

**ESCUELA POLITECNICA  
NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN  
TRANSFORMADOR CON BOBINA FLOTANTE**

**TESIS DE GRADO**

**NELSON DAVILA**

**QUITO-NOVIEMBRE-1995**

## CERTIFICACION

En calidad de Director de tesis de grado, certifico que la tesis previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico bajo el tema "Diseño y construcción de un transformador con bobina flotante", ha sido desarrollada de manera personal por el señor Nelson Dávila Jijon.



Ing. Milton Toapanta Oyo

Director de tesis.

## **AGRADECIMIENTO**

**A mi familia, a la Escuela Politécnica Nacional, a la Facultad de Ingeniería Eléctrica; a mi Director de Tesis el Ing. Milton Toapanta Oyos, al señor Enrique Breedy, Gerente de la Empresa S.E.E.I.N.; al personal del Laboratorio de Máquinas Eléctricas y del Taller Eléctrico de la Facultad de Ingeniería Eléctrica; y a todas las personas que de una u otra forma apoyaron para culminar esta etapa de mis estudios superiores.**

**Muchas gracias.**

**Nelson Dávila J.**

## DEDICATORIA

Con mucho cariño para mi esposa  
NORA por su apoyo, ayuda,  
comprensión, y por los difíciles momentos  
de soledad, a mis hijos por quienes me  
esfuerzo día a día .

Nelson.

## INDICE

	Pag.
CAPITULO I: Introducción	1
1.1 Introducción, Alcance y Objetivos	1
1.2 Propiedades del núcleo ferromagnético	4
1.3 El transformador	13
1.4 El transformador con bobina flotante	29
CAPITULO II: Diseño y construcción de transformadores convencional y de bobina flotante	42
2.1 Parametros de diseño	42
2.2 Diseño	61
2.3 Dimencionamiento de capacitores y debanados	73
2.4 Herramientas necesarias y construcción.	81
CAPITULO III : Pruebas y Mediciones	92
3.1 Pruebas de corto circuito	93
3.2 Pruebas de circuito abierto	96
3.3 Determinación de parámetros	98
3.4 Pruebas en carga	102
3.5 Curvas características y comparaciones.	102
CAPITULO IV : Análisis de Costos	111
4.1 Costos directos fijos	113
4.2 Costos directos de operación	114
4.3 Costos de mantenimiento	117
4.4 Análisis de ahorro de energía	118
4.5 Discusión de los costos	119
CAPITULO V: Conclusiones y Recomendaciones	125
Bibliografía.	129

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCION**

### **1.1 INTRODUCCION, ALCANCE Y OBJETIVOS**

El alto costo de la energía eléctrica, penalizaciones económicas a empresas industriales por factor de potencia que esta fuera del aceptado por las compañías suministradoras de energía eléctrica, son entre otros los motivos por los cuales ha surgido en nuestro país la inquietud técnica y económica de utilizar en forma óptima la energía eléctrica.

Estas inquietudes plantean la idea de utilizar una bobina flotante en la construcción de transformadores eléctricos. Esta bobina flotante se cierra a través de un capacitor permanente. La principal característica de usar esta bobina flotante es la de obtener un menor consumo de energía consiguiéndose de esta manera una disminución de las las pérdidas en el núcleo y en el cobre del transformador, mejorando la eficiencia, la regulación de voltaje y el factor de potencia, lo cual se demuestra de las pruebas experimentales realizadas en el transformador.

Con éste propósito se realizará el análisis teórico de circuitos electromagnéticos y transformadores, así como el rebobinado de dos transformadores uno convencional y otro con bobina flotante.

La construcción debe realizarse en núcleos de iguales características para tener una comparación justa. La potencia de los transformadores será de 2.2 Kva., y tendrán una alimentación monofásica de 120 v. a fin de comparar los resultados que arrojen las pruebas experimentales.

Los transformadores se someterán a pruebas para analizar sus características electromagnéticas, curvas de magnetización, pérdidas, y regulación de voltaje que permitirán comparar los dos transformadores contruïdos.

En el capítulo uno se dará un enfoque de lo que es el transformador con bobina flotante el cual consiste básicamente de un devanado adicional en el primario del transformador que se cierra a través de un capacitor, terminando con el planteamiento y resolución del circuito equivalente del transformador con bobina flotante.

Después de haber resuelto teóricamente el problema planteado en el primer capítulo se particularizará en el diseño y construcción de dos transformadores uno tradicionalmente y otro con bobina flotante ( 2.2 kva., 120 / 60 v, monofásico, 60 hz. ) , se hará un estudio de los materiales y herramientas necesarias para este propósito, así como también se dimensionará el capacitor, número de espiras de los bobinados, secciones de los conductores, dimensiones del núcleo, etc. Terminando el capítulo dos con los transformadores armados.

Los transformadores se someterán a pruebas de laboratorio realizando mediciones de los parámetros eléctricos . Para obtener curvas de magnetización, rendimiento, regulación de voltaje, comparar los dos transformadores y verificar las ventajas y desventajas entre ellos.

Luego se hará un análisis de los costos directos fijos, de operación, mantenimiento y costos por consumo de energía para transformadores, se discutirá el ahorro energético al utilizar un transformador con bobina flotante y comparará con el transformador convencional, de tal forma que se justifique o no la utilización de esta tecnología .

Por último se sacará conclusiones y recomendaciones de los análisis cualitativos, cuantitativos, y de los resultados obtenidos de las pruebas efectuadas a los dos transformadores.

Por tanto, el objetivo del presente trabajo es analizar el planteamiento teórico del transformador con bobina flotante, resolverlo analíticamente, construir dos transformadores uno convencional y otro con el principio de la bobina flotante para someterlos a pruebas experimentales, analizar los costos y determinar si es o no conveniente la utilización de esta tecnología en la fabricación de transformadores que consuman menor energía de la fuente de suministro y que mejoren las condiciones de operación de los transformadores construidos actualmente.

## 1.2 PROPIEDADES DEL NUCLEO FERROMAGNETICO

Una de las mejores maneras para entender las propiedades e importancia de un material, es la de tratar de imaginar que éste no existe, y que se podría hacer para suplir esta falta, en el diseño de los aparatos que usan estas propiedades.

Si los materiales usados en la construcción de motores, transformadores, relés y muchos otros equipos electromagnéticos perdieran súbita o inesperadamente sus propiedades magnéticas, estos aparatos no tendrían un uso prolongado. Es difícil imaginar como sin estos materiales, nuevos diseños pueden ser desarrollados y la variación de factores como espacio, tiempo y dinero dedicados para este propósito.

Obviamente cualquier substancia que permita una gran densidad de flujo para una fuerza magnética dada y que permita encerrar el flujo en un camino predefinido tiene un valor inestimable para el diseño, estas propiedades se encuentran en el acero y sus aleaciones con cobalto, tungsteno, níquel, aluminio y otros metales, a los que se conoce como materiales ferromagnéticos.

Las propiedades magnéticas de los materiales dependen del espín de electrones y del movimiento orbital de los electrones alrededor de los núcleos atómicos. En vista de que una carga en movimiento produce un campo magnético alrededor de la misma, los electrones en movimiento y con espín actúan como magnetos minúsculos. En muchos átomos los

espines opuestos se neutralizan mutuamente, pero cuando existe un exceso de electrones con espín en una dirección, se produce un campo magnético. A excepción de los materiales ferromagnéticos, los cuales pueden formar imanes permanentes, todas las sustancias presentan efectos magnéticos sólo cuando están sometidas a un campo electromagnético externo.

El campo externo se define y caracteriza por una potencia de campo magnético  $H$ , y la inducción magnética,  $B$ . La magnitud de la inducción magnética se calcula mediante el número de líneas de inducción hipotéticas por unidad de área normal, a su dirección, y en el sistema cegesimal se mide en unidades gauss. La inducción magnética también se conoce como densidad de flujo, ya que la inducción en un punto es igual al flujo por unidad de área.

La potencia del campo magnético, conocida como intensidad magnética o fuerza magnetizadora, se puede representar en forma semejante a la inducción magnética, mediante líneas de magnetización. El campo magnético  $H$  se mide en amperes (sistema SI) por metro, o en oersteds (unidades cegesimales).

$B$  y  $H$  están relacionadas por la permeabilidad magnética de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$B = \mu H \quad (1.2.1)$$

La permeabilidad ( $\mu$ ) es una medida de la capacidad del material para ser magnetizado, o la facilidad con la cual una fuerza magnética  $H$  puede inducir un flujo de densidad  $B$  en un circuito magnético.

En el espacio libre  $B = \mu_0 H$  en donde  $\mu_0$  es la permeabilidad en vacío y es igual a  $(4\pi) \cdot 10^{-7}$  henrios/m., en los materiales sólidos  $\mu$  es distinto de  $\mu_0$  y la permeabilidad relativa es  $\mu_r = \mu / \mu_0$ .

Desde el punto de vista magnético todos los materiales se caracterizan por ser diamagnéticos, paramagnéticos o ferromagnéticos, lo que depende de su comportamiento bajo la influencia de un campo magnético. Además los materiales ferromagnéticos se subdividen en antiferromagnéticos y ferromagnéticos.

La figura 1 presenta cuatro clases de magnetismo con diversas interacciones interatómicas.

Las sustancias diamagnéticas se componen de átomos que no tienen momentos magnéticos permanentes, sino débiles momentos magnéticos inducidos.

Las sustancias paramagnéticas tienen esta propiedad porque los átomos o iones poseen un número impar de electrones que producen un momento magnético residual permanente.

Los átomos con números pares de electrones pueden ser paramagnéticos, si algunos de los subniveles electrónicos interiores están incompletos. Los materiales diamagnéticos asumen una posición perpendicular a la dirección de un campo aplicado mientras que los materiales paramagnéticos se alinean en forma paralela a la dirección del campo.

Los materiales ferromagnéticos se caracterizan por uno o más de los siguientes atributos.

a.- Pueden ser magnetizados mucho más fácilmente que otros materiales, esta característica se debe a una elevada permeabilidad relativa.  $\mu_r = \mu / \mu_0$ .

b.- Tienen una alta intensidad de flujo intrínscico.

c.- Son magnetizados con diferente grado de facilidad para diferentes valores de fuerza magnetizante, esto se debe a la relación no lineal entre B y H.

d.- Un incremento en la fuerza magnetizante produce un cambio de flujo diferente al producido por un decremento igual en la fuerza magnetizante. Esto indica que la relación  $B = \mu H$  es no lineal y multivaluada.

e.- Retiene la magnetización cuando la fuerza magnetizadora es removida.

f.- Tiende a oponerse a revertir la magnetización una vez que esta ha comenzado.

El grado de importancia de estas características, está dado por la aplicación particular en la que será utilizado el material ferromagnético.

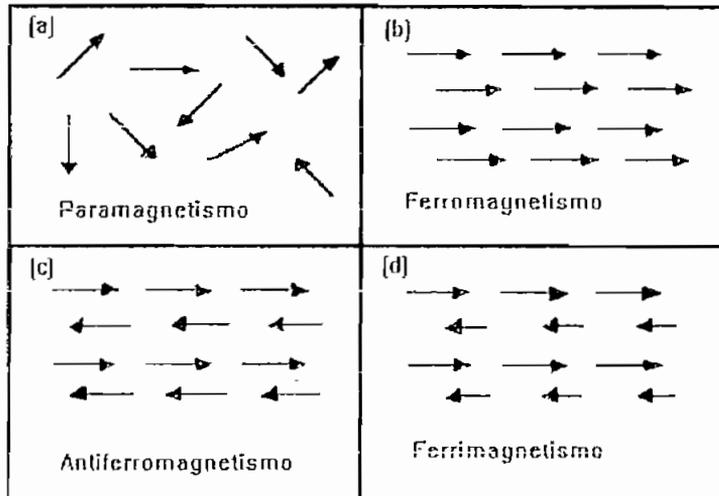


Fig. 1  
Cuatro clases de magnetismo con diversas interacciones interatómicas.  
a).Paramagnetismo  
b).Ferromagnetismo.  
c).Antiferromagnetismo.  
d).Ferrimagnetismo.

## CURVA DE MAGNETIZACION

En vista de que la relación entre la intensidad magnética  $H$  y la inducción magnética  $B$  no es lineal, los cambios de  $B$  con respecto a las variaciones de  $H$ , se representan mejor mediante una curva de magnetización ( Fig. 2) , llamada curva de magnetización normal la cual es obtenida trazando una curva de valoración simple uniendo la puntas extremas de una serie de lazos de histéresis (fig. 3) simétricos de un mismo material obtenidos para distintos rangos de variación del campo magnético . Se puede definir tres zonas características en la curva de magnetización.

La sección inicial tiene una inclinación definida conocida como permeabilidad inicial, la sección intermedia es la más inclinada y, en esta sección, la permeabilidad tiene un valor máximo, la sección superior declina y alcanza la línea horizontal marcada como  $B_s$ , que representa la saturación de magnetización del material. Por encima de esta línea ningún incremento en  $H$  causará un incremento útil en  $B$ .

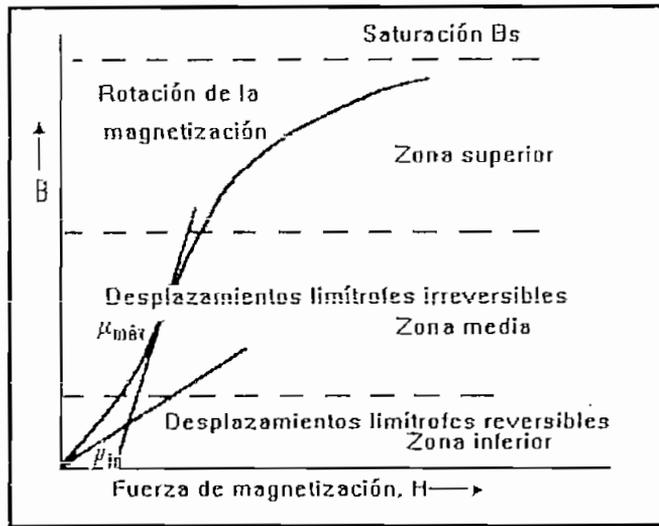


Fig. 2

Curva de magnetización (inducción magnética o densidad de flujo  $B$ , contra campo magnético o fuerza magnetizadora  $H$ ).  $\mu_{in}$  es la permeabilidad inicial;  $\mu_{m\acute{a}x}$  denota la permeabilidad máxima, y se define como la inclinación máxima de la curva de magnetización o imantación.

## HISTERESIS

La histéresis se puede definir como un retardo o "espacio intermedio" en cambios de la magnetización, debido a variaciones en el campo magnético. Si un material ferromagnético es sometido al incremento y disminución de

los campos magnéticos, los cambios en la inducción magnética graficada contra el campo magnético, produce un lazo de histéresis.

Al incrementar el campo magnético  $H$ , también aumentará la inducción magnética  $B$ , y la curva de magnetización seguirá la línea  $OB$  (fig. 3). Al aminorar el campo  $H$ , la curva de magnetización no coincide con la curva original  $OB$ , sino que sigue la línea  $BC$ . En el punto  $C$ , donde el campo  $H$  es cero, la inducción magnética no se vuelve cero, sino que adopta un valor  $B_r$ , conocido como inducción residual. Si el campo magnético ahora es aplicado en la dirección negativa, se alcanza el punto  $D$ , en donde la inducción magnética es cero y la fuerza magnetizadora se vuelve negativa teniendo un valor de  $H_c$  este valor negativo del campo magnético produce la desmagnetización y se conoce como fuerza coercitiva. Un incremento ulterior en el campo magnético en la dirección negativa produce una inducción máxima, pero en la dirección opuesta (punto  $E$ ). Si se continua en esta forma, se obtiene la curva  $EFGB$ , y se completaría el ciclo. El área encerrada se conoce como lazo de histéresis, y representa la pérdida de energía durante ese ciclo.

Cuando el campo magnético aplicado varía en forma cíclica a una velocidad finita, pueden resultar importante los efectos de la corriente parásita o de "remolino", la magnitud de estas corrientes depende de la frecuencia y la densidad de flujo impuestas por la aplicación del campo magnético, y de la resistencia específica y el espesor del material en sí., el efecto de la corrientes parásitas es el incrementar el campo magnético  $H$  a la misma inducción, produciendo un lazo de histéresis mucho más amplia. La suma de la pérdida por histéresis y de las pérdidas por corrientes parásitas se conoce como pérdida esencial total,



TABLE I — REPRESENTATIVE PROPERTIES OF FERROMAGNETIC MATERIALS

Magnetically Soft Materials	Elements	Composition	Intrinsic Saturation $B_{max}$	Residual Flux Density $B_r$	Coercive Force $H_c$	Typical Maximum Permeability $\mu_{max}$	Typical Initial Permeability $\mu_i$	Cost
		approx. parts per 100	kilogausses	kilogausses	oersteds	kilogausses/oersteds	kilogausses/oersteds	cents/lb
Magnetic Iron (Purified in H <sub>2</sub> )	Fe	99.98	21.5	13.6	0.05	275	25	7
Sandcast	Fe, Si, Al	85, 9, 5, 5.5	10.0	5.0	0.05	120	30	3
78.5 Permalloy	Ni, Fe, Mn	78.5, 20.9, 0.6	10.7	6.0	0.05	105	9	23
Hipernik	Fe, Ni	50, 50	15.0	7.5	0.06	90	6	18
Mumetal	Ni, Fe, Cu, Mn	74, 20, 5, 1	8.5	6.0	0.05	80	7	27
4-79 Mo-Permalloy	Ni, Fe, Mo, Mn	79, 16.4, 4, 0.6	8.5	5.0	0.05	72	22	32
High-Silicon Steel	Fe, Si	95.5, 4.5	19.0	5.0*	0.5*	8.3	0.750	8
Low-Silicon Steel	Fe, Si	99.1	21.0	8.5*	0.7*	5.2	0.350	7
Permendur	Fe, Co	50, 50	24.5	14.0	2.0	5.0	0.800	69
7-70 Permivar	Ni, Fe, Co, Mn	70, 22.4, 7, 0.6	12.5†	2.4†	0.6†	1.0†	0.850	35
45-25 Permivar	Ni, Fe, Co, Mn	45, 20.4, 25, 0.6	15.5†	3.5†	1.4†	1.3†	0.365	50
Conpernik	Fe, Ni	50, 50	15.0	.....	.....	1.0	0.175	18
Cast Steel	Fe, C	.....	20.0	.....	3.0*	1.0	0.175	1
Cast Iron Annealed	Fe	.....	16.0	3.5	11.0*	0.5	0.125	1
12.5-80 Mo-Permalloy	Ni, Mo, Fe	80, 12.5, 7.5 (Losses magnetic properties all 40 degrees C.)	.....	.....	.....	.....	.....	40

\*  $B_r$  and  $H_c$  at  $H_{max} = 10$  kilogausses instead of from saturation. † These are not the conditions under which Permivar is useful.

Magnetically Hard Materials	Elements	Composition	Retentivity $B_r$	Coercivity $H_c$	Permeability $\mu_{max}$	Cost
		approx. parts per 100	kilogausses	oersteds	( $H_c/H_{max}$ )	cents/lb
Alnico V Cast	Fe, Co, Ni, Al, Cu	51, 24, 14, 8, 3	12.5	550	$4.5 \times 10^4$	50
Alnico Metal	Fe, Co, Ni, Ti, Al	45, 27, 18, 6.7, 3.3	7.1	780	2.0	55
Alnico II Cast	Fe, Ni, Co, Al, Cu	54.5, 17, 12.5, 10, 6	7.2	540	1.6	26
Alnico I Cast	Fe, Ni, Al, Co	63, 20, 12.5	7.3	430	1.4	17
Mishima Metal	Fe, Ni, Al	55, 29, 15	6.0	550	1.4	15
Remalloy	Fe, Mo, Co	71, 17, 12	10.5	250	1.1	33
Coalite Steel	Fe, Co, C	64, 35, 1	9.5	260	1.05	62
Turbon Steel	Fe, W, C	95, 0, 1	10.0	80	0.34	9
Chrome Steel	Fe, Cr, C, Mn	96, 3, 1, 0.4	9.7	65	0.30	4

### 1.3 EL TRANSFORMADOR

El transformador es un dispositivo electromagnético estático que consta de dos o más devanados mutuamente fijos y acoplados inductivamente entre sí y destinado a la transformación de los parámetros de una corriente alterna (voltaje, corriente) - PRIMARIA- en otra -SECUNDARIA- de características diferentes.

Un transformador está constituido esencialmente de un núcleo magnético en el cual están alojados dos grupos distintos de bobinas que forman respectivamente los devanados primario y secundario, los cuales guardan una relación que permite obtener un voltaje mayor o menor que el disponible de la red. El devanado primario es aquel en el cual se aplica la fuente de voltaje independiente de ser un devanado de alto o bajo voltaje. El otro devanado al cual se conecta directamente la carga es el devanado secundario.

Como el fenómeno de inducción electromagnética tiene lugar en aparatos estáticos únicamente cuando el flujo magnético está variando continuamente, es claro que los transformadores estáticos pueden ser usados únicamente en circuitos de corriente alterna.

Si una fuerza electromotriz alterna es aplicada al devanado primario de un transformador con el devanado secundario en circuito abierto una corriente muy pequeña fluirá únicamente en el devanado primario la cual magnetiza el núcleo y supe las pérdidas en el hierro del transformador. Como un flujo magnético variante en el tiempo se cierra en el núcleo, induce una fuerza electromotriz en ambos devanados (primario y

secundario) . Los amperios-vuelta de magnetización estan dados por la corriente de magnetización y el número de espiras del devanado primario.

La corriente en vacío esta dada por los amperios-vueltas en vacío dividido para el número total de espiras del primario. Como el devanado primario y secundario estan físicamente montados en el mismo núcleo y como el flujo magnetizante es común a ambos, obviamente el voltaje inducido en una sola espira de cualquiera de los dos devanados será el mismo , y los voltajes inducidos en el devanado primario y secundario guardan una proporción directa al número de espiras de cada devanado respectivamente.

El voltaje inducido, el flujo y número de espiras se relacionan mediante la siguiente ecuación.

$$E = 4K_f\Phi_m Nf \quad 1.3.1$$

Donde:

$E$  = Valor r.m.s.de la fuerza electromotriz inducida en el devanado considerado.

$K_f$  = Factor de forma de la onda de la fuerza electromotriz.

$f$  = Frecuencia en ciclos sobre segundos.

$\Phi_m$  = Flujo magnético total a través en webers (valor máximo).

$N$  = Número de espiras en el devanado a consideración.

### 1.3.1 CONDICIONES EN VACIO

Considerando el transformador de la figura 4 con el secundario en circuito abierto y con una tensión alterna  $v_1$  aplicada en los terminales del primario: en estas condiciones circulará por el primario una pequeña corriente  $i_p$  denominada de excitación, que creará un flujo alterno en el

circuito magnético, cuyo flujo a su vez inducirá en el propio primario una f.e.m.(fuerza electromotriz) dada por la fórmula.

$$e_1 = d\lambda_1/ dt = N_1 d\phi/dt \quad 1.3.2$$

En la que  $\lambda_1$  es el flujo concatenado con el primario,  $\phi$  es el flujo ( supuesto todo él confinado en el núcleo ) y  $N_1$  el número de espiras primarias.

La ley de Lenz dice que  $e_1$  es una fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m) de polaridad respecto a la de  $v_1$ , como se indica con + y - en la (fig. 4). Esta fuerza contraelectromotriz junto con la caída de tensión en la resistencia  $r_1$  del primario deben compensar la tensión  $v_1$  aplicada es decir:

$$v_1 = r_1 i_\phi + e_1 \quad 1.3.3$$

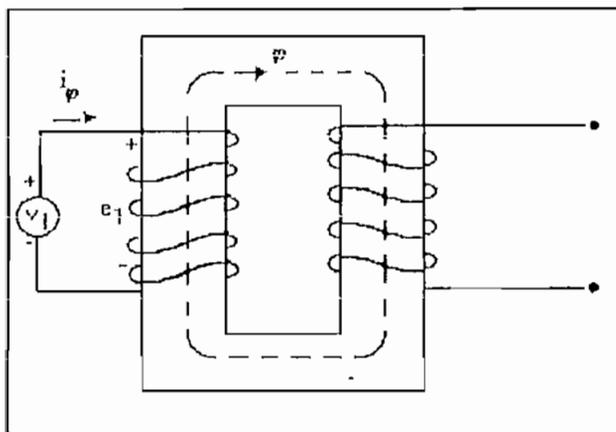


Fig. 4  
Transformador con el secundario abierto.

Debido a que las propiedades magnéticas del hierro no obedecen a una función lineal la corriente de excitación difiere de la forma de onda del flujo, puede hallarse gráficamente la curva de la corriente de excitación en función del tiempo, partiendo de las características magnéticas del material de que esta formado el núcleo siguiendo el procedimiento indicado en la figura 5.

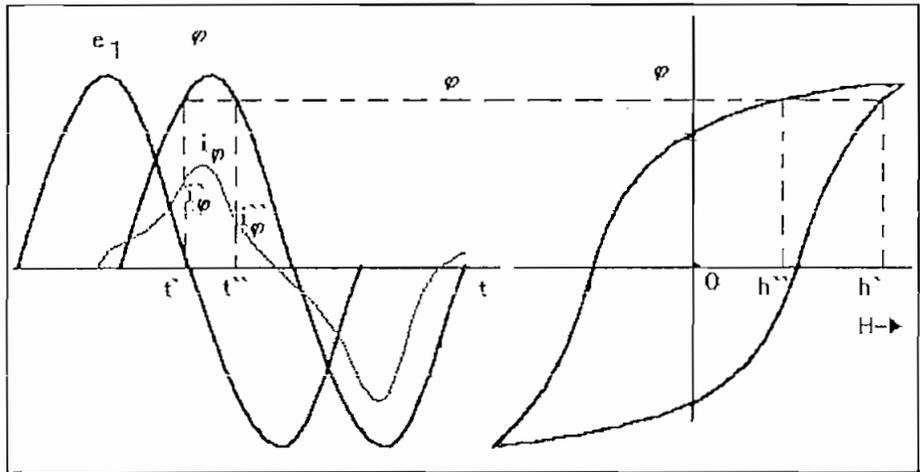


Fig. 5  
Fenómenos de excitación. (a) ondas de tensión, flujo e intensidad de excitación. (b) ciclo de flujo - fuerza magnetizadora (H) correspondiente.

En la figura fig. 5 (a) están trazadas las ondas senoidales de tensión  $e_1$  y de flujo  $\phi$ , ya que si se aplica la ecuación 1.3.2 a una función senoidal del flujo

$$\phi = \phi_{\max} \text{ sen } \omega t \quad 1.3.4$$

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} = \omega N_1 \phi_{\max} \text{ cos } \omega t \quad 1.3.5$$

Como puede apreciarse la fuerza electromotriz inducida adelanta en  $90^\circ$  al flujo.

Y en la fig. 5(b) la curva de histéresis correspondiente al núcleo, de la que se pueden deducir los valores de la fuerza magnetizadora correspondientes a cada valor del flujo. Por ejemplo, en el momento  $t'$  el flujo instantáneo es  $\varphi'$ , aumentando la fuerza magnetomotriz (F) tiene un valor  $H'$  leída sobre la rama ascendente de la curva de histéresis; el correspondiente valor  $i'\varphi$  de la corriente de excitación en el momento  $t'$  se señala en la fig. 5 (a). Análogamente en el momento  $t''$  el flujo tiene el mismo valor instantáneo  $\varphi'$  que antes, pero ahora descendiendo, por lo que los valores de la fuerza magnetizadora la corriente serán  $H''$  e  $i''\varphi$  respectivamente. De esta forma se va trazando por puntos la curva de la corriente de excitación  $i\varphi$  como puede verse en la curva 5 (a).

La curva de la corriente de excitación esta formada por una onda fundamental y una serie de armónicas impares. La fundamental puede, a su vez, reducirse a dos componentes, una en fase con la fuerza electromotriz y otra retrasada  $90^\circ$  respecto a ella. La componente en fase es debida a la potencia absorbida por la histéresis y por las corrientes parásitas y se denomina corriente de pérdidas en el núcleo: deducida esta corriente de la de excitación total, el resto se denomina corriente magnetizante, formada por la componente retrasada  $90^\circ$  junto con todas las armónicas. La principal armónica es la tercera. En los transformadores de potencia típicos puede llegar a valer hasta un 40% de la corriente de excitación total.

Representando la corriente de excitación con una onda senoidal equivalente, de igual frecuencia, valor efectivo y potencia media que la onda real: esta forma de representación es necesaria para poder trazar el

diagrama vectorial . En la Fig. 6 los valores  $E_1$  y  $\varphi$  representan la f.e.m. inducida y el flujo respectivamente, mientras que  $i_\varphi$  representa la corriente senoidal equivalente a la de excitación, retrasada respecto a  $E_1$  de un ángulo de desfase  $\theta_c$  tal que :

$$P_c = E_1 I_\varphi \cos \theta_c \quad 1.3.6$$

En la que  $P_c$  representa las pérdidas en el núcleo .

La componente  $I_c$  en fase con  $E_1$  es la corriente debida a dichas pérdidas, y la componente  $I_m$  en fase con el flujo representa la onda senoidal equivalente de igual valor eficaz que la corriente magnetizante.

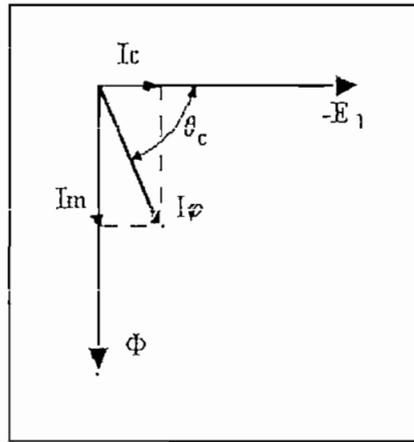


Fig. 6  
Diagrama vectorial en vacío.

### 1.3.2 CIRCUITO EQUIVALENTE Y DIAGRAMAS VECTORIALES DEL TRANSFORMADOR

El flujo total concatenado a cada devanado de un transformador de dos devanados puede ser expresado por la suma de los siguientes componentes :

- a.- El flujo disperso debido a la corriente en el propio devanado .
- b.- La componente de flujo mutuo debido a la corriente en el devanado, y.
- c.- La componente de flujo mutuo debido a la corriente en el otro devanado.

Es decir que los flujos resultantes  $\varphi_1$  y  $\varphi_2$  puede expresarse como :

$$\varphi_1 = \varphi_{1,1} + \varphi_{21} + \varphi_{12} \quad 1.3.7$$

$$\varphi_2 = \varphi_{1,2} + \varphi_{12} + \varphi_{21} \quad 1.3.8$$

Donde:

$\varphi_{1,1}$  y  $\varphi_{1,2}$  son los componentes de flujo disperso producidos por  $i_1$  e  $i_2$  respectivamente .

$\varphi_{21}$  componente de flujo mutuo producido por  $i_1$ .

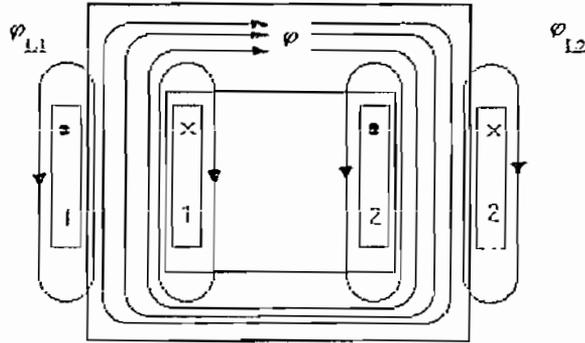
$\varphi_{12}$  componente de flujo mutuo producido por  $i_2$ .

Si  $\varphi$  es el flujo mutuo resultante por la acción combinada de la corriente primaria y secundaria (  $\varphi = \varphi_{21} + \varphi_{12}$  ) entonces las ecuaciones 1.3.7 y 1.3.8 pueden expresarse de la siguiente manera:

$$\varphi_1 = \varphi_{1,1} + \varphi \quad 1.3.9$$

$$\varphi_2 = \varphi_{1,2} + \varphi \quad 1.3.10$$

La fig. 7 Muestra las componentes de flujo en un núcleo con dos devanados.



x= corriente dirigida hacia el plano del dibujo.  
 . = corriente emergiendo del plano del dibujo.

Fig. 7  
 Componentes de flujo

Con las componentes de flujo expresadas en las ecuaciones 1.3.9 y 1.3.10, las ecuaciones de voltaje son:

$$v_1 = R_1 i_1 + N_1 d\phi_{L1}/dt + N_1 d\phi/dt \quad 1.3.11$$

$$v_2 = R_2 i_2 + N_2 d\phi_{L2}/dt + N_2 d\phi/dt \quad 1.3.12$$

Por definición el segundo término de las ecuaciones anteriores son las inductancias dispersas del primario con respecto al secundario ( $L_{L1}$ ) y del secundario con respecto al primario ( $L_{L2}$ ) respectivamente.

$$L_{L1} = N_1 \phi_{L1} / i_1 \quad 1.3.13$$

$$L_{L2} = N_2 \phi_{L2} / i_2 \quad 1.3.14$$

Como  $e_1$  y  $e_2$  son los voltajes inducidos por el flujo mutuo resultante  $\phi$  en el primario y en el secundario respectivamente las ecuaciones 1.3.11 y 1.3.12 pueden reescribirse de la siguiente manera:

$$v_1 = R_1 i_1 + L_{1,1} di_1/dt + e_1 \quad 1.3.15$$

$$v_2 = R_2 i_2 + L_{1,2} di_2/dt + e_2 \quad 1.3.16$$

En los que las resistencias e inductancias de dispersión son esencialmente parámetros constantes, y los efectos de la no linealidad de las propiedades magnéticas en el núcleo guarda su relación entre el flujo mutuo resultante  $\phi$  y la fuerza magnetomotriz requerida para producirlo.

Como se vio anteriormente la corriente de excitación  $i_\phi$  puede considerarse sustituida por una corriente senoidal equivalente, que a su vez se descompone en dos la componente  $I_c$  correspondiente a las pérdidas en el hierro, en fase con la fuerza contra electromotriz  $E_1$ , y la componente magnetizante  $I_m$  retrazada  $90^\circ$  respecto  $E_1$ , este efecto que en esencia representa las características del núcleo se introduce en el circuito equivalente por medio de un circuito paralelo conectado entre los bordes de  $E_1$  formado por una resistencia no inductiva de conductancia  $g_m$  en paralelo con una inductancia sin pérdidas de susceptancia  $b_m$ . En el cual la potencia  $E_1^2 g_m$  cubre las pérdidas en el hierro debidas al flujo mutuo resultante, y  $b_m$  satisface la componente de la corriente magnetizante retrazada  $90^\circ$  respecto  $E_1$ . Si se admite que  $g_m$  es constante las pérdidas en el hierro variarán como  $E_1^2$ , o como  $\phi_{max}^2 f^2$  si la onda es senoidal, la susceptancia magnetizante  $b_m$  varía con la saturación del hierro.

Considerando constante  $b_m$ , la corriente magnetizante es independiente de la frecuencia y directamente proporcional al flujo mutuo resultante. Tanto

$g_m$  como  $b_m$  se determinan normalmente para la tensión y frecuencia nominales, admitiendo que no varían con las pequeñas desviaciones que respecto a dichos valores nominales se produzcan en un funcionamiento normal.

Cuando las corrientes y voltajes se asumen senoidales, las ecuaciones de voltaje para el primario y el secundario ( 1.3.15 ) y ( 1.3.16 ) pueden ser escrita en forma vectorial como:

$$V_1 = ( R_1 + j X_{L1} ) I_1 + E_1 \quad 1.3.17$$

$$V_2 = ( R_2 + j X_{L2} ) I_2 + E_2 \quad 1.3.18$$

Por lo expuesto anteriormente las características eléctricas del transformador se satisfacen en el circuito equivalente de la figura 8.

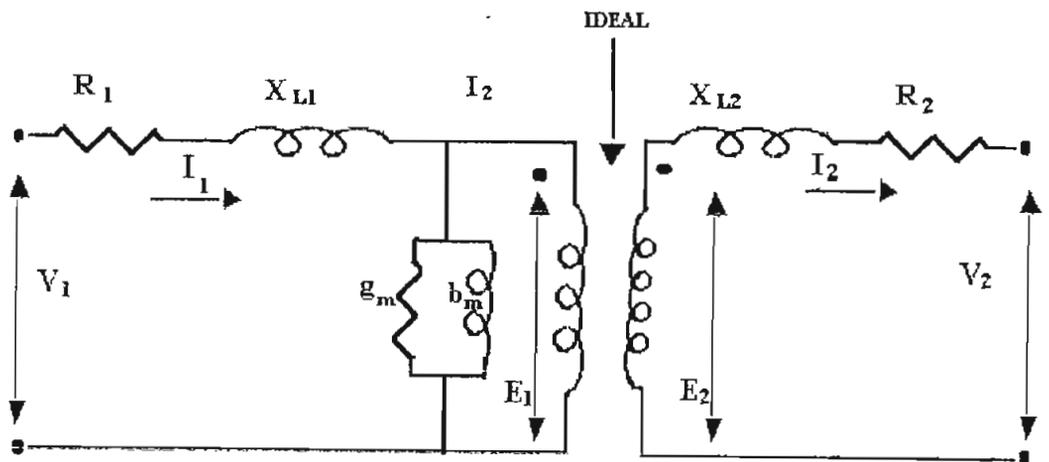


Fig. 8  
Circuito equivalente, asume una onda senoidal equivalente de la corriente de excitación.

El flujo mutuo resultante  $\varphi$  induce en el secundario una f.e.m.  $E_2$  y puesto que dicho flujo esta cocatenado con ambos devanados la relación entre las tensiones inducidas es:

$$E_1/E_2 = N_1/N_2 = a_n \quad 1.3.19$$

En donde  $a_n$  es la relación de transformación.

Por el principio de conservación de la energía.

$$V_1 I_1 \cos \phi_1 = V_2 I_2 \cos \phi_2 \quad 1.3.20$$

$$I_1/I_2 = V_2 \cos \phi_2 / V_1 \cos \phi_1 = 1/a_n \quad (\cos \phi_2 / \cos \phi_1) \quad 1.3.21$$

a plena carga  $\phi_1 = \phi_2$

entonces :

$$I_1/I_2 = 1/a_n \quad 1.3.22$$

A través de la relación de transformación el circuito equivalente puede referirse al lado primario o al lado secundario, teniendo en cuenta que:

$$V_1/V_2 = E_1/E_2 = I_2/I_1 = a_n \quad 1.3.23$$

### 1.3.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR REFERIDO AL PRIMARIO

Caída de voltaje en el secundario =  $r_2 I_2$

$$r_2 I_2 \rightarrow r_2' I_2'$$

$$r_2' I_2' = a_n (r_2 I_2)$$

Recordando

$$V_1/V_2 = E_1/E_2 = I_2/I_1 = a_n = N_1/N_2$$

Entonces:

$$E_1 = a_n E_2$$

$$E_1 = E_2'$$

$$E_2' = a_n E_2$$

$$I_1 = I_2/a_n$$

$$I_1 = I_2'$$

$$I_2' = I_2/a_n$$

$$r_2' I_2/a_n = a_n (r_2 I_2)$$

$$R_2' = a_n^2 R_2$$

$$X_{L2}' = a_n^2 X_{L2}$$

$$Z_2' = a_n^2 Z_2$$

**Resumen:**

$$E_2' = a_n E_2$$

$$I_2' = I_2/a_n$$

$$R_2' = a_n^2 R_2$$

$$X_{L2}' = a_n^2 X_{L2}$$

$$Z_2' = a_n^2 Z_2$$

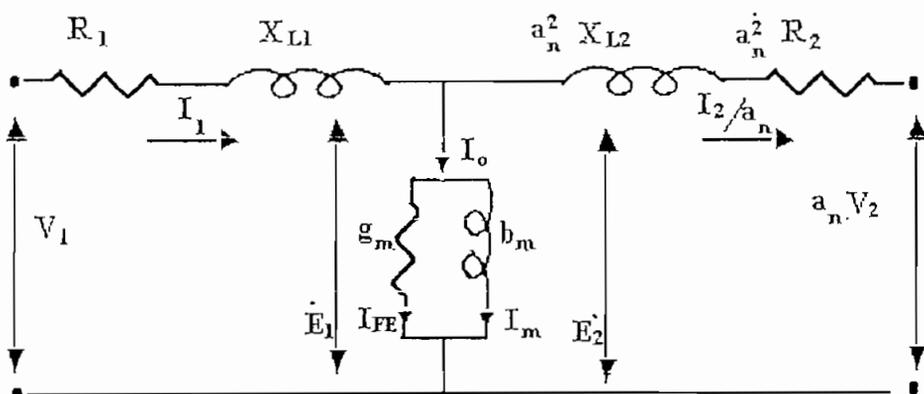


Fig. 9

Circuito equivalente, referido al primario.

### 1.3.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR REFERIDO AL SECUNDARIO

Caída de voltaje en el primario =  $r_1 I_1$

$$r_1 I_1 \text{ ---- } > r_1' I_1'$$

$$r_1' I_1' = (r_1 I_1) / a_n$$

Recordando

$$E_2 = E_1 / a_n$$

Entonces:

$$E_2 = E_1'$$

$$E_1' = E_1 / a_n$$

$$I_2 = a_n I_1$$

$$I_2 = I_1'$$

$$I_1' = a_n I_1$$

$$r_1' I_1 a_n = (r_1 I_1) / a_n$$

$$R_1' = R_1 / a_n^2$$

$$X_{1,1}' = X_{1,1} / a_n^2$$

$$Z_1' = Z_1 / a_n^2$$

**Resumen:**

$$E_1' = E_1 / a_n$$

$$I_1' = a_n I_1$$

$$R_1' = R_1 / a_n^2$$

$$X_{1,1}' = X_{1,1} / a_n^2$$

$$Z_1' = Z_1 / a_n^2$$

$$g_m' = a_n^2 g_m$$

$$b'_m = a_n^2 b_m$$

$$I'_{fc} = a_n I_{fc}$$

$$I'_m = a_n I_m$$

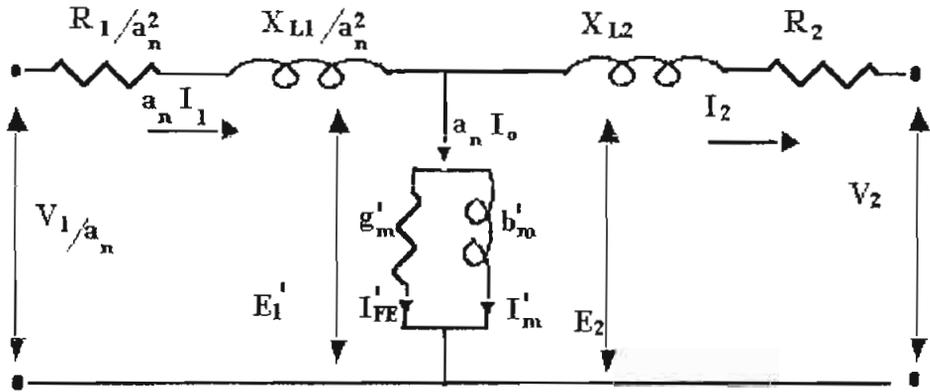


Fig. 10

Circuito equivalente, referido al secundario.

## DIAGRAMAS VECTORIALES

Los diagramas vectoriales son muy importantes puesto que dan una visualización más objetiva del comportamiento del transformador, estos diagramas pueden referirse al lado primario o al secundario. A continuación se encuentran los diagramas fasoriales del transformador monofásico asumiendo una relación de transformación igual a 1 y con las caídas de voltaje transferidas al primario, se ha escogido estas condiciones por cuanto permiten contrastar y comprender los diagramas vectoriales del transformador con bobina flotante que serán discutidos posteriormente.

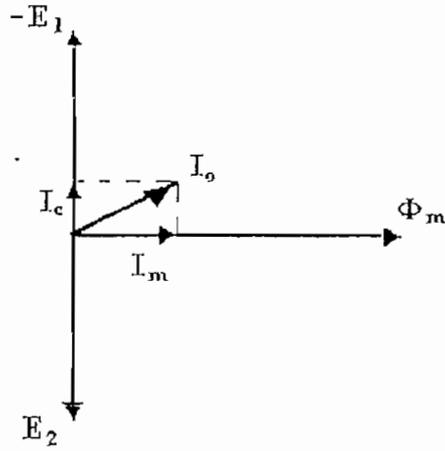


Fig. 11  
 Diagrama fasorial para un transformador monofásico en circuito abierto.

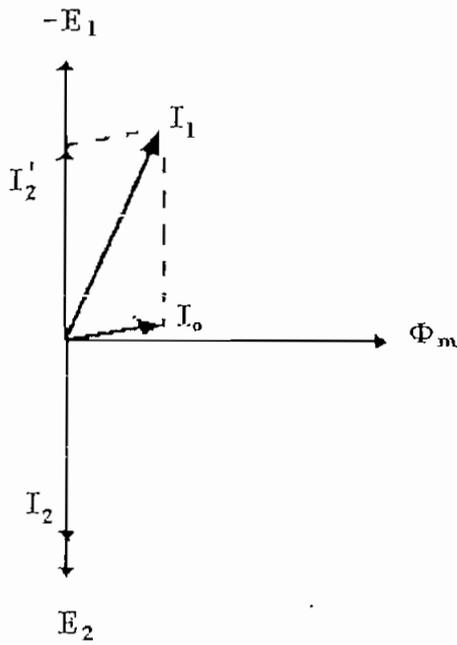


Fig. 12  
 Diagrama fasorial para un transformador monofásico con carga resistiva. Asumiendo una relación de transformación igual a 1

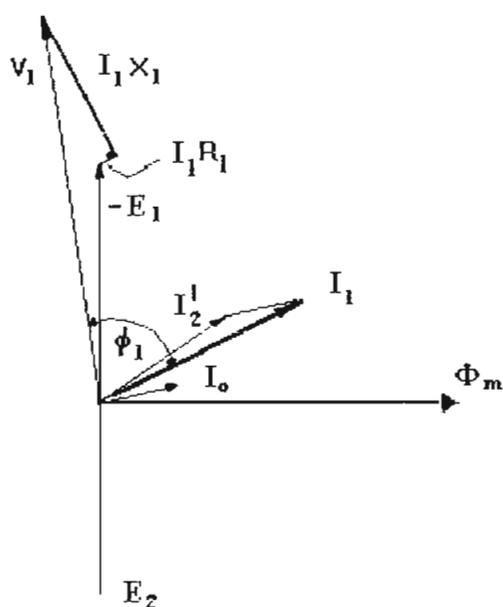


Fig.13  
 Diagrama vectorial de las caídas de voltaje en el lado primario de un transformador monofásico alimentando una carga inductiva ,  $I_2'$  es la corriente en la carga referida al primario .

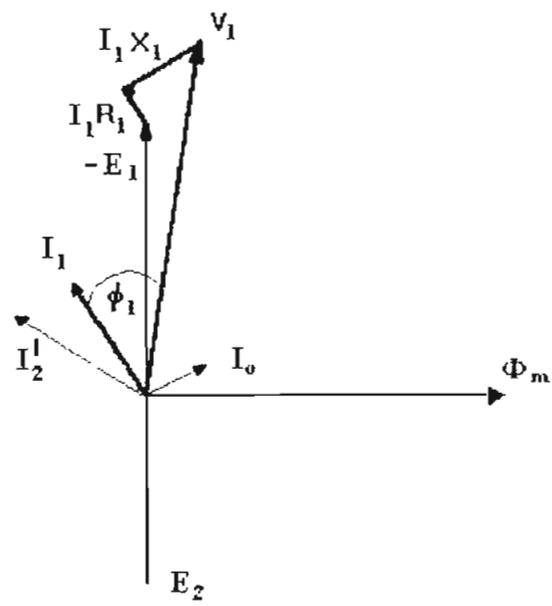


Fig. 14  
 Diagrama vectorial de las caídas de voltaje en el lado primario de un transformador monofásico alimentando una carga capacitiva  $I_2'$  es la corriente en la carga referida al primario .

#### 1.4 EL TRANSFORMADOR CON BOBINA FLOTANTE

El transformador con bobina flotante difiere de un transformador tradicional en el lado primario, el cual está formado como se puede observar en la figura 15. Por dos devanados acoplados magnéticamente, la bobina primaria propiamente dicha que es aquella que se conecta a la fuente de suministro de energía y la bobina flotante que se cierra a través de un capacitor.

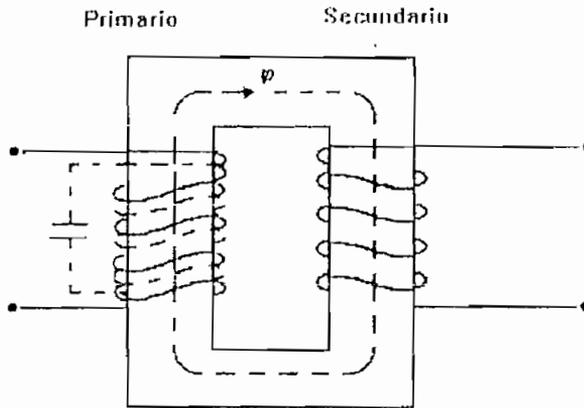


Fig. 15  
Transformador con bobina flotante.

Debido a la bobina flotante el comportamiento de este transformador difiere del transformador tradicional en forma muy estrecha con el efecto

que las características propias de los elementos de esta bobina causan, cuando un flujo magnético circula a través del núcleo, obviamente para que estos efectos, mejoren los parámetros de operación del transformador los elementos deben ser dimensionados para satisfacer ciertas condiciones que se analizarán con detalle posteriormente, sin embargo, básicamente el capacitor deberá inyectar reactivos para mantener la magnetización del núcleo, teóricamente la corriente de magnetización no será suministrada por la red de energía, lo que da lugar a que el voltaje inducido se acerque al voltaje de la fuente tanto en módulo como en su forma de onda.

#### **1.4.1 CONDICIONES EN VACIO DEL TRANSFORMADOR CON BOBINA FLOTANTE.**

Las características del núcleo magnético no son afectadas por el hecho de colocar la bobina flotante, y fueron tratadas anteriormente en el punto 1.3.1 (condiciones en vacío).

Cuando el secundario del transformador está en circuito abierto, y se conecta el primario a la fuente de energía ( $V_1 = V_{1\text{max}} \sin(\omega t)$ ), un voltaje inducido aparece en el bobinado flotante, el cual está cerrado a través del capacitor, esto origina un flujo de corriente eléctrica en el devanado flotante ( $I_f$ ) el cual es una corriente idealmente reactiva, adelantado en  $90^\circ$  eléctricos al fasor  $E_1$ , o lo que es lo mismo, defasada  $180^\circ$  con respecto al flujo magnético.

Con este antecedente y considerando la representación de la corriente de excitación por una onda senoidal equivalente de igual potencia, valor efectivo y, potencia media que la onda real se puede trazar el diagrama

fasorial de la figura 16 el cual tiene todos los fasores del diagrama en vacío de un transformador tradicional en el cual se ha introducido este efecto de la bobina flotante a través de el fásor  $I_f$ , que idealmente y si el capacitor ha sido seleccionado adecuadamente es igual en módulo pero de sentido contrario al fásor de la corriente de magnetización  $I_m$ , lo cual da como resultado una corriente de magnetización igual a la corriente de pérdidas en el núcleo  $I_c$ .

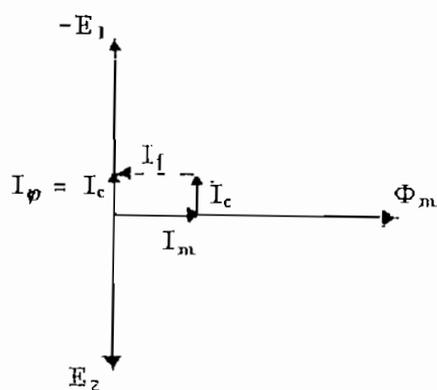


Fig. 16  
Diagrama vectorial en vacío para el transformador con bobina flotante.

En donde :

$I_f$  Corriente en el flotante.

$I_m$  Corriente de magnetización.

$I_c$  Corriente de pérdidas en el núcleo.

$I_\varphi$  Corriente en vacío total.

$$I_{\phi} = I_1 + I_m + I_c = I_c \quad 1.4.1$$

A esta conclusión se puede llegar también, analizando como si se tratara de un transformador tradicional el cual se ha conectado una carga capacitiva en el secundario, siendo el secundario el devanado de la bobina flotante y fasorialmente puede verse en la figura 17.

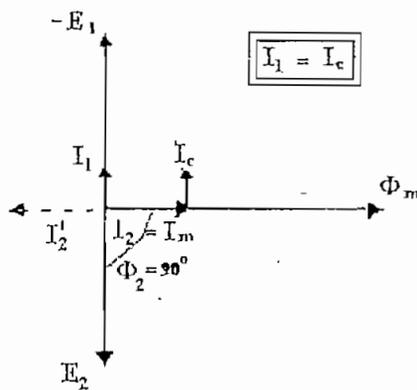


Fig. 17

Diagrama fasorial de un transformador con carga capacitiva que produciría el mismo efecto que la bobina flotante.

En el cual  $I_2$  es la corriente de carga debida al capacitor.  $I_0$  es la corriente en vacío del transformador tradicional, e  $I_1 = I_c$  sería la corriente suministrada por la fuente que se está considerando como la corriente en vacío para el transformador con bobina flotante.

### 1.4.2 CIRCUITO EQUIVALENTE Y DIAGRAMAS VECTORIALES DEL TRANSFORMADOR CON BOBINA FLOTANTE.

Debido a que el lado del primario esta formado por dos devanados acoplados magneticamente, y a los  $90^\circ$  eléctricos de diferencia entre la corriente del devanado conectado al suministro de energía con la corriente del devando flotante. La reactancia mutua entre ellos ( $X_m$ ) reduce las reactancias de dispersión de cada devanado,  $X_{L1}$  y  $X_{Lf}$ , respectivamente, lo que implica que las caídas de voltaje sean menores.

La figura 18, muestra en forma simplificada los componentes de flujo en el núcleo de un transformador con bobina flotante, donde el devanado flotante y el devanado primario se han esquematizado como dos grupos separados para una mejor comprensión, en realidad estas bobinas son enrolladas en un sólo grupo que forma el primario del transformador.

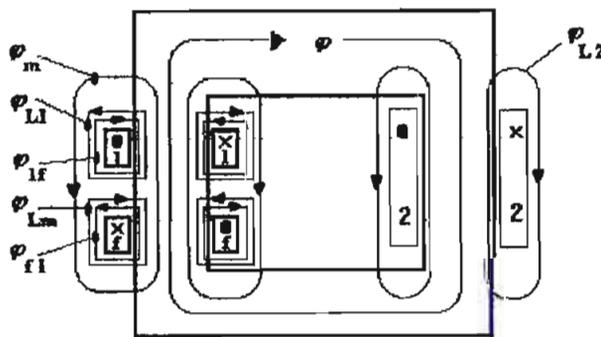


Fig 18  
Componentes del flujo en un transformador con bobina flotante.

El flujo total concatenado a cada devanado de un transformador con bobina flotante puede ser expresado por la suma de los siguientes componentes:

$$\varphi_1 = (\varphi_{L1} - \varphi_{m1}) + (\varphi_{1f} - \varphi_{f1}) + \varphi \quad 1.4.2$$

$$\varphi_2 = \varphi_{L2} + \varphi \quad 1.4.3$$

$$\varphi_f = (\varphi_{Lf} - \varphi_{mf}) + (\varphi_{f1} - \varphi_{1f}) + \varphi \quad 1.4.4$$

donde:

$\varphi_{L1} - \varphi_{m1}$  Flujo disperso resultante en el devanado del primario conectado a la fuente.

$\varphi$  Flujo mutuo total en el núcleo del transformador.

$\varphi_{L2}$  Flujo disperso en el devanado secundario.

$\varphi_{1f}$  La componente de flujo mutuo entre los dos devanados del primario producido por la corriente en el devanado flotante.

$\varphi_{f1}$  La componente de flujo mutuo entre los devanados del primario producido por la corriente en el devanado principal.

De las componentes de flujo expresados en las ecuaciones 1.4.2 , 1.4.3 , 1.4.4 , se deducen fácilmente las ecuaciones de voltaje que son:

$$v_1 = R_1 i_1 + L_{L1} di_1/dt - M di_1/dt + M (di_1/dt - di_f/dt) + e_1 \quad 1.4.5$$

$$v_2 = R_2 i_2 + L_{L2} di_2/dt + e_2 \quad 1.4.6$$

$$v_c = R_{fc} + L_{Lf} di_f/dt - M di_f/dt + M (di_f/dt - di_1/dt) + e_f \quad 1.4.7$$

En las que:

$v_1$ : Voltaje en los terminales del primario.

$v_2$ : Voltaje en los terminales del secundario.

$v_c$ : Voltaje en los terminales del capacitor.

$e_1, e_2, e_f$  : Son los voltajes inducidos por el flujo mutuo resultante ( $\phi$ ) que circula a través del núcleo.

$L_{L1}, L_{L2}, L_{Lf}$  : Inductancias de dispersión.

$R_1, R_2, R_f$  : Resistencias de dispersión.

$i_1, i_2, i_f$  : Son las corrientes en cada devanado.

Las resistencias y reactancias son parámetros esencialmente constantes, y los efectos de la no linealidad de las propiedades magnéticas en el núcleo, guardan su relación entre el flujo mutuo resultante y la fuerza magnetomotriz requerida para producirlo.

El efecto de la no linealidad de las características del núcleo se introduce en el circuito equivalente por medio de la rama paralelo de magnetización como se vio en el punto 1.3.2.

Cuando las corrientes y voltajes se asumen senoidales las ecuaciones de voltaje pueden ser escritas en forma vectorial como:

$$V_1 = (R_1 + jX_{L1} - jX_m) I_1 + jX_m (I_1 - I_f) + E_1 \quad 1.4.8$$

$$V_2 = (R_2 + jX_{L2}) I_2 + E_2 \quad 1.4.9$$

$$V_c = (R_f + jX_{Lf} - jX_m) I_f - jX_m (I_1 - I_f) + E_f \quad 1.4.10$$

La relación entre las tensiones inducidas en los devanados, es directamente proporcional al número de espiras de cada devanado puesto que el flujo mutuo resultante  $\phi$  concatena a todos ellos, es decir:

$$N_1/N_2 = E_1/E_2 ; N_1/N_f = E_1/E_f \quad 1.4.11$$

Lo que permite referir todos los parámetros al primario del transformador y trazar el circuito equivalente de la figura 19.

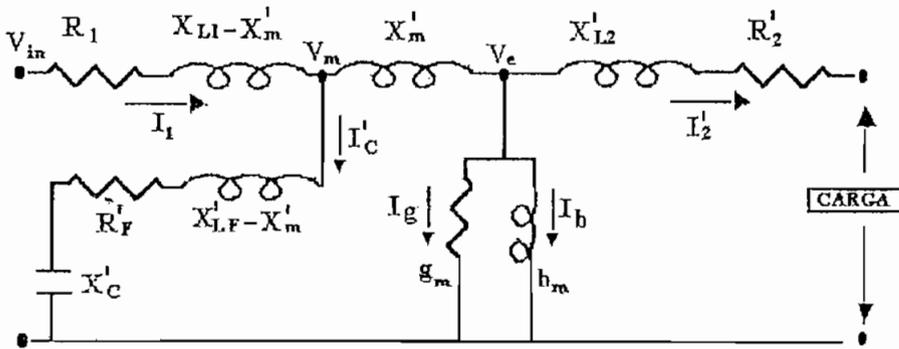


Fig. 19

Circuito equivalente del transformador con bobina flotante referido al primario.

En la fig 19 aparece el nodo  $V_m$  que satisface la condición del segundo término en las ecuaciones fasoriales de  $V_1$  ( 1.4.8 ) y de  $V_e$  (1.4.10).

Se puede llegar fácilmente a obtener este circuito equivalente analizando el comportamiento físico del transformador con bobina flotante, lo cual da como resultado el circuito equivalente de la fig 20 , que es básicamente el circuito equivalente para un transformador convencional aumentado la rama capacitiva que tiene una inductancia mutua con el bobinado primario.

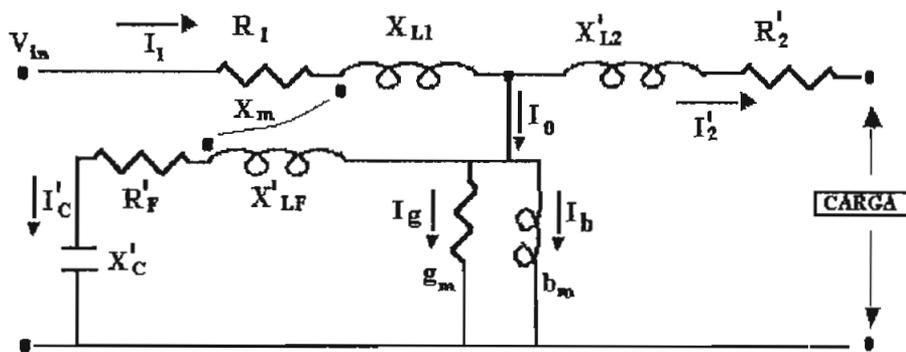


Fig. 20

Circuito equivalente del transformador convencional al cual se ha aumentado los parámetros eléctricos que satisfacen el comportamiento físico de la presencia del devanado flotante.

Los dos circuitos equivalentes del transformador con bobina flotante son los mismos puestos si se simplifica la inductancia mutua en el circuito de la fig 19 por medio de la teoría de circuitos eléctricos se llega al circuito de la figura 20 .

### 1.4.3 SOLUCION DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR CON BOBINA FLOTANTE.

El circuito equivalente de figura 19 del transformador con bobina flotante tiene dos nodos y una fuente de poder, asignando a estos voltajes como  $V_{in}$ ,  $V_m$  y  $V_e$  respectivamente y reemplazando los elementos por

admitancias equivalentes, se tiene el circuito equivalente de la figura 21, y se resuelve con las dos ecuaciones simultáneas siguientes:

$$(Y_1 + Y_f + Y_m) V_m - Y_m V_e = Y_1 V_{in} \quad 1.4.12$$

$$-Y_m V_m + (Y_m + Y_g + Y_b + Y_2) V_e = 0 \quad 1.4.13$$

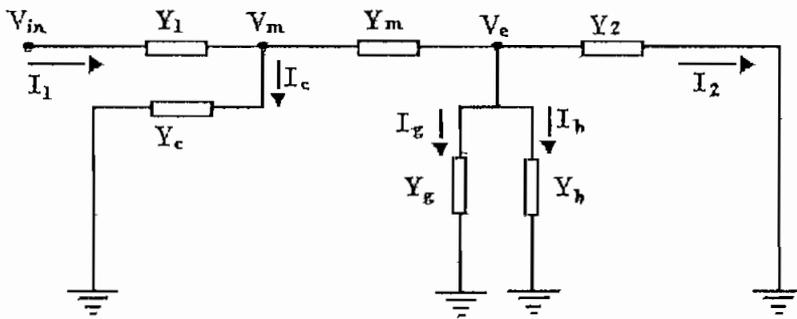


Fig. 21  
Circuito equivalente del transformador con bobina flotante con admitancias equivalentes.

La solución de este sistema de ecuación es :

$$V_e = V_1 \frac{Y_1 Y_m}{\{(Y_m + Y_g + Y_b + Y_2) (Y_1 + Y_c + Y_m) - Y_m^2\}} \quad 1.4.14$$

$$V_m = V_1 \frac{Y_1 (Y_m + Y_g + Y_b + Y_2)}{\{(Y_m + Y_g + Y_b + Y_2) (Y_1 + Y_c + Y_m) - Y_m^2\}} \quad 1.4.15$$

Donde:

$$Y_1 = 1/[R_1 + j(X_{L1} - X_m)] \quad 1.4.16$$

$$Y_g = G_m = 1/R_m \quad 1.4.17$$

$$Y_b = -jB_m = 1/jX_{Lm} \quad 1.4.18$$

$$Y_f = 1/[R_f + j(X_f - X_m - X_c)] \quad 1.4.19$$

$$Y_m = 1/jX_m \quad 1.4.20$$

$$Y_2 = 1/[R_2 + jX_{L2} + Z_L] \quad 1.4.21$$

En la que todos los términos están referidos al primario del transformador, mediante la ecuación 1.4.11

A continuación se presentan los diagramas fasoriales del transformador con bobina flotante asumiendo una relación de transformador 1:1 entre el primario y el flotante, y el primario con el secundario respectivamente.

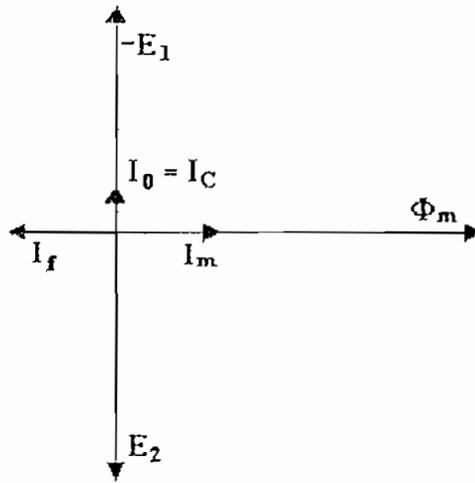


Fig. 22

Diagrama vectorial en circuito abierto para el transformador con bobina flotante

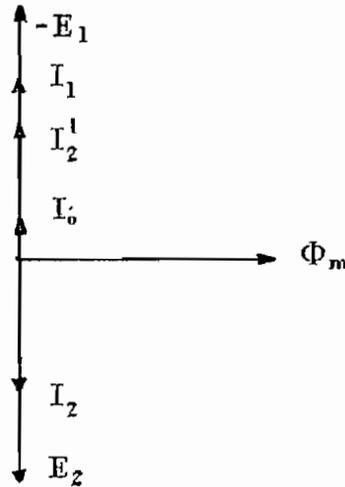


Fig. 23

Diagrama vectorial de un transformador monofásico con bobina flotante alimentando una carga resistiva.

$I'_2$  es la corriente en la carga referida al primario.

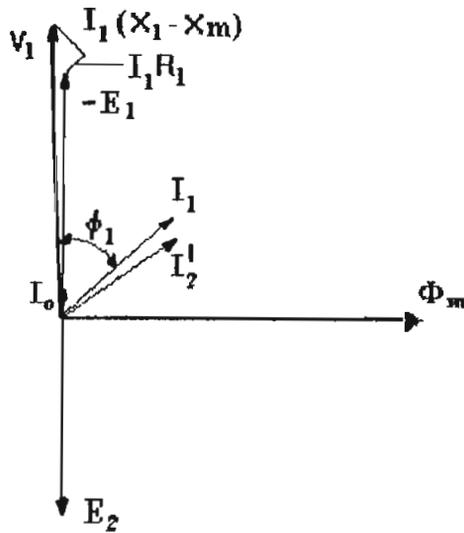


Fig.24  
 Diagrama vectorial de las caídas de voltaje en el lado primario de un transformador monofásico con bobina flotante, alimentando una carga inductiva,  $I_2'$  es la corriente en la carga referida al primario.

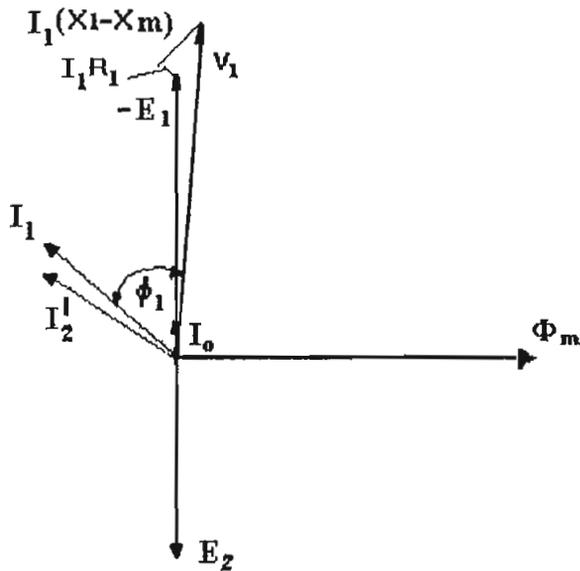


Fig.25  
 Diagrama vectorial de las caídas de voltaje en el lado primario de un transformador monofásico con bobina flotante, alimentando una carga capacitiva,  $I_2'$  es la corriente en la carga referida al primario.

## CAPITULO II

### DISEÑO Y CONSTRUCCION DE TRANSFORMADORES CONVENCIONALES Y DE BOBINA FLOTANTE.

#### 2.1 PARAMETROS DE DISEÑO

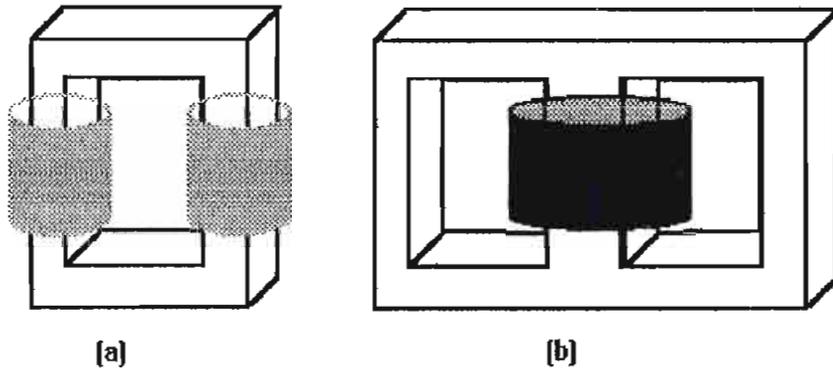
El transformador está formado por numerosas partes de las cuales las más importantes son:

**A.- NUCLEO MAGNETICO.** Constituye el circuito magnético que transfiere energía de un circuito a otro, siendo su función principal la de conducir el flujo activo.

Los dos tipos básicos de núcleos de los transformadores son el tipo anillo, en el cual los dos grupos de devanados abrazan a un núcleo único, según se ve en la figura 26 (a), y el tipo acorazonado, en el cual los bobinados están localizados, como se muestra en la figura 26 (b), en la rama central de dos circuitos magnéticos en paralelo.

El tipo anillo se utiliza corrientemente en transformadores grandes de distribución para alta tensión y en transformadores de potencia.

La sección recta del núcleo suele ser cuadrada o rectangular en los transformadores pequeños, pero en los grandes se aprovecha más eficazmente la abertura circular de las bobinas agrupando las láminas en capas de anchura variable de manera que constituyan un núcleo circular escalonado.



**Fig. 26**  
**Tipos Básicos de núcleos, (a)tipo anillo, (b) tipo acorazado.**

Los núcleos de los transformadores son fabricados con laminaciones de acero recocido adecuadamente , el cual contiene un 4% de silicio, puesto que este material no es muy costoso y presta algunas ventajas, como son bajas pérdidas por histéresis y por corrientes de Eddy, además de su alta permeabilidad con una densidad de flujo relativamente alta.

Los núcleos normalmente operan con densidades de flujo alterno máximo entre 65 y 90 mil líneas por pulgada cuadrada. En los pequeños transformadores, la capa de óxido entre las láminas constituye un aislamiento suficiente para evitar la propagación de las corrientes de Eddy, pero en núcleos grandes las laminaciones son barnizadas o cubiertas con una capa delgada de aislante. Como sea las perdidas debidas a las corrientes de Eddy son fuertemente reducidas por el uso de laminaciones delgadas. El espesor de las láminas de acero al silicio oscila alrededor de 0.014 pulgadas.

**B.- BOBINADOS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS.** Estos bobinados constituyen los circuitos de alimentación o de carga, pudiendo ser

monofásicos o trifásicos. La sección de los conductores variará entre valores delgados, medios, pequeños, gruesos o también pueden ser tipo barra rectangular, dependiendo de la corriente que circula a través de ellos, la función de los devanados es crear un campo magnético primario con una pérdida de energía muy pequeña y utilizar el flujo magnético para inducir una fuerza electromotriz secundaria.

Los bobinados están formados por numerosas espiras de conductor aislado por barniz, en pequeños transformadores se usa conductor circular pero en los grandes transformadores los conductores son normalmente rectangulares. Si el conductor sólido tiene una sección transversal grande la resistencia efectiva del conductor en una corriente alterna puede ser considerablemente alta, para reducir las pérdidas debidas a la distribución no uniforme de las corrientes en el conductor sólido, se subdivide el devanado en dos o más grupos de bobinas de conductor más delgado, los cuales enlazan el mismo flujo total, lo que divide la corriente total en cantidades iguales y las pérdidas en el cobre se reducen al mínimo, puesto que estas bobinas se conectan en paralelo para formar el devanado primario o secundario, según sea el caso.

En cuanto a la parte constructiva del transformador con bobina flotante es justamente en la parte de los bobinados donde difiere esencialmente del transformador convencional ya que el bobinado primario está constituido por el devanado que se conecta a la fuente de energía y por el devanado flotante, que se enrolla al mismo tiempo que el devanado principal por el cual circula una corriente pequeña que es igual a la corriente en vacío del transformador convencional y cuyos terminales se cierran a través de un condensador de uso permanente dimensionado para suplir la corriente magnetizante en el núcleo

del transformador en estado estable, lo cual minimiza las pérdidas en vacío debido a la histéresis en el material ferromagnético y permite que el núcleo del transformador pueda trabajar con un flujo magnético mayor o lo que es lo mismo que el área transversal del transformador con bobina flotante sea menor que la de un transformador convencional, para el mismo flujo magnético máximo y para una potencia dada si el núcleo usado para la construcción de los transformadores es del mismo material ferromagnético.

C.- SISTEMA DE ENFRIAMIENTO Y AISLAMIENTO. En pequeños transformadores la superficie es relativamente grande comparada con su volumen, por esta razón el enfriamiento por radiación y por convección natural usualmente es suficiente para mantener la temperatura de operación por debajo de la máxima a la cual el aislamiento puede operar sin sufrir una reducción seria en sus propiedades y por ello de su vida útil. Como el volumen se incrementa en una razón cúbica mientras que el área solamente en una cuadrática de las dimensiones lineales y como el calor es disipado por unidad de superficie, en los transformadores de mayor volumen se debe proveer un medio artificial para acelerar la disipación del calor.

Los materiales aislantes comunmente usados en máquinas eléctricas han sido clasificados por el Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos en los cuatro grupos listados en la tabla II (\*), y por proposito de estandarización se han establecido los siguientes valores máximos de temperatura en los puntos críticos.

(\*) Tabla II tomada de la referencia # 9 pag. 243

- clase O ----- 90°C
- clase A ----- 105°C
- clase B ----- 130°C
- clase C ----- no tiene un límite relacionado

La temperatura ambiente se considera de 40°C.

**TABLA II**

CLASE	DESCRIPCION DEL MATERIAL
Clase O	Algodón, seda, papel y materiales orgánicos similares no impregnados ni inmersos en un líquido dieléctrico.
Clase A	<p>(1) Algodón, seda, papel y materiales orgánicos similares impregnados o inmersos en un líquido dieléctrico.</p> <p>(2) Materiales moldeados y laminados con celulosa, resina fénica u otras resinas de propiedades similares.</p> <p>(3) Películas delgadas y láminas de celulosa de acetato, otras celulosas derivadas de propiedades similares.</p> <p>(4) Barnices como el aplicado en los conductores</p>
Clase B	Mica, asbestos, fibra de vidrio y materiales inorgánicos similares.
Clase C	Porcelana, vidrio, cuarzo y materiales inorgánicos similares.

La conducción del calor a través del volumen de una substancia es proporcional al gradiente de la temperatura

$$\theta_2 - \theta_1 = P d / Ak \qquad 2.1.1$$

Donde:  $\theta_2 - \theta_1$  es la diferencia de temperatura entre los puntos en los cuales se produce la conducción.

$P$  es la rata del flujo calórico.

$d$  es la distancia en la dirección del flujo de calor.

$A$  es el área en el plano perpendicular a la dirección del flujo calórico

$k$  es la conductividad térmica del medio.

La tabla III (\*) muestra los valores aproximados de conductividad térmica, resistividad térmica, y capacidad térmica específica de matariales comúnmente utilizados en equipos eléctricos.

**TABLA III**

MATERIAL	RESIS- TIVIDAD	CONDOC- TIVIDAD	CAPACIDAD CALORIFICA EAPECIFICA
Cobre	0.28	3.6	3.3
Aluminio	0.76	1.3	2.3
Hierro batido	1.3	0.79	3.7
Chapa de acero al carbón	2.3	0.43	3.7
Hierro colado	2.5	0.39	3.7
Acero al silicio(longitudinal)	5.8	0.17	3.7
Chapas de acero al silicio (transversal)	38-130	.03-.008	3.7
Mica (transversal)	360	0.003	2
Batista barnizada	500	0.002	1.4
Goma	640	0.002	.....
Cartón prensado, aceitado	640	0.002	.....
Ladrillo	1000	0.001	.....
Cartón prensado, seco	1000-1300	0.0008-.001	.....
Tejido sin tratar o fieltro	150	0.063	.....

(\*) Tabla III tomada de la referencia # 9 pag. 245

En la que las unidades son las siguientes:

Resistividad	[°C cm /w ]
Conductividad	[w / °C cm ]
Capacidad calorífica específica	[ J/cm³ °C ]

La radiación del calor es energía en forma de ondas electromagnéticas infrarrojas. La ley fundamental para la radiación del calor desde una superficie que esta a  $\theta$  grados centígrados es ;

$$p = K e (273+\theta)^4 \quad 2.1.2$$

Donde:  $p$ , es la velocidad de emisión.  
 $K$ , es una constante que depende del tamaño de la superficie.  
 $273 + \theta$ , es la temperatura absoluta en la escala centígrada.  
 $e$ , es el coeficiente de emisión de material de la superficie.

La tabla IV (\*) muestra los valores aproximados de ( $e$ ) para algunos materiales, que se encuentran en la superficie de los aparatos eléctricos.

**TABLA IV**

MATERIAL	COEFICIENTE DE EMISION CALORICA ( e )
Cuerpo negro ideal	1
Hollín de resina	0,98
Material aislante rugoso	0,9
Oxido de hierro	0,75
Oxido de cobre	0,65
Oxido de aluminio	0,15
Aluminio pulido	0,05
Cobre pulido	0,04
Plata pulida	0,025

(\*) Tabla IV tomada de la referencia # 9 pag. 247

La ley de Stefan, para la radiación del calor expresada en vatios por pulgada cuadrada es:

$$p = 37e \left( \theta + 273/1000 \right)^4 \quad [\text{w/plg.}^2] \quad 2.1.3$$

El cuerpo que esta irradiando calor a esta velocidad, estará a su vez recibiendo calor de sus alrededores, si la temperatura del cuerpo es  $\theta$  en grados centígrados, y está rodeado completamente por un gabinete mucho más grande de temperatura  $\theta_1$ , la radiación neta del calor será:

$$p = 37e \left[ \left( \theta + 273/1000 \right)^4 - \left( \theta_1 + 273/1000 \right)^4 \right] \quad [\text{w/plg.}^2] \quad 2.1.4$$

En el enfriamiento de las máquinas eléctricas en general la diferencia entre la temperatura de la máquina y de su carcasa es una fracción muy pequeña, más o menos un décimo de la temperatura absoluta, si  $\theta_a + \Delta$  es la temperatura absoluta del equipo, y  $\theta_a$  es la temperatura absoluta de las paredes, la radiación total es.

$$p = 37e * 10^{-12} \left[ \left( \theta_a + \Delta \right)^4 - \left( \theta_a \right)^4 \right]$$

$$p = 37e * 10^{-12} \left[ \left( 4\theta_a^3\Delta + 6\theta_a^2\Delta^2 + 4\theta_a\Delta^3 + \Delta^4 \right) \right]$$

Si  $\Delta$  es muy pequeño comparado con  $\theta_a$ , entonces:

$$p = 37e * 10^{-12} \left( 4 \theta_a^3 \Delta \right) \quad [\text{w/plg.}^2] \quad 2.1.5$$

La variación de  $p$  con  $\Delta$  es aproximadamente lineal para pequeños incrementos de temperatura, si se asume una temperatura ambiente moderada de  $25^\circ\text{C}$ , la radiación total por pulgada cuadrada es aproximadamente igual a:

$$p = 0.0039 e \Delta \quad [\text{w/plg.}^2] \quad 2.1.6$$

Entre superficies paralelas con coeficientes de emisión  $e_1$  y  $e_2$ , el coeficiente puede calcularse como:

$$e = (e_1^{-1} + e_2^{-1} - 1)^{-1} \quad 2.1.7$$

Para un pequeño cuerpo radiante de área  $A_1$  y coeficiente  $e_1$ , rodeado por una superficie grande de área  $A_2$  y coeficiente  $e_2$ , el coeficiente efectivo viene dado por.

$$e = (e_1^{-1} + (A_1/A_2)(e_2^{-1} - 1))^{-1} \quad 2.1.8$$

Como el aire es un pobre conductor del calor cualquier cuerpo caliente inmerso en una atmosfera que facilite el enfriamiento, creará en ella corrientes de convección natural las cuales materialmente ayudan al enfriamiento, la cantidad de calor disipado por convección natural en el aire es del mínimo orden que los que las disipadas por radiación, sin embargo con el uso de corrientes de aire forzadas, o por el uso de fluidos como aceite o agua que tienen una capacidad térmica mayor que el aire (por volumen), la disipación del calor puede ser incrementada muchas veces.

La cantidad del calor disipada por convección natural en el aire, no es una función lineal de tamaño, forma, superficie del material, condición y orientación del cuerpo caliente; su temperatura y la del aire en sus alrededores; y el carácter especial de los alrededores producen un flujo de corriente de aire.

Es obvio que no puede existir constantes generales debido a que las relaciones no son lineales, sin embargo experimentalmente se ha determinado que la razón total de disipación varía aproximadamente como una función exponencial del incremento de la temperatura, donde el exponente es igual a 1.25 para una posición horizontal con el flujo de calor hacia arriba.

$$p = 0.00157 \Delta^{1.25} \quad [w/plg.^2] \quad 2.1.9$$

En la que  $\Delta$  es el incremento de temperatura en grados centígrados.

Par una posición vertical

$$p = 0.00123 \Delta^{1.25}$$

[w/plg.<sup>2</sup>]

2.1.10

Algunos de los métodos comunmente usados para el sistema de enfriamiento en transformadores son:

**ENFRIAMIENTO POR AIRE.** Se usan en algunas instalaciones donde deben minimizarse el peligro de incendio, estos transformadores son adaptados para enfriarse por convención, y sus dimensiones son mayores que los de un transformador enfriado por aceite.

**ENFRIAMIENTO POR CORRIENTE DE AIRE.** Se usan cuando es importante mantener bajos pesos, y usar poco espacio, el transformador es enfriado por un ventilador su uso típico es en locomotoras y vehículos de transporte eléctrico alimentados por la riel.

**ACEITE PARA TRANSFORMADORES .** Generalmente el método más satisfactorio para enfriar el transformador, es de sumergir sus partes activas en aceite lo que facilita ampliamente la disipación del calor en el núcleo y los devanados, y al mismo tiempo tiene propiedades muy importantes de aislamiento.

**TRANSFORMADORES INMERSOS EN ACEITE AUTOENFRIADOS.** La mayoría de los transformadores de distribución y de potencia son de este tipo, en transformadores pequeños un tanque provee la superficie suficiente para enfriar el aceite, en los tamaños intermedios las paredes del tanque tienen

aletas para aumentar la superficie, y en los transformadores grandes se usan radiadores.

**REFRIGERADO POR ACEITE FORZADO.** El aceite caliente del transformador es bombeado a través de un enfriador externo el cual normalmente es enfriado por agua, este método de enfriamiento es muy común en Europa.

**TRANSFORMADORES INMERSOS EN ACEITE ENFRIADOS POR AGUA.** Cuando se dispone de un enfriador de agua y el espacio en el sitio debe ser conservado, el aceite caliente puede ser enfriado por circulación de agua a través de un serpentín de tubería de cobre que rodea el tanque por su parte inferior .

**INMERCION EN ACEITE REFRIGERACION POR AIRE FORZADO.** Para mandar aire fresco a los radiadores se puede instalar inyectores de aire o un cierto número de pequeños ventiladores regulados por termostato, los transformadores de este tipo tienen dos potencias características la menor corresponde a la autorefrigeración por convección natural y la mayor a la refrigeración por aire forzado.

**PYRANOL, INERTEEN O CHOREXTOL.** Se ha mencionado la refrigeración por aire para los transformadores que deban hallarse en el interior de los edificios Sin embargo, las limitaciones de la refrigeración por aire son importantes cuando la tensión es elevada, o cuando se disponga de poco espacio. Para sustituir el aceite se han desarrollado compuestos químicos que

llevan los nombres comerciales de Pyranol, Inerteen, o Chorextol. Estos compuestos no son volátiles, ni combustibles ni explosivos, y son lo suficientemente fluidos para circular libremente en torno a los devanados. Tienen gran rigidez dieléctrica y así, al igual que el aceite para transformadores, sirve tanto para aislar como para refrigerar los devanados.

Las abreviaciones usadas para el tipo de enfriamiento son:

Transformadores de tipo seco

Enfriamiento natural ----- tipo AN

Enfriamiento forzado ----- tipo AF

#### TRANSFORMADORES INMERSOS EN ACEITE.

Circulación de aceite	Método de enfriamiento	Tipo
Natural	Natural por aire	ONAN
	Por ventilador (Forzado por aire)	ONAF
Forzado por Bomba	natural por aire	OFAN
	por Ventilador (Forzado por aire)	OFAF
	Forzado por Agua	OFWF

D.- TANQUES . Los transformadores que empleen la refrigeración por líquido deben tener sus núcleos y devanados necesariamente encerrados en tanques que eviten las pérdidas del refrigerante, los cuales están contruidos de acero soldado y pueden tener forma redonda, ovalada, elíptica o rectangular . Deben tener un huelgo para permitir la dilatación y contracción térmica del aceite. En los transformadores de distribución es corriente utilizar

un tanque estanco al aire con cámara de aire suficiente entre la tapa y el aceite para permitir que éste comprima o dilate el aire encerrado . En algunos transformadores grandes, la cámara sobre el aceite se llena de nitrógeno mantenido a una presión ligeramente superior a la atmosférica por medio de una válvula automática accionada por la presión, que admite nitrógeno seco de un cilindro que lo contiene comprimido. También hay válvula de seguridad

A los transformadores grandes se les permite más corrientemente (respirar). Un método corriente para ello consiste en montar sobre el tanque un tambor horizontal llamado (conservador de aceite), que se conecta al tanque mediante un tubo en U. El aceite llena el tanque por completo y parcialmente el tambor de expansión. En la parte superior de éste existe una abertura de respiración a la atmósfera. Este respiradero puede ir equipado de un filtro químico que elimine la humedad y el oxígeno del aire que penetre en el conservador. Este está equipado de un sumidero para la extracción ocasional de barro y humedad. En caso de cortocircuito dentro del transformador podrán formarse burbujas rápidamente; luego, la tapa deberá ir provista de una tubería proyectora cerrada por un diafragma delgado de seguridad que se rompa ante una presión excesiva y evite así la explosión del tanque. El peligro de explosión resultante de burbujas gaseosas calientes se elimina excluyendo el oxígeno de la parte superior del tanque.

E.- PASATAPAS.- Cuando las tensiones son moderadas se extraen los conductores terminales por la parte superior del transformador a través de pasatapas de porcelana o de juntas en contacto con la funda de plomo de los cables subterráneos. Para tensiones elevadas existen dos tipos comunes de

pasatapas, el tipo lleno de aceite y el tipo condensador, cuyo exterior es parecido, pero que difieren en sus principios de funcionamiento.

El pasatapas lleno de aceite consiste en una varilla conductora rodeada de un cierto número de cilindros delgados coaxiales de material aislante separados por (separadores de madera dura tratada). La carilla y los cilindros aislantes están soportados en el interior de dos conos huecos de porcelana. Los espacios libres del pasatapas se llenan de aceite aislante. El exterior de los aisladores lleva campanas a fin de incrementar la distancia desarrollada entre los terminales y el tanque puesto a tierra. El cono inferior penetra bajo el nivel del aceite y requiere menor distancia desarrollada que el cono superior, que está dispuesto a la intemperie. El pasatapas está proporcionado de manera que, a lo largo de su superficie, el gradiente de potencial sea casi uniforme.

El pasatapas condensador, está constituido por capas alternadas de aislantes y hojas de metal arrolladas alrededor de una varilla conductora central. La parte superior de este conjunto interno se monta en el interior de un cono hueco de porcelana, como en el pasatapas lleno de aceite. El extremo inferior penetra en el aceite del transformador. La misión de la hoja metálica es producir en el interior del aislante un gradiente de potencial casi uniforme. Si se suprimiera la hoja metálica, el gradiente de potencial entre la varilla y la funda variaría aproximadamente en razón inversa a la distancia radial al eje de la varilla, y, por tanto, el gradiente en el aislante inmediato a la varilla sería mucho mayor que cerca de la funda, a menos que fuera muy grande el diámetro de la varilla. La hoja metálica descompone al aislante de un cierto número de condensadores en serie. Las tensiones en los condensadores en serie son inversamente proporcionales a sus capacidades. Si las capas de aislantes son

todas de igual espesor, las capacidades de los condensadores son proporcionales al área de sus superficies. Si las capacidades son iguales, las tensiones entre las capas de aislantes son iguales. Luego si las longitudes axiales de las capas varían inversamente con sus diámetros, el esfuerzo máximo sobre el aislante en las fibras interiores de cada capa es aproximadamente el mismo y el material se utiliza eficazmente y con seguridad.

La figura 27 muestra algunos tipos de arreglos de los terminales, comunmente usados en los transformadores.

**F.- DISPOSITIVOS DE PROTECCION.** Los transformadores utilizados en sistemas de potencia o en aplicaciones industriales precisan ser instalados de manera que se hallen protegidos contra tensiones excesivamente elevadas y contra sobrecargas peligrosas: deben disponerse de manera que sea fácil su mantenimiento y la instalación no debe constituir un serio peligro de incendio o de accidente. Existen dos causas que pueden producir tensiones excesivas entre los terminales. La primera, el rayo produce ondas progresivas de frente de onda muy pronunciado que se propagan en ambos sentidos desde el punto de incidencia en las líneas de hilos y se reflejan en los extremos y en los empalmes, originando una serie de picos de tensión agudos. Cuando alcanza los terminales de un transformador una de estas ondas de alta tensión, puede atravesar el aislante entre espiras, o entre espiras y tanque. La manera inmediata de reducir al mínimo el efecto de estas ondas es conectar un dispositivo entre las líneas de potencia y tierra, el cual proporciona un camino para corriente interna alrededor del transformador y así disipa la energía de la onda sin efectos nocivos. Los dispositivos utilizados para este fin reciben el

nombre de pararrayos. Se fabrican en una gran variedad de formas y materiales pero todos presentan la propiedad de resistencia no lineal. El elemento activo es una sustancia química, en forma de polvo, píldoras o bloque prensado cuya resistencia eléctrica se hace menor al elevarse el gradiente de potencial en el elemento. En la mayoría de los pararrayos se colocan en serie con el elemento de resistencia no lineal varios espacios de aire. A través de éstos salta la chispa al llegar el frente de onda de alta tensión y así presentan una resistencia despreciable en serie con los elementos principales. En cambio cuando ya casi ha pasado el frente de onda, el arco que salta en los espacios de aire desaparece cuando se anula la corriente y entonces en adelante no circula corriente de conducción alguna a través del pararrayos a menos que llegue otro frente de onda brusco.

La segunda causa de tensión peligrosamente alta es una descarga que se produzca a causa de un fallo en el sistema de potencia o de un error en la conmutación. La solución en este caso también es el empleo de pararrayos. Hay que tener cuidado en asegurarse que el pararrayos que se elija para una aplicación cualquiera soporte bien la tensión a él aplicada continuamente de la línea de potencia durante un fallo a tierra de otra fase. Esta tensión es, para muchos sistemas trifásicos mucho mayor que la tensión normal aplicada al pararrayos.

Los transformadores no sólo han de estar provistos de una adecuada protección contra las descargas, sino que también deben desconectarse automáticamente del generador de potencia si hay una corriente en los devanados que sea peligrosamente intensa, sea a causa de una sobrecarga anormal, o como resultado de un fallo interno del aislante del transformador.

Esta protección contra las sobreintensidades la dan fusibles o disyuntores automáticos que abren el circuito antes que el efecto calefactor de las sobreintensidades se haga excesivo. La protección usual contra sobreintensidades, ya sea por fusibles o por disyuntores, se ajusta con una (característica de tiempo inverso) lo cual significa que el circuito se interrumpe al cabo de un período de tiempo más corto para corrientes muy intensas que para otros que lo sean menos. Se dispone, para la protección de transformadores, de fusibles de hasta 13.800 V. En los fusibles de alta tensión, el principal problema es extinguir rápidamente el arco. Esto se realiza de varias maneras incluyendo la acción de soplo resultante de la expansión de un gas en un tubo que contenga el arco caliente; la separación rápida, bajo la acción de un resorte, de los terminales de uno y otro lado en un fusible, y la extensión del arco en un líquido tal como tetracloruro de carbono.

Para que la instalación de un transformador sea razonablemente segura desde el punto de vista de accidentes, todos los terminales desnudos deberán estar fuera del alcance o protegidos por un metal a tierra o por pantallas aisladoras. Los tanques metálicos deberán estar bien conectados a tierra y las señales de alta tensión deberán estar bien visibles si los transformadores se hallan en un lugar accesible al público o a los empleados no encargados de su mantenimiento. Los transformadores que tienen terminales de alta tensión desnudos deberán siempre estar en un recinto vallado y cerrado y, si contienen aceite refrigerante inflamable, deberán montarse sobre un lecho de piedra picada o rodeados de una valla baja de hormigón que evite el escape de aceite en el incendio.

Los transformadores refrigerados con aceite ordinario presentan un riesgo muy ligero a la explosión. Un arco sostenido en el interior del tanque vaporizará el aceite y cuando se haya acumulado una cantidad suficiente de vapor del aire podrá producirse una explosión a menos que exista un dispositivo de seguridad para la presión. No será, pues aconsejable permitir que en la proximidad de los grandes transformadores de potencia se estacione o trabaje gente de una forma sistemática.

G.- BLINDAJE . Aún cuando se proteja a un transformador con pararrayos, la tensión local entre espiras puede hacerse excesiva entre partes de los devanados. En otras palabras, la distribución del gradiente de potencial puede no ser uniforme. Un procedimiento para mejorar esta situación consiste en proporcionar una pantalla metálica bien diseñada colocada respecto a los devanados de manera que los gradientes de potencial se mantengan dentro de los valores de seguridad de todos los devanados. El sistema se conoce con el nombre de blindaje electrostático. En los transformadores para comunicaciones se emplea comunmente el blindaje electrostático para evitar que en uno de los devanados aparezcan tensiones inducidas a causa de una tensión existente en el otro, y para evitar una interferencia estática similar entre los devanados a tierra o interespiras. Los transformadores para comunicaciones están previstos a veces de blindaje magnético en forma de una caja de acero, con el fin de reducir al mínimo la interferencia electromagnética entre el transformador y otros elementos de circuito.

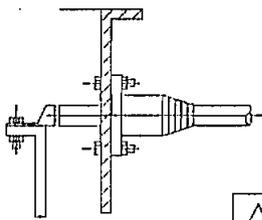
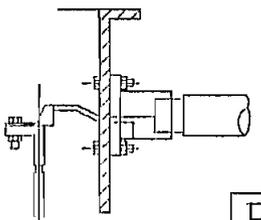
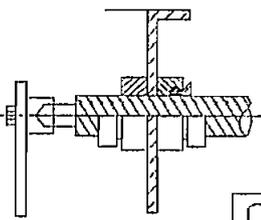
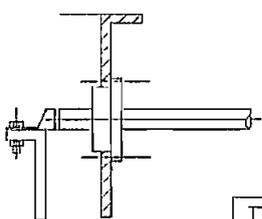
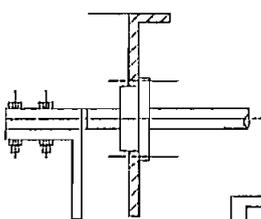
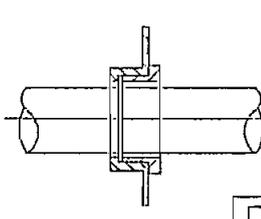
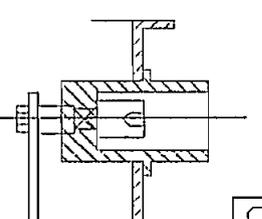
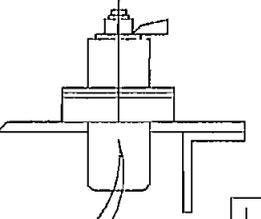
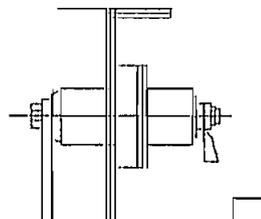
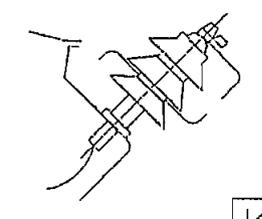
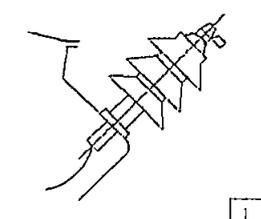
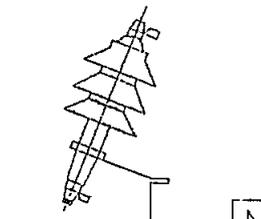
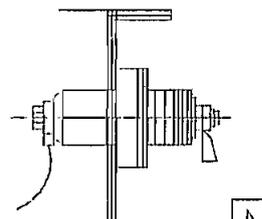
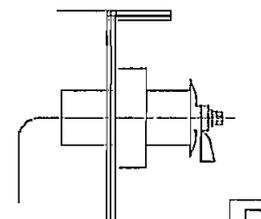
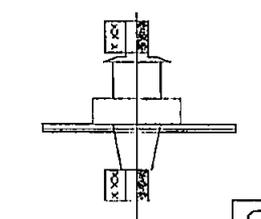
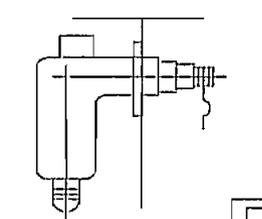
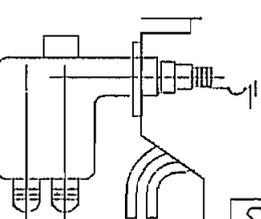
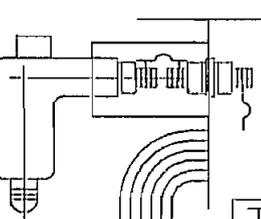
<p><b>COLLARINES</b></p> <p>A. DE BRONCE DESGLIZANTE</p> <p>B. TIPO CONDUIT</p> <p>C. DE BRONCE A PRUEBA DE AGUA</p>	 <p style="text-align: right;">A</p>	 <p style="text-align: right;">B</p>	 <p style="text-align: right;">C</p>
<p><b>AISLADORES</b></p> <p>D. DE MADERA PARA CABLE PASANTE</p> <p>E. PARA BARRA DE DISTRIBUCION</p> <p>F. RECUBIERTO PARA CABLE PASANTE</p>	 <p style="text-align: right;">D</p>	 <p style="text-align: right;">E</p>	 <p style="text-align: right;">F</p>
<p><b>TERMINALES INTERNOS</b></p> <p>G. TIPO CERRADO</p> <p>H. TIPO DESNUDO</p>	 <p style="text-align: right;">G</p>	 <p style="text-align: right;">H</p>	 <p style="text-align: right;">J</p>
<p><b>TERMINALES EXTERNOS</b></p> <p>ALTO VOLTAJE</p>	 <p style="text-align: right;">K</p>	 <p style="text-align: right;">L</p>	 <p style="text-align: right;">M</p>
<p><b>TERMINALES EXTERNOS</b></p> <p>BAJO VOLTAJE</p>	 <p style="text-align: right;">N</p>	 <p style="text-align: right;">P</p>	 <p style="text-align: right;">Q</p>
<p><b>CAJAS PARA CABLES</b></p> <p>T. CAJA PARA CABLE CON CAMARA DE DESCONEXION</p>	 <p style="text-align: right;">R</p>	 <p style="text-align: right;">S</p>	 <p style="text-align: right;">T</p>

Fig. 27  
Arreglos de terminales en transformadores

## 2.2 DISEÑO

Como se ha visto con anterioridad un transformador es un aparato eléctrico para convertir una corriente eléctrica de un voltaje a otro voltaje, puede ser diseñado para elevar o para bajar el voltaje, y se basa en el principio de la inducción magnética.

Un transformador no tiene partes en movimiento y es un equipo completamente estático lo que da lugar a que tenga un tiempo de vida útil extremadamente largo bajo condiciones normales de operación.

Básicamente un transformador está constituido por dos o más bobinas de conductor aislado, montados en un núcleo común de material ferromagnético, formado por láminas de acero al silicio. Cuando se aplica un voltaje en el bobinado primario se magnetiza el núcleo magnético, un voltaje inducido aparece en los terminales del bobinado secundario, y la relación entre los voltajes primarios y secundarios depende de la relación del número de espiras en ambos bobinados.

Recordando: El voltaje inducido, el flujo magnético y el número de espiras se relacionan mediante la ecuación 1.3.1. ( $E = 4.44 \Phi_{\max} N f$ ), que se conoce como ecuación general del transformador y que se aplica por igual a todos los devanados alojados en un mismo núcleo por el cual circula un flujo magnético dado, y que esencialmente nos indica que la relación de voltajes inducidos es igual a la relación del número de espiras de los devanados ( $N_1 / N_2$ ).

Para el diseño de transformadores monofásicos existen varios métodos dentro del campo tecnológico y en la mayoría de los casos se usa de una forma práctica las propiedades de los materiales utilizados así como factores de densidad de corriente permisible, de acuerdo al tipo del sistema de enfriamiento, etc, que están bien difundidos en tablas técnicas y otro tipo de literatura de fácil acceso. Sin embargo cuando se trata de grandes transformadores es necesario realizar un proceso detallado de cálculo con un chequeo minucioso y sobre todo con análisis de la calidad de los materiales a usarse en la fabricación.

A continuación se discuten los tres métodos más difundidos en el diseño de transformadores monofásicos.

## **METODO 1**

### **CALCULO SIMPLIFICADO DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS.**

Básicamente en el cálculo simplificado de transformadores se tiene dos categorías; por el tiempo de servicio del transformador, pudiendo ser constante o intermitente. Los primeros son del tipo de distribución que tienen servicio permanente aunque la carga no sea constante, como en el caso de las subestaciones, las instalaciones en clínicas, hospitales o en el campo netamente industrial.

Los de servicio intermitente son aquellos en los que el primario permanece siempre conectado al suministro de energía, pero se toma la carga a intervalos más o menos prolongados, de manera lógica y de acuerdo al tipo de servicio,

convendría que las pérdidas en el cobre sean iguales a las del hierro. También se debe tomar en consideración la forma del núcleo que puede ser tipo anillo o acorazonado. Los transformadores trifásicos en la mayoría de los casos son tipo anillo, teniendo la ventaja de poder utilizarse en grandes potencias.

**TENSION ESPECIFICA.** A diferencia de otros cálculos de transformadores, el método simplificado permite conocer primero el bobinado y después los datos de las dimensiones completas, pues lo lógico es calcular primero la sección del circuito magnético y determinar después las condiciones de enlace con el circuito eléctrico. La tensión específica ( $V_e$ ) se define como la relación que hay entre la fuerza electromotriz dada por la ecuación general de los transformadores y el número de espiras.

$$V_e = E/N = (4.44 \Phi_{\max} N f) / N \quad 2.2.1$$

Multiplicando el numerador y el denominador por la corriente que circula en el devanado, elevando luego al cuadrado ambos miembros de la igualdad, eliminando el término  $NI$  y reemplazando el producto  $(EI)$  por el valor de la potencia aparente del transformador en volta-amperios y obteniendo la raíz cuadrada en ambos miembros de la ecuación se tiene que:

$$V_e = (P)^{1/2} (4.44 \Phi_{\max} f / NI)^{1/2} \quad 2.2.2$$

En esta última ecuación se pueden introducir los valores prácticos de la constante  $K = 4,44$  para una función senoidal, la frecuencia igual a 60 HZ y el flujo máximo mientras que en el denominador aparece el valor de los

amperios-vuelta, ambos productos están relacionados por números fijos que se emplean para una gran cantidad de carros prácticos, en base a ello toda la segunda raíz cuadrada tendrá un valor práctico que se puede utilizar para toda una serie de transformadores y al asignarle la categoría de coeficiente práctico ( $\Delta p$ ) se tiene lo siguiente:

$$V_e = \Delta p (P)^{1/2} \quad 2.2.3$$

El coeficiente práctico tendrá diferentes valores de acuerdo a la tabla V (\*\*)

**TABLA V**

TIPO DE TRANSFORMADOR	COEFICIENTE PRACTICO	
	Máximo	Mínimo
Núcleo tipo anillo	0.022	0.014
Núcleo tipo acorazonado	0.030	0.002

En el método simplificado de transformadores, como segundo paso se debe llegar a determinar la sección del núcleo, para lo cual se toma la ecuación de la tensión específica, en la que, en vez de colocar el valor del flujo máximo se coloca el valor de su producto, es decir. (B s), quedando de la siguiente manera:

$$s = V_e 10^{-8} / (4.44 B f) \quad 2.2.4$$

En esta última ecuación, se ha despañado la sección en  $\text{cm}^2$ , apareciendo en función de la tensión específica que se conoce, de la f en c/s y de B en gauss.

Si se toma un valor para B, ya está resuelto el problema, pues las demás cantidades de la fórmula son conocidas.

La densidad de flujo ( B ) en transformadores, pueden tomar valores que dependen del tipo de servicio y en la práctica se utiliza las siguientes cifras:

a.- Transformador para servicio intermitente- B ( 8500 a 13000 gauss)

b.- Transformador para servicio constante- B ( 9500 a 14500 gauss)

Se debe aclarar que las cifras para servicio intermitente, son menores, puesto que en estos casos, se trata de reducir las pérdidas en el hierro, para aumentar las pérdidas en el cobre.

Para determinar los calibres o valores de la sección de los alambres con los que se fabrica el respectivo transformador, se hará en base a conocer las corrientes que circulan por los respectivos bobinados y de la densidad de corriente que puede adoptarse en función de una adecuada refrigeración .

$$sc = I/dc$$

2.2.5

Donde: sc es la sección del conductor, I es la corriente eficaz , y dc es la densidad de corriente.

La tabla VI (\*\*\*) muestra los valores de densidad de corriente para distintos tipos de transformadores, y la tabla VII (\*\*\*) muestra las características de los alambres macizos normalizados de cobre recocido.

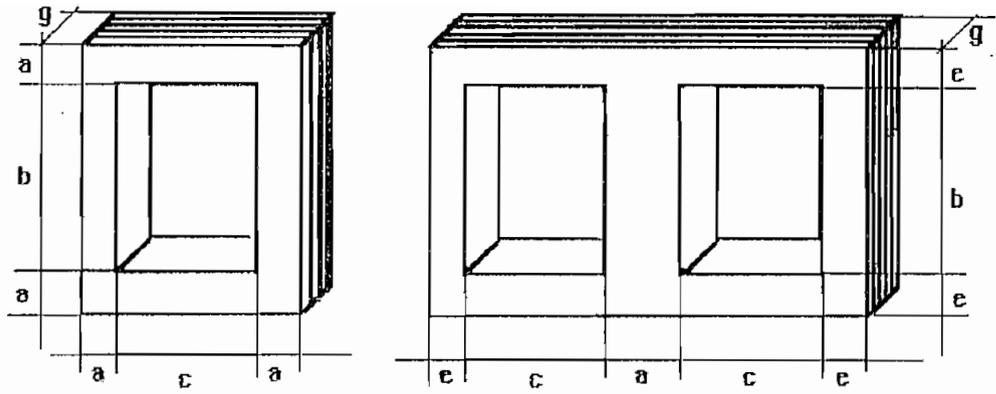
**TABLA VI**

TIPO DE TRANSFORMADOR CORRIENTE	DENSIDAD DE [Amp./cm <sup>2</sup> ]
Bobinados al aire tipo común	1 - 2
Bobinados en baño de aceite	1,5 - 2,5
Refrigeración natural ( H <sub>2</sub> O)	2,5 - 3,5
En aceite enfriado con aire a presión	2,5 - 3,5
Refrigeración esencialmente buena	3,5 - 4

Finalmente, cuando se tiene el caso de que el núcleo no esté previamente recortado para llegar a la fabricación del núcleo adecuado para el tipo de trabajo deseado, se recomienda usar las relaciones indicadas en la figura número 28.

(\*\*) Tabla V y Tabla VI, cortesía del taller de electricidad industrial del Colegio Nacional Técnico Sucre, Quito-Ecuador.

(\*\*\*) Tabla VII, cortesía de Industrias Logacho Almeida Cía. Ltda. Quito-Ecuador



RELACIONES:  
 $b/c = 2,5 \text{ a } 3,5$   
 $g/a = 1 \text{ a } 1,5$

$b/c = 2,5 \text{ a } 3,5$   
 $e/a = 0,5 \text{ a } 0,75$   
 $g/a = 2 \text{ a } 3$

Fig. 28

Relaciones comunes de las dimensiones en los núcleos.

## METODO 2.

### CALCULO DE UN TRANSFORMADOR POR EL METODO DE MARCO SANCHO

Este método utiliza las siguientes fórmulas básicas:

$$s = 1,2 (P)^{1/2} \quad \text{para } 50 \text{ Hz.}$$

$$s = a (P)^{1/2} \quad \text{donde } a \text{ toma valores entre } 1 \text{ y } 1,1 \text{ para } 60 \text{ Hz.}$$

$$E = 4,44 N \Phi_{\max} f$$

$$P = E I \cos \theta \quad n$$

$$\Phi_{\max} = B s$$

2.2.6

Donde:

$s$ , es la sección transversal en centímetros cuadrados

$P$ , es la potencia

$\cos \theta$ , es el factor de potencia

$\eta$ , es el rendimiento

$\Phi_{\max}$ , es el flujo máximo

$B$ , es la densidad del flujo

## PROCEDIMIENTOS DEL CALCULO

1.- Calcular la potencia en el lado de la carga.

2.- Calcular la sección del núcleo. en este punto a la sección obtenida por medio de las fórmulas básicas, se le afecta por un factor de utilización ( $f$ ) que se considera para dar un margen en la capacidad del núcleo y que soporte condiciones de sobrecarga del transformador. ( $s_t = s/f$ ) el método recomienda usar un factor de utilización igual a 0,82.

3.- Cálculo del flujo magnético máximo, el flujo magnético máximo se calcula como el producto de la sección transversal del núcleo obtenida en el numeral dos por la densidad de flujo, la cual se escoje según el tipo de transformador, ( de 85000. a 13000 gauss para transformador de servicios

intermitente y de 9500 a 14500 gauss para transformador de servicio continuo).

4.-Despejando ( $N$ ) de la Ecuación fundamentalmente del transformador ( $E=4.44 N \Phi_{max} f$ ) se obtiene el número de espiras tanto para devanado primero como para los demás devanados alojados en el núcleo.

5.- Calcular los valores de la corriente en los devanados, de acuerdo con la potencia y el voltaje.

6.- Con estos valores de corriente, con los valores prácticos de la densidad de corriente de acuerdo al sistema de enfriamiento del transformador en cuestión indicados en la tabla VI y con los datos de los alambres macizos normalizados de cobre recorrido de la tabla VII, se calcula la sección del conductor a utilizarse.

7.-Por último para definir las dimensiones del núcleo, se puede usar las relaciones de la figura 28 y el valor de la sección del núcleo obtenido el numeral dos.

### METODO 3

#### METODO EXPERIMENTAL DEL CALCULO DE TRANSFORMADORES.

Este método básicamente utiliza los mismos valores de los métodos anteriores y puede resumirse en los siguientes pasos:

1.- Cálculo de la potencia en el secundario

2.- Cálculo de la potencia efectiva en el secundario ( $P_s = E_s I_s \cos \theta_n$ ), se recomienda que la potencia efectiva ( $P_{ec}$ ) del transformador sea aproximadamente de un doce por ciento más alta que el valor calculado para la potencia del secundario de acuerdo con los datos de la carga.

3.- Cálculo de sección del transformador, la sección del núcleo del transformador se calcula empleando la ecuación  $s = a (P_{ef})^{1/2}$ , donde (a) es igual a 1.2 para una frecuencia de 50 ciclos por segundo y toma un valor entre 1 y 1.1 cuando la frecuencia es de 60 ciclos por segundo.

4.- Calcular el número de espiras de los devanados. Este método utiliza la relación conocida como espira / voltio y que no es otra cosa que el dividir para (N) los dos miembros de la ecuación general de los transformadores, en donde se reemplazan los valores de la frecuencia y flujo máximo que se obtiene del producto de la sección (s) calculada en el numeral anterior y el

valor asumido para la inducción magnética (B) de acuerdo al tipo de transformador.

5.- Se calcula la potencia del primario como el valor de la potencia efectiva del transformador calculada en el numeral dos, más un 6 por ciento, que se considera como la potencia total que el transformador tomará de la fuente de energía.

6.- Calcular la corriente en el devanado primario como la relación de dividir el valor de la potencia primaria para el voltaje de la red que alimenta el transformador.

7.- Calcular la corriente en el devanado secundario.

8.- Calcular la sección de los conductores con los valores de las respectivas corrientes, la densidad de corriente de la tabla VI y los valores de la tabla VII para alambres macizos normalizados de cobre recocido.

# TABLA VII

CALIBRE No.	DIAMETRO		CIRCULARES MILSIMAS	K&Z	PESO		RESISTENCIA OHMS / 1000 PIES (Ø T)	RESISTENCIA OHMS /km
	PULGADAS	MM			LIBRAS POR 100 PIES	KP POR Lb.		
0000	0,46	11,68	211600	136,42	640,5	933,18	0,049	0,164
000	0,4096	10,38	167800	107,74	507,9	733,06	0,0618	0,203
00	0,3648	9,35	133100	87,61	402,8	599,45	0,0779	0,256
0	0,3248	8,25	105300	68,06	319,5	475,48	0,0912	0,322
1	0,2893	7,34	83694	53,87	251,3	376,96	0,124	0,407
2	0,2576	6,54	66370	42,77	200,4	297,67	0,156	0,512
3	0,2294	5,82	52630	33,87	159,3	237,07	0,197	0,646
4	0,2043	5,18	41740	20,81	126,4	188,1	0,248	0,814
5	0,1819	4,61	33100	21,25	100,2	149,12	0,313	0,079
6	0,162	4,11	26250	16,89	79,46	118,25	0,395	1,286
7	0,1443	3,66	20820	13,39	63,02	93,79	0,498	1,634
8	0,1285	3,26	16510	10,62	49,98	74,38	0,628	2,06
9	0,1144	2,91	13090	8,47	39,63	54,51	0,792	2,598
10	0,1019	2,59	10380	6,71	31,43	46,77	0,998	3,274
11	0,09074	2,3	8230	5,29	24,92	37,09	1,26	4,134
12	0,08081	2,05	6530	4,2	19,77	29,42	1,588	5,209
13	0,07196	1,82	5170	3,31	15,68	23,33	2,003	6,572
14	0,06408	1,62	4107	2,62	12,43	18,5	2,515	8,244
15	0,05707	1,41	3257	1,99	9,858	14,68	3,184	10,176
16	0,05082	1,29	2583	1,66	7,818	11,78	4,016	13,176
17	0,04526	1,14	2048	1,3	6,200	9,23	5,064	16,614
18	0,0403	1,02	1624	1,04	4917	7,32	6,385	20,948
19	0,03589	0,9	1288	0,81	3899	5,8	8,051	26,414
20	0,03196	0,81	1022	0,65	3,092	4,6	10,15	33,201
21	0,02835	0,72	810,1	0,52	2,452	3,649	12,8	42
22	0,02557	0,61	642,4	0,41	1,945	2,895	16,14	52,95
23	0,0201	0,57	509,5	0,32	1,542	2,295	20,36	66,8
24	0,01799	0,51	404	0,26	1,223	1,82	25,67	84,22
25	0,01594	0,45	320	0,2	0,9699	1,443	32,37	106,2
26	0,0142	0,41	254,1	0,17	0,7692	1,145	40,81	133,89
27	0,01264	0,36	201,5	0,13	0,61	0,909	51,47	168,87
28	0,01126	0,32	159,8	0,1	0,4037	0,72	64,9	212,93
29	0,01003	0,29	126,7	0,084	0,3836	0,571	81,83	268,47
30	0,01003	0,26	100,5	0,067	0,3042	0,453	103,2	338,59
31	0,00892	0,23	79,7	0,053	0,2413	0,359	130,1	426,4
32	0,00795	0,2	63,21	0,04	0,1913	0,285	164,1	533,4
33	0,00708	0,18	50,13	0,032	0,1517	0,226	206,9	687,8
34	0,00708	0,16	39,75	0,025	0,1203	0,179	260,9	856
35	0,0063	0,14	31,52	0,019	0,09542	0,142	329	1079,4
36	0,005	0,13	25	0,016	0,07568	0,113	414,8	1361
37	0,00445	0,11	19,83	0,012	0,0601	0,089	523,1	1716
38	0,00396	0,1	15,72	0,01	0,04759	0,071	659,6	2164
39	0,00353	0,09	12,47	0,008	0,03774	0,056	831,8	2729
40	0,00314	0,08	9,888	0,006	0,0299	0,044	1049	3442

CARACTERÍSTICAS DE LOS CONDUCTORES DE COBRE NORMALIZADOS SEGÚN LA ESCALA DE CALIBRES A.W.G.  
(AMERICAN WIRE GAUGES)

## 2.3 DIMENSIONAMIENTO DE CAPACITORES Y DEVANADOS

En los puntos anteriores de este capítulo, y en el anterior se ha discutido ampliamente las propiedades de los materiales utilizados en la construcción de transformadores así como también los parámetros que deben tomarse en cuenta para el diseño y dimensionamiento de las partes que forman un transformador, también se ha planteado y resuelto el concepto del transformador con bobina flotante que en su parte constructiva difiere de un transformador convencional en que el devanado primario esta formado a más del bobinado principal que se conecta a la fuente de energía por un bobinado flotante el cual cierra a través de un capacitor.

Con la utilización de todos estos conceptos se procederá a dimensionar los bobinados primario y secundario para un transformador convencional y para otro con bobina flotante de 2.2 Kva de potencia, con un voltaje primario 120 voltios, 60 voltios en el secundario y para una frecuencia nominal de 60 ciclos por segundo.

Los transformadores serán de tipo seco enfriado por aire, con núcleo acorazado y para servicio constante.

### TRANSFORMADOR CONVENCIONAL

1.-Cálculo de la tensión específica.

$$V_e = \Delta (P)^{1/2} = 1.1726$$

Donde  $\Delta$  . es el coeficiente práctico y que para este caso en particular lo tomamos de la tabla V con un valor de 0,025.

2.- El número de espiras del primario ( $N_p$ ) es igual a:

$$N_p = V_p / V_e = 104$$

3.- El número secundario ( $N_s$ ) es igual a :

$$N_s = V_s / V_e = 52$$

3.- La corriente en el primario ( $I_p$ ) :

$$I_p = P_p / E_p = 18.34 \text{ amp.}$$

4.- La corriente en el secundario ( $I_s$ ) :

$$I_s = P_s / E_s = 36.68 \text{ amp.}$$

5.- Con la densidad de corriente ( $d_c$ ) igual a 1,5 tomada de la tabla VI la sección del conductor del alambre del devanado primario ( $s_{cp}$ ), y del devanado secundario ( $s_{cs}$ ) son respectivamente.

$$s_{cp} = 9.17 \text{ cm}^2$$

$$s_{cs} = 18.34 \text{ cm}^2$$

6.- para una intensidad de flujo magnético de 11.000 gauss, la sección del núcleo es:

$$s = 40 \text{ cm}^2$$

7.-El núcleo tipo acorazado que se dispone tiene las siguientes medidas, de acuerdo a la figura número 29.

$$a = 64 \text{ mm}$$

$$e = 32 \text{ mm}$$

$$c = 32 \text{ mm}$$

$$b = 96 \text{ mm}$$

Para satisfacer la condición de que la sección del núcleo sea igual a  $40 \text{ cm}^2$ , g debe ser igual a 62,5 mm.

## **TRANSFORMADOR CON BOBINA FLOTANTE**

Recordando:

El concepto fundamental del transformador con bobinas flotante, es que el capacitor supla en estado estable la corriente de magnetización que requiere el núcleo.

La corriente de vacío para un transformador de este tipo oscila entre el 2 y el 6 por ciento de la corriente nominal referida al primario, casi en su totalidad es una corriente reactiva, que es la que debe entregar el capacitor y a su vez la que circula por el devanado flotante.

Introduciendo estos conceptos y características en el cálculo simplificado de transformadores monofásicos se obtiene los siguientes datos para el transformador con bobina flotante.

1.  $V_e = 1,1726 \text{ Voltios / espira}$

2.  $N_p = 104$  espiras
3.  $N_s = 52$  espiras
4. Como los 0,917 amp correspondientes a la corriente de vacío, en estado estable serán entregados en forma de inyección de volta-amperios desde el condensador conectado a la bobina flotante la corriente eficaz en el primario es:

$$I_p = 18,34 * 0,95 = 17,423 \text{ Amp}$$

5. La corriente en el devanado secundario  $I_s$  es igual a 36,68amp, puesto que ésta no se ve afectada por la presencia de la bobina flotante sino que más bien depende de la carga.

6. La corriente en el devanado flotante ( $I_c$ ) para cuestiones de diseño se toma como el valor de la corriente de vacío.  $I_c = 0,917$  amp

7. Con la densidad de corriente igual a 1,5 tomada de la tabla V, la sección de los conductores para las diferentes bobinas son respectivamente:

$$s_{cp} = 8.72 \text{ mm}^2$$

$$s_{cs} = 18.34 \text{ mm}^2$$

$$s_{cf} = 0.4585 \text{ mm}^2$$

8. El núcleo tipo acorazado que se dispone para la construcción de éste transformador tiene una sección transversal de  $32,4 \text{ Cm}^2$ , esto implica que para satisfacer las condiciones de trabajo estará sometido a una inducción magnética de 13.580 gauss, lo cual está dentro de los parámetros prácticos recomendados.

9. Para el dimensionamiento del número de espiras del devanado flotante, y el capacitor, el factor más importante es fijar el voltaje al cual va a trabajar dicho devanado, para esto hay que tomar en cuenta básicamente la facilidad de conseguir el capacitor en el mercado, los niveles de voltaje a los que se está trabajando, y la potencia del devanado flotante, en este caso se está construyendo un transformador de bajo voltaje entonces el capacitor puede ser dimensionado a 120 o 220 voltios que comúnmente existen en el mercado, con un voltaje de 120 voltios tenemos que el número de espiras del devanado flotante es igual a 104 espiras.

La potencia del capacitor a este voltaje debe ser igual a  $120\text{v} \times 0,917 \text{ amp.}$  que dan 110 va. y que su mayor parte está formado por la potencia reactiva necesaria para magnetizar el núcleo, y que se deduce de la curva característica del material. La figura 29 da las curvas de pérdidas en el núcleo y de voltamperios eficaces de excitación, correspondientes a un acero típico. puesto que con el volumen y con el peso específico del núcleo de acero ( $7,65 \text{ g/cm}^3$ ), en el gráfico puede verse que las pérdidas efectivas son una décima parte de las pérdidas aparentes para el valor de flujo magnético al que estará trabajando este núcleo, entonces:

$$Q = 0,9 (P_o) = 0,9 (110) = 99 \text{ var.}$$

$$C = Q / (2 \pi f V^2) = 18.5 \mu\text{f}$$

## RESUMEN

### TRANSFORMADOR CONVENCIONAL

Potencia:	2.2 kva
Voltaje primario:	120 v.
Voltaje secundario:	60 v.
Corriente del primario:	18.34 amp.
Corriente del secundario:	36.68 amp.
Sección transversal del núcleo:	40 cm <sup>2</sup>
Sección del conductor primario:	9.17 cm <sup>2</sup>
Número de espiras del primario:	104
Sección del conductor secundario:	18.34 cm <sup>2</sup>
Número de espiras del secundario:	52

## TRANSFORMADOR CON BOBINA FLOTANTE

Potencia:	2.2 kva
Voltaje primario:	120 v.
Voltaje secundario:	60 v.
Voltaje del flotante:	120 v.
Corriente del primario:	18.34 amp.
Corriente del secundario:	36.68 amp.
Corriente del flotante:	0.917 amp.
Sección transversal del núcleo:	32.4 cm <sup>2</sup>
Sección del conductor primario:	8.72 cm <sup>2</sup>
Número de espiras del primario:	104
Sección del conductor secundario:	18.34 cm <sup>2</sup>
Número de espiras del secundario:	52
Sección del conductor del flotante:	0.4585 cm <sup>2</sup>
Número de espiras del flotante:	104
Capacidad del condensador:	18.5 μf

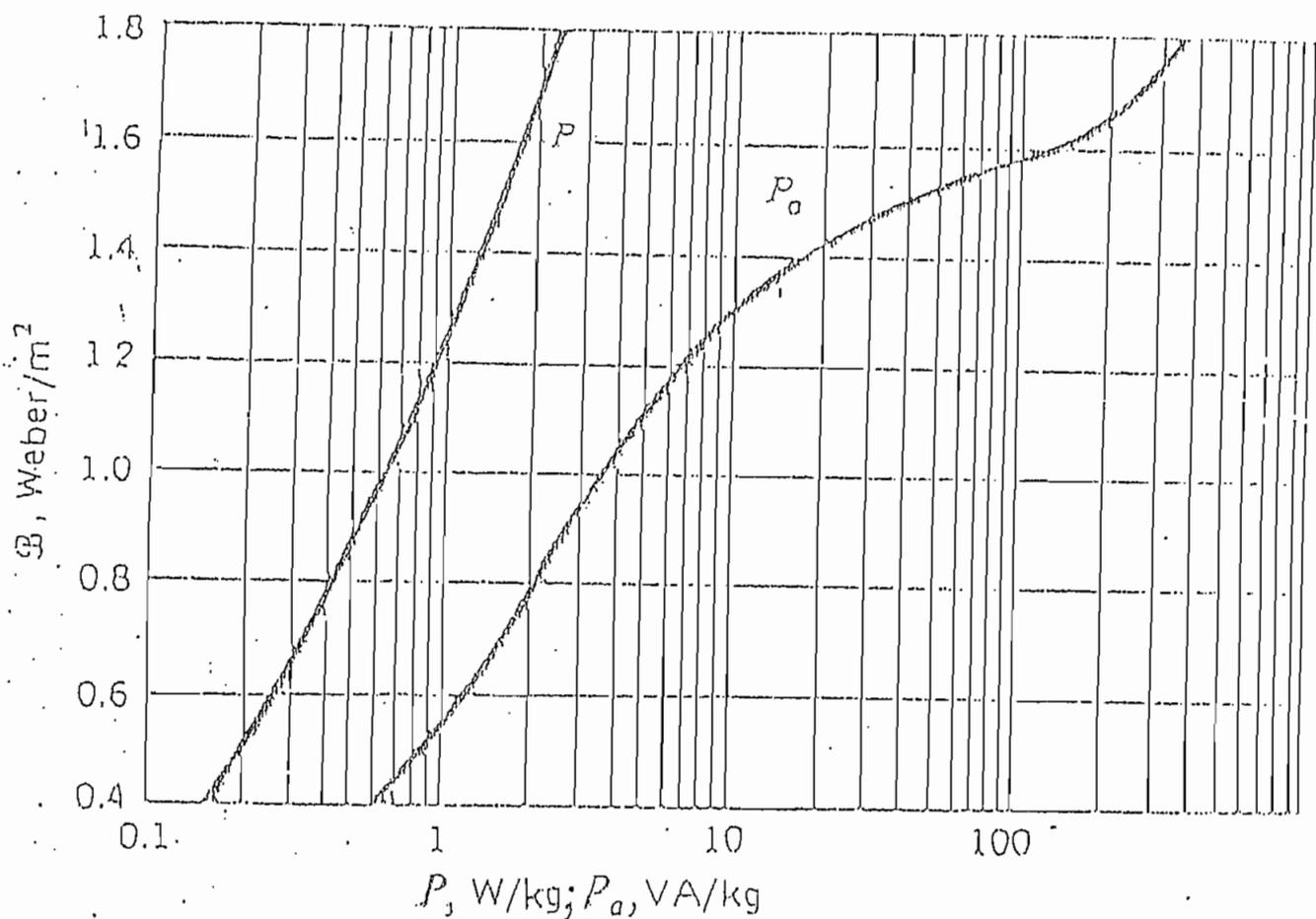


Fig. 29

Curvas de pérdidas en el núcleo y de voltampere eficaces de excitación, correspondientes a un acero típico.

Este gráfico se ha obtenido del libro. Electric Machinery , cuyos autores son: FITZGERAL , C. KINGSLEY Jr, y, KUSKO : 1971. (pag. # 16)

## **2.4 HERRAMIENTAS NECESARIAS Y CONSTRUCCION**

Una vez analizados los factores de diseño y luego de haber calculado los parámetros como el número de espiras, sección de los conductores etc. se procede a la construcción física de estos, este proceso comprende varias operaciones independientes, las más importantes son:

### **1.- FABRICACION DEL MOLDE**

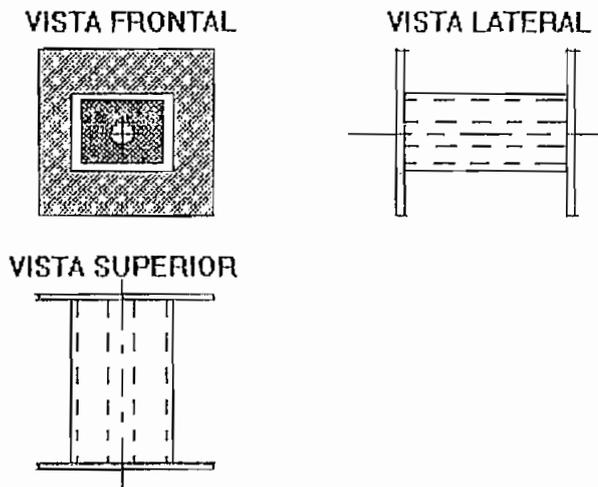
El molde debe hacerse de tal manera que la forma, y las dimensiones sean iguales a la de la columna del núcleo magnético en la cual irá alojada la bobina, estos moldes normalmente se fabrican de madera o se usan moldes metálicos de tamaños predefinidos cuando se fabrican transformadores en serie, los moldes deben tener una perforación en el sentido transversal que permita sujetarlo con un perno o una base fija o al eje de una máquina eléctrica de bajas revoluciones, para luego ir montando los arrollamientos del conductor que forman la bobina.

### **2.- AISLAMIENTOS**

Luego de haber fabricado el molde, es necesario construir el aislamiento entre el devanado y el núcleo de tal forma que evite el contacto de los arrollamientos con el núcleo y se produzca algún desperfecto en el transformador para ello se usan diferentes materiales como son:

- a) Papel de trazo elaborado con gran esmero para asegurar su pureza química y su resistencia mecánica ( fabricando en varios espesores y doblado): constituyen un aislamiento clase A.
- b) Combinación o Sandwich Mylar, También clase A.
- c) Combinación Dacron - Mylar, para aislamiento clase B y F.
- d) Papel nylon, para aislamiento clase B hasta H ( es especialmente resistente a las temperaturas elevadas, posee gran resistencia mecánica a la tracción y goza de excelentes propiedades dieléctricas).

La figura 30 muestra un conjunto formado por el molde y el aislamiento para un transformador que será fabricado en un núcleo cuya sección transversal es rectangular.



**Fig. 30**

**Conjunto molde-aislamiento para un núcleo de sección transversal rectangular.**

### 3. CONSTRUCCION DE LOS DEVANADOS .

Para la fabricación de los bobinados en la práctica se utilizan indistintamente uno de los siguientes procedimientos.

a) A mano: se sujeta el molde formado con el aislamiento a una superficie fija con un perno, de tal forma que facilite el trabajo a la persona encargada de ir enrollando el conductor y llevando nota del número de espiras, este método es muy usado en talleres pequeños que eventualmete construyen una bobinada.

b) Con una platina móvil que sujeta el molde. En este caso el molde se sujeta a una platina la cual tiene libertad de movimiento circular provocado bien sea por la persona encargada o por una máquina electromecánica de bajas revoluciones ( un motoreductor, o con la utilización de poleas conectadas por una banda para reducir la velocidad), es muy importante que se mantenga el control sobre el número de vueltas.

En la actualidad existen máquinas muy sofisticadas con un alto nivel de automatización que han sido desarrolladas con el fin de optimizar la producción.

3. Se procede a retirar el molde, para luego alojar el bobinado en el núcleo; tanto los núcleos tipo anillos como los acorazonados estan formados por chapas, unas en forma de I y otras en forma de C para el núcleo tipo anillo, y de E par el tipo acorazonado, se van introduciendo las chapas en forma

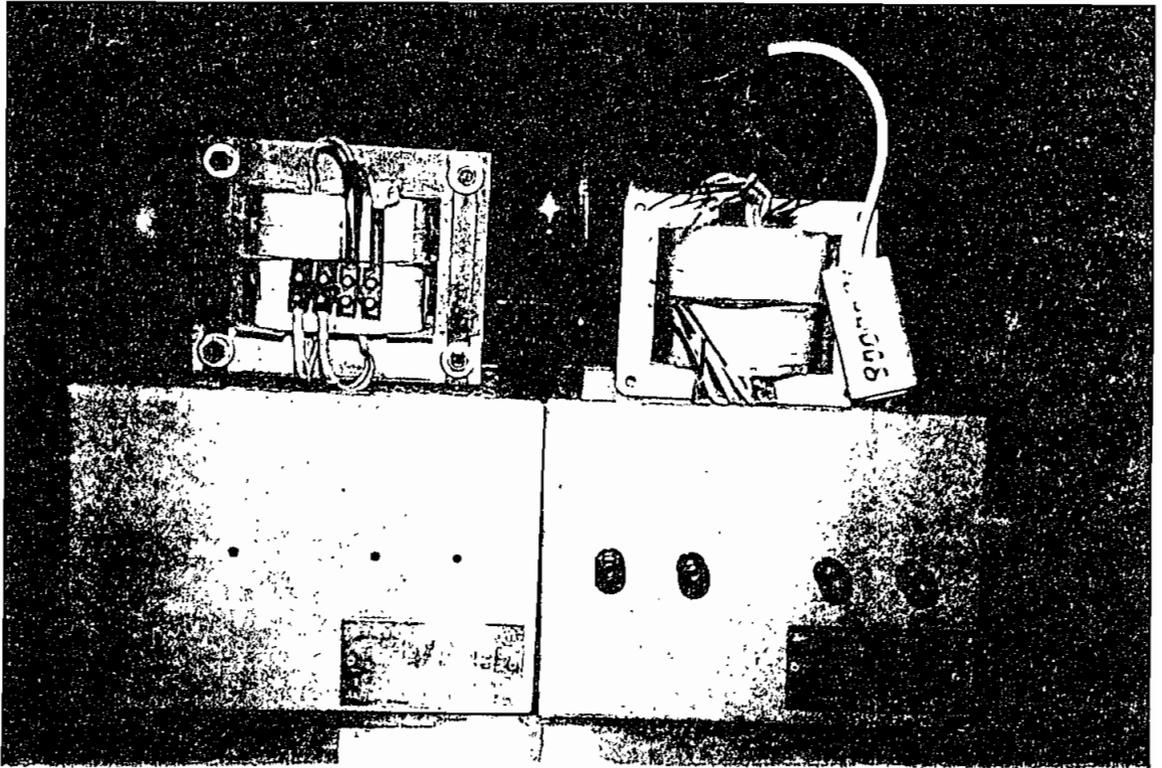
intercalada hasta cubrir el espacio hueco en donde está alojado el molde que es de la misma dimensión del núcleo.

4. Una vez que las bobinas han sido ensambladas en el núcleo, se efectuará la primera prueba para determinar la relación de transformación y detectar posibles fallas de cortocircuito, polaridad o circuito abierto, seguidamente se efectúa las conexiones eléctricas empleando una soldadura de alta calidad, y recubriendo los terminales y conexiones con el aislante.

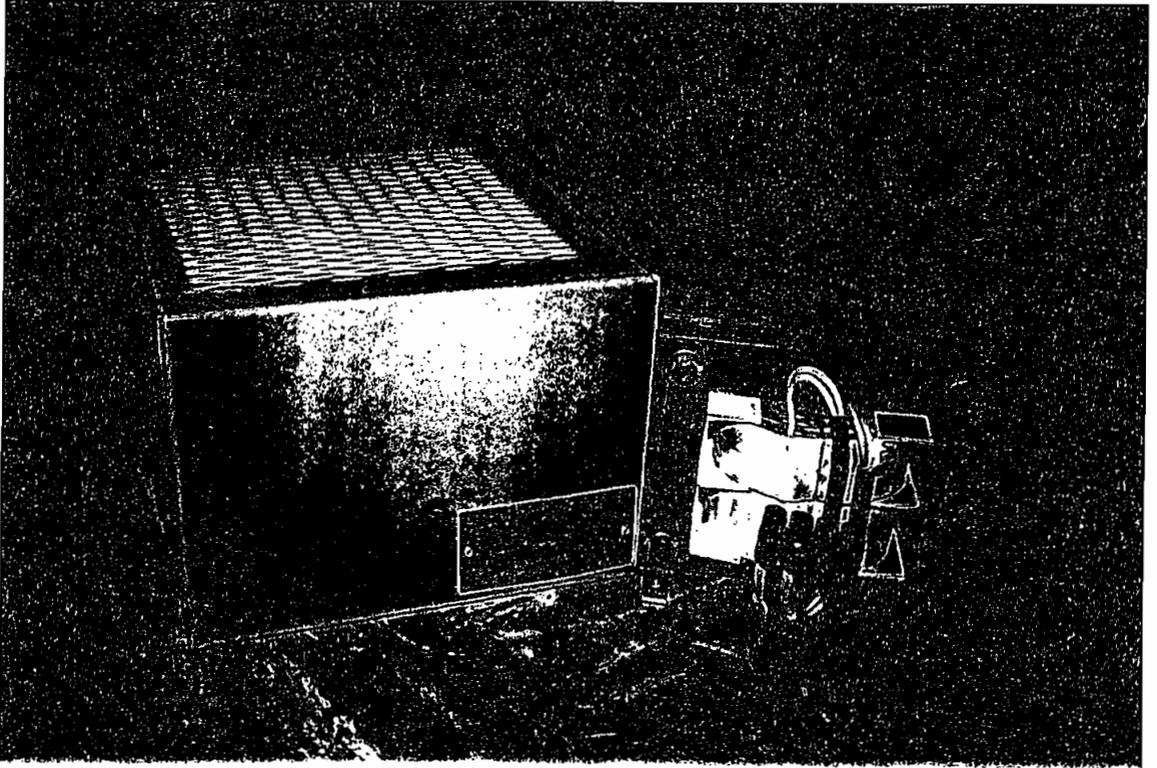
5. Luego viene el proceso de secado para lo cual se lo introduce en un horno o estufa que aproximadamente tenga una temperatura de 120 grados centígrados durante un tiempo conveniente con el objeto de extraer toda la humedad de los arrollamientos, se debe cuidar que no se caliente demasiado ya que podría quemarse el material aislante del conductor de la bobina, seguidamente se procede a rociar barniz en los bobinados procurando que penetre en el interior de las bobinas, luego se lo introduce nuevamente en el horno para un secado completo, una vez seco el barniz los arrollamientos quedarán rígidos y sin posibilidad de movimiento, además, el barniz protege herméticamente los arrollamientos contra la penetración de la humedad o de partículas extrañas, y eleva tanto la resistencia mecánica, como la rigidez dieléctrica de los conductores.

6. Por último se efectúa el ensamble en el gabinete metálico o dentro del tanque dependiendo del tipo de transformador, teniendo el mayor cuidado de conservar las distancias de aislamiento para que la parte activa del transformador no tenga contacto eléctrico alguno con la carcasa.

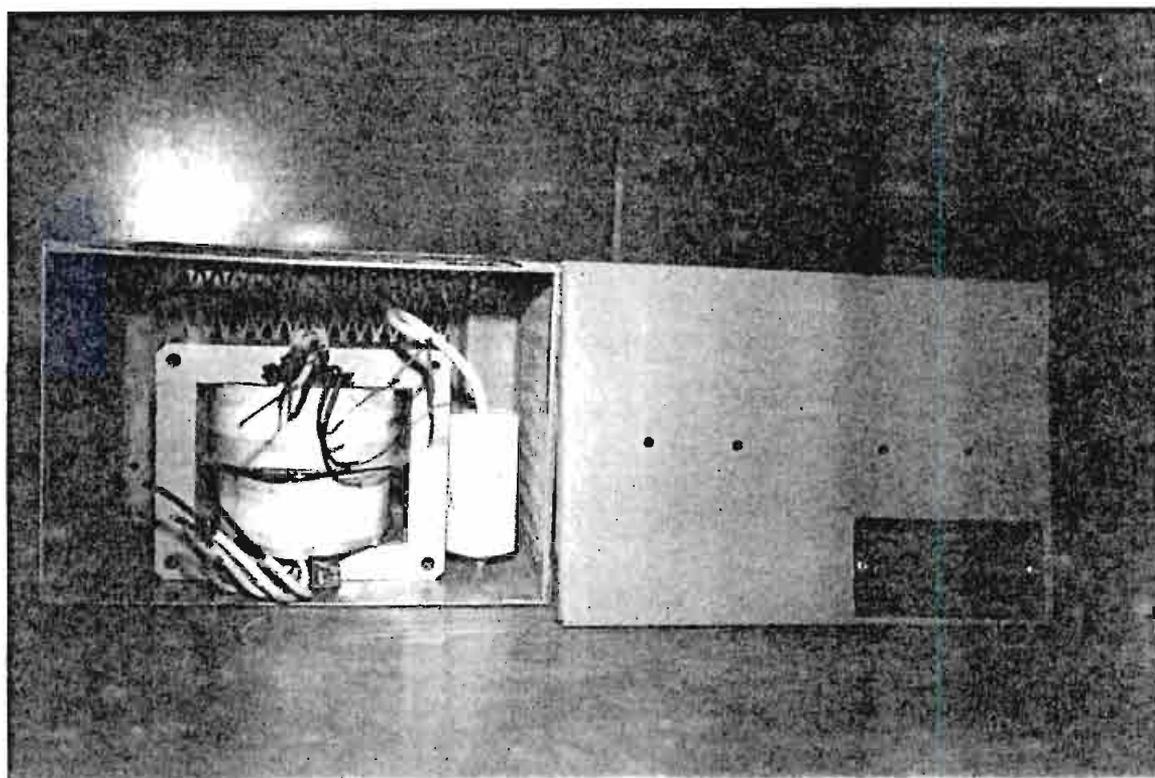
Las siguientes fotografías muestran los dos transformadores contruidos, en ellas puede verse las claras diferencias entre ambos, el transformador con bobina flotante es más pequeño que el convencional, y tiene conectado el capacitor a la bobina flotante.



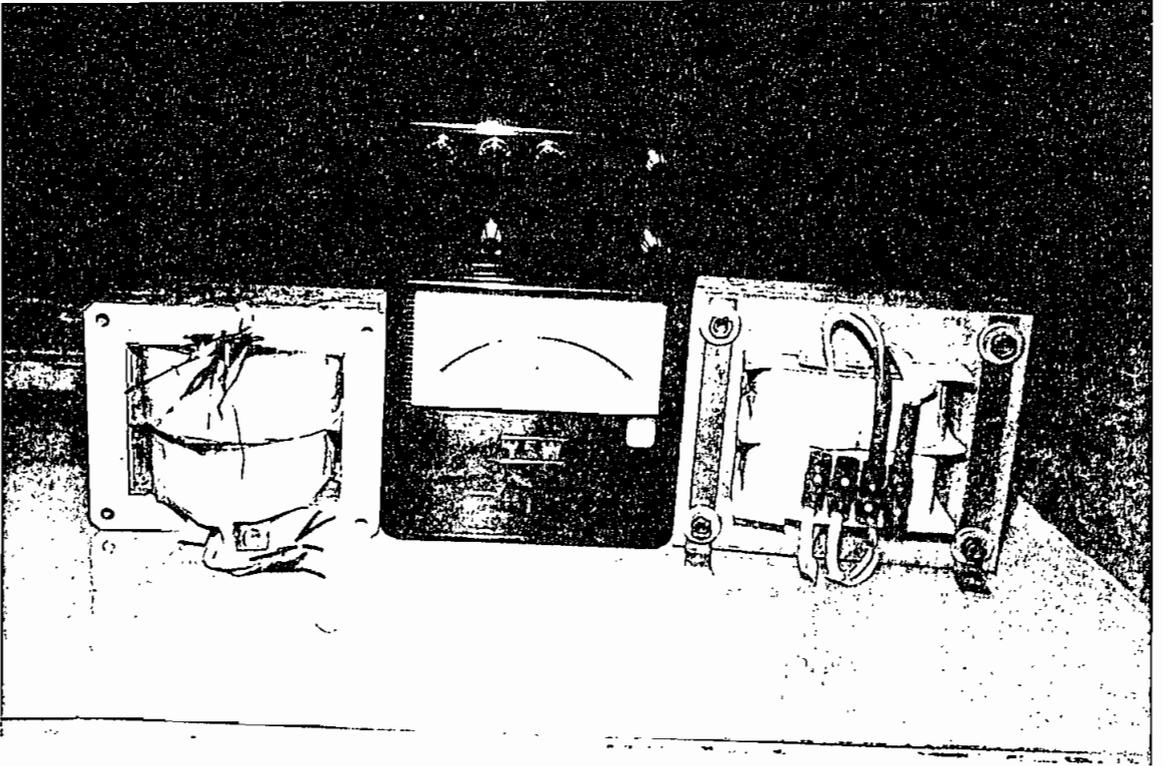
Fotografía 1: Muestra los dos transformadores contruidos, a la izquierda el transformador convencional y la derecha el de bobina flotante, puede observarse la diferencia de tamaño y el capacitor en el transformador con bobina flotante .



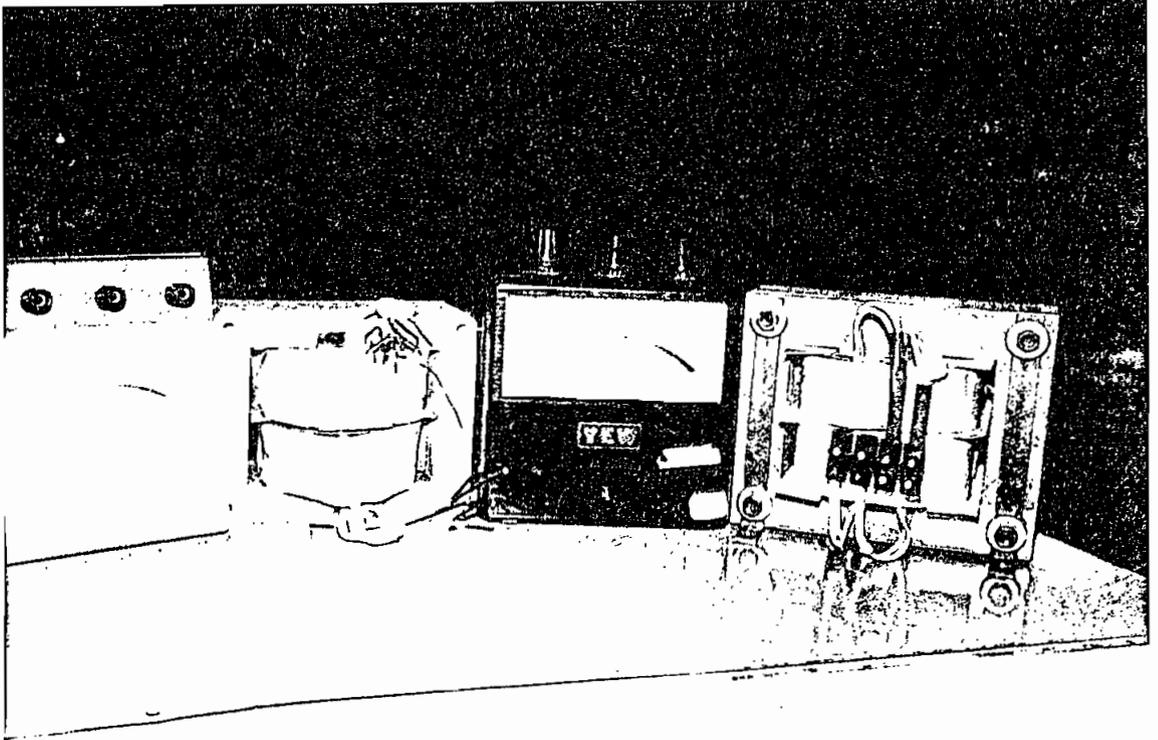
Fotografía 2: Transformador convencional preparado para ser alojado dentro del gabinete metálico, se observa los dos grupos de bobinas alojados en la rama central del núcleo ferromagnético y sus terminales conectados a una bornera.



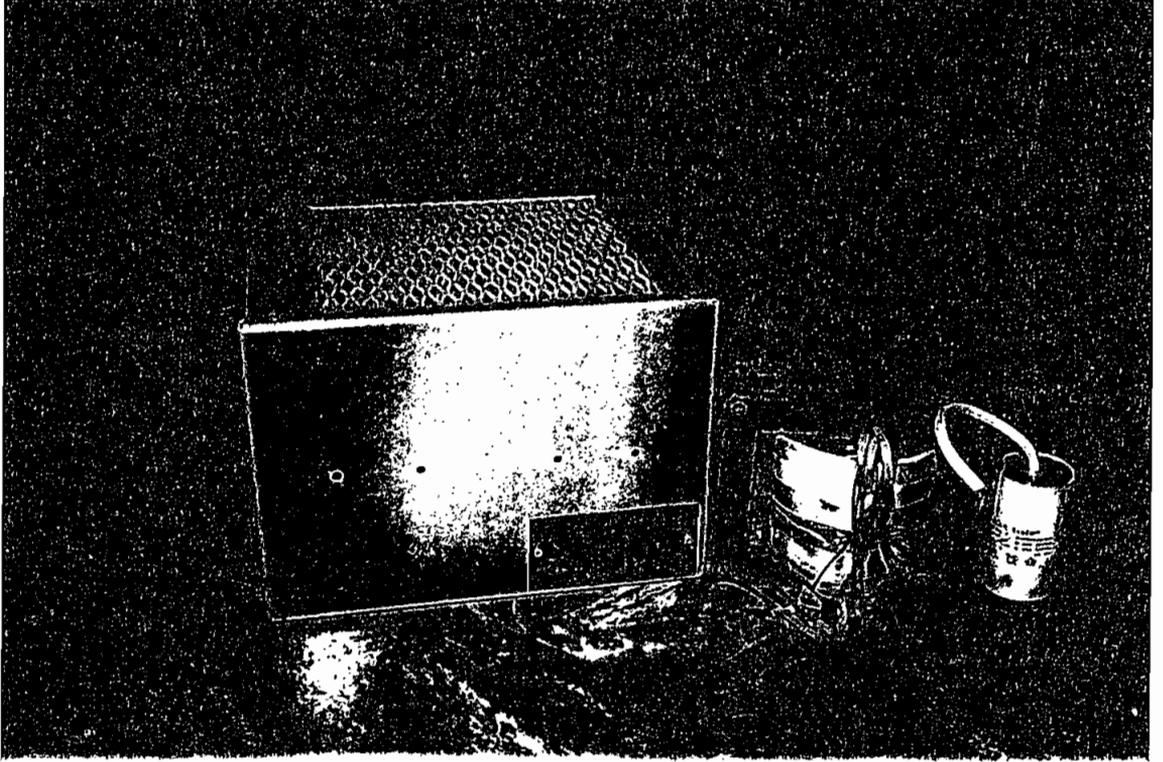
Fotografía 3. En esta fotografía se observa el gabinete metálico y el transformador con bobina flotante, el capacitor permanente conectado al devanado flotante en el primario del transformador, y los dos grupos de bobinas, la bobina superior que es de mayor volumen corresponde al primario y la inferior al secundario.



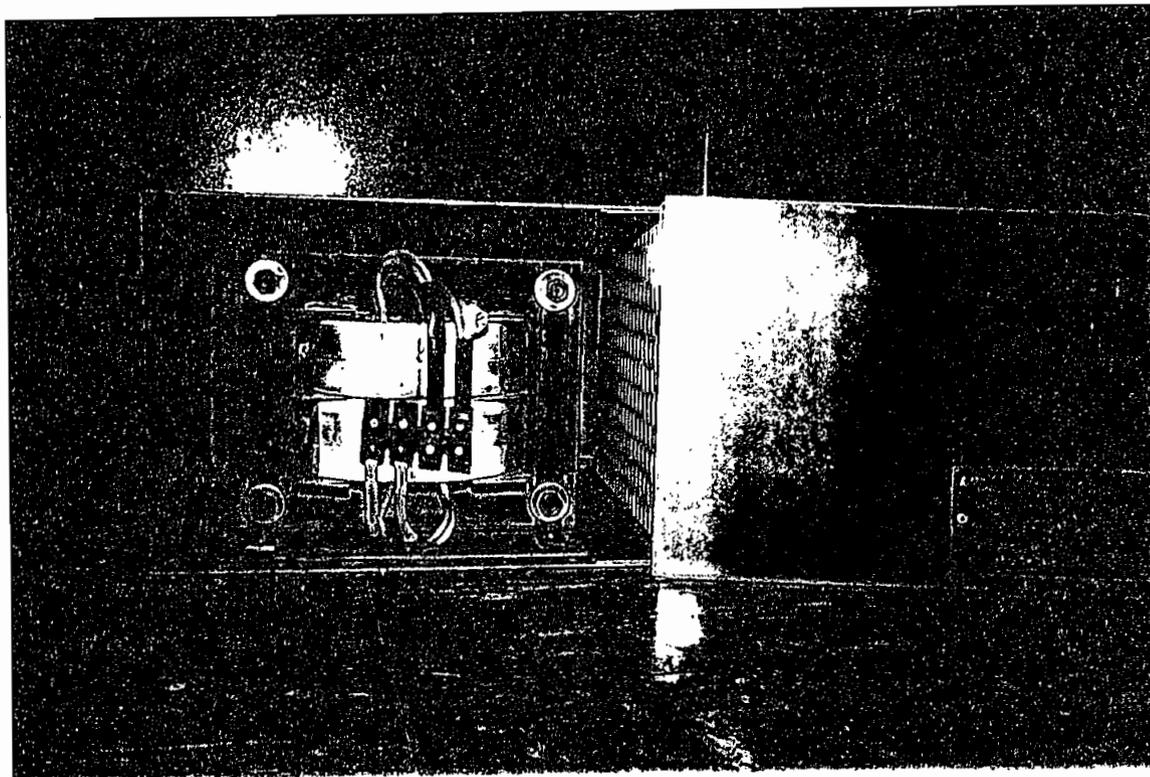
Fotografía 4: Muestra los dos transformadores con un wattímetro usado para los ensayos, en el taller de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Pólitecnica Nacional.



Fotografía 5: Muestra los dos transformadores con un voltímetro y un amperímetro en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.



Fotografía 6: Muestra el transformador con bobina flotante y su gabinete, puede observarse los dos grupos de bobinados alojados en la columna central del núcleo ferromagnético y el capacitor conectado al devanado flotante en el primario del transformador.



Fotografía 7: Transformador convencional en el interior de su gabinete metálico, se puede apreciar el aislamiento de las conexiones con spaguetty, y además se observa claramente que difere del transformador con bobina flotante porque no tiene el condensador y lo más resaltante que el volumen del primario es apenas mayor respecto al secundario pues en este caso no existe el devanado flotante.

## CAPITULO III

### PRUEBAS Y MEDICIONES

Ensayar una máquina eléctrica significa someterla a una serie de pruebas, con el propósito de verificar que dicha máquina responda a los requisitos de una buena construcción y un buen funcionamiento. Las pruebas efectuadas a una máquina se clasifican en las pruebas de rutina que se realizan a todas las máquinas fabricadas, y las pruebas prototipo que se efectúan a una de cada serie.

#### A: PRUEBAS DE RUTINA EN TRANSFORMADORES

- a. Medida de la resistencia de aislamiento con un Megger entre alta tensión y tierra, baja tensión y tierra, alta tensión y baja tensión, baja tensión y tierra.
- b. Relación de transformación.
- c. Medida de las pérdidas en vacío y la corriente de excitación al 100% del voltaje nominal.
- d. Medida de las pérdidas en cortocircuito y tensión de cortocircuito.
- e. Ensayos de tensión aplicada.
- f. Ensayos de tensión inducida.
- g. Medida de la resistencia de los devanados.

## B: PRUEBAS PROTOTIPO EN TRANSFORMADORES

- a. Ensayos de calentamiento.
- b. Ensayos de vacío desde el 10% hasta el 120% del voltaje nominal.
- c. Verificación de la polaridad para transformadores monofásicos.
- d. Chequeo de la relación de fase (grupo vectorial) para transformadores trifásicos.
- e. Chequeo de la rigidez dieléctrica del aceite.
- f. Prueba de impulso.

### 3.1 PRUEBAS DE CORTOCIRCUITO

El ensayo de cortocircuito sirve para determinar globalmente las pérdidas en el cobre y las adicionales. Estas últimas son debidas a distorsiones en el flujo magnético, distribución no uniforme de la corriente en los conductores ( especialmente en los de gran sección ), corrientes parásitas en la masa metálica cercana a los devanados y a otras causas de menor importancia.

Con el secundario en cortocircuito basta una tensión primaria del orden del 5% de la nominal en los pequeños transformadores ( hasta 100 kva aproximadamente ), y del 12 % en los grandes transformadores ( por ejemplo, 40.000 kva a 110 kv en el secundario ), para conseguir la corriente de plena carga : en esta prueba se prefiere tomar , el lado de alta tensión como primario por que su intensidad nominal es menor, pero, esta no es una restricción pues el ensayo también puede efectuarse alimentando el otro devanado.

La figura 31 muestra una disposición de instrumentos y dispositivos para obtener los datos del ensayo de cortocircuito de un transformador dado. El procedimiento es el siguiente:

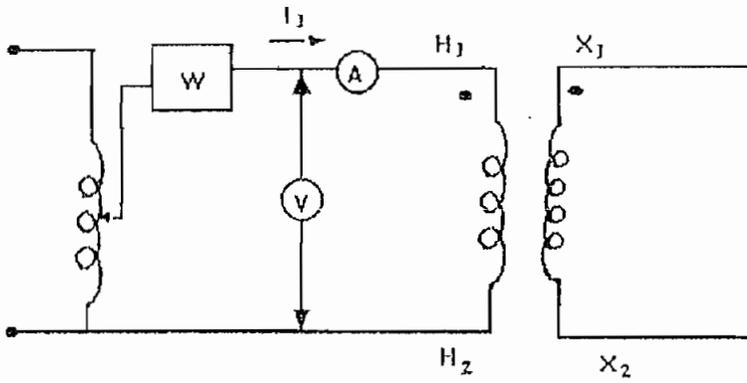


Fig. 31

Conexión típica de instrumentos para el ensayo de cortocircuito.

1. Ajustar a cero la tensión aplicada al primario mediante un potenciómetro o un transformador regulable, y cortocircuitar los terminales de baja tensión, X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub>, del transformador.

2. Aumentar lenta y cuidadosamente la tensión mediante el potenciómetro o un transformador regulable, hasta que el amperímetro señale la intensidad nominal del primario. ( La intensidad nominal del primario se determina a partir de la potencia nominal del transformador en voltamperios dividida por la tensión nominal del lado de alta tensión ).
  
3. Anotar los valores de la potencia de cortocircuito (  $P_{sc}$  ), tensión de cortocircuito (  $V_{sc}$  ), y la intensidad de cortocircuito (  $I_{sc}$  ), que es igual a la intensidad nominal en el primario.
  
4. Calcular la impedancia en cortocircuito (  $Z_{sc}$  ), como relación de las lecturas del volúmetro y del amperímetro: (  $Z_{sc} = V_{sc}/I_{sc}$  ).
  
5. Calcular la resistencia de cortocircuito (  $R_{sc}$  ), como cociente entre la lectura del watímetro y el cuadrado de la lectura del amperímetro: (  $R_{sc} = P_{sc}/I_{sc}^2$  ).
  
6. Calcular la reactancia de cortocircuito (  $X_{sc}$  ), a partir de  $Z_{sc}$  y de  $R_{sc}$  .

### 3.2 PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

Este ensayo es importante por determinar las pérdidas en el hierro del transformador a la tensión nominal o de funcionamiento, lo que puede obtenerse excitando cualquiera de los devanados del transformador a su tensión nominal. Estando el secundario en circuito abierto y aplicando al primario la tensión nominal, circula por éste una corriente de excitación cuyo valor no es más que del 2 al 6 por ciento de la corriente a plena carga. si el transformador está destinado a trabajar con una tensión distinta de la suya nominal , las pruebas deberán hacerse a esta otra tensión. En general para los ensayos de circuito abierto se toma como primario el devanado de baja tensión. Las conexiones típicas pueden verse en la figura 32 , con la tensión nominal aplicada a los terminales de baja tensión,  $X_1$ - $X_2$  , y, los terminales de alta tensión  $H_1$ - $H_2$ , abiertos. Como se aplica la tensión nominal al lado de baja tensión , la tensión nominal aparecerá también en los terminales del lado de alta tensión . Deben tomarse precauciones para ver que estos terminales estén adecuadamente aislados entre sí y del personal. En el desarrollo de esta tesis se ha realizado la prueba de vacío con el lado de baja tensión abierto, con el fin de captar en mejor forma el efecto de la bobina flotante.

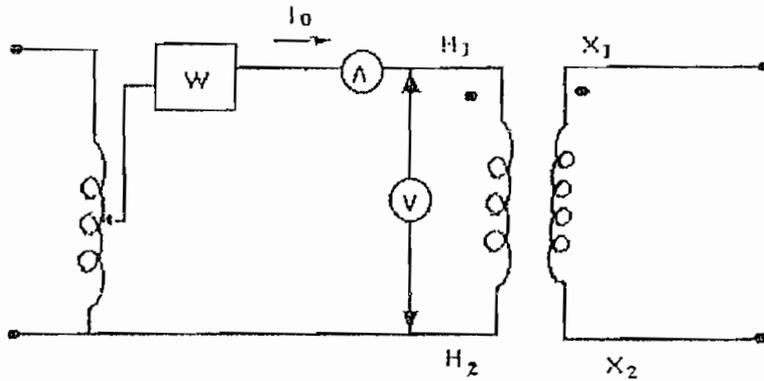


Fig. 32

Conexión de instrumentos en el ensayo de vacío para la determinación de las pérdidas en el hierro.

El procedimiento para la realización del ensayo en vacío es como sigue:

1. Variar el potenciómetro o el transformador regulable desde cero hasta la tensión nominal correspondiente.
2. Anotar la potencia en vacío ( $P_0$ ), a tensión nominal, y la corriente en vacío ( $I_0$ ), que se hayan medido en el watímetro, voltímetro, y amperímetro respectivamente.
3. Calcular la admitancia equivalente en vacío ( $Y_0$ ), como la relación entre la corriente en vacío y la tensión en vacío, ( $Y_0 = I_0/V_0$ ).

4. Calcular conductancia equivalente en vacío ( $g_0$ ), como cociente de la lectura del watímetro y el cuadrado de la lectura del voltímetro, ( $g_0 = P_0 / V^2_0$ ).

5. Calcular la susceptancia equivalente en vacío ( $b_0$ ), a partir de la admitancia y conductancia equivalentes en vacío.

### **3.3 DETERMINACION DE PARAMETROS**

A los transformadores construidos en el capítulo número 2, uno en forma convencional y otro con el devanado flotante, se les ha sometido a las pruebas de cortocircuito y de circuito abierto para determinar sus parámetros de funcionamiento, de las mediciones efectuadas se han obtenido los siguientes datos, los cuales se han procesado para obtener curvas comparativas, con el fin de comparar los resultados y comprobar el cumplimiento de la teoría en la práctica.

**MEDICIONES TOMADAS EN LA PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO**

**TRANS. CONVENCIONAL**

**TRANS. CON BOBINA FLOTANTE**

Vo(vol.)	Io(amp.)	Po(watt.)	Vo(vol.)	Io(amp.)	Po(watt.)
10	0.12	0.14	10	0.046	0.14
20	0.18	0.41	20	0.035	0.40
30	0.23	0.79	30	0.026	0.79
40	0.26	1.24	40	0.053	1.24
50	0.31	1.78	50	0.077	1.77
60	0.36	2.48	60	0.102	2.52
70	0.45	3.48	70	0.093	3.47
80	0.55	4.62	80	0.080	4.61
90	0.65	6.68	90	0.080	7.00
100	0.81	9.16	100	0.106	9.13
110	0.89	11.1	110	0.116	11.07
120	0.92	12.5	120	0.105	12.40

**MEDICIONES TOMADAS EN LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO**

**TRANSFORMADOR CONVENCIONAL**

Potencia de cortocircuito  $P_{sc} = 35 \text{ watt}$

Voltaje de cortocircuito  $V_{sc} = 13.5 \text{ v}$

Corriente de cortocircuito  $I_{sc} = 18.3 \text{ A}$

## TRANSFORMADOR CON BOBINA FLOTANTE

Potencia de cortocircuito  $P_{sc} = 34.8 \text{ watt}$

Voltaje de cortocircuito  $V_{sc} = 12.5 \text{ v}$

Corriente de cortocircuito  $I_{sc} = 18.3 \text{ A}$

Con los valores tomados para las condiciones de cortocircuito se puede calcular el valor de la impedancia del transformador como la relación entre el voltaje de cortocircuito y la corriente de cortocircuito, entonces:

$Z_{sc} = .737 \text{ ohmios}$  para el transformador convencional .

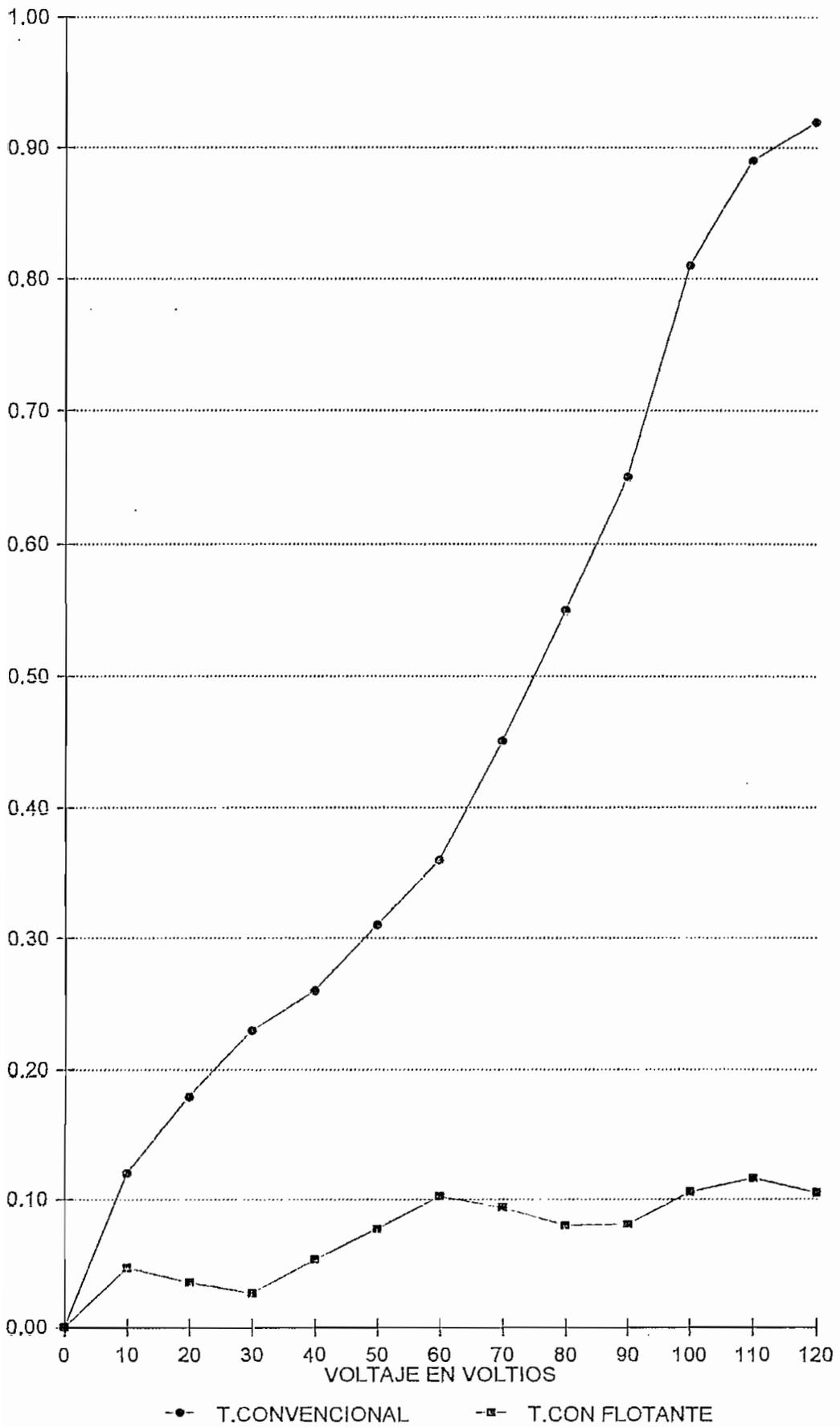
$Z_{sc} = .684 \text{ ohmios}$  para el transformador con bobina flotante.

De las pruebas de circuito abierto se determina la admitancia total que el transformador presenta y que es una medida de la facilidad que tiene el núcleo para magnetizarse, mientras menor sea el valor de  $Y_o$  para el mismo voltaje de operación, menor será la corriente necesaria para magnetizar el núcleo..

$Y_o = .0077 \text{ mho}$  para el transformador convencional.

$Y_o = .000875 \text{ mho}$  para el transformador con bobina flotante.

# COMPARACION DE LAS CORRIENTES DE VACIO PARA LOS TRANSFORMADORES CONSTRUIDOS



### **3.4 PRUEBAS EN CARGA**

A los transformadores construídos , luego de someterlos a las pruebas de circuito abierto y de cortocircuito, se les ha probado con carga para comprobar su adecuado funcionamiento y para compararlos, obteniéndose los siguientes resultados.

### **3.5 CURVAS CARACTERISTICAS Y COMPARACIONES**

El rendimiento es la relación entre la potencia de salida (entregada a la carga) y la potencia de entrada (suministrada por la fuente).

Regulación de voltaje es la variación de voltaje en los terminales de la carga para las condiciones de vacío y plena carga. Normalmente se lo expresa en porcentaje del voltaje a plena carga.

Con los datos obtenidos de las pruebas realizadas a los dos transformadores se han graficado las curvas características de cada transformador .

## DATOS DE PRUEBAS CON CARGA RESISTIVA

### TRANSFORMADOR CONVENCIONAL

CARGA %	Is. (A)	Vs. (V)	Ip (A)	Vp. (V)
25%	9.40	59.36	4.71	120.00
50%	18.10	59.22	9.05	120.00
75%	27.22	59.11	13.61	120.00
100%	36.10	58.40	18.01	120.00

### TRANSFORMADOR CON BOBINA FLOTANTE

CARGA %	Is. (A)	Vs. (V)	Ip (A)	Vp. (V)
25%	9.11	59.84	4.58	120.00
50%	17.30	59.83	8.68	120.00
75%	25.80	59.83	12.94	120.00
100%	34.17	59.82	17.12	120.00

## DATOS DE PRUEBAS CON CARGA INDUCTIVA (Fp=0.8)

### TRANSFORMADOR CONVENCIONAL

CARGA %	Is. (A)	Vs. (V)	Ip (A)	Vp. (V)
25%	9.4	58.89	4.70	120.00
50%	18.1	58.27	8.93	120.00
75%	27.22	57.89	13.34	120.00
100%	36.1	57.74	17.68	120.00

## TRANSFORMADOR CON BOBINA FLOTANTE

CARGA %	Is. (A)	Vs. (V)	Ip (A)	Vp. (V)
25%	9.15	59.61	4.60	120.00
50%	17.37	59.60	8.72	120.00
75%	25.90	59.59	13.01	120.00
100%	34.30	59.58	17.22	120.00

## REGULACION DE VOLTAJE

CARGA	TRANSFORMADOR CONVENCIONAL		TRANSFORMADOR CON FLOTANTE	
	Fp=1	Fp=0.8	Fp=1	Fp=0.8
25%	1.07%	1.85%	0.26%	0.65%
50%	1.30%	2.88%	0.29%	0.66%
75%	1.48%	3.52%	0.29%	0.68%
100%	1.60%	3.77%	0.30%	0.69%

**DATOS DE POTENCIA DE LAS PRUEBAS CON CARGA RESISTIVA**

CARGA %	25%	50%	75%	100%
Ps(conv.)	540	1024	1525	2018
Pp(conv.)	547	1038	1548	2050
Ps(floatante)	539	1031	1526	2019
Pp(floatante)	543	1038	1535	2030

**RENDIMIENTO CON CARGA RESISTIVA**

Fp = 1

CARGA	TRANSFORMDOR CONVENCIONAL	TRANSFORMADOR CON FLOTANTE
25%	98.72	99.26
50%	98.65	99.32
75%	98.51	99.41
100%	98.44	99.46

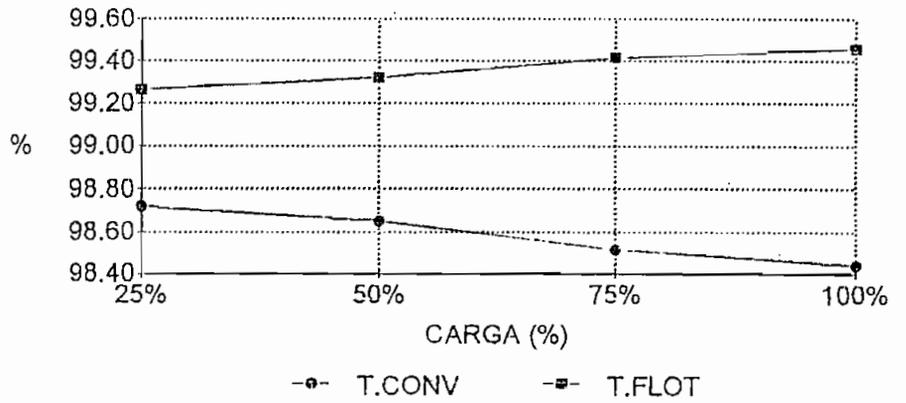
**DATOS DE POTENCIA DE LAS PRUEBAS CON CARGA INDUCTIVA( $F_p = 0.8$ )**

<b>CARGA %</b>	25%	50%	75%	100%
<b>Ps(conv.)</b>	431.00	820.00	1,225.00	1,620.00
<b>Pp(conv.)</b>	439.00	833.00	1,244.50	1,649.00
<b>Ps(flotante)</b>	431.00	819.20	1,220.00	1,615.20
<b>Pp(flotante)</b>	436.00	828.00	1,234.00	1,633.00

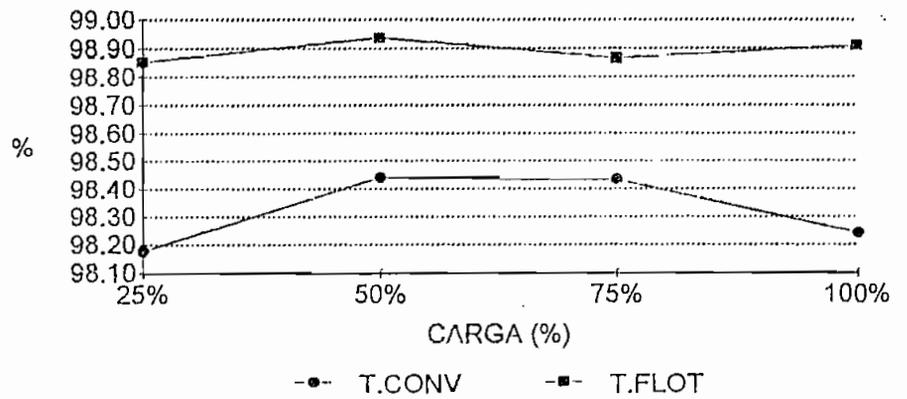
**RENDIMIENTO CON CARGA INDUCTIVA**  
 $F_p = 0.8$

<b>CARGA</b>	<b>TRANSFORMADOR CONVENCIONAL</b>	<b>TRANSFORMADOR CON FLOTANTE</b>
<b>25%</b>	98.18	98.85
<b>50%</b>	98.44	98.94
<b>75%</b>	98.43	98.87
<b>100%</b>	98.24	98.91

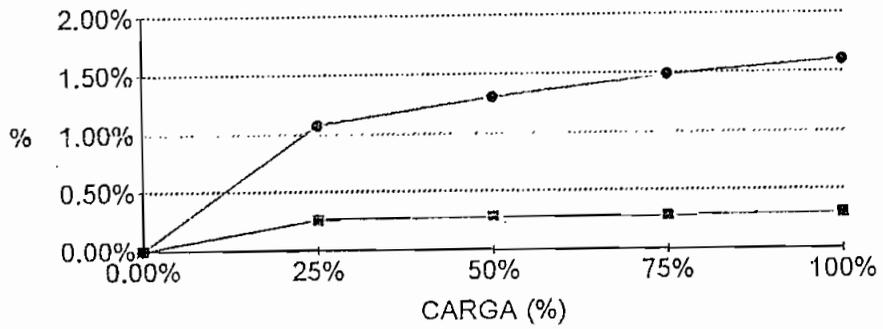
**COMPARACION DE LA EFICIENCIA**  
**FACTOR DE POTENCIA UNIDAD**



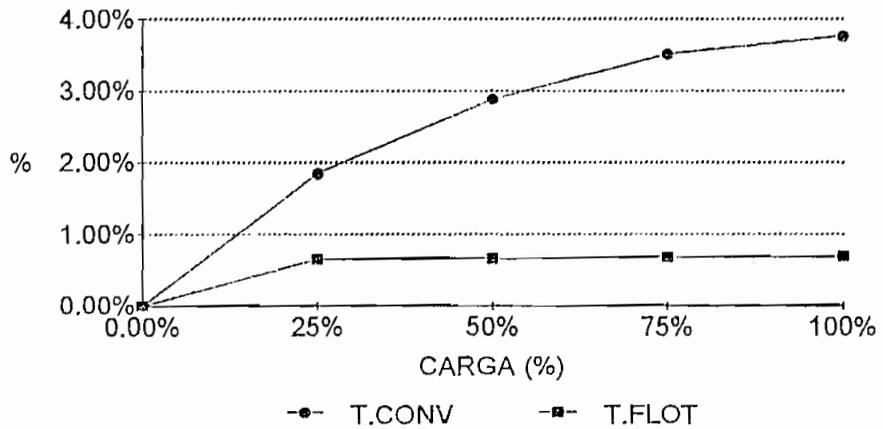
**COMPARACION DE LA EFICIENCIA**  
**FACTOR DE POTENCIA 0.8 INDUCTIVO**



**COMPARACION DE LA REGULACION DE VOLTAJE**  
**FACTOR DE POTENCIA UNIDAD**



**COMPARACION DE LA REGULACION DE VOLTAJE**  
**FACTOR DE POTENCIA 0.8 INDUCTIVO**



## COMENTARIOS

De los resultados obtenidos luego de realizar las pruebas de circuito abierto, se observa que la corriente de vacío del transformador con bobina flotante al voltaje nominal (120 v.) es el 11.44 % de la del convencional, que es muy cercano a lo esperado, que era el 10 %, además mientras que en el transformador convencional la corriente de vacío sube con el aumento del voltaje teniendo su máximo valor (0.92 amp.) cuando se alcanza el voltaje nominal, en el transformador con bobina flotante la corriente oscila entre un valor mínimo de 0.026 amperios a 30 voltios y un máximo de 0.116 amperios a 110 voltios, sin embargo en ningún caso la corriente en vacío del transformador con bobina flotante se acerca a la del convencional. Con respecto a la corriente nominal del transformador, la corriente en vacío tiene un valor del 5.03 % en el transformador convencional mientras que en el de bobina flotante es el 0.57 %, se puede concluir que las condiciones en vacío son mejoradas notoriamente con el uso de la bobina flotante.

Pero también se logra demostrar que la corriente en vacío no solamente mejora en módulo sino también en ángulo ya que al comparar la potencia activa medida en el wattímetro (12.4 w.) con la aparente (12.6 v.a.) dada por el producto de las lecturas del voltímetro y el amperímetro se tiene un ángulo de desfase de 10.22 grados mientras que en el transformador convencional se tiene 83.49 grados, teóricamente se esperaba que el desfase sea igual a cero grados, esto no se logra ya que los valores prácticos de los materiales usados en la construcción del devanado flotante no se ajustan exactamente a los valores teóricos del cálculo, y lógicamente a pequeños errores que se pueden cometer no sólo en el proceso de fabricación sino también en la lectura de los aparatos de medida .

Por otro lado los parámetros de cortocircuito también son satisfactorios pues si se compara el valor de la impedancia de cortocircuito, se tiene que es menor en el transformador con bobina flotante lo cual es una ventaja ya que en definitiva da una visión clara de que las pérdidas en el cobre son menores que las del transformador convencional.

Ahora bien como consecuencia de las discusiones en los párrafos anteriores es obvio pensar que el comportamiento bajo carga también será mejorado, esto se demostró con las pruebas efectuadas y si se comenta las curvas de eficiencia y de regulación de voltaje se puede decir que:

1. A diferencia del transformador convencional en el cual la eficiencia disminuye conforme se aumenta la carga, al utilizar la bobina flotante el rendimiento se incrementa tendiendo a converger en un valor máximo, dado por la eficiencia a plena carga como se observa en las curvas comparativas de eficiencia, esto se debe a que el diseño del devanado flotante se basa en conseguir una corriente de vacío mínima y en fase con el voltaje inducido cuando el transformador trabaje al cien por ciento de la carga, lógicamente este valor máximo tiene lugar en el punto en el cual la corriente de vacío es mínima y estará tan cerca de plena carga como los dispositivos usados en la construcción lo permitan.

2. El mejoramiento en la regulación de voltaje es fácil comprenderlo debido a la presencia del capacitor ya que el comportamiento natural de este elemento es tender a estabilizar el voltaje en sus terminales lo cual se refleja en el secundario, además el hecho de que la impedancia de cortocircuito sea menor y que la corriente de vacío esté en fase con el voltaje inducido ayudan a que la forma de onda de la fuente de energía se vea menos afectada que en un transformador convencional.

## CAPITULO IV

### ANALISIS DE COSTOS

El fabricante de transformadores se enfrenta con varios problemas económicos importantes. Primeramente, debe procurar mantener los costos de fabricación lo más bajo posible compatible con la buena calidad que se espera de su producto. La necesidad de la reducción de los costos de fabricación ha conducido frecuentemente a mejoras físicas. El fabricante debe estar enterado de los cambios generales de las características de las cargas de los transformadores porque las tendencias de éstas guardan una importante relación económica con las características de las pérdidas concernientes para él. Por último, el fabricante debe construir transformadores de manera que su registro de servicio resulte satisfactorio a los usuarios, tendiendo así a ampliar el mercado de su producto.

Un transformador en servicio puede tener gastos de los tipos indicados a continuación:

#### A. Costos fijos (sujetos a la cuantía de la inversión)

1. Directos (derivados del costo de instalación del transformador y de sus dispositivos asociados de mando y operación)

- a. Interés
- b. Impuestos
- c. Seguro
- d. Depreciación
- e. Administración

2. Indirectos (costos fijos en otras partes de la fábrica, ocasionados por el transformador)

a. Aumento de los costos fijos en otras partes de la fábrica, resultantes del tamaño adicional de la fábrica debido a las pérdidas del transformador y la corriente de excitación.

b. Parte de las cargas fijas sobre reguladores de tensión del alimentador o condensadores necesarios para compensar la caída de tensión en la impedancia del transformador.

B. Costos de funcionamiento (variables, dependientes de las condiciones de utilización)

1. Directos (costos de las pérdidas internas del transformador )

a. Costo de la pérdida en el núcleo (prácticamente constante)

b. Costo de la pérdida en la carga (proporcional al cuadrado de la intensidad de la corriente)

c. Costo de la energía consumida por el equipo auxiliar de refrigeración

d. Costo del refrigerante

2. Indirectos ( aumento de costo de las pérdidas en circuitos exteriores originado por el transformador y gastos de mantenimiento)

a. Pérdida adicional en el cobre del circuito y del generador que alimenta al transformador, resultante de la corriente de excitación y pérdidas del transformador.

- b. Parte de las pérdidas en el regulador de tensión de salida del transformador.
- c. Gastos de mantenimiento
  - a. Comprobación periódica del aceite
  - b. Filtrado o cambio del aceite
  - c. Reparaciones
  - d. Comprobación periódica de la carga
  - e. Sustitución del gas inerte y de los productos químicos desoxidantes.

#### **4.1 COSTOS DIRECTOS FIJOS**

Los costos directos fijos tipo 1 anuales suelen considerarse proporcionales al costo inicial de la instalación del transformador.

Los réditos anuales a cargar en concepto de interés, impuestos y seguros varían tanto con las condiciones locales y normas de la compañía, en este punto es el propietario del transformador el que estudia los porcentajes a usar de acuerdo a su condición y tipo de negociación, por ejemplo, en las localidades en que los transformadores son clasificados por asesores como propiedad personal exenta de impuesto la compañía propietaria de un transformador no paga impuestos por él, mientras que si se monta el transformador en un poste, hay que pagar por el poste soporte. Muchas compañías no aseguran los transformadores a menos que estén colocados en edificios y prefieren considerar un fallo ocasional como parte de la base general para réditos de depreciación. No puede evitarse las cargas por interés, ya que, aún cuando se disponga de fondos para comprar e instalar un transformador sin necesidad de préstamos, el dinero gastado en el transformador y en su instalación podría haberse invertido de otra manera que produjera interés.

La valoración de la depreciación varía mucho en compañías diferentes y en diversos tipos de industrias, los riesgos de trabajo son mayores en las industrias de fabricación que en las compañías suministradoras de fluido eléctrico, por eso los fabricantes amortizan la inversión más rápidamente que las compañías suministradoras. Los transformadores tienen por término medio una vida útil bastante larga, puede esperarse, sin exageración de 25 años, existe por tanto, un comercio activo de transformadores usados y las administraciones de las industrias adquieren frecuentemente equipos usados con el fin de reducir las cargas fijas inmediatas.

Los gastos de administración incluyen una parte de los salarios de administración, gastos de cálculo del capital fijo, gastos de registros técnicos, costos legales, salarios y gastos del departamento de impuestos y seguros, y otros costos similares.

## **4.2 COSTOS DIRECTOS DE OPERACION**

Los costos de funcionamiento de un transformador son funciones directas de la manera en que se utilice dicho transformador, por esta razón los costos de funcionamiento cesan el momento en que se quita de servicio el transformador. Si el transformador está refrigerado por un equipo exterior, el costo de funcionamiento de dicho equipo es un costo directo de funcionamiento.

Si un transformador se halla accionado continuamente, su pérdida de energía debida a la pérdida del núcleo, expresada en kilowalthora por año es:

$$\text{Pérdida anual de energía en el núcleo} = (\text{pérdida en el núcleo en kw}) \times 8760$$

[kwh]      4.2.1

Las pérdidas en la carga incluyen la pérdida calorífica en los devanados del transformador y las pérdidas parásitas en la carga que se producen en las partes de hierro, las cuales resultan de las condiciones de carga, a las pérdidas en la carga comúnmente se las conoce como pérdidas en el cobre, que incluyen tanto las pérdidas por efecto Joule en los devanados como las pérdidas parásitas.

Si se determina la demanda al transformador para cada uno de los intervalos de una serie de intervalos de demanda básicos consecutivos, por ejemplo 24 intervalos consecutivos de una hora , durante un día , la demanda eficaz para el período total transcurrido correspondiente es el valor eficaz de las demandas de los intervalos básicos para dicho período, y que se calcula como:

$$\text{Demanda eficaz} = \left[ \sum_{i=1}^{\text{hasta } n} D_i^2 \times \Delta t_i / T \right]^{1/2}$$

4.2.2

Donde:  $\Delta t_i$  intervalos de tiempo básicos , T es el período total , y ,  $D_i$  son los valores de demanda básica para cada intervalo.

La demanda máxima de un sistema o dispositivo eléctrico es la mayor de todas las demandas que se han producido durante un tiempo determinado. El factor de carga de un sistema o dispositivo eléctrico es el cociente entre la carga media y la carga máxima durante un tiempo determinado.

Para determinar una expresión de la pérdida anual de energía resultante de las pérdidas en el cobre del transformador, sean:

$W_a$  : pérdida anual de energía en kilowatt-hora debida a las pérdidas en el cobre del transformador,

$P_{cu}$  : pérdida en cobre conocida en kilowatt,

$t$  : tiempo en horas,

$i$  : intensidad momentánea de la corriente de carga en amperios eficaces,

$I_{fl}$  : intensidad nominal a plena carga en amperios eficaces,

$I_a$  : intensidad eficaz de la corriente de carga en amperios tomada por un tiempo de un año,

$\lambda$  :  $I_a / I_{fl}$ .

Las intensidades  $i$ ,  $I_{fl}$  e  $I_a$  están referidas al mismo lado del transformador, o bien se expresan todas en tanto por uno.

La pérdida momentánea en el cobre  $p$ , puede expresarse en función de la pérdida en el cobre conocida a plena carga y de la intensidad conocida de la corriente a plena carga: así:

$$p = P_{cu} (i / I_{fl})^2 \quad 4.2.3$$

La pérdida total anual en el cobre es:

$$W_a = \int_0^{8760} p \, dt = (P_{cu} / I_{fl}^2) \int_0^{8760} i^2 \, dt, \quad 4.2.4$$

donde 8760 es el número de horas de un año.

Como  $I_a$  es la intensidad eficaz de la corriente de carga en amperios tomada para un tiempo de un año :

$$\int_0^{8760} i^2 dt = 8760 I_a^2 \lambda \quad 4.2.5$$

Sustituyendo la ecuación 4.2.5 en la 4.2.4, se tiene que:

$$W_a = 8760 (I_a / I_n)^2 P_{cu} = 8760 \lambda^2 P_{cu}. \quad 4.2.6$$

$\lambda$  es la razón de la intensidad eficaz anual a la intensidad a plena carga de la corriente ; no obstante suponiendo constante la tensión de salida del transformador,  $\lambda$  es análogamente la razón de la demanda eficaz anual en kva de la carga a la potencia nominal a plena carga en kva del transformador . La demanda eficaz anual en kva necesaria para hallar  $\lambda$  puede determinarse fácilmente, por el método de la ecuación 4.2.2.

La suma de las energías en la pérdida en el núcleo y en la pérdida en el cobre determinan el costo total resultante de las pérdidas del transformador. Análogamente la suma de la demanda máxima debida a la pérdida en el núcleo más la debida a la pérdida en el cobre determinan el costo total de la demanda resultante de las pérdidas en el transformador.

### 4.3 COSTOS DE MANTENIMIENTO

Los transformadores necesitan muy poco mantenimiento, pero a intervalos de tiempos definidos se les debe prestar cierto tipo de atenciones, debe comprobarse anualmente la rigidez dieléctrica del aceite aislante de los grandes transformadores , así como también hay que mantener el suministro de gas inerte y de productos desoxidantes, lo cual lleva consigo un pequeño gasto de mantenimiento. A veces son necesarias pequeñas

reparaciones , tales como la sustitución de un pasatapas roto, de un fusible protector fundido, el ajuste de los contactos de los disyuntores, la sustitución de los pararrayos rotos, la comprobación de la resistencia a tierra y el mantenimiento de buenas condiciones de puesta a tierra.

Una actividad de mantenimiento importante relativa a los transformadores es la vigilancia de la carga del transformador la cual, en las compañías suministradoras, se organiza sobre una base definida con personal especializado asignado a ella. Todo tipo de mantenimiento sea preventivo, sustitución de partes destruidas e incluso ajustes y limpieza entrañan cierto gasto.

#### **4.4 ANALISIS DEL AHORRO DE ENERGIA**

Los grandes usuarios de la electricidad están cada día más interesados en el ahorro de energía, la disminución de las pérdidas, o el mejoramiento del factor de potencia, para que su industria tenga una mejor rentabilidad ya que los costos por el consumo de energía eléctrica disminuyen. Cuando el usuario industrial posee transformadores reductores, la energía que se le vende es la medida en sus lados de alta tensión, por ello el costo de las pérdidas en el transformador es importante para el usuario, ya que estas pérdidas se hallan incluidas en la energía medida que se le vende y que por tanto ocasionan una carga que hay que pagar como gasto de funcionamiento definido.

Pero, como puede el transformador con bobina flotante mejorar estos parámetros ?

El mejoramiento del factor de potencia es tal vez el más fácil de comprender debido a la presencia del condensador en el transformador con bobina flotante. Es decir el ahorro de energía en primer término se da como un ahorro en reactivos ya que la parte reactiva de la corriente en vacío no es tomada del suministro de energía, por esta razón el módulo de la corriente en el devanado primario que es igual (todo referido al primario) a la suma de la corriente secundaria y la corriente de vacío, es menor que la corriente primaria de un transformador tradicional para entregar la misma potencia a la carga, lo que obviamente disminuye las pérdidas en el devanado primario constituyéndose en un ahorro de energía de potencia activa.

Por otro lado si se considera un transformador convencional y otro con bobina flotante de la misma potencia aparente (kva) fabricados en dos núcleos idénticos en cuanto a características y dimensiones, el transformador con bobina flotante está en capacidad de entregar mayor potencia efectiva a la carga puesto que no gasta reactivos del suministro de energía para su magnetización. Lo que analizado desde un punto de vista tecnológico en cuanto a construcción implica que para la misma potencia el transformador con bobina flotante utilice un volumen del núcleo ferromagnético menor disminuyendo así las las pérdidas activas en el núcleo .

#### **4.5 DISCUSION DE LOS COSTOS**

Recordando, la pérdida anual total debida a las pérdidas en el cobre de un transformador convencional están dadas por la ecuación 4.2.6. ( $W_a =$

$8760 (I_a / I_n)^2 P_{cu} = 8760 \lambda^2 P_{cu}$ ) en la que  $\lambda = I_a / I_n$ , donde  $I_n$  es la intensidad nominal a plena carga del transformador y que está definida para una potencia y voltaje dados, por tal razón tiene el mismo valor en un transformador convencional o de bobina flotante, pero la intensidad eficaz  $I_a$  en el transformador con bobina flotante es aproximadamente un 5 % menor que para uno convencional de donde se deduce fácilmente que la pérdida anual total debida a las pérdidas en el cobre de un transformador convencional son iguales a 0.9025 (ahorro del 9.75%) veces las de un transformador convencional.

El volumen del transformador con bobina flotante de acuerdo con los parámetros de diseño y construcción del capítulo dos está alrededor del 97.5 por ciento del volumen del transformador convencional, como el volumen y el peso guardan una relación lineal, el ahorro de energía de pérdidas en el núcleo bordeará el 2.5 %.

Con respecto a la potencia nominal del transformador las pérdidas en el núcleo están en el orden del 0.5 por ciento, y las del cobre bordean el 2 por ciento, entonces el ahorro de energía por concepto de ahorro en pérdidas totales en el transformador está entre el 0.2075 por ciento de la potencia total del transformador.

En resumen el transformador con bobina flotante ahorra en energía al año:

1. El 5 % (en v.a.r.) de la potencia nominal en kva.
2. El 0.0125 % (en wattios ) que es el 2.5% del 0.5%, de la potencia nominal en kva. por efecto de ahorro en el núcleo.
3. El 0.195 % (en wattios ) que es el 9.75% del 2%, de la potencia nominal en kva. por efecto de ahorro en el cobre.

A continuación se analiza los costos para los transformadores construidos en el desarrollo de esta tesis.

De las pruebas realizadas en el capítulo tres se tiene que a plena carga, el rendimiento del transformador con bobina flotante es 1.02% mayor que el del transformador convencional cuando se alimenta una carga resistiva, y 0.67% si la carga es inductiva con factor de potencia 0.8, a continuación se presenta un resumen de las pérdidas en cada caso y el resumen de los costos de fabricación para los dos transformadores construidos.

### PERDIDAS DE POTENCIA ACTIVA

	<b>CARGA RESISTIVA</b>	<b>CARGA INDUCTIVA</b> <b>Fp=0.8</b>
<b>T.CONVENCIONAL</b>	32 w.	29 w.
<b>T. CON BOB.FLOT.</b>	11 w.	17.8 w.
<b>AHORRO EN Wats.</b>	<b>21 w.</b>	<b>11.2 w.</b>

**COSTOS DE FABRICACION DE LOS TRANSFORMADORES ARMADOS**

**TRANSFORMADOR CONVENCIONAL**

ITEM	UNID.	CANT.	DESCRIPCION	COST. UNIT.	COST. TOTAL
1	kg.	11.6	NUCLEO MAGNETICO	27,000.00	313,200.00
2	Unid.	1	GABINETE	155,000.00	155,000.00
3	Lb.	8	ALAMBRE PRIMARIO	11,200.00	89,600.00
4	Lb.	6	ALAMBRE SECUNDARIO	11,000.00	66,000.00
5	Plieg.	0.5	AISLANTE	23,500.00	11,750.00
6	Galon	0.25	BARNIZ	185,000.00	46,250.00
7	Unid.	2	TERMINALES	20,000.00	40,000.00
8	Unid.	1	MICELANEOS	10,000.00	10,000.00

**TOTAL SUCRES:**

**731,800.00**

**TRANSFORMADOR CON BOBINA FLOTANTEVENCIONAL**

ITEM	UNID.	CANT.	DESCRIPCION	COST. UNIT.	COST. TOTAL
1	kg.	9.5	NUCLEO MAGNETICO	27,000.00	256,500.00
2	Unid.	1	GABINETE	155,000.00	155,000.00
3	Lb.	8	ALAMBRE PRIMARIO	11,200.00	89,600.00
4	Lb.	6	ALAMBRE- SECUND.	11,000.00	66,000.00
5	Plieg.	0.5	AISLANTE	23,500.00	11,750.00
6	Galon	0.25	BARNIZ	185,000.00	46,250.00
7	Unid.	2	TERMINALES	20,000.00	40,000.00
8	Unid.	1	MICELANEOS	10,000.00	10,000.00
9	Unid.	1	CAPACITOR	25,000.00	25,000.00
10	Lb.	2.5	ALAMBRE -FLOTANTE	12,800.00	32,000.00

**TOTAL SUCRES:**

**732,100.00**

**DIFERENCIA TOTAL EN SUCRES;**

**300.00**

Como puede observarse en los cuadros de precios el transformador con bobina flotante costó 300 sucres más (10 centavos de dolar considerando un cambio de 3000 sucres por dólar ), que el transformador con bobina flotante, esto se debe a la disminución del tamaño del núcleo que compensa el precio del devanado flotante.

En el cuadro de pérdidas, el ahorro en wátios para una carga inductiva con factor de potencia igual a 0.8 es de 11.2 watt. y de 21 watt. para una carga resistiva. Si se considera el peor de los casos (11.2 watt.), y tomando en cuenta el costo del kilowatio por hora como 7 centavos de dolar se tiene que:

$$7 \times 0.0112 \times T = 10$$

Donde T es el tiempo en horas para recuperar los 10 centavos de dólar adicionales que se invirtieron en la construcción del transformador con bobina flotante.

$$T = 127,55 \text{ horas.}$$

En un año se tendrá un ahorro de  $(0.07 \times 8,760 \times 0.0112 = 6.86 \text{ U.\$.D.})$ , este ahorro se da por la disminución de pérdidas en el cobre y en el núcleo del transformador.

El siguiente cuadro muestra el ahorro esperado tanto en energía como económico para transformadores monofásicos con bobina flotante desde 10 hasta 100 kva.

POTENCIA NOMINAL	AHORRO DE ENERGIA EN UN AÑO	HORRO-ECONOMICO EN UN AÑO
kva	kw.h	USD
10	181.77	12.72
20	363.54	25.45
30	545.31	38.17
40	727.08	50.90
50	908.85	63.62
60	1,090.62	76.34
70	1,272.39	89.07
80	1,454.16	101.79
90	1,635.93	114.52
100	1,817.70	127.24

Evidentemente existe un ahorro de energía que se traduce en ahorro de dinero, la diferencia de la inversión inicial se recupera en poco tiempo, la tecnología es simple de aplicar, y el proceso de fabricación no es complicado, por estas razones se concluye que sí es conveniente el implementar esta tecnología en la fabricación de transformadores.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el transcurso del desarrollo de este trabajo de tesis se ha podido visualizar los aspectos fundamentales del comportamiento del transformador con bobina flotante, sus diferencias con el convencional así como también las consideraciones de construcción y costos relacionados con la conveniencia de utilizar o no un transformador construido con esta tecnología, llegando a las siguientes conclusiones y recomendaciones..

a. La diferencia física fundamental entre los dos transformadores es la existencia del devanado adicional y del capacitor en el transformador con bobina flotante, los cuales son dimensionados para una potencia muy por abajo de la nominal ya que su función principal es la de actuar sobre el núcleo ayudándolo a mantener su magnetización .

b. En el análisis de las condiciones de vacío se concluye teóricamente y luego se demostró con las pruebas efectuadas a los dos transformadores que efectivamente la corriente de vacío en el transformador con bobina flotante es muy pequeña comparada con la del convencional , ambos construidos con el mismo criterio y con materiales de las mismas características. Esto se debe a que el capacitor inyecta una potencia reactiva que suple la necesidad que tiene el núcleo electromagnético para magnetizarse puesto que la corriente del vacío esta formada en su mayor parte por la componente reactiva.

c. Como consecuencia de que en la corriente de vacío del transformador con bobina flotante practicamente se anula la componente reactiva, ésta corriente de vacío difiere de la de un transformador convencional

notoriamente, no solo en módulo sino también en ángulo, teniendo un defasaje de cero grados eléctricos con respecto al voltaje inducido, si el dimensionamiento del condensador es el adecuado y si el valor exacto puede ser encontrado en el mercado, esto da lugar a que el módulo del voltaje inducido en el transformador sea muy cercano al módulo del voltaje de la fuente de alimentación y además la forma de onda de la fuente de energía es más efectivamente introducida en el campo magnético del núcleo.

d. La corriente necesaria en el primario del transformador para suplir la carga en el secundario es igual a la suma de la corriente secundaria más la corriente de vacío del transformador (todas referidas al primario), dado que la corriente de vacío de un transformador con bobina flotante es menor que la de un transformador convencional, el módulo de la corriente eficaz en el lado primario también es menor.

e. El factor de potencia del lado primario también mejora en el transformador con bobina flotante, debido a que en la suma vectorial de la corriente secundaria referida al primario y la corriente en vacío del transformador, el aporte de la bobina flotante da lugar a que la corriente en vacío sea únicamente resistiva, y no como en el caso de un transformador convencional en el que la corriente de vacío esta formada en su mayor parte por la componente reactiva.

f. El voltaje primario no ha cambiado, y es el de la fuente de suministro de energía, pero como la corriente primaria del transformador con bobina flotante mejora tanto en módulo como en ángulo, la potencia aparente (kva) requerida de éste, es menor que la del convencional para satisfacer una carga dada.

g. El hecho de que la potencia aparente requerida por el transformador con bobina flotante sea menor que la requerida por el convencional, da lugar a que el volumen del núcleo electromagnético también disminuya aproximadamente en 2.5% como se demostró en el capítulo tres , o lo que es lo mismo que si se mantiene el tamaño del núcleo se pueda transmitir una mayor cantidad de energía activa a través de éste.

h. De las pruebas realizadas a los dos transformadores construidos se concluye, que la impedancia equivalente del transformador con bobina flotante tiene un valor del 92,8 % de la del convencional, mientras que la admitancia es apenas del 12,5 % lo que da cuenta clara de las ventajas y el ahorro de energía.

i. En los transformadores construidos y probados la regulación del voltaje (expresada en porcentaje del voltaje nominal secundario) mejora notoriamente con el uso de la bobina flotante de 1.03 % a 0.3 % con una carga resistiva y de 3,77 a 0.69 con una carga inductiva cuyo factor de potencia es igual a 0.8, lo que se debe a la presencia del condensador.

j. Al comparar el rendimiento de los transformadores construidos como, se esperaba se tiene una mejor eficiencia en el transformador con bobina flotante, esto se debe a que las pérdidas en el cobre son menores debido a la disminución de la corriente en el primario del transformador, y a que las pérdidas en el núcleo también disminuyen puesto que su volumen es menor que el del transformador convencional para satisfacer la misma potencia nominal.

k. Desde el punto de vista económico el incremento de costo en la fabricación del transformador con bobina flotante no fue significativamente

alto comparado con el del convencional, y se demostró que éste se recupera en un periodo de tiempo pequeño con respecto al tiempo de vida del transformador, lo que sumado a las ventajas en el funcionamiento discutidas anteriormente justifica la utilización de esta tecnología.

l. Los transformadores convencionales fabricados en la actualidad presentan un elevado rendimiento, dado a que los materiales ferromagnéticos hoy en día tienen excelentes características, la utilización de la bobina flotante no mejora estas propiedades pero sí le ayuda a la fuente de energía en el sentido que se encarga de mantener magnetizado al núcleo, lo que resulta en ahorro de energía activa, por el otro lado el mejoramiento del factor de potencia, y la regulación de voltaje son muy favorables. Por esta razón se recomienda el uso de esta tecnología en la fabricación y reconstrucción de transformadores.

m. Recomiendo a los profesionales y técnicos que estén relacionados con el campo de diseño y construcción de máquinas eléctricas, profundizar en el estudio de esta técnica, ya que la bobina flotante suple la corriente de magnetización requerida por el núcleo ferromagnético cualquiera sea su aplicación.

n. Como trabajo posterior a esta tesis para desarrollar la tecnología de la bobina flotante, sugiero se planteen los siguientes temas de tesis:

1. Diseño y construcción de un transformador trifásico con bobina flotante.
2. Diseño y construcción de un motor de inducción con bobina flotante.
3. Diseño y construcción de un transformador de distribución con bobina flotante.

## BIBLIOGRAFIA

01. Acme Transformer, "General Transformer Catalog", ATD-01, 1995.
02. Comisión Federal De Electricidad, Instituto de Investigaciones de la Industria Eléctrica, "Notas sobre transformadores", informe técnico # 1.
03. Daniels. "The Performance of Electrical Machines", New York , McGraw- Hill, Inc., 1968.
04. Filippo Tiberio, "Pruebas Sobre Máquinas Eléctricas", Barcelona , Editorial Vicens-Vives,1965.
05. Fitzgerald, A.E., C. Kingsley, Jr. Kusko, A."Electric Machinery, 3th ed", New york. McGraw-Hill, Inc, 1971.
06. Herbert Nessler y Friedrich Stadelmier. "Construcción y Funcionamiento del transformador",Siemens, Enseñanza Programada ep 23, ed. Marcombo S.A.
07. Irving Kosow, PH.D. "Máquinas eléctricas y transformadores", New Jersey, Pretice- Hall, Inc.
08. Joseph A. Edminister, "Teoria y problemas de circuitos eléctricos", MacGraw-Hill, Inc,1969.

09. Karl T. Compton, "Magnetic circuit and transformer", Cambridge, Massachusetts, John Wiley & Sons, Inc, 1962.
10. Roberjot, Loubignac, "Ensayos de las máquinas eléctricas", Barcelona, Editorial Gustavo Gili, S.A. , 1962.
11. S.Austen Stigant, A. C. Franklin, "The J&P Transformer Book", Great Britain, Fletcher & Son Ltd, 1973.
12. Selmon, "Magnetolectric Devices: Transducers, Transformers and machines", New York, Wiley Interscience, 1966.
13. Westing House Electrical Corporation, "Electric Utility Engineering Reference Book", volume 3, East Pittsburg, Printed in the United States of America, 1959.
14. Westing House Electrical Corporation, "Transmission and Distribution Reference Book", East Pittsburg, Printed in the United States of America. 1964.
15. Zbigniew D. Jastrzebski, "Naturaleza y propiedades de los materiales para ingeniería", Lafayette College, segunda edición.