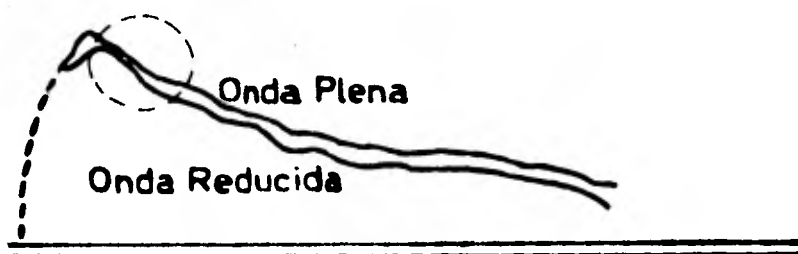
figura 2.22



Falla entre vuelta-vuelta en las derivaciones o taps en la parte media del devanado.

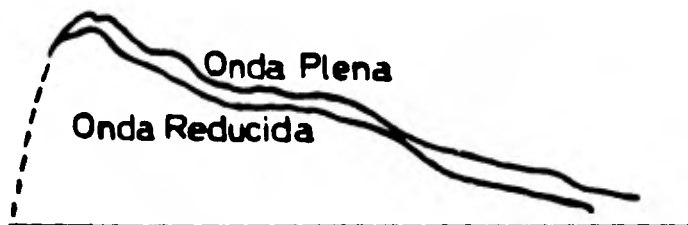
figura 2.23

Las siguientes dos figuras nos ilustran fallas donde el comportamiento de las ondas es diferente, debido al lugar de la falla y al por ciento de devanado fallado.



La figura nos muestra el resultado de una prueba en la que el 3% de devanado falló a 96% de una terminal de línea.

figura 2.24



Esta figura nos muestra el resultado de una prueba en la que falló el 0.2% de devanado a 35% de la terminal de línea.

figura 2.25



Por último se muestra una falla de un ducto de aceite al aplicar la onda completa.

figura 2.26

INTERPRETACION DE LOS OSCILOGRAMAS DE ONDAS CORTADAS Y FRENTES DE ONDA.

Los esfuerzos producidos en los devanados por la aplicación de ondas completas son a lo largo de los devanados completos.

Las ondas cortadas generalmente producen esfuerzos grandes en la porción de los devanados cercana a la terminal de línea.

La detección de fallas usando oscilograma de ondas cortas es más difícil que con ondas completas. La prueba de impulso con ondas cortadas no dan oscilaciones idénticas después del corte a menos que los tiempos al momento del corte sean los mismos. Ha habido ocasiones en las que se ha considerado que un devanado ya ha pasado las pruebas de ondas cortadas, aunque las oscilaciones producidas cerca de la línea después del corte han sido parecidas pero no idénticas, al comparar dos ondas cortas.

A continuación tenemos dos ondas con desviaciones considerables, indicativas de falla. Cuando las desviaciones se encuentran antes del corte, es indicio más posible de que ha ocurrido una falla.

Algunas fallas causadas por ondas cortadas a veces se detectan por que la onda completa puede no causar una recuperación del arco en la falla producida. Para reducir lo anterior, es recomendable aplicar la onda completa tan pronto como sea posible después de las ondas cortadas para reducir las probabilidades de que el punto fallado en las ondas cortadas se recupere y no aparezca en la onda completa.

INTERPRETACION DE LOS OSCILOGRAMAS DE ONDAS CORTADAS Y FRENTES DE ONDA.

Los esfuerzos producidos en los devanados por la aplicación de ondas completas son a lo largo de los devanados completos.

Las ondas cortadas generalmente producen esfuerzos grandes en la porción de los devanados cercana a la terminal de línea.

La detección de fallas usando oscilograma de ondas cortas es más difícil que con ondas completas. La prueba de impulso con ondas cortadas no dan oscilaciones idénticas después del corte a menos que los tiempos al momento del corte sean los mismos. Ha habido ocasiones en las que se ha considerado que un devanado ya ha pasado las pruebas de ondas cortadas, aunque las oscilaciones producidas cerca de la línea después del corte han sido parecidas pero no idénticas, al comparar dos ondas cortas.

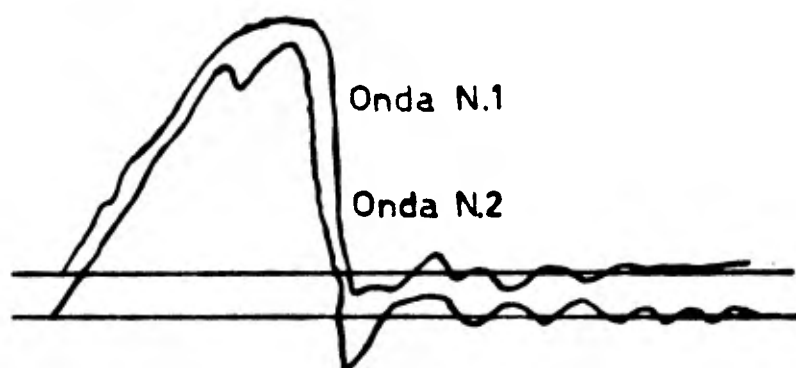
A continuación tenemos dos ondas con desviaciones considerables, indicativas de falla. Cuando las desviaciones se encuentran antes del corte, es indicio más posible de que ha ocurrido una falla.

Algunas fallas causadas por ondas cortadas a veces se detectan por que la onda completa puede no causar una recuperación del arco en la falla producida. Para reducir lo anterior, es recomendable aplicar la onda completa tan pronto como sea posible después de las ondas cortadas para reducir las probabilidades de que el punto fallado en las ondas cortadas se recupere y no aparezca en la onda completa.



Dos ondas cortadas que corresponden perfectamente.

figura 2.27



Dos ondas cortadas que denotan falla.

figura 2.28

2.22 Pruebas a boquillas.

Prueba de collar caliente.

Este tipo de prueba se efectúa en cualquier tipo de boquilla ya que una falla de una fuga en el pico de la boquilla acepta humedad en la cámara o deterioro en la porcelana.

Esta prueba puede ser fácilmente aplicada, incrementando la tensión en el aislamiento sobre las regiones, para localizar la humedad o deterioro antes de que haya progresado suficientemente.

Dichas pruebas son conocidas como collar caliente --

simple, collar caliente multiple y F.P.

El equipo utilizado en esta prueba es el mismo que se utilizo en el punto 2.I2.

SIMPLE COLLAR CALIENTE: En esta prueba el collar es energizado por el aparato de prueba y el centro del conductor de la boquilla es aterrizado. La prueba es usualmente hecha con un collar de metal alrededor de la porcelana en la parte superior, si los mVA o los mW son apreciablemente mas altos que lo normal, entonces una segunda prueba es efectuada, removiendo el collar a la segunda falda, este procedimiento debe ser efectuado hacia las siguientes faldas como sea necesario para determinar como la falla ha progresado.

En la prueba de collar caliente, se deberá tener -- cuidado que el collar usado esté bien apretado alrededor de la boquilla, asegurando un buen contacto en la porcelana, si hay un pobre contacto entre el collar y la porcelana, puede dar resultados indeseables.

MULTIPLE COLLAR CALIENTE: Esta prueba puede ser efectuada en todas las boquillas y esencialmente es la misma que la prueba simple de collar caliente con la excepción de dos o mas collares son puestos en cada falda, estos collares son conectados juntos y energizados por el aparato de prueba y el centro del conductor de la boquilla aterrizada.

El rango de los mW para que una boquilla sea accepta

da como buena deberá ser menor de 9 mW, mayor de este valor se deberá investigar.

FACTOR DE POTENCIA A BOQUILLAS: Para esta prueba se aplica el método de collar caliente múltiple, en el que por medición de la corriente y pérdidas dentro de un grupo de collares en paralelo y un conductor central, nos da una indicación de las condiciones del aislamiento en la región superior de la boquilla.

Debe hacerse notar que en una boquilla tipo condensador esta prueba también nos da una indicación de contaminación y/o deterioración en todo lo largo de la boquilla.

Normalmente las boquillas actuales traen grabado en su placa el F.P. obtenido en fábrica, obviamente el F.P. medido en el campo se deberá comparar con este y siempre son menores de 1%.

Todas las pruebas deberán corregirse a una temperatura de 20°C. El detalle de conexiones se puede ver en la fig. - 2.29.

2.23 Métodos de secado

Cuando se determina que es necesario un secado, uno ó más de los métodos siguientes deberá ser aplicado dependiendo de las facilidades con que se cuente en el lugar de instalación.

El secado con alto vacío auxiliado con calentamiento

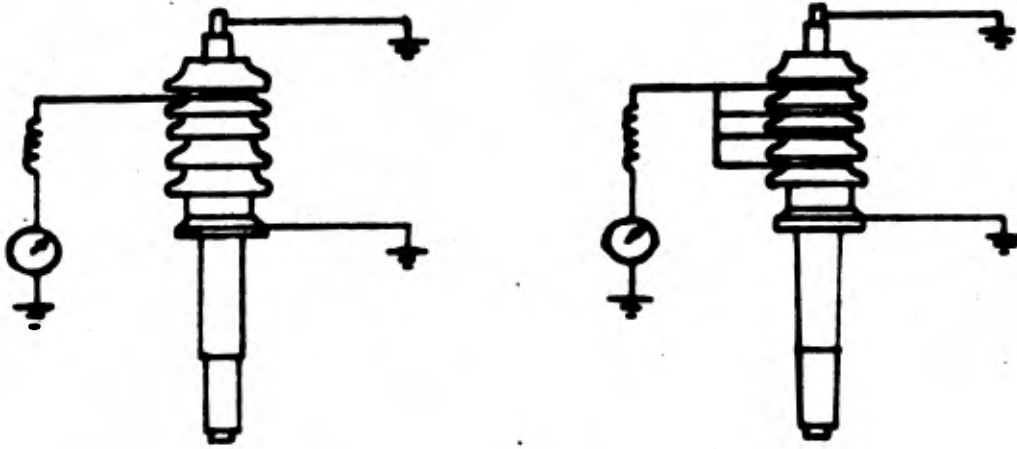


figura 2.29

simultáneo por medio de aceite caliente atomizado, del método 3 es mucho mejor que los demás y solamente este método es adecuado para transformadores de extra altos voltajes. Para transformadores que no sean de voltajes muy elevados el método 2 -- puede ser más rápido. El método I por si mismo es demasiado -- lento y no muy efectivo, pero puede combinarse con el método 3 como se describe más adelante. Los métodos I y 2 se exponen an tes que el método preferente 3 porque algunos de sus elementos en ocasiones se combinan.

I.- METODO I CIRCULACION CON ACEITE CALIENTE

Este método requiere un filtro de aceite adecuado, -- una bomba de vacío y un calentador que sea capaz de calentar -- el aceite a una temperatura aproximadamente de 85°C el cual --

estará circulando en el tanque del transformador hasta que se obtiene una indicación de que el secado de los devanados ha sido terminado. El transformador se debe llenar con aceite a cubrir el núcleo y devanados y el aceite circulará a través del filtro prensa y las válvulas superior e inferior del propio tanque. Para reducir las pérdidas de calor debido a la radiación, se deberán cerrar las válvulas de los radiadores y bloquear eléctricamente los ventiladores para disminuir el tiempo de secado y el calor requerido.

Con este método, la humedad se remueve a través del filtro de aceite. Cuando se utiliza un filtro prensa, la cantidad de extracción de agua depende del grado de saturación del papel filtro. El papel deberá estar extremadamente seco y se deberá cambiar frecuentemente si se espera que el método sea efectivo.

La bomba de vacío que se acopla al transformador es para extraer los gases y la humedad que se desprenden de los devanados y del aceite por el calentamiento.

Este método tiene algunas desventajas como son:

a) El vacío aplicado durante el secado no es muy efectivo por la columna de aceite en el tanque.

b) Debido a la diferencia de presiones entre la parte superior e inferior de los aislamientos, el secado no será uniforme.

c) La humedad es extraída por medio del aceite y esta extracción está limitada por la saturación del aceite.

d) Al utilizar el filtro se corre el riesgo de airear el aceite.

2.- CALOR POR CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO.

Este método requiere de una fuente de potencia para calentar el transformador por circulación de corriente a través de sus devanados, una bomba de vacío adecuada para extraer la humedad de los aislamientos, y una trampa de agua en la línea de vacío para coleccionar los condensados.

El transformador se deberá llenar con aceite arriba del núcleo y devanados y se dejará el tanque conservador instalado para la expansión del aceite. Las válvulas de los radiadores quedarán cerradas para reducir al mínimo el calor necesario. Se conecta la bomba de vacío a una válvula adecuada en el punto más alto del tanque. Deberán extremarse los cuidados para evitar que la temperatura de los devanados y aislamientos alcance valores peligrosos. La temperatura de los devanados no deberá exceder de 95°C . Durante el proceso deberán hacerse con cierta frecuencia mediciones de la resistencia de los devanados y registrarse la temperatura del aceite.

Se excita uno de los devanados y el otro se cortocircuita. Los secundarios de los transformadores de corriente en el tanque, también deberán ser cortocircuitados. Todos los taps

de las bobinas deberán estar conectados en los devanados.

En transformadores con enfriamiento por medio de circulación forzada de aceite y aire, las bombas deberán estar trabajando cuando el transformador se está calentando, pero los ventiladores o cualquier otro medio de refrigeración deberá estar fuera de servicio. El voltaje requerido es la tensión de impedancia correspondiente al devanado que se vaya a excitar, y la corriente tomada de la fuente será la de plena carga de este devanado. La tensión de impedancia suele estar indicada en la placa de datos en porcentaje.

La tensión de impedancia puede ser excedida hasta un 15% durante el período de calentamiento, es decir mientras la temperatura del aceite en la parte alta del tanque sea menor de 90°C. Por encima de esta temperatura la tensión de impedancia no debe ser excedida en más de un pequeño porcentaje y la temperatura del aceite no debe exceder de 90°C.

Se puede aplicar una tensión algo menor que la de impedancia pero la cantidad de calor generado será bastante menor y el período de calentamiento será más largo.

Una vez que se han alcanzado las temperaturas deseadas en el aceite y los devanados, se desenergiza el transformador y el aceite se drena del tanque, estando vacío el tanque se cierran las válvulas y de inmediato se arranca la bomba de va--

cío, este vacío se continuará hasta que la extracción de agua del transformador se estabilice y se obtenga el grado de secado deseado de acuerdo a los criterios de contenido de humedad.

Este método también tiene algunas desventajas como son:

a) Existe el peligro de sobrecalentamiento excesivo en el aislamiento de los devanados debido a los "puntos calientes" sobre los que no se tiene ningún control.

b) Dado que este es un proceso repetitivo, cada vez que se caliente el transformador será necesario sacar el aceite para aplicarle vacío, y cuando se inicie otro ciclo del tratamiento habrá que regenerar el aceite previamente al nuevo llenado.

3.- SECADO CON ALTO VACIO AUXILIADO CON CALENTAMIENTO SIMULTANEO POR MEDIO DE ACEITE CALIENTE ATOMIZADO.

Este método requiere el uso de una unidad con sistema al alto vacío para secado de aceite aislante. Además, una trampa fría para coleccionar el agua, un local provisional de madera forrado interiormente con láminas lisas de asbesto; las dimensiones de dicho local serán mayores a las del transformador para que este se pueda alojar en su interior. Es necesario instalar entre el tanque y las paredes del local un medio de calentamiento adicional como lámparas infrarrojas en número proporcional, lo anterior ayudará a que el transformador obten

ga la temperatura de 60°C en un tiempo menor y a la vez evitará que haya pérdidas por dispersión de calor.

Este método requiere que el tanque del transformador esté diseñado para soportar el vacío absoluto y tenga un mínimo de fugas.

El transformador debe estar sin aceite y se quitarán las conexiones de tuberías externas y sellar los huecos que dejen con bridas ciegas. Se deberá preparar una tubería de liga con un tubo central de diámetro igual al del circuito de aceite de la unidad, con derivaciones a los lados como -- tantos bushings lleve el transformador, estas derivaciones de tubo llevan unas toberas en el extremo que se introduce al transformador y tienen la finalidad de atomizar el aceite caliente directamente sobre el núcleo y los devanados. El -- aceite al ser precalentado a 60°C en la unidad y después des cargado al transformador en circuito cerrado, hace que el ca lor de dicho aceite penetre lentamente al núcleo y bobinas -- mientras el transformador está bajo vacío.

Para disminuir las pérdidas en la línea y aumentar la velocidad del secado, la trampa fría deberá instalarse tan cerca del tanque del transformador como sea posible. El agua es extraída de los aislamientos, cuando la presión en el tan que se ha reducido abajo de la presión de vaporización del agua en dicho aislamiento. Después que la presión residual +

en el transformador ha sido reducida al punto en que el agua-
está siendo extraída, el contenido de agua residual del aisla
miento puede determinarse de la relación en la tabla de equi-
librio de presión-vapor, conocida como carto de Piper, la cual
se muestra en la tabla 2.2.

Los efectos combinados de temperatura elevada y la-
baja presión absoluta, permite la rápida, eficiente y econó-
mica remoción de la humedad absorbida. El arreglo de este mé-
todo se ilustra en la fig. 2.30.

Entre las ventajas principales de este método tene-
mos:

a) Prácticamente todo el devanado del transformador
está sometida a un alto vacío, lo que permite una evaporación
más rápida y uniforme en todo el devanado.

b) Debido a que un mismo pequeño volumen de aceite
es el que esta recircualando, no existe el riesgo de introdu-
cir aire o humedad, como en los métodos en que se utiliza una
columna de aceite que cubre todo el devanado y que es recircu
lado.

c) Es más fácil tener un criterio para determinar -
la cantidad de humedad, ya que conociendo el vacío que se tie-
ne en el tanque del transformador así como la temperatura a--
que está el devanado, se puede determinar el % de humedad por
medio de las curvas de equilibrio de humedad.

Con esto, inclusive se puede estimar el tiempo probable de secado y determinar si existen fugas o cualquier otra falla que obstaculice el secado debido al control de temperatura y vacío que debe llevarse.

d) Debido a la trampa fría instalada, es fácil obtener el agua condensada y medirla. Esto nos da un criterio más real para determinar cuando el transformador está seco. El agua obtenida es casi exclusivamente de los devanados porque debido a que es un pequeño volumen de aceite el que se recircula a un alto vacío, este aceite es rápidamente deshidratado y desgasificado.

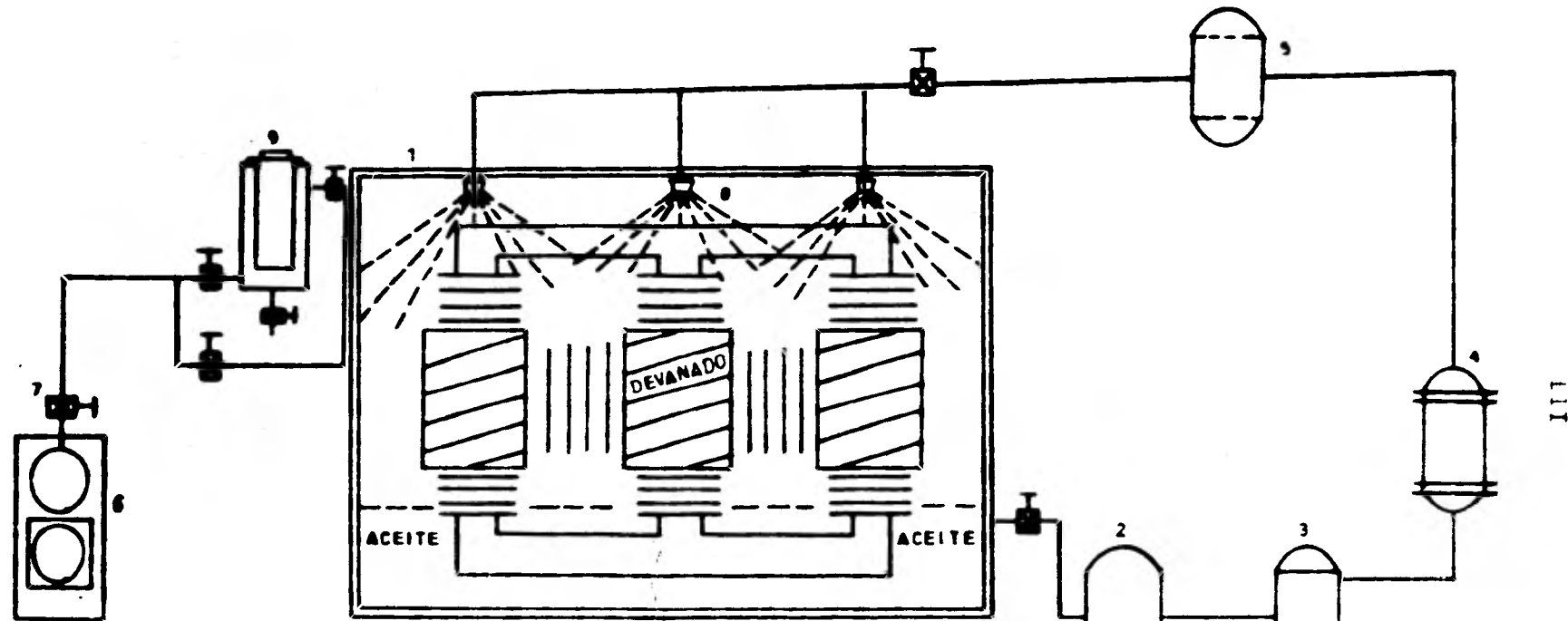
Una recomendación muy importante en este método es que se requiere que tanto el transformador como la línea de vacío se sellen perfectamente.

CARTA DE PIPER

PRESION EN mm de Hg	CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL AISLAMIENTO (% EN PESO DEL AISLAMIENTO SECO)					
	20°C	30°C	40°C	60°C	80°C	100°C
0.030	0.2	0.12	0.07	0.02	—	—
0.100	0.4	0.25	0.15	0.05	0.015	—
0.300	0.8	0.50	0.30	0.17	0.04	0.02
1.00	1.6	1.00	0.75	0.25	0.10	0.07
3.00	2.8	1.90	1.20	0.50	0.23	0.15
10.00	5.4	3.80	2.50	1.20	0.51	0.35

tabla 2.2

SECADO CON ALTO VACIO AUXILIADO CON CALENTAMIENTO
SIMULTANEO POR MEDIO DE ACEITE CALIENTE ATOMIZADO



- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| 1.- TRANSFORMADOR | 2.- BOMBA DE CIRCULACION DE ACEITE |
| 3.- DESGASIFICADOR DE ALTO VACIO | 4.- CAMBIADOR DE CALOR |
| 5.- FILTRO | 6.- SISTEMA DE VACIO DE DOS ETAPAS |
| 7.- VALVULAS | 8.- TOVERAS |
| | 9.- TRAMPA FRIA |

figura 230

CAPITULO III

TRANSPORTE, EMBARQUE Y DESEMBARQUE DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Para facilitar el transporte del transformador de la fábrica al lugar donde será instalado, existe una gran variedad de formas y métodos que permiten reducir al mínimo los excesos de alto, bajo y ancho, así como el peso del transformador. Estas maniobras se realizan debido a las limitaciones de peso y altura para el libramiento de puentes y carreteras.

Las recomendaciones constantes de la necesidad de tener los máximos cuidados durante la instalación de transformadores son con la finalidad de que se ponga en servicio en las mismas condiciones con que salió de la fábrica, observando en forma muy particular los aislamientos, todas las consideraciones estarán enfocadas principalmente para asegurar un secado adecuado de los aislamientos y un impregnado total de aceite a los mismos.

En resumen todos los fabricantes exigen que se tengan grandes cuidados en la instalación de transformadores de extra altos voltajes como condición para otorgar la garantía correspondiente.

3.1 Condiciones del Transporte.

El transporte puede efectuarse por ferrocarril, carretera o barco, de acuerdo a las condiciones geográficas entre - -

el trayecto de la fábrica al lugar de instalación.

Por cuestión de dimensiones de carga y por un punto -- muy importante que es proteger los accesorios que podrían su-- frir daños se le quitan al transformador.

En cuanto al transformador por ser este de extra altos voltajes se embarca sin aceite con el fin de reducir su peso, y prevenir la entrada de humedad durante el transporte, el tanque se presuriza a 0.30 kg/cm^2 con nitrógeno seco ya que el comercial no es adecuado usarlo para transformadores, debido a su alta humedad. Es recomendable que cuando se elaboren las especificaciones para compra de transformadores, se incluya la prueba de contenido de humedad con que el transformador sale de la fábrica para tener un punto de comparación del grado de sequedad de los aislamientos cuando dicho aparato se reciba en el sitio de instalación.

Transporte de transformadores de potencia de gran capacidad.

- 1.- Para el transporte marítimo se utilizarán barcos de gran tonelaje y con el transformador localizado en la bodega central y debidamente anclado para evitar deslizamientos.
- 2.- Para el transporte por carretera, se debe realizar un estudio de la ruta mas adecuada, la selección de la hora y condiciones atmosféricas del transporte.
- 3.- Para el transporte por ferrocarril, se recomienda localizar

el transformador en el tercer carro y fijarlo rígidamente a la -
plataforma con placas soldadas en la base y tensores con resor--
tes en la parte superior del transformador.

Entre la base del transformador y la plataforma se co-
loca fieltro del mayor espesor disponible. En las figuras, 3.1.a
y 3.1.b se muestra una plataforma de ferrocarril y la fijación -
del transformador.

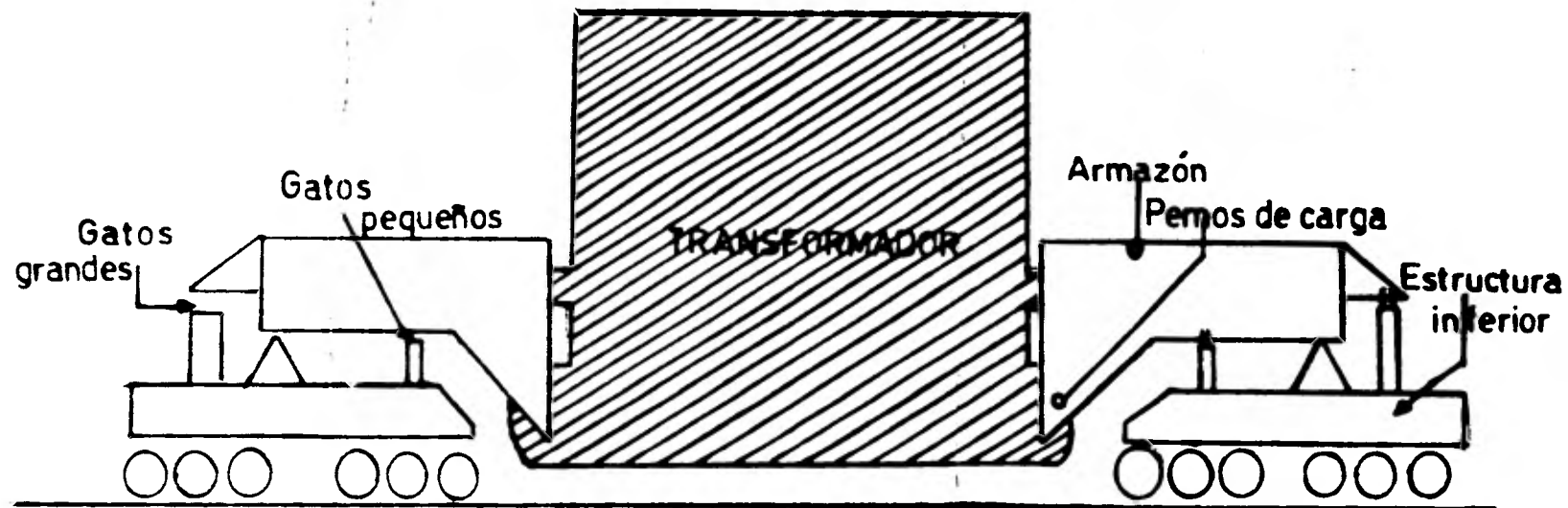
Para todos los casos anteriores es necesario instalar-
registradores de impactos en el transformador al momento de ser-
embarcados, para que cuando arribe a su destino se pueda tener -
un registro con la información del trato al que se sometió el --
transformador durante el transporte.

El registrador de impactos, es un instrumento usado --
para registrar el tiempo, la magnitud, la dirección de choques y
• vibraciones.

La información que proporciona éste dispositivo es por
medio de una cinta de papel que está graduado en zonas de impac-
tos y horas, en la cual aparecen los trazos de las agujas impre-
soras indicando la hora y magnitud de los impactos.

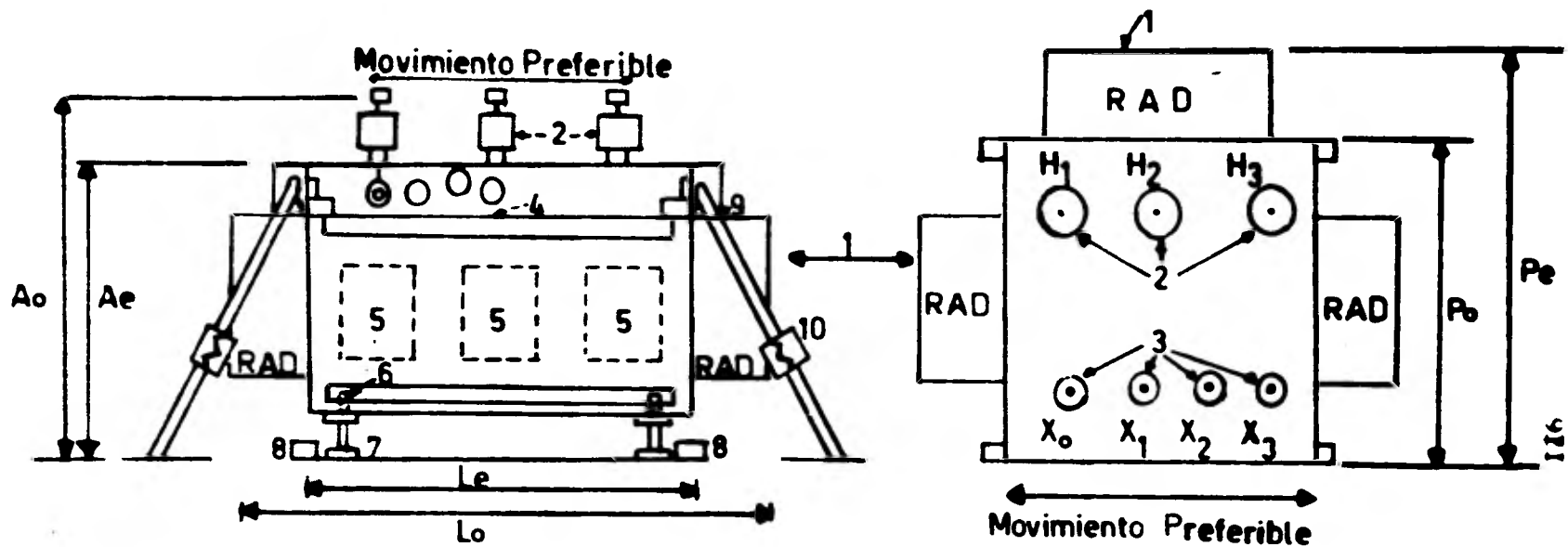
Es conveniente mencionar que hay diversidad de marcas-
y tipos: bidireccionales, tridimensionales y diferentes sensibi-
lidades.

Dentro de los tipos existen los eléctricos de pilas y-



Esquema que muestra una plataforma de F.C. tipo Schnobel para transporte de transformadores de gran potencia.

figura 3.1 a



- | | |
|-----------------|------------------------|
| 1) Radiadores | 6) Perno centrador |
| 2) Boquillas AT | 7) Base |
| 3) Boquillas BT | 8) Topes para embarque |
| 4) Bastidores | 9) Tirantes |
| 5) Bobinas | 10) Resorte templador |

- | | |
|-------|--------------------------|
| A_o | Altura de Operación |
| A_e | Altura de Embarque |
| L_o | Largo de Operación |
| L_e | Largo de Embarque |
| P_o | Profundidad de Embarque |
| P_c | Profundidad de Operación |

figura 31b

los de mecanismos de reloj.

Normalmente los transformadores estan diseñados para resistir impactos de 5G (aceleración de la gravedad) en dirección longitudinal y 3G en los sentidos vertical y transversal. En la fig. 3.2 se muestra un ejemplo de un registro de impactos.

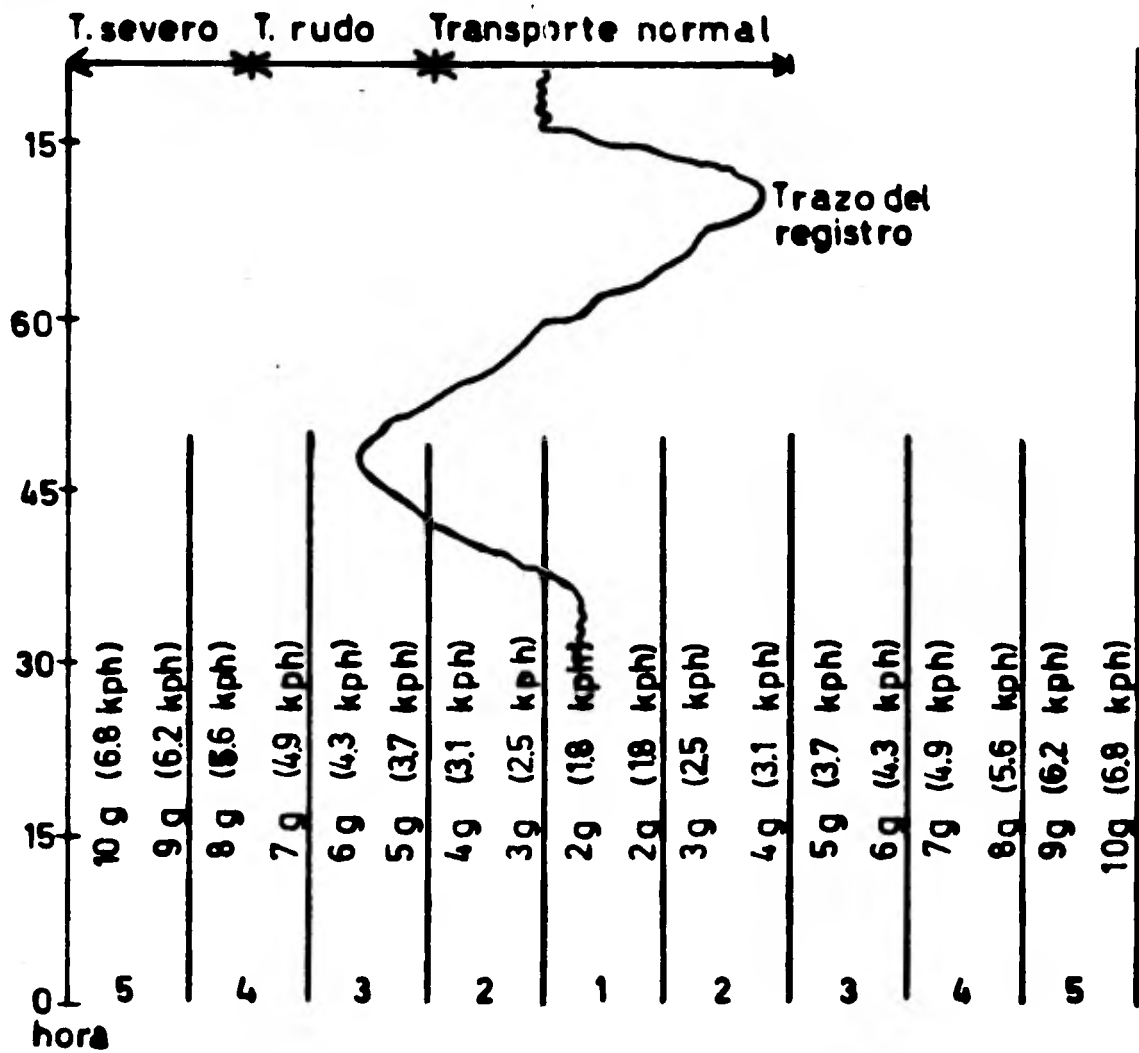
3.2 Descarga del transformador del barco.

Parte de los grandes cuidados que se deben tener en el transformador, se inician desde que arriba el barco al puerto donde se dejará el transformador para transportarlo posteriormente por ferrocarril o por carretera según sea el caso, hasta su sitio de instalación.

Los daños que sufren los transformadores en el momento de las maniobras de desembarco son, rotura de manómetros, válvulas, y tuberías de cobre del sistema inerte que traen los transformadores para compensar la pérdida de presión de ni trógeno por fugas en el tanque y a veces también se golpean los costados de los mismos, por lo que será necesario reparar estos daños de inmediato.

3.3 Pruebas de verificación.

Cuando los transformadores hayan sido desembarcados, se deberán inspeccionar cuidadosamente con el fin de detectar cualquier daño aparente originado en el tránsito o maniobras.



Ejemplo de un registro de impactos

figura 3.2

Revisar la cinta del registrador de impactos para comprobar que no haya impactos registrados con valores mayores de los que recomienda el fabricante, medir la presión del nitrógeno en el tanque del transformador y en el cilindro de nitrógeno acoplado al transformador, medición del contenido de oxígeno, y humedad residual en el tanque. El contenido de oxígeno deberá ser menor del 1% (excepto cuando los transformadores se embarcan con presión de aire seco).

El contenido de humedad residual se obtiene por las mediciones de temperatura, la presión y temperatura del punto de rocío del gas, que deberán ser las mismas con que se embarcó el transformador.

Si la presión es cero o negativa, el contenido de oxígeno y la temperatura de punto de rocío del gas serán mayores que los iniciales, lo que indicará que el transformador ha sido contaminado con aire atmosférico o humedad, y en este caso será necesario hacerle un secado en el campo antes de instalarlo.

Con referencia a la temperatura de punto de rocío se tratará en el punto 3.8.

3.4 Recepción de los transformadores en el lugar de instalación

Las pruebas de recepción en este sitio serán las mismas que se le hicieron al transformador en el primer punto de descarga y se volverán a confirmar los valores obtenidos en las pruebas

bas con los que se obtuvieron en la fábrica, pero si al revisar la cinta registradora del impactógrafo existiera un impacto - - mayor de lo que por diseño soporta el transformador, y si además existen indicios exteriores que hagan suponer que, durante el tránsito el transformador haya sufrido choque o sacudidas -- que pudieran haberle causado daños internos, será necesario llevar a cabo una revisión interior de todos sus componentes y si es necesario se deberá examinar cuidadosamente las bobinas fuera del tanque. Cuando el conjunto núcleo bobinas se expone al contacto del aire absorbe humedad, por lo que será necesario go meter el transformador a un proceso de secado.

3.5 Recepción de accesorios.

Al llegar al sitio de instalación se deberán comprobar detenidamente el estado de cada una de las cajas.

Una inspección superficial de los bultos resulta inguficiente; deberá completarse por el exámen de su contenido para comprobar que no hayan sufrido averías durante el transporte.

La menor avería requiere una comprobación profunda para asegurarse de que no se ha producido ningún daño de graves consecuencias. Las investigaciones deberán permitir determinar las circunstancias del daño.

Todos los bultos que contienen las piezas separadas, - deben cuando sea posible, colocarse bajo techo para protegerse-

de la intemperie, en caso de no contar con suficiente área techada se le dará preferencia a las boquillas de alta, mediana y baja tensión. Cuando no se cuenta con la condición anterior deberán protegerse los bultos con lonas enceradas en virtud de que cuando se realizó la inspección minuciosa se les rompió la protección impermeable a base de nylon que traen de fábrica. En cuanto a todos los gabinetes de control antes de almacenarlos, se les deberá poner en servicio la calefacción propia que traen de fábrica, para evitar corrosión interna y humedad en algunos de sus componentes por efecto de condensación de la humedad ambiente.

3.6 Conexión a tierra del tanque del transformador.

Antes de emprender cualquier trabajo en un transformador de potencia, no obstante que se encuentre fuera de su lugar de instalación definitivo, su tanque deberá conectarse a tierra para eliminar la posibilidad de recibir descargas por electricidad estática, o de ser dañado por una tierra accidental de los devanados al tanque. Por normas existe siempre una zapata para conexión a tierra en la base del transformador.

3.7 Llenado preliminar con aceite fuera del sitio de instalación.

Este punto está enfocado para hacer notar la gran diferencia de precauciones y medidas que hay entre equipos para

tensiones de 115 KV, 230 KV y 500 KV.

Un transformador de 230 KV o menor puede ser almacenado sin aceite, únicamente con presión positiva de nitrógeno por más de tres meses, en cambio uno de 400 KV, omás es sumamente crítico que permanezca más de tres meses sin aceite, por lo tanto dichos transformadores deberán impregnarse con aceite en -- cuanto arriben a su lugar de destino aunque no queden instalados en sus bases definitivas, lo anterior es con el fin de que los devanados siempre estén saturados y de este modo absorban -- menos humedad en caso de que les llegara a entrar aire ambiente.

El núcleo y las bobinas del transformador se deberán cubrir previamente a la apertura del tanque para inspección interna, aplicando los tiempos y presiones absolutas especificadas para llenado preliminar con aceite de la tabla 3.1.

Con el fin de lograr los valores de vacío especificados y para mantener estos valores durante el llenado con aceite se requiere una buena bomba de vacío de capacidad adecuada. -- Las conexiones de la bomba de vacío al transformador deberán -- ser lo mas cortas posibles en longitud y lo máximo en diámetro.

La presión en el tanque durante el proceso de vacío -- se medirá con un microvacuómetro.

Cualquier medición que se haga en otro punto que no -- sea la tapa del tanque será errónea.

Antes de iniciar el proceso de vacío se efectúan prue

PROCESO DE VACIO Y CONDICIONES PARA LLENADO DE ACEITE

CONDICION	VOLTAJE DE OPERACION (DEVANADO H. T.)			
	230 KV o menos	286 ó 345 KV	500 KV	700 KV
PRESION ABSOLUTA-Torr. max.				
Antes del llenado de aceite	5	4	2	1
Durante el llenado de aceite	6	5	3	2
TIEMPO DE VACIO SOSTENIDO	(mínimo de horas después de haber alcanzado el vacío especificado)			
Llenado preliminar previo al llenado de aceite				
Tanque normal	6	6	12	16
Tanque seccionado	12	12	24	32
Llenado final con aceite				
Unidades previamente llenadas	8	8	12	16
<p>NOTA: EL tiempo mínimo para llenado con aceite de cualquier unidad será de 4 hrs y al valor máximo de flujo de aceite durante el llenado no excederá de 9000 litros por hora en cualquier unidad.</p> <p>NOTA: 1 Torr = 1 mm Hg</p>				

Tabla 3.1

bas de hermeticidad tanto en el tanque como en toda la línea de vacío para verificar la ausencia de fugas, ya que de haber fugas no se logrará el vacío requerido.

Simultáneamente al proceso de vacío se inicia el tratamiento del aceite aislante previa confirmación de sus características en el laboratorio. La preparación consiste en recircular en un depósito, aceite por medio de una unidad de tratamiento de aceite al alto vacío (equipo desgasificador).

Una vez que se ha logrado ésto se procede al llenado del transformador conectando la manguera de descarga de la unidad de tratamiento en la tapa del transformador y en el lado opuesto al circuito de vacío. Las condiciones de tiempo y gasto de llenado en transformadores se indica en la tabla 3.1.

3.8 Humedad relativa del medio ambiente.

La definición de humedad relativa (H.R.) es "La relación entre la presión del vapor de agua contenida en el aire y la presión del vapor saturante a la misma temperatura".

$$H. R. = \frac{P_w}{P_s} \times 100$$

donde:

P_w — Presión de vapor de agua para el punto de rocío del aire (mm de Hg.)

P_s _____ Presión del vapor saturante a la temperatura ambiente (mm de Hg.)

La humedad relativa se obtiene en forma indirecta es - decir dependiendo del instrumento que se este utilizando para - determinarla, a continuación describimos uno de estos instrumen- tos.

Medidor de punto de rocío "Alnor"

Se usa para determinar el punto de rocío de una mez- - cla de vapor de agua-aire.

Cuando una mezcla de vapor de agua-aire es enfriada - hay alguna temperatura a la cual tenderá a condensarse.

Por definición esta temperatura se conoce como tempe- - ratura de punto de rocío (Dew point).

Este equipo es de naturaleza electromecánica y la de- - terminación del punto de rocío se hace por tanteo, es decir que se hacen varias pruebas del aire ambiente, el cual se comprime- - en el interior a un valor de presión dado y posteriormente por medio de una válvula lo hace pasar a una cámara de niebla, la - cual tiene una ventana de observación por donde se ve si se for- - ma o no niebla. La mecánica de este aparato consiste en hacer - algunas pruebas variando la presión a que se comprime la mezcla hasta que se encuentren los puntos donde no aparezca neblina y el último punto donde sí aparece, una vez obtenido este valor - promedio se toma en cuenta la temperatura indicada en el apar-

to y con estos valores se pasa a un calculador circular que forma parte del aparato y ahí se determina el punto de rocío del -- aire.

La figura 3.3. a muestra una copa alnor y la figura -- 3.3.b es una carta sincronométrica normal, en la que se puede entrar con los valores de temperatura de punto de rocío, y temperatura de bulbo seco, y se determina la humedad relativa.

3.9. Definición de vacío, unidades, equipo de medición y terminología.

Se define el vacío como la variable de la presión at--mosférica, creada por una disminución de aire.

Se conoce en dos formas:

Vacío grueso.- Es aquel que se alcanza arriba de 5 mi--límetros de mercurio.

Vacío fino.- Es aquel que se alcanza abajo de 5 milímetros de mercurio.

Para obtener vacío en una cámara, este se obtiene me--diante la extracción de aire por medios mecánicos (bombas), lo - cual crea una presión interna (negativa), o sea el vacío de la - la cámara.

Con la aplicación del vacío, el agua puede ser eva----porada del aceite y aislamiento aún a temperatura ambiente, in--cluyendo la parte de agua soluble y otros componentes más volátii

les presentes en el aceite. El remover aire y otros gases mezclados en el aceite es un beneficio agregado por el método de vacío.

La terminología de vacío algunas veces puede causar -- confusión porque comúnmente varias unidades pueden definir el -- mismo valor. La relación entre las diferentes unidades de medición es la siguiente:

1 atmosfera = 760 mm. de Hg. absoluta al nivel del mar

1 mm de Hg. = 1000 micrones de Hg. absoluto = 1 Torr.

Las unidades de medición de vacío que se están usando normalmente en trabajos de alto vacío, son las unidades de presión absoluta expresadas en mm de Hg., micrones o Torr con preferencia.

Medidores de vacío.- Existen varios tipos de medidores usualmente utilizados para medir vacío en terminos de presión absoluta cuando se seca y llenan transformadores en el campo, de los cuales el más común es el medidor Mcleod.

3.10. Contenido de oxígeno.

Cuando el transformador está presurizado se debe verificar el contenido en por ciento de oxígeno en su interior, siempre deberá marcar cero por ciento y en ningún caso exceder de 1 %.

Esta prueba se hace con un aparato llamado fyrite. --- Cuando un transformador con atmósfera de nitrógeno se va a re---

visar internamente, también debe hacerse esta prueba y en este caso el contenido de oxígeno debe ser mayor del 16 % antes de entrar en el.

3.11. Humedad residual.

Esta prueba debe efectuarse en los transformadores - en el momento en que se reciben en el sitio de instalación o - antes si es posible, y la finalidad será la de comparar el contenido actual de humedad contra el valor medido en fábrica, esto nos dará un criterio del estado de sequedad del transformador.

El proceso de medición es el siguiente:

1) Comprobar que la presión del nitrógeno en el transformador sea positiva y que no exceda de 0.35 Kg/cm² (5 lbs/pulg²) y se haya mantenido en reposo como mínimo 24 Hrs.

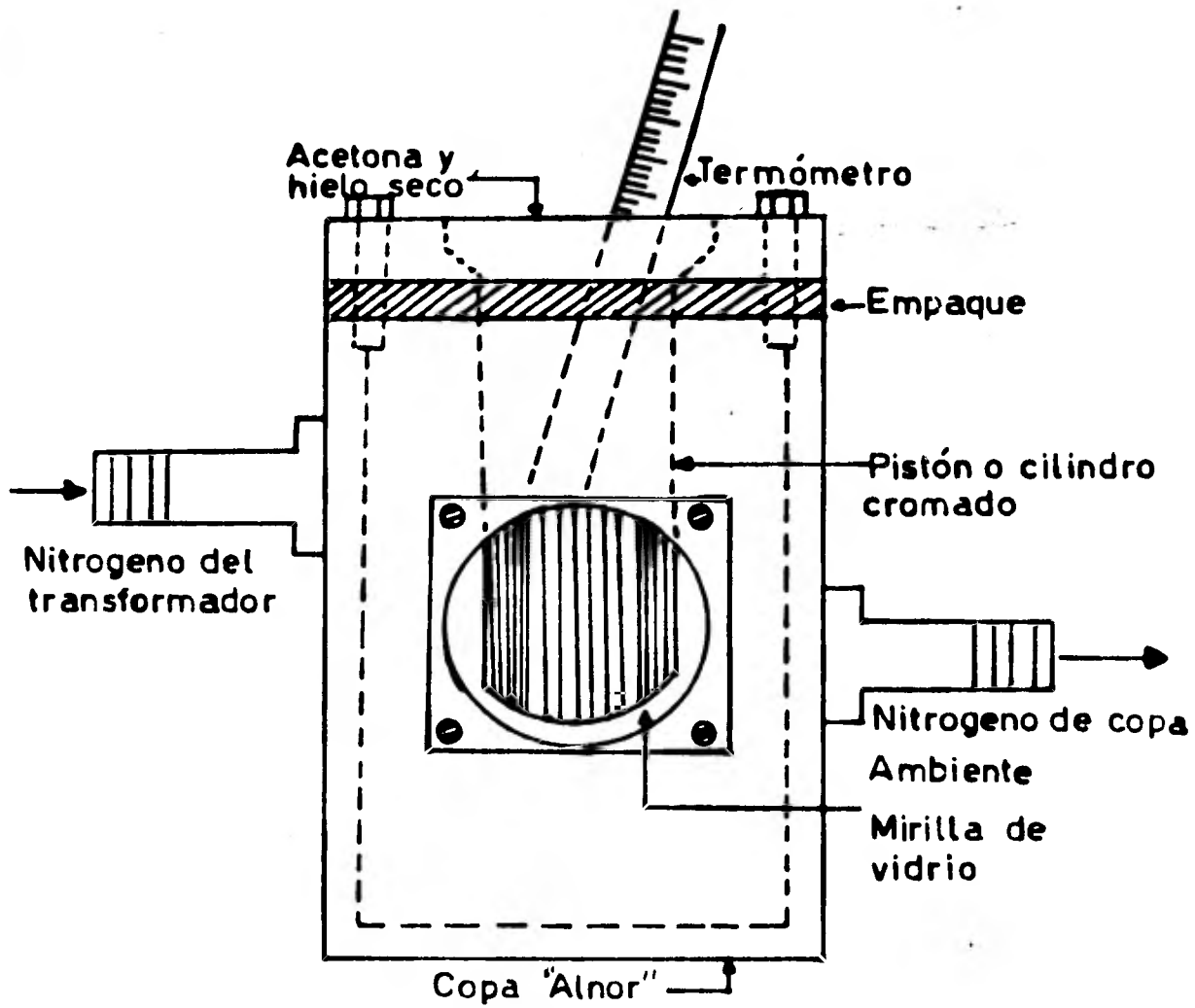
2) Medición del punto de rocío

Esta medición se tomará en una válvula superior sobre la cubierta donde el gas se pueda mover libremente en el interior del transformador, luego por medio de la válvula se deja escapar el nitrógeno a través del medidor de punto de rocío "Alnor" en el cual obtenemos los valores de presión y temperatura, y por medio del calculador circular del aparato, obtenemos la temperatura de punto de rocío.

Luego con la presión que se tiene en el transformador

(5 lbs/pulg²) en ese momento y la temperatura del punto de rocío, se entra a la fig. 3.4 para determinar la presión de vapor de agua en micrones que corresponde a este punto de rocío. Con la presión de vapor de agua en micrones y la temperatura ambiente en el momento de hacer la prueba se entra a la fig. 3.5. para determinar el porcentaje de humedad residual.

Es importante hacer notar que una sola medición no es suficiente porque puede conducir a errores, por lo tanto deberán hacerse un mínimo de seis pruebas cada cinco minutos antes de llegar al resultado final.



Copa Alnor para medir Punto de Rocío.
 figura 3.3a

CARTA SICROMETRICA

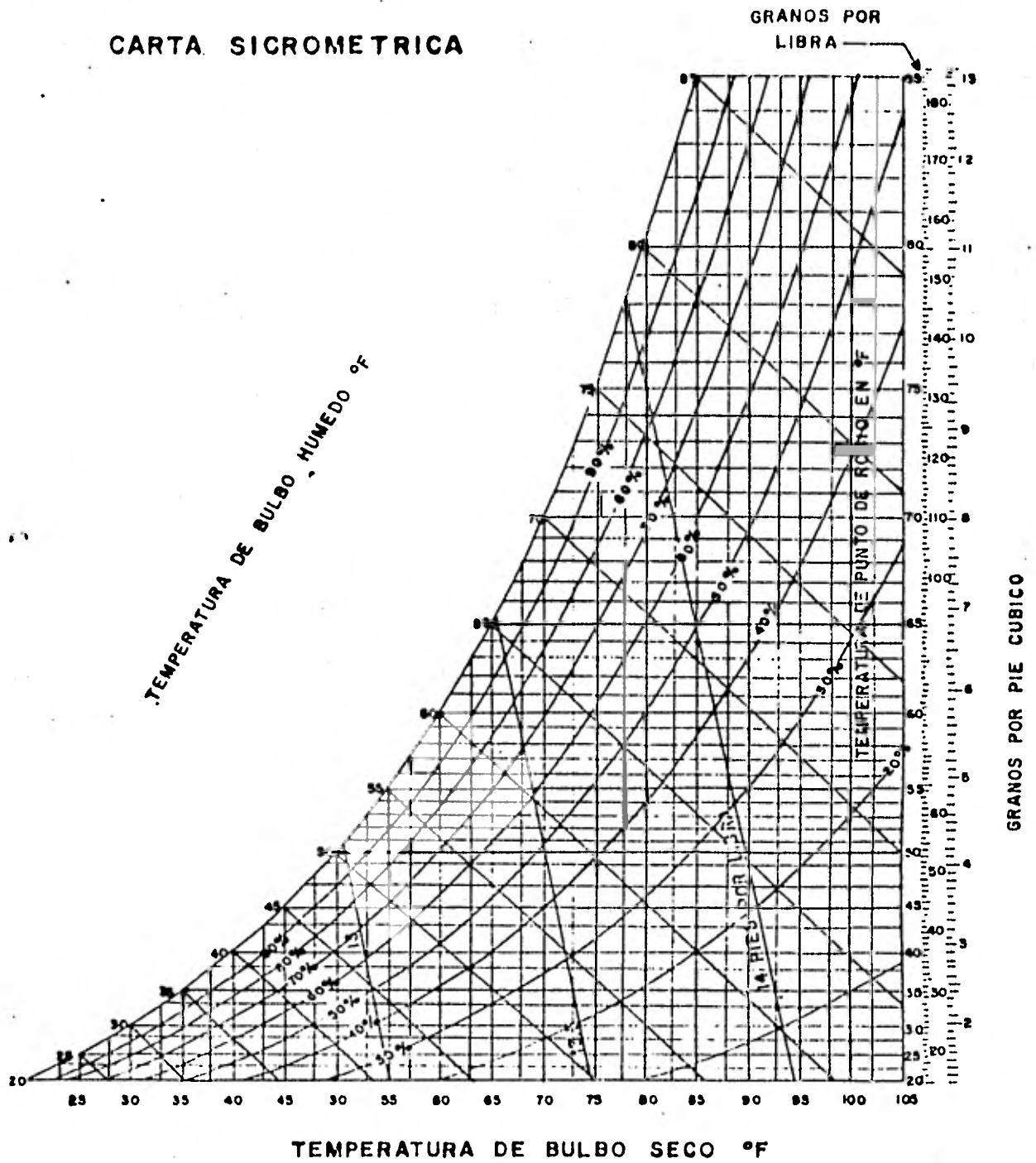
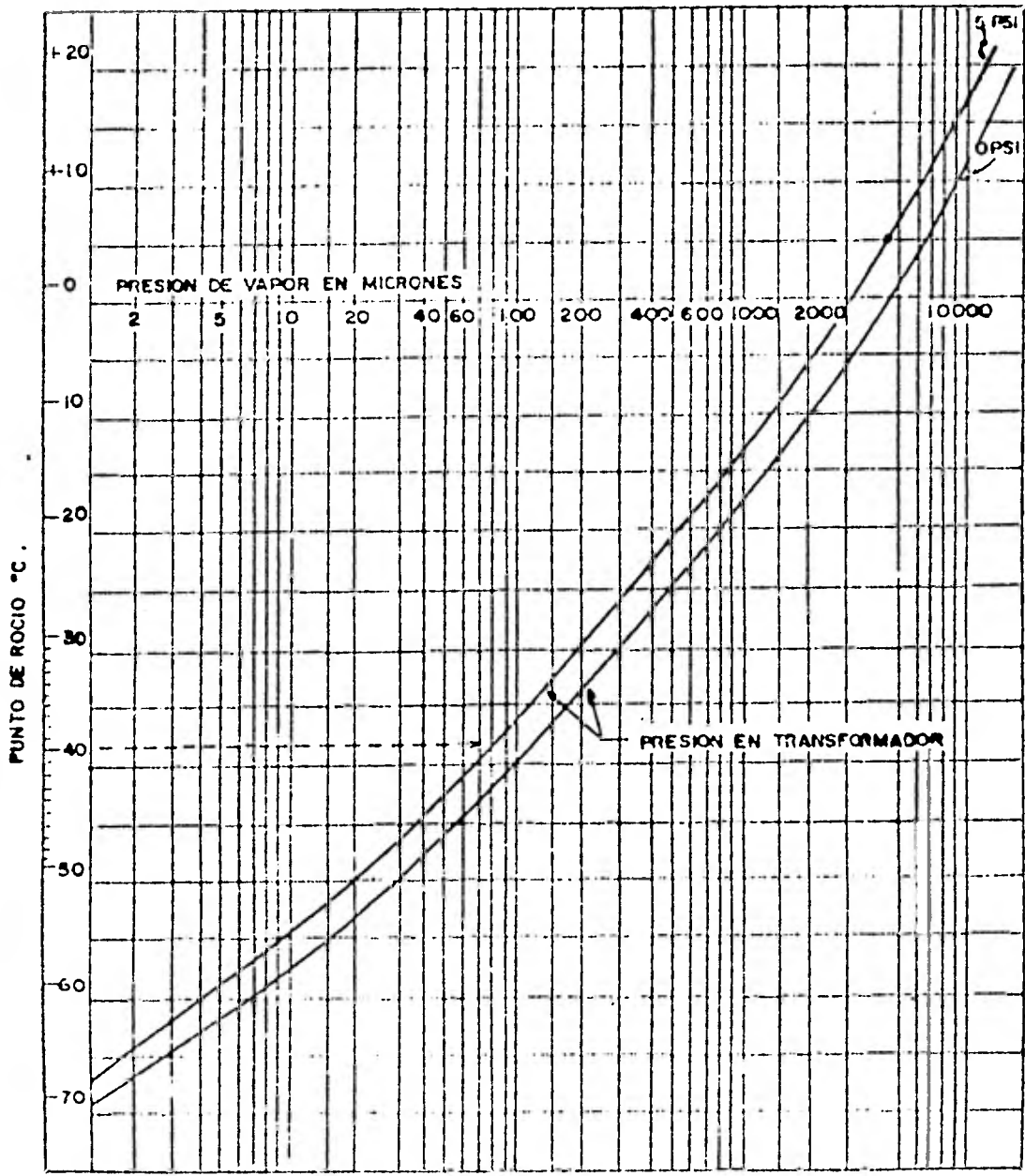


figura 3.3b



GRAFICA PUNTO DE ROCIO
PRESION VAPOR

FIGURA 3.4

PRESION DE VAPOR EN MICRONES

100,000

10000

8000

6000

4000

2000

1000

800

600

200

100

80

60

20

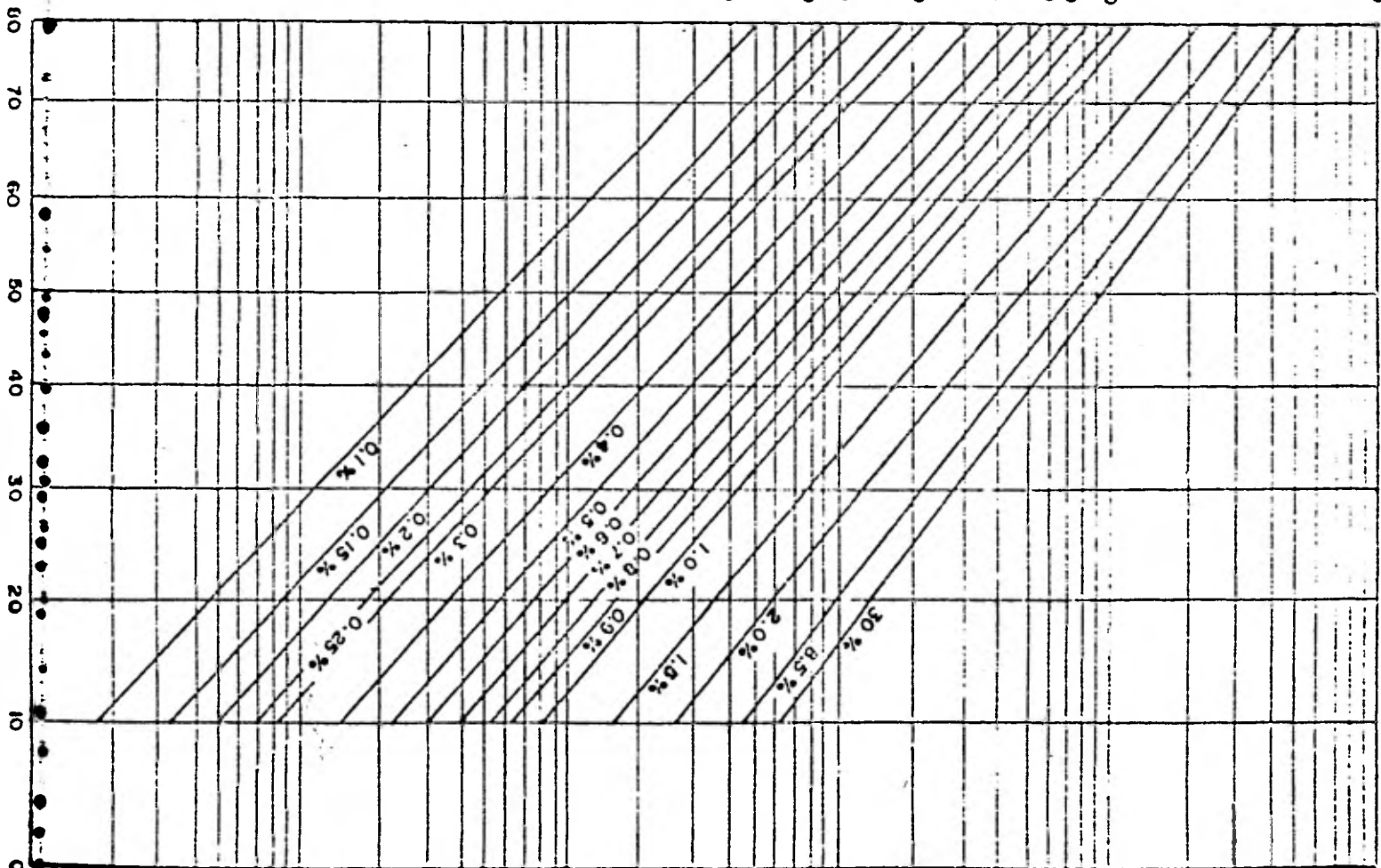
10

8

6

4

2



GRAFICA PRESION VAPOR HUMEDAD RESIDUAL
Figura 3.5

CAPITULO IV

INSTALACION Y PUESTA EN SERVICIO

La instalación de los transformadores de potencia abarca esencialmente los aspectos concernientes a la inspección interna, montaje de accesorios, secado, pruebas eléctricas previas a la puesta en servicio y puesta en servicio.

Todos estos aspectos son llevados a cabo para que el transformador sea puesto en servicio en las mismas condiciones en que se encontraba antes de salir de la fábrica, para lograr una energización satisfactoria y una operación adecuada.

El mantenimiento de el transformador, se lleva a cabo para que todos sus accesorios y componentes de éste se encuentren en buen estado y funcionen correctamente y mantengán al transformador libre de fallas.

4.1. Sitio de instalación.

Al determinar la localización del o los transformadores se debe considerar cuidadosamente la accesibilidad al sitio de instalación, tomando en cuenta la ruta desde la entrega hasta su propia base. Por otra parte durante el tiempo que dure el montaje del transformador se deberán observar si no hay hundimientos de su base.

4.2 Programa de trabajo para efectuar el montaje de transformadores.

Este es un punto muy importante, porque deberá elaborarse con la mayor precisión para lograr la máxima calidad en la instalación como resultado de una planeación adecuada de los recursos humanos, equipo, materiales, secuencia de montaje, técnicas a seguir y tiempo de ejecución.

Por otra parte este programa sirve para obtener los costos de montaje por concepto de mano de obra.

4.3. Vaciado del aceite del transformador con presión de nitrógeno.

Como esta actividad debe realizarse el mismo día que se va a efectuar la revisión interna y el montaje de las boquillas, debe hacerse en un día en que la humedad relativa del medio ambiente este abajo del 60 %, ya que la cantidad de humedad absorbida en los aislamientos es función de la humedad relativa,

Una vez que se confirma que todos los preparativos están completos y sobre todo que el tiempo es adecuado, se procede a vaciar el aceite del transformador forzándolo a salir con presión de nitrógeno el cual se inyecta por la tapa del transformador a 1 Kg/cm^2 , esto tiene como fin evitar la entrada de aire al transformador y al evacuar todo el aceite, dejarlo ligeramente presurizado a 0.1 Kg/cm^2 .

De este modo se evita que haya condensación en el interior porque el aire no penetra al principio, el tiempo de vaciado se inicia a las ocho horas del día programado y al término de este el transformador está en condiciones de destaparse.

4.4. Revisión interna.

El objetivo de la revisión interna es el localizar -- cualquier daño que pudiese haberle ocurrido al transformador durante el embarque o su transporte.

La humedad puede condensarse en cualquier superficie -- que se encuentre más fría que el aire ambiente. La humedad en -- los aislamientos o en el aceite baja su resistencia de aislamiento y esto puede causar fallas en el equipo. El transformador no deberá abrirse bajo ninguna circunstancia que permita la entrada de humedad y polvo, deberá tomarse en cuenta que la temperatura del tanque y partes internas sea mayor como mínimo 10°C que la temperatura del punto de rocío del aire ambiente. Si la construcción del tanque es del tipo seccionado y ha sido embarcado con la sección superior del tanque removida, será necesario remover las -- cubiertas provisionales entre ambas secciones del tanque antes -- de unir las entre sí, siguiendo las instrucciones que el fabricante dá para ejecutar esta operación.

Durante este trabajo la inspección interna se puede -- hacer rápidamente.

Si el transformador fue embarcado en un solo tanque, el acceso para inspección interna y ensamble se hace através de una entrada hombre indicada por el fabricante.

No se deberá entrar al transformador hasta que el nitrógeno sea totalmente purgado con aire seco, o que se haya ventilado el interior lo suficiente, el contenido de oxígeno en el interior deberá ser como mínimo de 19.5 % antes de entrar el personal para la inspección interna.

Durante la inspección y siempre que el tanque permanezca abierto se suministra en forma continua un barrido con aire fresco y seco, que además sacará la humedad de la respiración y transpiración de la persona que esté trabajando en el interior del tanque. Para evitar el riesgo de que objetos extraños caigan al interior del transformador, todos los objetos sueltos deberán sacarse de las bolsas así como relojes y anillos de cualquier trabajador que este arriba del transformador, todas las herramientas deberán amarrarse con cinta de tela de algodón y ésta asegurarse en cualquier punto exterior del tanque o en un punto fácilmente accesible en el interior. Herramientas con partes sueltas como las matracas reversibles deben evitarse.

La persona que entra a la unidad deberá hacerlo con ropa limpia y con los zapatos cubiertos con bolsas de tela especial. Cuando se entra a la unidad a la cual se le ha bajado pre

viamente el nivel de aceite, debe procurarse no pisar directamente los aislamientos y de ser posible, debe colocarse una lona o un tramo de plástico limpio para cubrirlos.

Es conveniente tener también un imán potente que permita en un caso dado, recobrar alguna tuerca, tornillo o roldana que pueda safarse y caer dentro de la unidad en algún lugar inaccesible para el trabajador.

Al abrir una entrada hombre o las bridas donde se instalarán las boquillas, generalmente el fabricante pone material deshidratante (silica-gel).

Este material se pesa y se compara con el anotado en su envoltura o con el anotado en los documentos de embarque.

Si el peso medido es mayor que el anotado, puede suponerse que el transformador admitió humedad durante el transporte.

Cuando se realiza la inspección interna se debe prestar la mayor atención a conductores, herrajes y gatos mecánicos para ver si hubo deslizamiento del núcleo, conexiones eléctricas, verificación del número de tierras del núcleo y pruebas de aislamiento del núcleo contra el tanque y tierra, cambiador de derivaciones, incluyendo un barrido y presión de contactos en todas las posiciones, transformadores de corriente, aislamiento de la estructura soporte, distancia a tierra de las terminales de alta y baja tensión, que no este sucio el núcleo, que no ha-

ya rebabas. Algunos soportes provisionales para embarque están pintados de amarillo y deberán retirarse una vez que el transformador se instala en su base definitiva. Siempre deberá tenerse el plano de "conexiones internas" para usarse como una guía cuando se haga la revisión interna.

4.5. Pruebas para determinar si el transformador sufrió daños en el transporte.

Cuando se sospecha que pudo haber un daño deberán hacerse las siguientes pruebas:

1.- Prueba de relación en todos los devanados y todas las derivaciones, si cualquiera de estas mediciones está fuera de relación por $\pm 0.5\%$ deberá medirse la resistencia óhmica y temperatura de los devanados para compararlas con las pruebas de fábrica.

2.- Resistencia de aislamiento de cada devanada con respecto a los otros devanados y tierra, deberá hacerse con los devanados cubiertos con aceite. Las lecturas obtenidas se deberán comparar con las de fábrica.

3.- Retirar la conexión de tierra del núcleo en transformadores tipo núcleo y medir la resistencia de aislamiento del núcleo contra la estructura y de la estructura contra el tanque, usando un megger de 1000 volts, la resistencia deberá ser mayor de 100 megohms si el núcleo no está cubierto con acei

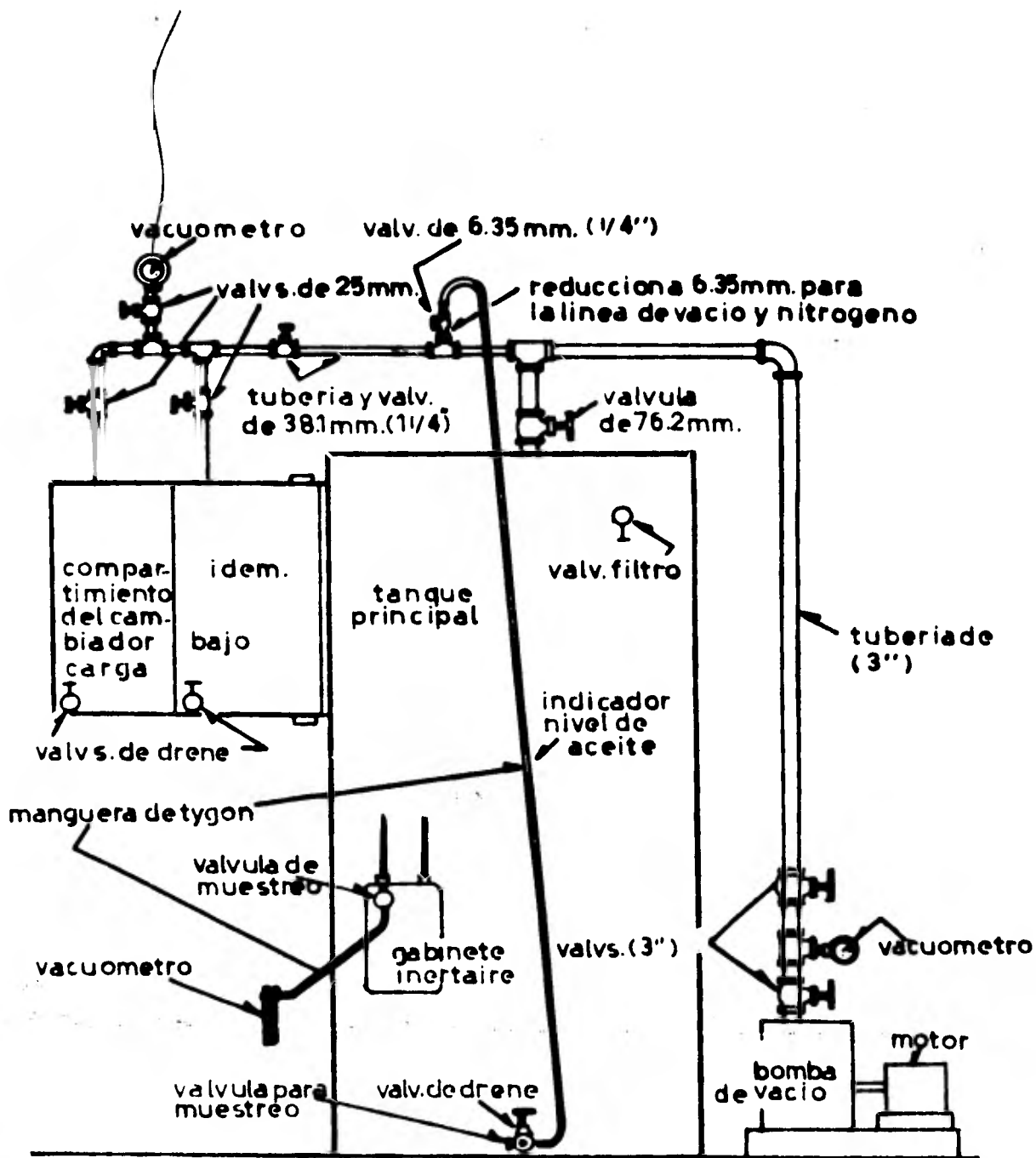
te o, 200. megohms si el núcleo está cubierto con aceite.

Terminada la inspección se procede al montaje de las boquillas comenzando por las de alta tensión, en ocasiones se puede hacer el montaje de boquillas simultáneamente a la inspección. Terminado el montaje de boquillas se cierra la entrada -- hombre y se presuriza el tanque con nitrógeno a 0.5 Kg/cm^2 para verificar la hermeticidad del tanque se utiliza jabonadura en todos los puntos donde se instalaron accesorios. Se deja escapar el nitrógeno a la atmósfera hasta 0.1 Kg/cm^2 y desde este momento se inicia el proceso de vacío para secar el transformador el cual debe alcanzar como mínimo el valor de 1 Torr y sostenerse por 24 Hrs para poder meterle aceite al transformador.

Cuando exista cambiador de derivaciones bajo carga en el transformador el compartimiento de este deberá conectarse también a la línea de vacío, de no hacerlo existe el peligro de que se dañe por los esfuerzos mecánicos tan grandes a que va estar sometido por la diferencia de presión interna de éste con respecto al tanque del transformador. En la fig. 4.1 se indica la disposición de equipo y tubería para proceso de vacío.

4.6. Tiempo de exposición de los devanados al ambiente sin llegar a ser crítico.

Esto tiene la finalidad de dar un criterio para casos



DISPOSICION DE EQUIPO Y TUBERIA PARA PROCESO DE VACIO.

fig. 4.1

de algún imprevisto como fallas en equipo de vacío, interrupción en la energía eléctrica, y que una vez terminado el montaje de boquillas y la revisión interna no sea posible arrancar el proceso de vacío. Pero lo más indicado es que dicha inspección y montaje deberán realizarse tan pronto como sea posible. En la tabla 4.1 se muestra la relación entre la humedad ambiente y el tiempo de exposición permisible de los devanados.

% de Humedad ambiente	Tiempo de Exposición Permisible
41—60	16 Hrs.
36—40	20 Hrs.
31—35	27 Hrs.
26—30	40 Hrs.

Tabla 4.1

4.7. Montaje de accesorios.

Además de las boquillas, radiadores, válvulas y bombas, se instalarán los accesorios que correspondan al tanque, - Los radiadores, bombas y boquillas serán manejados de acuerdo a las instrucciones del fabricante, la posición de los radiadores no siempre es vertical algunas veces es horizontal; las boquillas en ocasiones son verticales y en otros casos son inclinadas. Para el ensamble de estos componentes se utilizan juntas de varios tipos y tamaños. Las instrucciones específicas para -

su aplicación son proporcionadas usualmente por los fabricantes.

Las boquillas deberán estar completamente limpias, secas y probadas eléctricamente antes de instalarse. Cuando existan juntas de corcho neopreno en sitios donde se van a instalar accesorios éstas deberán cambiarse por nuevas, si son de neopreno **no se** limpian perfectamente, y deberán colocarse cuidadosamente y apretarse en forma de cruz para que el sello sea uniforme. Las conexiones de alta y baja tensión deben limpiarse completamente y apretarse sólidamente, excepto que sean de acoplamiento rápido las juntas no deberán comprimirse más de la mitad de su espesor los extremos de las boquillas no deberán someterse a grandes esfuerzos de tensión que rebasen los límites dados por el fabricante.

Los radiadores y tuberías de aceite previamente deberán lavarse con aceite limpio y seco, a una temperatura de 25°C. Si los radiadores no están diseñados para soportar el vacío total no deberán instalarse sino hasta después de que el tanque se ha llenado con aceite bajo vacío. Los gabinetes del cambiador de derivaciones bajo carga y el control de equipos auxiliares se -- instalarán y conectarán de acuerdo a los planos del fabricante, -- los termómetros, termostátos, niveles de aceite, válvulas de sobre presión, relevadores de protección y señalización también se instalarán según las instrucciones de fábrica. Revisar la operación de los cambiadores de derivaciones para confirmar que trabajen adecuadamente en los dos sentidos subir y bajar -- que el área

y la presión de contactos es adecuada en todas las derivaciones, deberá revisarse antes de sellar el transformador.

Cuando un transformador se va a someter a un tratamiento de vacío, los accesorios que no resistan el vacío pleno deberán sustituirse por bridas ciegas. Cuando se hizo un llenado preliminar con aceite y no se tubo el cuidado de revisar periódicamente el colchón de nitrógeno, el aceite se expulsará metiendo presión de nitrógeno todo el tiempo que dure el drenado con miras a la inspección interna. El transformador se dejará presurizado a 0.35 Kg/cm^2 de 12 a 24 Hrs. hasta que se logra el equilibrio de la mezcla, el cual es indicado por un mínimo de tres mediciones de punto de rocío, presión y temperatura con intervalos de una hora. Estas mediciones pueden servir como una guía para el grado de tratamiento de vacío subsecuente.

4.8 Secado del transformador después de la revisión interna.

La preparación de transformadores para servicio es -- una operación importante y una integrante de esta preparación -- es el secado.

La necesidad de lograr el grado de sequedad de los -- aislamientos cercano al obtenido en fábrica tiene una influen--cia considerable no solamente en el funcionamiento futuro, sino también para la vida del transformador.

El factor importante en el proceso de secado de trans

formadores es el agua residual permisible en los aislamientos.

Los transformadores de potencia de muy altos voltajes son secados en la fábrica a un contenido de agua o humedad residual del 0.5% del peso del aislamiento de un transformador, y a menudo son sujetos a una exposición inadvertida. El riesgo de humedecerse las estructuras y los aislamientos en forma muy rápida es reconocido generalmente, y que a pesar de las precauciones que se toman no es cierto que el grado de secado se mantenga, por esto es necesario e imprescindible confirmar las condiciones del transformador por medio de mediciones que determinen el secado necesario o para continuar secándolo. Esto se logra por la medición de la humedad residual de acuerdo a la carta de piper.

Otro procedimiento es que una vez que se ha hecho la inspección interna, se proceda al secado de la siguiente forma:

- 1.- Hacer vacío al transformador hasta alcanzar mínimo 1 Torr, sostener este valor por 48 hrs.
- 2.- Llenar el transformador hasta 40 cm abajo de la tapa con aceite desgasificado, deshidratado y filtrado a una temperatura de 75°C.
- 3.- Terminado el llenado continuar con el vacío por 24 horas para extraer los vapores residuales.
- 4.- Para transformadores de mas de 100 MVA y arriba de 400 Kv recircular el aceite en el tanque a 75°C durante 144

hrs.

5.- Realizar la medición de la resistencia de aislamiento de los devanados y rigidez dieléctrica del aceite para determinar el grado de secado.

4.9 Eliminación de las burbujas que permanecen en el aceite.

Hemos visto que cuando se termina la instalación de un transformador, y sobre todo de extra alta tensión este se llena con aceite desgasificado. No obstante esto, inmediatamente después de meter el aceite, aún dentro de los aislamientos se encuentran restos de pequeñas burbujas que pueden provocar descargas parciales. Por lo que considerando esto, es necesario dejar reposar el transformador durante cierto tiempo - antes de energizarlo, pues estas burbujas se disuelven en el aceite y desaparecen, ver la siguiente tabla 4.2.

TIEMPO DE REPOSO DESPUES DEL LLENADO				
TENSION NOMINAL DEL TRANSF. (kv)	TIEMPO DE REPOSO EN HORAS			Vacío Aplicado Durante el llenado (Torr)
	Transfor- madores Nuevos	Transformadores usados		
		Llenado Total	Llenado Parcial	
77	24	6	3	
110	24	12	6	5
154	36	12	6	5
187	42	24	12	1
215	48	24	12	1
500	72			0.5

Tabla 4:2

- NOTAS:**
- 1.- Temperatura del aceite 20 a 30°C
 - 2.- Un llenado parcial puede ser debido a una revisión interna superficial.
 - 3.- El tiempo de reposo es el período necesario a partir de la terminación del llenado, antes de que se aplique una tensión mayor a la tensión nominal.

4.10 Pruebas

Después de que el transformador ha sido montado y llenado con aceite, una fase muy importante de la puesta en servicio de los transformadores, son las pruebas que se le efectúen, ya que de los resultados que se obtengan sabremos si el transformador está en posibilidades de entrar en servicio sin temor de que ocurra una falla. Además nos dan una base de comparación para pruebas de mantenimiento futuro.

Las pruebas eléctricas finales de puesta en servicio que se efectúan en los transformadores son las siguientes:

- 1.- Prueba de resistencia de aislamiento
- 2.- Prueba de relación de transformación
- 3.- Prueba de factor de potencia
- 4.- Prueba eléctrica al aceite
- 5.- Pruebas de operación de alarmas

Por sobretemperaturas, buchholz, niveles de aceite, operación automática de bombas y ventiladores,

etc.

6.- Pruebas a cambiadores de derivaciones.

1.- Prueba de resistencia de aislamiento

El desarrollo de estas pruebas se realizó de acuerdo al punto 2.11 del capítulo II, que es en donde se trata lo referente a ésta prueba.

Después de la prueba de resistencia de aislamiento - deben realizarse otras pruebas, como las enumeradas al inicio de este inciso, para que analizadas en conjunto nos permitan - tomar una buena decisión.

2.- Prueba de relación de transformación

Esta prueba se realiza de acuerdo al punto 2.15. La relación de vueltas de los devanados se realiza para confirmar si esta relación coincide con la relación de voltajes que aparecen marcados en la placa del transformador y también verificar que todos los devanados y derivaciones estén como máximo - $\pm 0.5\%$ fuera de la relación teórica.

3.- Prueba de factor de potencia

Esta prueba se realiza de acuerdo al punto 2.12.

4.- Prueba eléctrica al aceite.

La presencia de humedad, oxígeno, partículas sólidas en suspensión, etc., reducen considerablemente las propiedades

dieléctricas del aceite, hasta hacerlo algunas veces inservible; estas propiedades como son: rigidez dieléctrica, factor de potencia, etc., determinan el estado de buen aislante eléctrico que debe tener un aceite para transformadores.

Las dos pruebas arriba mencionadas son de campo y es muy importante practicarlas en un aceite que se utiliza en un transformador para poder comparar los valores obtenidos con las especificaciones y saber si se encuentra dentro de los rangos permitidos.

Rigidez dieléctrica del aceite.-

Esta prueba sirva para determinar la tensión de ruptura dieléctrica del aceite aislante, que es una medida de su habilidad para soportar el esfuerzo dieléctrico.

De acuerdo a las normas CCONNIE 8.8-1 el aceite aislante se clasifica en:

Tipo S: Para tensiones de hasta 85KV.

M: Para tensiones de 115KV y mayores.

La tensión de ruptura dieléctrica, para ambos tipos de aceite debe ser como mínimo la siguiente:

Electrodos planos 2:54 mm de separación, 30KV mínimos.

Electrodos semiesféricos 1.02mm de separación, 20KV mínimos.

En este método se establecen dos formas para la de--

terminación de la tensión de ruptura dieléctrica, una por electrodos planos y la otra por electrodos semiesféricos, el procedimiento es similar en ambos casos.

Con electrodos planos

Aparato y equipo: El Baur con un motor que asegure un incremento de tensión de prueba de 3KV/seg.

Electrodos.- Los electrodos deben ser discos de bronce pulidos de 2.54 cm de diámetro y cuando menos 0.32 cm de espesor.

Preparación de la muestra.- La muestra debe consistir cuando mínimo de 2 litros de aceite, el recipiente que contendrá la muestra deberá lavarse con el mismo aceite antes de llenar la copa, con el objeto de que la prueba sea representativa del contenido de impurezas.

Procedimiento:

a) Llenado de la copa.- Se llena la copa lentamente hasta un nivel de 2 cm arriba del borde superior de los electrodos, no tocar el aceite con los dedos ni hablar teniendo enfrente la copa destapada y evitar que la copa se humedezca.

b) Temperatura de prueba.- La prueba deberá llevarse a cabo a 20°C.

c) Aplicación de tensión.- Después de un período de 2 ó 3 minutos de haber llenado la copa, se incrementa la ten-

si3n en intervalos de 3 Kv/seg. hasta que ocurra la ruptura, - la cual se conoce como una descarga continua.

d) Determinaci3n de la ruptura.- De cada muestra se toman cinco lecturas y de estas se saca el promedio el cual nos da el valor de tensi3n de ruptura diel3ctrica del aceite aislante.

Electrodos semiesf3ricos

Equipo de control para la tensi3n.- La relaci3n de tensi3n de elevaci3n debe ser de 1/2 KV/seg.

Debe haber un intervalo de por lo menos 3 minutos entre el llenado de la celda y la aplicaci3n de la tensi3n para la primera ruptura. En la fig. 4.2 se ilustra la conexi3n para esta prueba utilizando una copa standar.

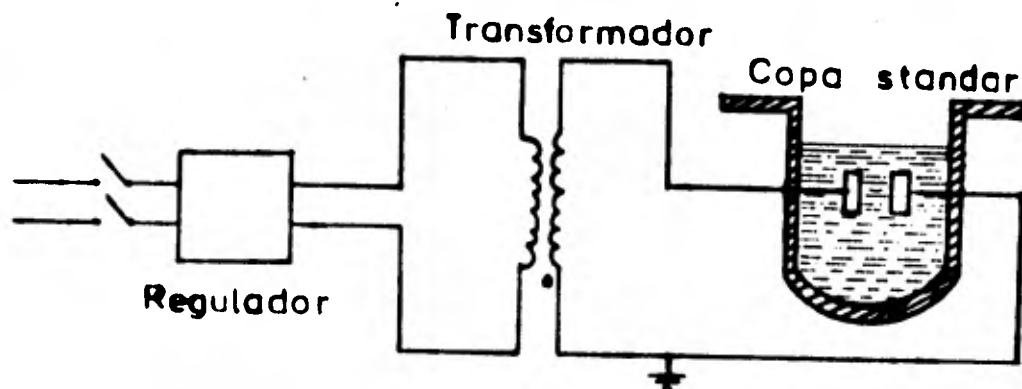


figura 4.2

Factor de potencia.- La prueba de factor de potencia es una de las pruebas mas modernas y se usa como ya hemos visto para obtener la condición de aislamiento de boquillas, devanados y aceite de transformadores.

El equipo utilizado en esta prueba es el mismo que se empleo para la prueba de factor de potencia del aislamiento.

Para la prueba de factor de potencia del aceite se usa una celda especial que básicamente es un capacitor, cuyo dieléctrico es el aceite que se encuentra bajo prueba.

La celda se deberá llenar hasta el valor indicado en ella. La forma de conectar el probador a la celda es la siguiente: El gancho de alta tensión se conecta a la manija de la copa, el arillo del cilindro exterior se aterriza con la terminal de baja tensión y el aro de guarda del cable de alta tensión al tornillo de guarda de la celda como se muestra en la fig. 4.3. Un aceite aislante nuevo deberá tener un F.P. máximo de 0.05% a 20°C.

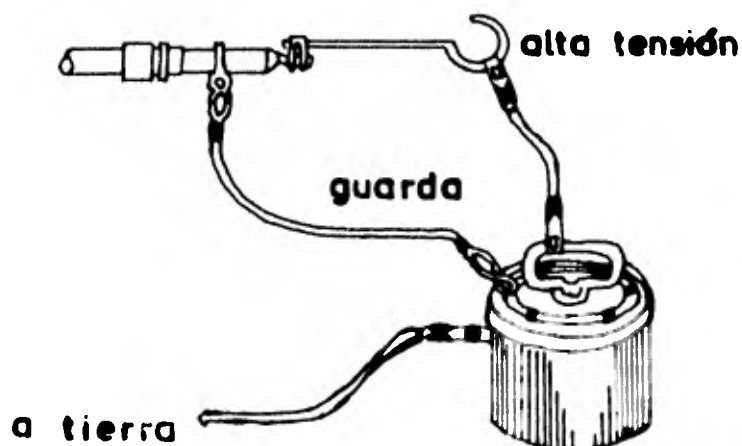


figura 4.3

5.- Pruebas de operación de alarmas por alta temperatura, por bajo nivel de aceite, por buchholz, por bombas y ventiladores, cambiador de derivaciones.

Termómetro para el aceite.- Se comprueba la indicación del termómetro calentando en un recipiente aceite de transformador y comparandó la lectura con un termómetro patrón para que su microswitch cierre a 75°C.

Termómetro de devanado.- Este termómetro se calibra -- del mismo modo que el anterior a una temperatura de 105°C, luego instalado en el transformador con una fuente de C. D. variable - se le pasan 10 amp. a 4 ó 7 volts a través de su transformador - de corriente saturable, este a su vez está conectado a la bobina calefactora del bulbo en el transformador, se lleva hasta que la aguja indique 105°C para que cierre un microswitch.

Niveles de aceite del conservador y cambiadores.- Se - verifica la operación de sus microswitch antes de instalarse, -- porque por su tipo de construcción no se pueden probar instalados, a menos que se le baje aceite al transformador, sus contactos deben cerrar cuando la aguja marca bajo nivel "MIN".

Relevador buchholz.- Son dos uno para el cambiador y - otro para el transformador, se les hace revisión interna para verificar que todos sus elementos esten en posición correcta, esto se efectúa en el momento de su montaje. Ambos traen una palanca exterior que hace mover sus flotadores para que envíen la señal-

de alarma o disparo en el momento de probar.

Indicadores de flujo.- Estos funcionan cuando las bombas están trabajando y sus contactos se abren y si una de ellas estando sus controles en posición de operación se para, cae la chapaleta indicando que no hay flujo de aceite y envía una alarma a través de sus contactos.

6.- Cambiador de derivaciones bajo carga.- Esta prueba se realiza para verificar que el cambiador opera correctamente. Si el transformador trae cambiador de derivación manual este es probado moviendo la manivela que trae para tal propósito.

Para el cambiador de derivaciones automático este es probado desde el gabinete de control del transformador, mandando una señal al cambiador para -- que este cambie de posición.

4.II Puesta en servicio

Tratándose de sistemas eléctricos de potencia hay fallas imprevisibles que escapan al control humano, de aquí que -- deberán extremarse los cuidados antes de poner en servicio un transformador.

Antes de energizar un transformador éste deberá haber reposado como mínimo el tiempo especificado en la tabla 4.2, -- por ejemplo en el caso de un transformador de 400 KV, el tiempo

mínimo de reposo es de 72 hrs. y justamente horas antes de esta prueba se deberá revisar por última vez lo siguiente:

- 1.- Que las conexiones en alta y baja tensión estén de acuerdo a la placa de datos del transformador.
- 2.- Purgar relevadores buchholz y boquillas.
- 3.- Que los niveles de aceite en las boquillas y tanque conservador estén normales.
- 4.- Que el tanque esté conectado sólidamente a tierra.
- 5.- Que las alimentaciones de C. A. y C. D. esten --- puestas en los gabinetes de control.
- 6.- Que no haya objetos extraños sobre el transformador como sogas, escaleras, tierras, etc.
- 7.- Que el área que va a estar energizada esté perfectamente delimitada con señales de advertencia.
- 8.- Que no haya vehículos abajo de las líneas o cerca de la zona de los transformadores.
- 9.- Que no haya personal trabajando cerca de la zona de prueba.
- 10.- Que el transformador no tenga fugas de aceite y que es te anclado a su vía.
- 11.- Que los cambiadores de derivaciones estén en la - posición nominal y libre de bloqueos eléctricos.
- 12.- Que las válvulas de los radiadores y cabezales es tén abiertas.

4.12 Pruebas finales

Se hacen en dos etapas:

- 1.- Energización
- 2.- Toma de carga

1.- Energización

Cuando se cuenta con un generador de la capacidad disponible para este tipo de prueba se aplica inicialmente el 50 % de la tensión nominal y se sostiene por unos minutos este valor. Luego se va subiendo gradualmente la tensión hasta el 75 % ,--- sosteniendo por unos minutos este valor. Se continúa subiendo la tensión hasta el 100 % de la tensión nominal luego se hacen dos switcheos (apertura y cierre del interruptor del lado de A. T.)

En esta prueba de voltaje gradual con máquina separada del sistema es normal que el voltaje se dispare a veces por problemas para controlar el generador, si este sobrevoltaje es menor del 25 % de la tensión nominal por unos minutos no hay -- riesgo de dañar el transformador.

Cuando no se cuenta con un generador, se conecta directamente a la línea y se hacen dos switcheos.

Después de aplicar la tensión nominal, el transformador permanece energizado ocho horas sin carga, durante este --- tiempo se observan cuidadosamente los indicadores de temperatura; se escucha en el tanque para ver si no hay ruidos anormales

o excesivos, se operan los enfriadores y se hace un barrido del cambiador de derivaciones automáticamente en todas sus posiciones, se hace un faseo en el lado de baja tensión con respecto a la línea a la que se conectó.

2.- Toma de carga

Una vez terminada la prueba anterior el banco está -- listo ahora para tomar carga.

Aunque la carga que se vaya a conectar sea menor que la nominal, se deben seguir observando durante una hora más -- principalmente la temperatura, ruidos y buchholz.

4.13 Mantenimiento general del transformador

Un programa de inspección y mantenimiento bien estudiado permitiera reducir al mínimo las interrupciones del servicio y los gastos de mantenimiento. Además de observar diariamente las condiciones generales de la máquina y su funcionamiento, recomiéndase organizar un sistema de controles periódicos, considerando con cuidado particular a los puntos que se indican a continuación.

1.- Temperaturas

La temperatura ambiente, la del aceite y la de los devanados (cuando este provisto de imagen térmica), deben controlarse con frecuencia en el curso del día para averiguar que el transformador no esté arriba de sus valores nominales.

2.- Niveles de aceite

Averiguar que el nivel de aceite sea correcto, en caso de pérdidas deberá añadirse de inmediato la cantidad que se necesite para no perjudicar el funcionamiento del transformador

3.- Regidez dieléctrica del aceite del transformador.

La frecuencia con que deberá efectuarse dichas averiguaciones dependerá de las condiciones climáticas del sitio de instalación, los resultados deberán ser minuciosamente registrados.

Será así mismo oportuno efectuar cada 2 ó 3 años como mínimo el análisis químico del aceite con el objeto de determinar si sus características son todavía las prescritas por las - normas.

4.- Valores de tensión y de carga

También estos valores deberán ser regularmente registrados para que sea posible establecer las condiciones correctas de funcionamiento.

5.- Aisladores

Los aisladores se deberán inspeccionar regularmente y mantenerlos libres de polvo u otros depósitos, donde existan -- graves condiciones atmosféricas, la limpieza de los aisladores- deberá mantenerse con cuidado aún mayor.

6.- Válvulas de explosión de diafragma

Para tener la certeza que ésta válvula funcionará regularmente en caso de intervención hace falta averiguar regularmente que su diafragma esté intacto. En caso de rotura se sustituye lo más pronto posible para evitar contacto prolongado entre el aceite y la atmósfera.

7.- Conexión a tierra

Para una protección eficiente es indispensable una buena conexión a tierra, realizada mediante una resistencia de bajo valor; esta se controlará muy a menudo, pues una tierra en malas condiciones puede ser motivo de varios trastornos.

8.- Relés

Se averiguará regularmente la calibración de los relés de protección, para cerciorarse que pueden señalar pronto una condición anormal de funcionamiento del transformador.

9.- Descargadores de sobretensiones.

Hará falta averiguar regularmente la calibración y la limpieza de los descargadores de tensión para garantizar la eficiencia de su acción de protección respecto al transformador

También se controlará que los descargadores esten conectados eficazmente a tierra.

10.- Sistema de refrigeración

Si el transformador es del tipo provisto de ventiladores y circulación forzada, puede suceder que los motoventiladores queden sin funcionar por largos períodos; en esté caso, se-

rá oportuno ponerlos en marcha periódicamente para cerciorarse que sus condiciones de funcionamiento sean satisfactorias, también se cuidará de inspeccionar a los radiadores y quitar los depósitos que se hayan formado entre sus elementos.

11.- El deshidratador

Se averiguará periódicamente el color de los gránulos de silica-gel pues la buena preservación del aceite del transformador también depende del grado de desecación de dichos gránulos.

CAPITULO V

DISPOSITIVOS DE PROTECCION Y CONTROL PARA TRANSFORMADORES

A continuación se describen los diferentes tipos de dispositivos de protección y control más usuales en este tipo de transformadores de extra altos voltajes.

El transformador se encuentra protegido contra fallas internas las cuales pueden ocurrir cuando éste se encuentra bajo tensión y en condiciones normales de operación.

Para prevenir que este tipo de fallas cause grandes daños a el transformador, éste se encuentra protegido contra fallas debidas a cortocircuito entre espiras o a tierra, fallas entre espiras y núcleo magnético, por medio de la protección diferencial.

Así como indicadores y alarmas para que entren en operación otros dispositivos auxiliares que controlan la operación del transformador, como son el termómetro para el aceite, termómetro de devanados, termostato, relevador buchholz, indicadores magnéticos de nivel de aceite, indicadores de flujo de aceite y el deshidratador o deshumedificador.

La protección diferencial es un dispositivo de protección el cual funciona sobre un porcentaje o ángulo de fase u otras cantidades de dos corrientes o de algunas otras cantidades eléctricas.

Como se observa la protección diferencial es útil en casos de fallas entre espiras así como de fallas entre fases o a tierra si la corriente de falla es bastante elevada.

Los requisitos básicos para una protección de un transformador al utilizar la protección diferencial son los siguientes:

- 1.- No debe funcionar para cargas o fallas externas a la zona de protección.
- 2.- Debe funcionar únicamente para fallas internas bastante severas.

A continuación describimos brevemente en que consiste la función de cada uno de los puntos citados anteriormente.

5.1 Termómetro para el aceite

Este termómetro de mercurio sirve para controlar la temperatura del aceite, está constituido por un bulbo insertado en la parte superior del tanque del transformador y conectado por un tramo de un tubo capilar de acero revestido de plomo a el termómetro de carátula.

Este termómetro tiene tres agujas las cuales indican la temperatura de operación, alarma y desconexión.

Al subir la temperatura arriba de la determinada por la aguja de operación, esta se mueve hasta la posición donde se encuentra la aguja de alarma cerrando el circuito que accionará la señal del tablero.

Al continuar la temperatura subiendo, la aguja seguirá moviéndose hasta llegar a la posición de la aguja de desconexión y esto determinará el cierre de otros circuitos que actuarán --- directamente sobre el interruptor principal y desconectará el -- transformador de la línea.

5.2 Termómetro de devanados

Por medio de este termómetro se conoce la temperatura de los devanados. La medición de la temperatura se obtiene considerando las variaciones de la resistencia con el variar de la temperatura de el elemento sensible.

Es instalado en el transformador a través de su transformador de corriente saturable y este a su vez está conectado a la bobina calefactora del bulbo en el transformador, la cual va a indicar la temperatura para que cierre sus microswitchs y mande una señal de alarma.

5.3 Termostato

Estos aparatos se emplean normalmente para determinar automáticamente el arranque y el paro de los motoventiladores y de las motobombas del conjunto de refrigeración del transformador o bien para accionar a distancia dispositivos de alarma y - desconexión.

Un elemento sensible, que se introduce dentro de una vaina en las capas más calientes del aceite del transformador,

determina la intervención de un microinterruptor o de un interruptor de mercurio insertado en un circuito de señalamiento o de mando.

5.4 Relevador buchholz

El relevador buchholz se emplea para proteger a los transformadores contra efectos de descargas entre partes que están bajo tensión, contactos de tierra, cortos circuitos entre espiras, interrupción de fases, quemaduras del hierro y pérdidas de aceite en el tanque.

Este tipo de relevador interviene en presencia de las formaciones de gas y de las rápidas variaciones de el nivel del aceite que son ocasionadas en casos de desperfectos en el transformador, emitiendo una señal de alarma seguida cuando sea grave o persistente el desperfecto, por la desconexión del transformador.

Este relevador va colocado entre el tanque conservador y el cuerpo principal del transformador, por medio de una tubería y colocado entre dos válvulas, encontrándose normalmente lleno de aceite su interior en el cual se tienen dos flotadores, dos contactos de mercurio y una paleta sensible a las corrientes del aceite que van hacia el tanque conservador.

El contacto superior o de señalamiento se cierra, por mando de un flotador, cuando un flujo de gas en el relevador o-

cualquier otro motivo determina la bajada de el nivel del aceite contenido en la parte superior del relevador.

El contacto inferior, enlazado con el circuito de des-
conexión, se cierra también por mando de un flotador, cuando el nivel de el aceite baja hasta alcanzar la parte inferior del re-
levador, el cierre de dicho contacto también puede ser ocasiona-
do por una paleta sensible a las corrientes del aceite que se -
producen en el conducto que va al tanque conservador.

La paleta inferior esta provista de un contra peso --
ajustable que permite la determinación de con que velocidad del
aceite se efectua el movimiento de la paleta y el cierre de el
contacto que accionará la intervención de los interruptores.

En caso de desperfecto en el interior del transforma-
dor el gas que se desarrolle, se acumulará en el relevador y -
accionará a los contactos de alarma y de disparo, la velocidad
con que se acumulen los gases y por consiguiente la velocidad -
de intervención, depende de la gravedad del desperfecto.

5.5 Indicador magnético de nivel

Los indicadores magnéticos de nivel se emplean para -
controlar y señalar el nivel del líquido aislante en el tanque
principal del transformador y en los recipientes y compartimien-
tos que con dicho tanque estan conectados.

Estos indicadores pueden por medio de un interruptor

de disparo accionar una señal de alarma, cuando el nivel del -- líquido alcance un punto demasiado bajo para el funcionamiento normal del transformador.

El indicador esta provisto de contactos de alarma incluyendo un interruptor de disparo accionado por un flotador -- aplicado al eje de la aguja.

5.6 Indicadores de flujo de aceite

Existen dos; uno por bomba, cuando trabajan las bom-- bas sus contactos se abren y si una de ellas estando sus contro-- les en posición de operación se para cae la chapaleta indicando que no hay flujo de aceite y envía una alarma a través de sus -- contactos.

5.7 Deshumidificador

Este dispositivo se emplea para eliminar la humedad-- provocada por la condensación en el interior del tanque debido a las variaciones de la temperatura.

Es un dispositivo que contiene en su interior un inhi-- bidor de humedad silica-gel y esta conectado al tanque del --- transformador por medio de una tubería.

En la siguiente fig. 5.1 se muestra el diagrama unifi lar de la protección de un transformador.

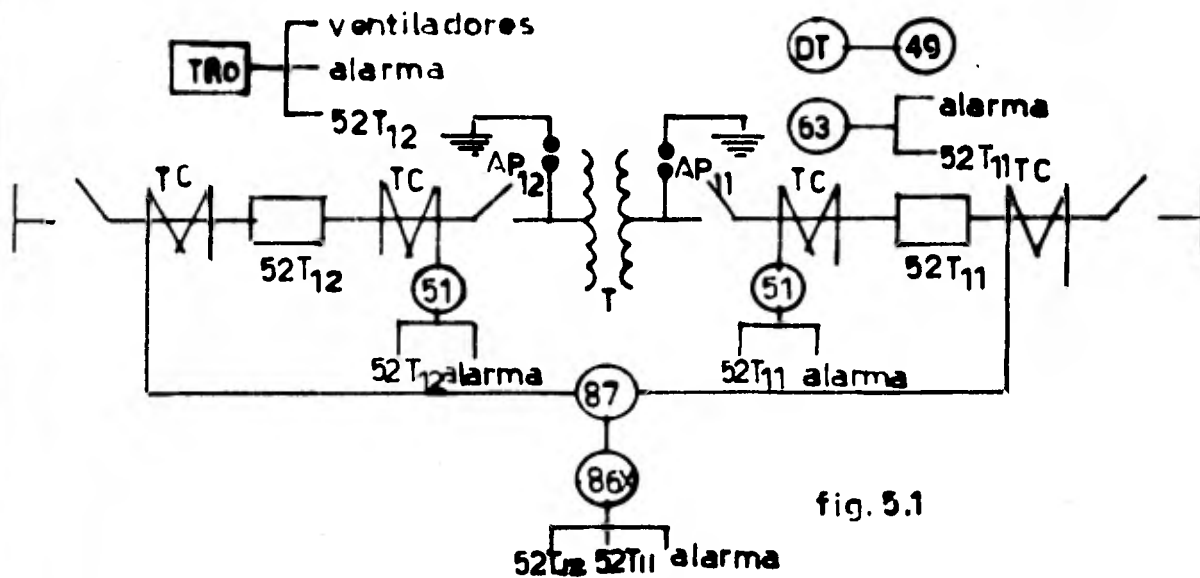


fig. 5.1

Los números convencionales para designar dispositivos eléctricos, de acuerdo con la A. S. A. son los siguientes:

- 51 N.- Relevador de sobrecorriente en falla de tierra al neutro.
- 52 .- Interruptor o contactor de aceite para C. A.
- 49 .- Relevador o dispositivo térmico para C. A.
- 63 .- Relevador de presión, nivel o gasto, llamado - buchholz.
- 87 .- Relevador diferencial de corriente.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- INSTALLATION AND MAINTENANCE OF POWER TRANSFORMERS.
Westinghouse.
- 2.- SHIPMENT, INSTALLATION AND STORAGE OF SHELL FORM -
TRANSFORMERS.
Westinghouse.
- 3.- TRANSFORMATORI MEDI E GRANDI.
Italfrafo Spa.
- 4.- CURSO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA
Cía. de Luz y Fuerza del Centro, S.A.
- 5.- NORMAS DE METODOS DE PRUEBA, TRANSFORMADORES DE DIS-
TRIBUCION Y DE POTENCIA.
cconnie.
- 6.- TRANSFORMADORES DE POTENCIA.
Westinghouse.
- 7.- PUESTA EN SERVICIO DE TRANSFORMADORES DE ALTA Y EX-
TRA ALTA TENSION.
Comisión Federal de Electricidad.
- 8.- INSTRUCTIVO PARA EMBARCAR Y DESEMBARCAR TRANSFOR-
MADORES EN BAÑO DE ACEITE Y NITROGENO SECO.
IEM.
- 9.- EMBARQUE E INSTALACION DE TRANSFORMADORES DE PO--
TENCIA.
IEM.
- 10.- TRANSFORMADORES.
Ing. Héctor M. Pacheco.

11.- ELECTRIC MACHINERY AND TRANSFORMERS.
Irving L. Kosow.

12.- MAQUINAS ELECTRICAS.
Tercera Parte.
Ing. Carlos Luca M.

13.- CURSO DE TRANSFORMADORES Y MOTORES -
TRIFASICOS DE INDUCCION.
Ing. Gilberto Enríquez Harper.