

41126  
57



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS  
PROFESIONALES ARAGÓN**

**"MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA EN TRANSFORMADORES  
DE POTENCIA"**

**TESIS**

**QUE PARA RECIBIR EL GRADO DE:  
INGENIERO MÉCANICO ELECTRICISTA  
PRESENTA:**

**HERRERA ROMERO JOSÉ VIDAL**

**ASESOR:**

**M. en ING. DAVID FRANCO MARTÍNEZ**

**BOSQUES DE ARAGÓN, EDO. DE MEXICO, JUNIO DEL 2003**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## AGRADECIMIENTOS

Una expresión de gratitud tiene mucha fuerza de humanidad en quien da las gracias y en aquel a quien se dan las gracias.

En efecto, dar es un acto propio de la dignidad de persona, porque sólo aquel que se posee puede darse o dar algo realmente suyo. Por ello, al dar la persona en cierto modo se disminuye, en el sentido de que no puede dar sin perder de alguna manera. Sin embargo, esto que da, sea una palabra, una idea, un afecto o una cosa, es siempre algo mejor que sí mismo. Por eso, cuando la persona recibe las gracias, recibe algo mejor que lo que dio, porque las gracias siempre tienen la dignidad de la persona que agradece.

Así pues, cada "gracias" que decimos enriquece a quien lo escucha, porque le hace recuperar, mejorado, aquello que dio.

Ésta es la razón por la que no hay gratitud más hermosa que la que tenemos a Dios. Porque su gracia nos hace agradecidos, y nuestras gracias nos hacen gratos.

### *A DIOS*

*Por darme la oportunidad de vivir esta etapa de mi vida al alcanzar una meta mas en la corta vida que tenemos*

### *A MI MADRE ( † )*

*Por todos los consejos que me dio, por el gran sacrificio que hizo para ayudarme, por el tiempo que se preocupó por mí, especialmente, por la comprensión y la confianza que me brindó.*

### *A MI FAMILIA*

*Por darme el apoyo en todo momento, con un especial cariño y afecto a mi hermana Claudia, a mi papá Arnulfo y mis hermanos José José y Arnulfo, a mi sobrina Rosa Ivette que siempre sea un ejemplo para ella*

### *A MI ASESOR*

*M. En Ing. David Franco Martínez  
Que siempre creyó en mí y por ser un gran ser humano.*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**A TODOS LOS PROFESORES**

*Que transmitieron y compartieron sus conocimientos, no solamente a mí, si no a todos mis compañeros, ya que soy parte de los frutos de su dura tarea.*

**A LA ENEP ARAGÓN**

*Por haberme alojado en sus aulas y concederme ser parte de ella*

**A LA UNAM**

*Por ser una institución que siempre esta a la vanguardia y es forjadora de muchos profesionistas.*

**A MIS COMPAÑEROS**

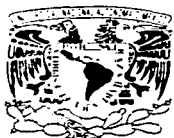
*Que pasaron por el mismo camino, luchando siempre por el mismo objetivo.*

**A TODAS LAS PERSONAS**

*Que de alguna forma recibí su apoyo para lograr este objetivo.*

**¡GRACIAS!  
HERRERA ROMERO JOSÉ VIDAL**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



ESCUELA NACIONAL  
DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGÓN - MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS  
PROFESIONALES ARAGÓN - UNAM

JEFATURA DE CARRERA DE  
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

OFICIO: ENAR/JAME/511/2003.

ASUNTO: Síndico

**LIC. ALBERTO IBARRA ROSAS**  
**SECRETARIO ACADÉMICO**  
**PRESENTE**

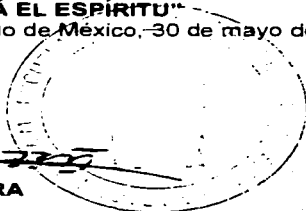
Por este conducto me permito relacionar los nombres de los Profesores que sugiero integren el Síndico del Examen Profesional del alumno: **JOSÉ VIDAL HERRERA ROMERO**, con Número de Cuenta: **09758335-8**, con el tema de tesis: **"MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA"**.

* PRESIDENTE:	ING. RAÚL BARRÓN VERA	OCTUBRE	78
VOCAL:	ING. JOSÉ JUAN RAMÓN MEJÍA ROLDÁN	MARZO	85
SECRETARIO:	ING. JUAN ANTONIO VILLANUEVA ORTEGA	SEPTIEMBRE	94
SUPLENTE:	ING. ABEL VERDE CRUZ	ABRIL	95
SUPLENTE:	M. en C. DAVID FRANCO MARTÍNEZ	JULIO	98 *

Quiero subrayar que el Director de Tesis es el M. en C. David Franco Martínez, quien está incluido basándose en lo que reza el Reglamento de Exámenes Profesionales de esta Escuela.

**Atentamente**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
Bosques de Aragón, Estado de México, 30 de mayo de 2003.  
**EL JEFE DE CARRERA**

  
**ING. RAÚL BARRÓN VERA**



C.c.p.- Lic. Ma. Teresa Luna Sánchez.- Jefa del Depto. de Servicios Escolares.  
C.c.p.- M. en C. David Franco Martínez.- Asesor de Tesis.  
C.c.p.- Alumno.  
RBVamce.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# MEJORAMIENTO DE EFICIENCIA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

## INDICE

Introducción	1
I. Conceptos generales.	3
I.1. Definición	3
I.2. Clasificación y utilización de los transformadores	4
I.3. Estructura	8
I.4. Funcionamiento	8
I.5. Sistema de aislamiento	9
I.6. Tanque y accesorios	10
I.7. Bobina primaria y bobina secundaria	10
I.8. Excitación de la bobina primaria	11
I.9. Fuerza electromotriz inducida en el secundario	14
I.10. Proporcionalidad y concepto de relación de transformación	15
I.11. Ondas en fase y concepto de polaridad	16
I.12. Diagrama vectorial simplificado en vacío	17
I.13. Corrientes de carga	19
I.14. Transformador ideal	20
II. Materiales para la construcción del transformador.	22
II.1. Aceros orientados	22
II.1.1. Grados	23
II.1.2. Sus ventajas	23
II.2. Efecto en diseño	24
II.2.1. Aislamiento	25
II.2.2. Alto factor de laminación	26
II.3. Propiedades magnéticas	26
II.4. Diseño del núcleo	26
II.5. Métodos de prueba	28
II.5.1. Determinación de inducción	28
II.5.2. Circuito magnético	28
II.5.3. Medida de las pérdidas en el núcleo	29
II.6. Determinación de la permeabilidad	29
II.6.1. Datos de magnetización de corriente directa	30
II.6.2. Flujo vs lazos de corriente excitante	30
II.6.3. Datos de permeabilidad de C.A. incremental	30
II.7. Efectos de fabricación	30
II.7.1. Efectos de coyunturas	31
II.7.2. Efectos de distribución de flujo no uniforme	32
II.7.3. Permeabilidad incremental	32
II.8. Temple de tensión relevante	34
II.8.1. Hornos para templar	34
II.8.2. Gravamen o peso de carga	35
II.8.3. Atmósfera de temple	36
II.8.4. Temperatura de temple	37
II.8.5. Procedimiento de calentamiento y enfriamiento	37
III. Pérdidas en el transformador.	38
III.1. Pérdidas magnéticas	38
III.1.1. Pérdidas por corrientes parásitas	39
III.1.2. Pérdidas por histeresis	44

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

III.2. Pérdidas eléctricas	48
III.2.1. Pérdidas por resistencia	48
III.2.2. Pérdidas por reactancia de dispersión	49
III.3. Representación de las pérdidas eléctricas	51
III.4. Circuito equivalente del transformador	52
III.5. Transformador de impedancia	53
III.6. Primera simplificación del circuito equivalente	55
III.7. Segunda simplificación del circuito equivalente	56
III.8. Aspectos prácticos del circuito equivalente	57
III.8.1. Determinación de los parámetros	57
III.8.1.1. Prueba de circuito abierto	58
III.8.1.2. Prueba de circuito cerrado	60
III.9. Estudio de circuito equivalente	62
III.9.1. Pérdidas de voltaje y regulación	62
III.9.2. Pérdidas de energía y eficiencia	64
III.10. Condiciones para la eficiencia máxima	65
III.11. Eficiencia diaria total	67
IV. Transformadores trifásicos	68
IV.1. Construcción del transformador de tres columnas	68
IV.2. Teoría de los transformadores trifásicos en estado de equilibrio	71
IV.3. Núcleos trifásicos	72
IV.4. Corrientes armónicas y flujos en núcleos trifásicos	73
IV.5. División de las corrientes de tercera armónica entre trayectorias aleatorias	74
IV.6. El núcleo trifásico de cinco pierna	75
IV.7. Transformación polifásica	77
IV.7.1. Conexión delta - delta	77
IV.7.2. Conexión estrella - estrella	79
IV.7.3. Conexión delta - estrella	80
IV.7.4. Conexión estrella - delta	82
IV.8. Transformación trifásica mediante dos transformadores	83
IV.8.1. Conexión $v - v$	84
IV.8.2. Conexión T - T	85
IV.9. Conexión Scott a transformadores de dos a tres fases y viceversa	90
IV.9.1. Transformación multifásica	93
IV.10. Armónicas en transformadores	93
IV.10.1. Armónicas e transformadores conectados en red	94
IV.10.2. Armónicas en transformadores conectados en estrella	94
IV.11. Supresión de armónicas en transformadores con devanados terciarios	95
IV.12. Importancia del neutro en transformaciones trifásicas	96
IV.13. El sistema por unidad	100
IV.14. Acopiamiento de transformadores en paralelo	103
IV.14.1. Consideraciones rigurosas para que sea posible la conexión en paralelo	105
IV.14.2. Transformadores no concordantes en paralelo	105
IV.14.3. Transformadores concordantes en paralelo	106
IV.14.4. Puesta en paralelo de transformadores trifásicos	106
IV.15. Disposición constructiva de los transformadores sumergidos en aceite	106
IV.15.1. Cambiador de derivaciones	108
IV.15.2. Radiadores	108
IV.15.3. Boquillas de alta y baja tensión	109
IV.15.4. Termómetro con contactos de alarma	109
IV.15.5. Termómetro de punta caliente con contactos de alarma	110
IV.15.6. Indicador de nivel con contactos de alarma	111
IV.15.7. Relevador Bulchholz	112
IV.15.8. Tanque conservador	118
IV.15.9. Ventiladores	120

TESIS CON  
 FALLA DE CUBIEN

IV.15.10.	Válvula de bloqueo para radiadores	120
IV.15.11.	Válvula de drene de aceite	121
IV.15.12.	Válvula de muestreo	121
IV.15.13.	Placa de datos	122
IV.15.14.	Equipo inerte	122
IV.15.15.	Placa de conexión a tierra	123
IV.15.16.	Válvula de sobrepresión	123
IV.15.17.	Pasamuros	124
IV.15.18.	Transformador de corriente	124
IV.15.19.	Apartarayos	125
IV.15.20.	Caja de conexiones	125
V.	Cálculo de transformadores.	126
V.1.	Condiciones normales de servicio	125
V.2.	Características nominales	129
V.3.	Criterios de dimensionamiento	133
V.4.	Desarrollo del cálculo	134
V.4.1.	Datos de partida	135
V.4.2.	Cálculo de tensiones y corrientes en los devanados	136
V.4.3.	Cálculo del número de vueltas, sección del conductor	137
V.4.3.1.	Determinación del número de vueltas	137
V.4.3.2.	Cálculo de calibres del conductor	140
V.4.4.	Cálculo de la sección transversal del núcleo y sus dimensiones geométricas	141
V.4.5.	Cálculo de las dimensiones generales de la bobina y del ancho de la ventana de las arcadas del núcleo	144
V.4.5.1.	Dimensionado de las bobinas	144
V.4.5.2.	Cálculo de aislamientos menores	152
V.4.5.3.	Determinación del ancho de la ventana del núcleo y peso de la arcada	155
V.4.6.	Diseño dieléctrico del transformador	157
V.4.6.1.	Cálculo de aislamientos menores	158
V.4.6.2.	Selección de aislamientos mayores	160
V.4.7.	Pérdidas en el transformador y eficiencia	160
V.4.7.1.	Pérdidas en el hierro	160
V.4.7.2.	Pérdidas en el conductor	162
V.4.7.3.	Eficiencia del transformador	163
V.4.8.	Impedancia del transformador	164
V.4.8.1.	Resistencia equivalente y % de resistencia	165
V.4.8.2.	Por ciento de la reactancia de dispersión	165
V.4.9.	Regulación de tensión	166
V.4.10.	Hoja de cálculo para diseño	166
V.5.	Aspectos térmicos de los transformadores	167
	Conclusiones.	169
	ANEXO 1 Tablas de conductores eléctricos	172
	ANEXO 2 Gráficas de los aceros eléctricos	176
	ANEXO 3 Tabla 1 y 2 de la Norma Oficial Mexicana <b>NOM-002-SEDE-1999.</b>	181
	Bibliografía.	183



## Introducción.

Los transformadores de potencia son muy utilizados en la industria en general, ya que de ellos depende la reducción de energía de alto voltaje de las líneas de transmisión proporcionadas por compañías de luz y fuerza, impulsando la compleja maquinaria de una fábrica y proporciona luz, ventilación y calefacción.

Por lo general tendemos a pensar que un transformador de potencia es un tanque lleno de aceite o algún otro líquido; que sumergido en aceite hay un pesado montón de laminaciones de hierro alrededor de las cuales se encuentra enredado un alambre aislado. Nada se mueve dentro o fuera. Sin fricción, sin desgaste, sin problemas, permanece en un lugar especificado año tras año.

Esta idea es correcta en muchos aspectos, pero en realidad, el moderno transformador de potencia o de distribución contiene un alto grado de habilidad de ingeniería, ha sido cuidadosamente fabricado y es una parte del equipo que relativamente no tiene problemas.

Sin embargo, no es cierto que nada se mueva dentro de un transformador. Las grandes masas de hierro y de cobre se expanden y se contraen con los cambios de temperatura, y las bobinas se encuentran sometidas a esfuerzos continuos magnéticos y físicos, particularmente durante los periodos en que las cargas están cambiando o cuando aparecen sobrecorrientes originadas al energizar el propio transformador o cuando éste energiza a otro equipo electromagnético, produciendo pérdidas que se presentan en forma de calor y en forma de un zumbido debido a los esfuerzos físicos.

Cabe mencionar que las pérdidas no son iguales en los diferentes materiales, por lo tanto, hay que conocer las propiedades físicas que tienen los materiales, y para el caso de la construcción de transformadores, se tiene que penetrar en las propiedades de los aceros al silicio de grano orientado.

Los transformadores son eslabones vitales en una cadena de producción. Para funcionar continua y confiablemente, debe dárseles un diseño óptimo con alto rendimiento. En especial tomar en cuenta las pérdidas eléctricas y magnéticas que en él se producen al momento de implementar un diseño.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Sin embargo, el este estudio realizado en los capítulos siguientes nos muestra el funcionamiento, los materiales usados en los transformadores, las pérdidas que en ellos se producen incluyendo el cálculo de la eficiencia, sus conexiones y el diseño de transformadores.

Para este estudio, primero es necesario el conocimiento de los principios fundamentales que rigen a los transformadores monofásicos de potencia en forma ideal. Toda esta teoría fundamental se ha simplificado dando un carácter general del transformador monofásico ideal, lo anterior se estudian en el capítulo uno.

En el capítulo dos, se muestran las propiedades de los materiales usados en la construcción de transformadores, más general, de los aceros eléctricos de grano orientado, sus propiedades magnéticas con ventajas y desventajas, su forma de temple o construcción y los efectos la fabricación de los transformadores.

No hay que olvidar que todos los materiales producen pérdidas de energía, por lo tanto, ahí que tener el conocimiento del origen de las pérdidas, para realizar el cálculo de la eficiencia a la que esta sujeto el transformador monofásico. Este estudio se encuentra en el capítulo tercero.

En el capítulo cuarto, se presenta las ventajas y desventajas de los diferentes conexiones para transformadores trifásicos, las ventajas y desventajas de las diferentes conexiones, el efecto de las armónicas, acoplamiento de transformadores y la disposición constructiva de los transformadores trifásicos.

Conocido todo lo anterior, en el quinto capítulo se presenta las condiciones normales de servicio con los diferentes criterios de dimensionamiento en el desarrollo de un diseño de un transformador trifásico, dando una pauta para la realización cómoda y ordenada del cálculo para transformadores trifásicos, sin olvidar que al desarrollar un diseño, se tiene que tener conocimiento del origen de las pérdidas, para poder minimizarlas y obtener el mayor provecho de la energía al desarrollar un modelo con la máxima eficiencia posible.

## I CONCEPTOS GENERALES

La aplicación común de los transformadores es el transporte de energía eléctrica sobre redes, se encuentran normalmente formando subestaciones eléctricas y según el empleo que se les dé reciben el nombre de transformadores de potencia o de distribución, actuando indistintamente como elevadores o reductores de tensión; por medio de subestaciones de transformación, con una económica conversión de la energía eléctrica, así como, el respaldo del servicio más confiable para la industria y el servicio.

Los transformadores son aparatos estáticos destinados a transferir energía eléctrica de un circuito a otro, utilizando ambos como enlace principalmente un flujo común de inducción. Como quiera, la inducción electromagnética sólo se produce con un flujo variable, siendo esencial para todo transformador.

Todo lo anterior depende principalmente de la estructura y partes físicas que componen al transformador. Entre estos componentes se pueden encontrar el núcleo y las bobinas, ya que de ellos se derivan varios conceptos que determinan la funcionalidad del transformador.

### I.1 DEFINICION

Se puede entender que un transformador estático es un mecanismo electromagnético de transporte de potencia eléctrica en forma de corriente alterna a otro flujo alterno, sin cambiar su frecuencia. Esta potencia la recibe a ciertos valores de sus componentes:

$$P = V_H I_H \cos\theta \text{ --- (1.1)}$$

Los cuales cambia para entregarlos como:

$$P = V_X I_X \cos\theta \text{ --- (1.2)}$$

En una transformación ideal, se supone que tanto la potencia  $P$  como el factor de potencia  $\cos\theta$  no se alteran, de modo que los valores de entrada y salida son los mismos. Sin embargo, un transformador real, tiene pérdidas, de modo que los valores de salida difieren ligeramente de los de entrada.

Lo anterior nos lleva a que el coste por kilovatio en los transformadores es muy bajo en comparación con otros aparatos, y se presentan pérdidas pequeñas, permitiéndonos pensar que la eficiencia es alta, como los arrollamientos pueden ir inmersos en aceite, no es difícil aislarlos para tensiones muy elevadas

Debido a estas excelentes características, el transformador es un aparato muy empleado, y como efectúa muy económicamente la transformación de baja tensión en alta y viceversa, viene a ser la causa principal del extendido uso de la corriente alterna. Proporcionando un alto grado de flexibilidad en todo sistema de potencia.

Se acostumbra usar la letra H para referirse al lado de mayor voltaje, al que se le llama lado de alto voltaje o de alta tensión, y la letra X para el lado de menor voltaje, llamado lado de bajo voltaje o de baja tensión. Así:

$V_H$  es voltajes en el lado de alta tensión.  
 $I_H$  es corriente en el lado de alta tensión.  
 $V_X$  es voltajes en el lado de baja tensión.  
 $I_X$  es corriente en el lado de baja tensión.

La figura 1.1 representa un diagrama de bloques de un transformador ideal. El flujo de energía puede ser de izquierda a derecha, o sea, que la alta tensión se ubica en el lado izquierdo, y la baja tensión en el lado derecho en cuyo caso el transformador trabaja como reductor de voltaje, o de derecha a izquierda, como elevador de voltaje.

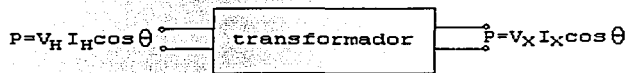


Figura 1.1. Diagrama de bloque del transformador

## 1.2 Clasificación y utilización de los transformadores

Los transformadores pueden ser clasificados de distintas maneras, según se tome como base la operación, la construcción o la utilización, así tenemos que:

A) *Por la operación.* Se refiere a la energía o potencia que manejan dentro del sistema eléctrico:  
**Transformadores de distribución.** Los que tienen capacidad desde 5 hasta 500 kVA (monofásicos o trifásicos)

*Transformadores de potencia.* Los que tienen capacidades mayores de 500 kVA.

B) *Por el número de fases.* De acuerdo con las características del sistema al que se conectará:

*Monofásico.* Transformadores de potencia o distribución que son conectados a una línea o fase y un neutro o tierra. Tienen un solo devanado de alta tensión y uno de baja tensión. Se denota con  $1\phi$ .

*Trifásico.* Transformadores de potencia o distribución que son conectados a tres líneas o fases y pueden estar o no conectados a un neutro común o tierra. Tiene 3 devanados de alta tensión y 3 de baja tensión. Se denota con  $3\phi$ .

C) *Por su utilización.* De acuerdo con la posición que ocupan dentro del sistema:

*Transformador para generador.* Son transformadores de potencia que van conectados a la salida del generador. Proporcionan la energía a la línea de transmisión.

*Transformadores de subestación.* Los transformadores de potencia que se conectan al final de la línea de transmisión para reducir la tensión al nivel de subtransmisión.

*Transformadores de distribución.* Reducen la tensión de subtransmisión a tensiones aplicables en zonas de consumo.

*Transformadores especiales.* Son transformadores de potencia diseñados para aplicaciones no incluidas en las anteriores y que pueden ser: reguladoras de tensión, transformadores para rectificador, transformadores para horno de arco eléctrico, transformadores defasadores, autotransformadores para mina; transformadores para prueba, transformadores para fuentes de corriente directa y muchos otros.

D) *Por la construcción o la forma del núcleo.* De acuerdo con la posición que existe entre la colocación de las bobinas y el núcleo, se conocen o se generalizan en dos tipos:

*Núcleo acorazado.* También llamado tipo "shell", es aquel en el cual el núcleo se encuentra cubriendo los devanados de baja y alta tensión.

*Núcleo no acorazado.* También conocido como tipo columna o "core" y es aquel en el cual las bobinas abarcan una parte considerable del circuito magnético.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

E) En función de las condiciones de servicio.  
Para uso interior.  
Para uso en la intemperie.

F) En función de los lugares de instalación.  
Tipo poste.  
Tipo subestación.  
Tipo pedestal.  
Tipo bóveda o sumergible.

G) De acuerdo con el tipo de enfriamiento. Existen los sumergidos en aceite y los tipos secos.

Entre los sumergidos en aceite tenemos:

Tipo OA.  
Tipo OA/FA  
Tipo OA/FA/FOA  
Tipo FOA  
Tipo OW  
Tipo FOW

Entre los tipos secos tenemos.

Tipo AA  
Tipo AFA  
Tipo AA/FA

Descripción literal de los tipos de enfriamiento.

Tipo OA. Es un transformador sumergido en aceite con enfriamiento natural. Esta es el enfriamiento más común y frecuente resultando más económico y adaptable a la generalidad de las aplicaciones. En estas unidades el aceite aislante circula por convección natural dentro de un tanque con paredes lisas o corrugadas, o bien provistos de enfriadores tubulares o de radiadores separables.

Tipo OA/FA. Sumergido en aceite con enfriamiento basado en aire forzado. Esta unidad es básicamente del tipo OA a la cual se le han agregado ventiladores para aumentar la disipación de calor en las superficies de enfriamiento, y por lo tanto, aumentar los kVA de salida del transformador. El empleo de este sistema de enfriamiento esta indicado cuando la unidad debe soportar sobrecarga durante periodos cortos, pero cuya ocurrencia se espera con cierta frecuencia dentro de las condiciones normales de trabajo y, que deben de ser tolerados sin afectar el funcionamiento normal del transformador.

Tipo OA/FA/FOA. Transformador sumergido en aceite con enfriamiento propio, con enfriamiento basado en aire forzado y a partir de aceite forzado. El régimen del transformador tipo OA sumergido en aceite puede ser aumentado por el empleo combinado de bombas y ventiladores. En la construcción se usan los radiadores desprendibles normales, con la adición de ventiladores montados sobre dichos radiadores y bombas conectadas a los cabezales de los mismos. El aumento de la capacidad se hace en dos pasos.

En el primero se usan la mitad de los ventiladores y la mitad de las bombas para lograr el aumento de 1.333 veces la capacidad sobre el diseño OA; en el segundo se usa la totalidad de los ventiladores y bombas, con lo que se consigue un aumento de 1.667 veces el régimen OA. El arranque y parada de los ventiladores y bombas son controlados por la temperatura del aceite, por medio de controles automáticos que seleccionen la secuencia de operación al aumentar la carga del transformador.

Tipo FOA. Sumergido en aceite con enfriamiento con aceite forzado y enfriadores de aire forzado. El aceite de estas unidades es enfriado al hacerlo pasar por cambiadores de calor o radiadores de aire y aceite, colocados fuera del tanque. Su diseño esta destinado a usarse únicamente con ventiladores y bombas de aceite, trabajando continuamente, en cuyas condiciones pueden sostener la totalidad de su carga nominal.

Tipo OW. Sumergido en aceite, con enfriamiento con agua. Este tipo de transformador esta equipado con un cambiador de calor tubular colocado fuera del tanque. El agua de enfriamiento circula en el interior de los tubos y se drena por gravedad o por medio de una bomba independientemente. El aceite fluye estando en contacto con la superficie de los tubos.

Tipo FOW. Sumergido en aceite, con enfriamiento de aceite forzado con enfriadores de agua forzada. Este es prácticamente igual que el tipo FOA, solo que el cambiador de calor es del modelo agua-aceite y por lo tanto, el enfriamiento del aceite se hace por medio de agua sin tener ventiladores.

Tipo AA. Transformadores tipo seco con enfriamiento propio. Se caracteriza por no tener aceite u otro líquido para

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

efectuar las funciones de aislamiento y enfriamiento. El aire es el único medio aislante que rodea el núcleo y las bobinas.

Tipo AFA. Transformador tipo seco con enfriamiento de aire forzado, el diseño comprende un ventilador que empuja el aire en un ducto colocado en la parte inferior de la unidad; por medio de aberturas en el ducto se lleva el aire a cada núcleo. Este tipo solo tiene un régimen. Con ventilador.

Tipo AA/FA. Transformador tipo seco con enfriamiento propio, con enfriamientos con aire forzado, su denominación indica que tiene dos regímenes, uno por enfriamiento natural y otro contando con la circulación forzada por medio de ventiladores, éste control es automático y opera mediante un relevador térmico.

### **I.3 Estructura.**

Las partes que componen un transformador son clasificados en 4 grandes grupos, los cuales comprenden:

- Circuito magnético (núcleo).
- Circuito eléctrico (devanados).
- Sistema de aislamiento.
- Tanque y accesorios.

### **I.4 Funcionamiento**

El principal funcionamiento en que se basa el transformador es que la energía se pueda transportar eficazmente por inducción magnética desde un juego de bobinas a otro (circuito eléctrico), por medio de un flujo magnético variable, si ambos juegos de bobinas están en el mismo circuito magnético.

El circuito magnético es la parte componente del transformador que servirá para conducir el flujo magnético generado, el cual conectará magnéticamente los circuitos eléctricos del transformador. El circuito magnético consta de un núcleo ferromagnético en el cual se encuentran devanadas dos bobinas, generalmente de diferente número de vueltas. Las bobinas y el circuito magnético son estacionarios cada uno respecto al otro.

El núcleo está formado de chapas rectangulares de acero laminado, mas generalmente de acero de silicio de grano

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



orientado, unidas entre sí por grapas o pasadores. Todas las laminas están aisladas en ambas caras por medio de un aislante inorganico. Un arrollamiento continuo está bobinado sobre uno de los lados o brazos del núcleo de hierro, y otro arrollamiento continuo, que puede tener o no el mismo número de espiras, esta bobinado en el brazo o en el lado opuesto en un transformador de núcleo sencillo como se ve en la figura 1.2 a.

En la figura 1.2 b se muestran una disposición usual para los núcleos en el caso acorazado. Ambas bobinas están dibujadas en un caso muy elemental, pues en realidad tienen cientos de miles de vueltas, y en la disposición acorazada, la bobina de baja tensión suele devanarse sobre las de alta tensión, de manera que son concéntricas.

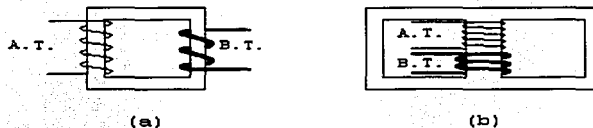


Figura 1.2 Estructura del transformador  
(a) de núcleo sencillo (b) de núcleo acorazado

### I.5 El sistema de aislamiento.

Los transformadores poseen una serie de materiales aislantes, los cuales juntos forman el sistema de aislamiento. Este sistema incluye materiales como:

- Cartón prensado (pressboard)
- Papel kraft normal o tratado (insuldur)
- Papel manila y corrugado.
- Cartón prensado de alta densidad.
- Collares de cartón prensado y aislamientos finales.
- Partes de cartón prensados laminados.
- Esmaltes y barnices
- Recubrimientos orgánicos e inorgánicos.
- Porcelanas (boquillas)
- Recubrimiento de polvo epóxico.
- Madera y maple o machiche para armados.
- Fibra vulcanizada.
- Algodón (hilos y cintas)

- Plásticos y cementos, telas y cintas adhesivas, cintas de fibra de vidrio, etc.
- Fluido líquido dieléctrico (excepto equipos aislados en aire o gas) que puede ser aceite mineral, aceite de silicona o r-temp.

El sistema de aislamiento aísla los devanados del transformador entre ellos y a tierra, así como las partes cercanas al núcleo y a las partes de acero que forman la estructura.

#### **I.6 Tanque y accesorios.**

Los transformadores deben de ser construidos con un tanque hermético, con el objeto de preservar el aceite, ya que tienen la función de dieléctrico y también de refrigerante, del conjunto de bobinas y núcleo. El transformador debe de permanecer perfectamente sellado desde una temperatura de -5°C a un máximo de 105°C en la parte superior del líquido aislante.

Entre los accesorios más importantes del transformador están:

- Boquillas de porcelana de A.T. y B.T.
- Cambiador de derivaciones (o taps)
- Terminales de cobre para A.T. y B.T.
- Válvula de muestreo de aceite.

#### **I.7 Bobina primaria y bobina secundaria.**

Se llama bobina primaria, a aquella por la cual se recibe o alimenta el transformador, y bobina secundaria a aquella por la que se libera o entrega la energía transformada. Siendo conceptos de trabajo, de modo que un transformador que no se encuentra acoplado y funcionando en un sistema, no existe primario ni secundario, sino solamente alta y baja tensión

Un transformador reductor opera con alta tensión como primario y con la baja como secundario, mientras tanto, un transformador elevador trabaja con baja tensión en el primario y alta como secundario.

### I.8 Excitación de la bobina primaria.

Para comprobar la excitación de bobina primaria, se puede tomar cualquier bobina como primaria. Se ha apartado la bobina de alta tensión mostrándola en la figura 1.3, y abreviando la figura, solamente se ha bosquejado una parte del núcleo sin incluir la bobina secundaria.

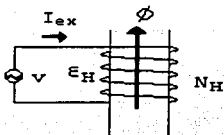


Figura 1.3 excitación de la bobina primaria

Esta bobina primaria, con un número de vueltas  $N_H$  se acopla a una generador de corriente alterna, proporcionando un voltaje alterno de acuerdo con la siguiente expresión.

$$v = V_{máx} \text{ sen } 2\pi ft \text{ ----(1.3)}$$

Donde:

$v$ : es el voltaje alterno proporcionado por el generador.

$V_{máx}$ : es el voltaje máximo alcanzado en medio ciclo de onda.

$f$ : la frecuencia de la onda.

$t$ : es el tiempo

El voltaje alterno hace circular en el circuito, una corriente alterna  $I_{ex}$ , la cual induce en el eje magnético de la bobina, un flujo también alterno ( $\phi$ ).

Independientemente de la naturaleza del flujo, éste induce en la bobina una fuerza electromotriz  $\epsilon_H$  de acuerdo con la ley de Faraday la cual establece que si un flujo pasa por una vuelta de una bobina de alambre, se inducirá un voltaje en la vuelta de alambre, proporcional a la tasa de cambio en el flujo con relación al tiempo, dando por resultado la ecuación siguiente:

$$\epsilon_H = -N_H \frac{d\phi}{dt} \text{ ----(1.4)}$$

El conjunto descrito hasta aquí, constituye una malla, como se puede observar en la figura 1.3 de modo que aplicando La 1ª Ley de Kirchoff para voltajes, la cual establece que la suma algebraica de los voltajes alrededor de cualquier malla cerrada es igual a cero, por lo tanto, se tiene:

$$v + \varepsilon_H = 0 \text{-----(1.5)}$$

Y reemplazando en 1.5 las ecuaciones 1.3 y 1.4 tenemos:

$$V_{ma's} \text{ sen} 2\pi ft - N_H \frac{d\phi}{dt} = 0 \text{-----(1.6)}$$

Resolviendo la ecuación diferencial se obtiene:

$$\phi = \frac{V_{ma's}}{2\pi f N_H} [-\cos 2\pi ft] + c \text{-----(1.7)}$$

La constante de integración únicamente tiene permanencia en los primeros ciclos posteriormente de cerrar el circuito, por lo que después en estado estable  $C=0$ . Por otra parte, en función del valor eficaz

$$v_{ma's} = \sqrt{2}v \text{-----(1.8)}$$

Y uniendo las constantes

$$\frac{2\pi}{\sqrt{2}} = 4.44 \text{-----(1.9)}$$

La expresión de flujo con valor eficaz se disminuye a:

$$\phi = \frac{v}{4.44 N_H f} [-\cos 2\pi ft] \text{-----(1.10)}$$

Y la magnitud de la cosenoide es:

$$|\phi_m| = \frac{v}{4.44 N_H f} \text{-----(1.11)}$$

Esto destaca que el flujo en el núcleo es directamente proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a la frecuencia. Para devanar la bobina de igual forma hay que tener en cuenta que mientras más vueltas contenga, es necesario menos flujo y viceversa. La gráfica de la figura 1.4 puede proporcionar una noción de la proporción de material necesario de acuerdo con el número de vueltas.

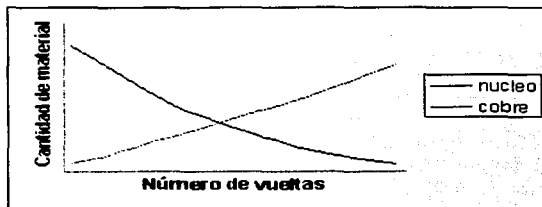


Figura 1.4 Comparación de la cantidad de cobre y hierro que necesita

En este momento que ya se conoce la expresión de flujo, se puede calcular la fuerza electromotriz inducida en la bobina, por medio de la ley de Faraday. Para tal motivo sustituimos la ecuación 1.7 en la ecuación 1.4:

$$\epsilon_H = -N_H \frac{d}{dt} \frac{V_{m \times}}{2\pi f N_H} [-\cos 2\pi ft] \text{-----(1.12)}$$

Del cual:

$$\epsilon_H = -V_{m \times} \text{sen } 2\pi ft \text{-----(1.13)}$$

Conforme:

$$\epsilon_H = -v \text{-----(1.14)}$$

Despejando a v de 1.11 se tiene:

$$v = 4.44 N_H f \phi_m = -\epsilon_H \text{-----(1.11a)}$$

El flujo máximo es  $\phi_m = B_m A$ , si  $B_m$  es la densidad de flujo máxima y A la sección transversal del núcleo, entonces la ecuación se puede escribir:

$$-\epsilon_H = 4.44 N_H f B_m A \text{-----(1.11b)}$$

Siendo la ecuación general del transformador, referida al lado de alta tensión.

En la figura 1.5 se representan las gráficas respectivas al voltaje aplicado, el flujo en el núcleo y la fuerza electromotriz inducida.

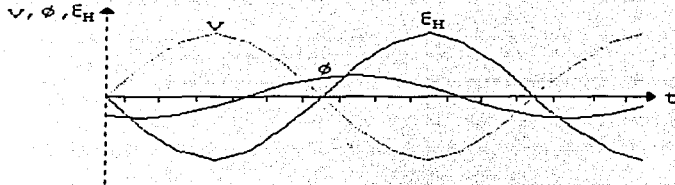


Figura 1.5 variación del voltaje, el flujo y la fuerza electromotriz en el tiempo

Se aprecia que el flujo se retrasa noventa grados con respecto al voltaje aplicado, la fuerza electromotriz se retrasa noventa grados con respecto al flujo y ciento ochenta grados respecto al voltaje aplicado.

### I.9 Fuerza electromotriz inducida en el secundario.

Para una explicación sencilla sobre la inducción en el secundario y algunas relaciones que guarda respecto al primario, es más fácil recurrir al arreglo acorazado, como se muestra en la figura 1.6. Aparece únicamente la columna central del núcleo, por sencillez del dibujo, y se puede observar que las dos bobinas están devanadas en el mismo sentido; solamente difieren en el número de vueltas y en el calibre de alambre que se utiliza. También se observa que el flujo atraviesa las dos bobinas en el mismo sentido.

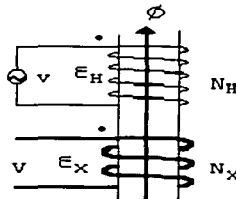


Figura 1.6 Inducción de la fuerza electromotriz en la bobina secundaria

La inducción de la fuerza electromotriz en el secundario se lleva a cabo en circunstancias muy parecidas a la inducción del primario. Se produce el mismo flujo magnético y solamente difiere en el número de vueltas, de manera que aplicando la ley de Faraday se tiene:

$$\varepsilon_x = -N_x \frac{d}{dt} \frac{V_{ma'x}}{2\pi f N_H} [-\cos 2\pi ft] \text{-----(1.15)}$$

Que da por resultado

$$\varepsilon_x = -\frac{N_x}{N_H} V_{ma'x} \text{ sen } 2\pi ft \text{-----(1.16)}$$

$$\varepsilon_x = -\frac{N_x}{N_H} v \text{-----(1.16a)}$$

Resultando una onda cuya magnitud es proporcional a la fuerza electromotriz primaria y, además, se encuentra en fase con ella.

De igual forma que en el lado de A.T. se obtiene la ecuación general del transformador para el lado de B.T.

$$-E_X = 4.44 N_X f B_m A \text{-----(1.11c)}$$

Ambas fuerzas electromotrices se pueden observar en la figura 1.7. Es conveniente insistir en que, independientemente de la elección que se ha hecho en este razonamiento (a la tensión como primario), en la práctica, cualquiera de ellas puede ser la f.e.m. primaria y la otra la secundaria.

#### **I.10 Proporcionalidad y concepto de relación de transformación.**

Tomando la ecuación (1.13) de la fuerza electromotriz inducida en el primario:

$$\varepsilon_H = -V_{ma't} \text{ sen } 2\pi ft \text{-----(1.13)}$$

Y sustituyendo en la ecuación 16, se tiene:

$$\varepsilon_x = \frac{N_x}{N_H} \varepsilon_H \text{-----(1.17)}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

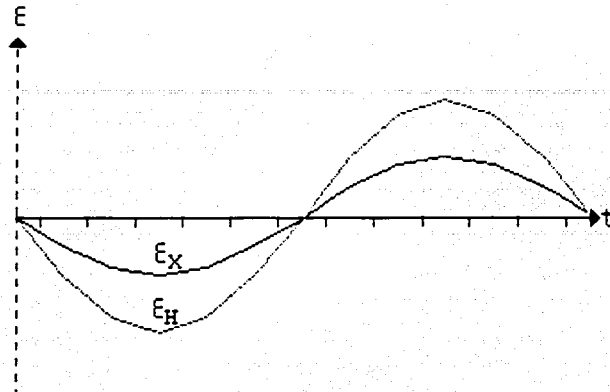


Figura 1.7 Comparación de las dos fuerzas electromotrices inducidas

O sea:

$$\frac{N_H}{N_X} = \frac{\varepsilon_H}{\varepsilon_X} = a \text{-----} (1.18)$$

Esta expresión muestra dos cocientes, en la cual, las magnitudes de las fuerzas electromotrices conservan una relación constante, igual a la relación entre los números de vueltas. A esta expresión se le llama relación de transformación y se representa por la letra a.

Teniendo en cuenta que los numeradores de esta expresión son mayores que los denominadores, por lo tanto, la relación de transformación siempre es mayor que la unidad, o cuando menos, igual a la unidad en algunos casos particulares.

### I.11 Ondas en fase y el concepto de polaridad.

Observando en la figura 1.7 que las dos fuerzas electromotrices están en fase, se puede decir que en un instante cualquiera, las dos son nulas, o positivas, o negativas, es decir, que en un instante cualquiera ambas fuerzas tienen la misma polaridad. Desde el punto de vista práctico, significa que siempre corresponderán en polaridad,



una terminal del devanado de alta tensión y una del devanado de baja tensión.

Con la distribución geométrica de la figura 1.6 resulta fácil darse cuenta de que las terminales de igual polaridad son las que tienen la misma posición relativa, por ejemplo las dos de arriba o las dos de abajo. En los diagramas suelen identificarse dos de ellas y se marcan con un punto, como las dos terminales superiores de la figura 1.6.

El conocimiento de las mismas terminales de igual polaridad es indispensable para conectar correctamente varios transformadores entre sí. Puede ser el caso en serie o paralelo en un sistema monofásico, y en delta o estrella para sistemas trifásicos.

### I.12 Diagrama vectorial simplificado, en vacío.

Para obtener la regulación de voltaje en un transformador se requiere entender las caídas de voltaje que se producen en su interior. La regulación de voltaje de un transformador depende tanto de la magnitud de estas caídas de voltaje como del ángulo de fase de la corriente que circula por el transformador. Lo anterior se representa en el diagrama vectorial de la figura 1.8, donde los vectores tienen la significación siguiente:

$\phi$  = flujo común en vacío; es el único flujo que se supone existe en el transformador en vacío, ya que, como dijimos el transformador es ideal.

$\epsilon_x$  = f.e.m. inducida en el secundario por el anterior flujo; retrasada  $\pi/2$  respecto al  $\phi$ .

$V$  = tensión que aparece entre los bornes del secundario; es igual a la f.e.m. anterior.

$$V = \epsilon_x \text{ ---- (1.19)}$$

$\epsilon_H$  = f.e.m. inducida por el mismo flujo en el devanado primario, en fase con  $\epsilon_x$ ; entre estas dos f.e.m. y el número de espiras en el primario  $N_H$  y el número de espiras en el secundario  $N_x$ , existe la relación (1.18)

$$\frac{N_H}{N_x} = \frac{\epsilon_H}{\epsilon_x} = a \text{ ---- (1.18)}$$

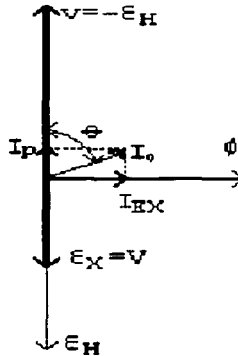


FIGURA 1.8 Diagrama vectorial en vacío

$v$  = tensión de línea, aplicada al primario, igual y opuesta a la f.e.m. desarrollada en éste. Despejando de la ecuación (1.5)

$$v = \varepsilon_H \text{ -----(1.5a)}$$

$I_{EX}$  = componente magnetizante de la corriente primaria, necesaria para producir el flujo  $\phi$ , en fase con él.

$I_P$  = componente activa de la corriente primaria, necesaria para suministrar las pérdidas en el hierro, abstracción hecha de las pérdidas insignificantes, por efecto Joule, en el cobre, debidas a la corriente de vacío. En fase con la tensión  $-\varepsilon_H$  y la tensión primaria  $v$ . (esta corriente se estudiara mas adelante, pero se hace mención para efecto de elaborar el diagrama vectorial).

$I_0$  = corriente total en vacío resultante de las dos anteriores.

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_{EX} + \bar{I}_P \text{ -----(1.20)}$$

$\theta$  = desfase en vacío. Como la corriente magnetizante suele ser bastante superior a la corriente activa, el desfase  $\theta$  es muy elevado, es decir, el factor de potencia de un

transformador en vacío es siempre muy pequeño, del orden de 0.10 a 0.20.

### I.13 Corrientes de carga.

Con fin de aprovechar la fuerza electromotriz inducida en el secundario, se agrega una impedancia de carga a la figura 1.6 (como se muestra en la figura 1.9).

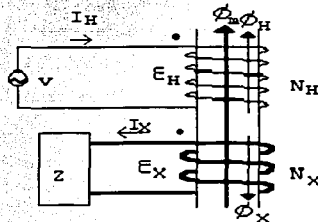


Figura 1.9 Aprovechamiento de la fuerza electromotriz inducida mediante la adición de una impedancia.

Ahora imaginemos un instante en que las ondas de fuerza electromotriz son positivas, o sea, que los puntos de polaridad son positivos. Por lo tanto, la bobina secundaria se constituye ahora en una fuente de energía y, en este instante impulsa una corriente  $I_X$  por el punto de polaridad, hacia la carga. Aplicando la ley de la mano derecha (consiste en tomar el núcleo con la mano derecha, con los dedos en el mismo sentido de la corriente, donde el pulgar indica la dirección del flujo magnético que produce) nos damos cuenta que esta corriente debe producir un flujo  $\Phi_X$  cuyo sentido es opuesto al flujo originado por la excitación de la bobina primaria. A este último flujo, por su propiedad de eslabonar las dos bobinas, se le llamaría de ahora en adelante flujo mutuo ( $\Phi_m$ ).

El flujo mutuo, como ya se ha visto, depende del voltaje aplicado y de la frecuencia, de manera que no debe disminuir por el hecho de aparecer ahora una corriente de carga  $I_X$ .

Para evitar que el flujo de carga  $\Phi_X$ , haga disminuir el flujo mutuo, debe generarse un equilibrante del primero, como se aprecia en la figura identificado como  $\Phi_H$ .

$\Phi_H$  y  $\Phi_x$  deben de ser de la misma magnitud y de sentidos opuestos.

Aplicando ahora a la inversa la ley de la mano derecha, deducimos que el flujo  $\Phi_H$  debe ser producido por una corriente  $I_H$ . Esta corriente es independiente de la corriente de excitación  $I_{ex}$  que se ilustra en la figura 1.3 y que intencionalmente no se ha incluido en la figura 1.8, pues en un caso ideal  $I_{ex}$  resulta despreciable junto a  $I_H$ .

Considerando que las magnitudes de los flujos  $\Phi_x$  y  $\Phi_H$  son iguales (sin interesarnos en este razonamiento sus sentidos), las correspondientes fuerzas magnetomotrices también deben de ser iguales, por lo tanto:

$$N_x I_x = N_H I_H \text{ -----(1.21)}$$

De donde:

$$\frac{N_H}{N_x} = \frac{I_x}{I_H} = a \text{ -----(1.22)}$$

O sea, que la relación de corrientes es inversamente proporcional a la relación de vueltas, y la relación de vueltas es la relación de transformación, por lo tanto:

$$\frac{N_H}{N_x} = \frac{\epsilon_H}{\epsilon_x} = \frac{I_x}{I_H} = a \text{ -----(1.23)}$$

La bobina de mayor número de vueltas opera con el mayor voltaje y la menor corriente, mientras que la de menor número de vueltas opera con el menor voltaje y la mayor corriente. Esta es la razón por la que la bobina de baja tensión se ha dibujado con trazos más gruesos en las figuras 1.6 y 1.8, pues a mayor corriente se requiere conductor de calibre más grueso.

#### **I.14 Transformador ideal.**

Un transformador que obedece fielmente a los planteamientos hechos hasta ahora, es un transformador ideal. Su característica fundamental es que carece de pérdidas.

El núcleo es de un supuesto material no saturable y con una permeabilidad magnética considerablemente mayor que la de los materiales ferromagnéticos ya conocidos. Esto ocasiona que todo el flujo producido por las bobinas (aun con carga) esta contenido en este núcleo y, además, la corriente de excitación se vuelve tan pequeña que resulta despreciable (inclusive, no se detecta). Nótese que en el subtema antepasado no se ha tenido en cuenta esta corriente.

Las bobinas se devanan también con un supuesto material que no requiere aislamiento y consecuentemente las espiras quedan tan cerca entre sí que no hay el menor espacio intermedio. Esto ocasiona que el voltaje aplicado sea exactamente igual a la fuerza electromotriz como se considero en el subtema de bobina primaria y bobina secundaria, y que no se genere flujo disperso entre espiras.

Para facilitar el dibujo de este transformador en los diagramas eléctricos, se recurre a una simbología simplificada como la que aparece en la figura 1.10. Con fin de aprovechar la fuerza electromotriz inducida en el secundario

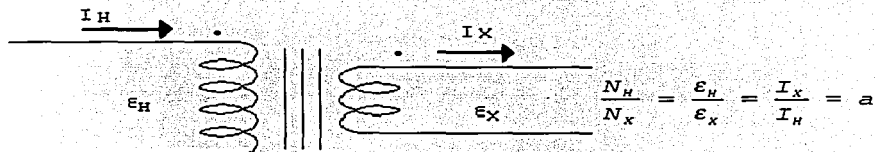


FIGURA 1.10 Transformador ideal

Dos bobinas, una a cada lado y de diferente número de vueltas representan una parte del alta y una de la baja tensión, con sus respectivas corrientes y polaridades. No se suele hacer énfasis en los diferentes calibres. Las líneas entre bobinas representan al núcleo ideal (en algunos casos, como transformadores electrónicos de alta frecuencia que no tienen núcleo ferromagnético, se dice que tienen núcleo de aire y no se dibujan las líneas).

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

## II MATERIALES USADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL TRANSFORMADOR

Este capítulo trata acerca de los aceros conocidos por los aceros orientados, que se usan actualmente en la fabricación de transformadores, este tipo representa lo más adelantado aceros de este tipo en las dos últimas décadas.

Esto ha hecho posible el diseño de transformadores de peso ligero con una alta inducción en su operación, aun teniendo la misma garantía, el transformador tiene menos pérdidas en el núcleo y menos excitación de corriente.

El desarrollo comercial de estos es solo una de las muchas contribuciones que la corporación de aceros ha hecho para la industria eléctrica durante mas de 50 años de investigación en mejorar la calidad y obra de los aceros eléctricos.

### II.1 ACEROS ORIENTADOS

Los aceros eléctricos orientados son aleaciones de acero al silicio diseñado últimamente para la baja pérdida del núcleo y una alta permeabilidad en la dirección del arrollamiento.

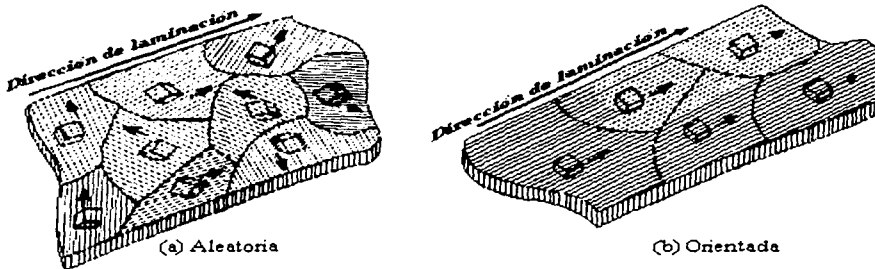


Figura 2.1 Acero al silicio con estructura orientada.

Tienen propiedades direccionales por la colocación orientada de casi toda la celosía de cristal o del modelo de los átomos elementales. Los átomos de los aceros al silicio han sido alineados en tal forma que sus ejes, los cuales son de fácil

magnetización, están casi paralelos a la dirección de arrollamiento (Figura 2.1).

La reagrupación anterior es acompañada por la propia combinación de análisis químicos altamente controlados, un procedimiento especial para templar y un arrollamiento sin energías.

### **II.1.1 GRADOS.**

Los grados son espesores para corazones o núcleos de bobina especialmente, pero podrían ser usados en núcleos si su radio es de un largo de 6.35 cm (2 ¼ pulg.). Ambos grados de espesor son fabricados solamente en 0.3658 mm (0.0144 pulg.) y son aislados con carlite, o sea, un tratamiento basándose en productos químicos y terminales que aseguran una resistencia máxima de interlaminación, con una pérdida mínima de energía y un efecto mínimo en el factor de laminación.

### **II.1.2 SUS VENTAJAS.**

#### ◆ *MENOS PERDIDA EN LA DIRECCIÓN DE ARROLLAMIENTO.*

Los aceros eléctricos orientados dan al diseñador de transformadores cuatro grados en reducción de enfriamiento teniendo menos pérdidas de núcleos que cualquier otro acero convencional del grado reducido en frío ó arrollamiento en caliente.

#### ◆ *ALTA PERMEABILIDAD EN LA DIRECCIÓN DE ARROLLAMIENTO.*

Los grados de acero orientado tienen otra única ventaja sobre los únicos aceros eléctricos convencionales:

Baja pérdida en el núcleo, combinada con una alta permeabilidad y alta inducción. Antes de la inducción de los aceros orientados de silicio, la baja pérdida del núcleo fue obtenida solamente a expensas de la permeabilidad baja y muy alta inducción en el transformador.

Como la calidad en pérdida en el núcleo mejoro, la excitación de corriente fue el factor limite en el diseño. Los grados de espesor en el acero orientado llegaron a remover esta barrera.

◆ **FACTOR SUPERIOR DE LAMINACIÓN.**

La laminación o factor de agrupamiento del acero orientado es marcadamente bueno. Esto permite más acarreo de corriente en el mismo volumen en el núcleo, agrupándosele las ventajas ganadas con la alta permeabilidad.

◆ **MONTAJE AISLADO.**

Los aceros eléctricos orientados están producidos con aislamiento obtenido durante su proceso de temple. Este aislamiento es generalmente adecuado en núcleos para transformadores de distribución.

◆ **RESULTADOS ASEGURADOS.**

Los aceros eléctricos orientados son producidos con propiedades magnéticas desarrolladas completamente en el molino por un tratamiento especial de alta temperatura. Los fabricantes de transformadores deberán de diseñar, para conocer las características eléctricas establecidas de grado en el molino de pruebas, unos pedazos de bobinas del temple del molino. Ellos son relevados de la responsabilidad y el peligro de la alta temperatura requerida en su tratamiento de calor para producir sus propiedades magnéticas necesarias para el diseño del transformador.

◆ **SOLO EL TEMPLE REQUIERE FUERZA RELEVADA.**

Una baja temperatura (800 °C) de fuerza relevada para el temple es todo lo necesario para establecer las pérdidas de propiedades magnéticas en la fabricación por el golpeteo, corte y enrollado.

## **II.2 EFECTO EN DISEÑO.**

En una manera conveniente de diseño de transformadores, la baja pérdida del núcleo, la alta permeabilidad, factor superior de espacio y máxima resistencia interlaminada, permite a un núcleo pequeño de peso ligero, ser operado a alta inducción. Esto resulta en un diseño más económico, sin ningún deterioro en el funcionamiento eléctrico. Los beneficios de los aceros orientados en el uso de los últimos o nuevos transformadores son presentados enseguida.

- Peso ligero.



- Menos cobre.
- Menos alambre.
- Tanque pequeño.
- Economía de espacio en áreas restringidas.
- Instalación fácil.
- Más largo alcance en medidas de transformadores para polos en montaje de plataforma cara.
- Regulación eléctrica mejorada.

### **II.2.1 AISLAMIENTO.**

Los aceros orientados tienen una superficie o cara natural producida en la operación final de temple.

Esto es una adherencia de silicato de magnesio en tipo de película, teniendo las propiedades aislantes necesarias para que el transformador sea operado a pocos volts por vuelta. La cara superior que se asemeja al vidrio puede soportar la temperatura de 800 °C.

#### *Aislamiento Carlite.*

Los aceros orientados son usados para transformadores de fuerza y transformadores que utilizan pocos volts por vuelta, teniendo un aislamiento llamado carlite, desarrollado por la ARMCO (Fabrica de aceros). El aislamiento carlite no tiene ninguna aplicación o capa de barniz igual que los otros transformadores de placa, pero su cara tiene un tratamiento producido por un producto químico de grandes ventajas térmicas que aseguran una máxima resistencia interlaminada, una mínima pérdida de energía y un máximo efecto en el factor laminación. Las ventajas especificadas de este nuevo aislamiento, ofrecen mejores ventajas en la fabricación.

Como estas placas de núcleo son a prueba de aceite, el carlite es conveniente para transformadores de aire y transformadores de aceite.

Los aceros aislados con carlite pueden ser guardados en un almacén seco, por mucho tiempo sin que le salga moho. Su resistencia a este es superior que los cubiertos de oxido o acabados oxidizados.

## II.2.2 ALTO FACTOR DE LAMINACION.

La medida completa de la placa de núcleo de un acero eléctrico es conocida como su factor de laminación (también conocido como factor de espacio). Este es su radio de volumen, calculado de su peso y la densidad del acero, del volumen total del empaque compensado, determinado de sus dimensiones medidas a una cierta presión.

## II.3 PROPIEDADES MAGNETICAS.

*Máxima pérdida en la placa del núcleo.* Para calificar la pérdida en la placa del núcleo en aceros eléctricos, las pruebas son hechas a una inducción de 14.9963 gauss (96.750 rayas por pulgada cuadrada). Los límites de las pruebas son 15 kilogausses. Con las siguientes condiciones aplicadas:

1) Tiras Epstein:

- a. Recortadas paralelas a la dirección de arrollamiento de núcleos de bobinas que han sido templadas para desarrollar propiedades magnéticas completas.
- b. Templado una vez más después de recortado para el relevo de pieza.
- c. Espesor Grados W 0.30 mm (0.0012 milésimas de pulgada).  
Grados X 0.35 mm (0.014 milésimas de pulgada).
- a. Densidad 7.65 g/cm<sup>3</sup>.

2) Las articulaciones en el circuito de pruebas son de pliegue doble y no de un objeto doblado sobre sí mismo (Figura 2.2)

## II.4 DISEÑO DEL NÚCLEO.

Cuando el paso de la corriente es paralelo a la dirección en que el acero fue enrollado, los aceros eléctricos orientados ofrecen propiedades magnéticas sobresalientes. Esto se debe primeramente a su alta perfección de orientación al hilo.

Aun así esta misma orientación que perfecciona las características magnéticas en la dirección de arrollamiento empeora o disminuye las propiedades magnéticas cuando el paso de la corriente no es paralelo a la dirección de arrollamiento.



Figura 2.2 Aparato para pruebas magnéticas para laminaciones de transformadores, por medio de las cuales se obtienen las pérdidas del núcleo a diferentes frecuencias.

En los núcleos apilados, la presencia de coyunturas y los pasos de corriente en direcciones desfavorables, hacen su diseño más simple o complicado. El buen éxito de aceros orientados requiere un diseño cuidadoso del núcleo para empequeñecer o eliminar, si es posible, todos los pasos magnéticos que haya en diferentes direcciones.

Los núcleos apilados de superior calidad pueden usualmente ser producidos de los aceros orientados haciéndose algunas modificaciones en su diseño. Esto es particularmente cierto de los transformadores largos. Las proporciones del diseño deberán de asegurar que los amperes-vuelta para las esquinas del núcleo no sobresalgan de las patas.

Para calcular la excitación requerida y las pérdidas de un núcleo de forma particular, rómpase el paso magnético a vueltas paralelas, vueltas cruzadas y secciones de esquina y calcúlese cada sección por separado. Enseguida se combinan los valores de todas las secciones para obtener el total de pérdidas para el núcleo.

En los núcleos apilados cualquier paso de corriente que no este en la dirección de arrollamiento será limitada a secciones relativamente cortas tales como las esquinas de núcleos convencionales con ventanas largas.

En los ensambles E e I, (Figura 2.3) las patas de las laminaciones E e I deben de ser el blanco en la dirección de arrollamiento, cuando los núcleos E e I son operados a inducciones sumamente altas es recomendable que se amplíe la parte trasera del núcleo E para reducir la densidad de

corriente porque es aquí donde el paso de corriente es transversal a la dirección de arrollamiento.

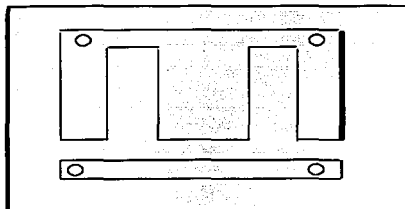


Figura 2.3 Ensamblados E e I para el núcleo de un transformador.

Cuando los núcleos pequeños de material orientado E e I, son sobrepuestos es deseable interponer las laminaciones una por una para mejores resultados a inducciones bajas y moderadas.

## II.5 METODOS DE PRUEBA

### II.5.1 DETERMINACIONES DE INDUCCIÓN.

En las curvas de propiedades magnéticas, la inducción es calculada del área de corte transversal o sólida, equivalente o neto del núcleo.

Los diseñadores pueden obtener un resultado cercano al área neta multiplicando el área neta de un núcleo compacto por su factor de laminación expresada por un decimal. Inducciones de corriente alterna (C.A.), fueron calculadas de medidas de voltaje hechas de un arrollamiento secundario de descarga según el promedio tipo rectificado del voltímetro C.A. Todo el voltaje producido por el flujo en el aire fuera del acero es excluido de esta medida.

### II.5.2 CIRCUITO MAGNÉTICO.

Los datos magnéticos fueron obtenidos en un circuito magnético de área uniforme del corte transversal que tiene coyunturas despreciables. Excitación que es afectada por un arrollamiento primario y distribuida uniformemente a lo largo del circuito. Todas las medidas de voltaje fueron hechas en un arrollamiento secundariamente descargando que por otra

parte es distribuido uniformemente a lo largo del circuito. En todas las pruebas de propiedades magnéticas para corriente alterna, la forma de la onda de flujo era senoidal.

### **II.5.3 MEDIDA DE LAS PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO.**

Los valores de pérdidas en el núcleo a inducciones moderadas y altas fueron obtenidas por el método Wattmeter, que elimina el factor de pérdidas del cobre y la caída de voltaje en las pruebas de arrollamiento. A inducciones bajas, la pérdida en el núcleo fue determinada de medidas tomadas del puente de componentes resistivos, efectivos de corriente excitantes. Este método también excluye pérdidas de cobre en el arrollamiento.

### **II.6 DETERMINACIÓN DE PERMEABILIDAD.**

Los valores de permeabilidad de C.A. pueden ser alcanzados en muchas formas. Esta depende ampliamente en el buen uso de estos datos. Los datos de permeabilidad fueron obtenidos por medio de la inducción precisa, medidas en pruebas del puente de corriente alterna (C.A.). Estos valores de permeabilidad que son calculados de la inducción paralela efectiva de la bobina de prueba, son también convertidos directamente a componentes reactivos efectivos de corriente o a volts-amperes reactivos (Vars). Los valores para la permeabilidad de C.A. pueden ser determinados por impedimento si se convierten los valores RMS amperes-vuelta excitantes por CM o valores de H (I.E., multiplicado 0.411 X 1.414).

Puede ser notado que los valores de permeabilidad de corriente alterna, calculados de inductancias diferencian de esas calculadas de impedancia particularmente a inducción cerca de permeabilidad máxima. Esto se debe a que la corriente excitante es afectada considerablemente por la pérdida de corrientes a inducciones moderadas y porque la forma de onda del total de corriente excitante y de su componente reactivo no es en realidad senoidal como se presumía.

No se debe de presumir que ninguno de estos tipos de permeabilidad de corriente alterna es directamente comparable con la permeabilidad de corriente directa.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### **II.6.1 DATOS DE MAGNETIZACIÓN DE CORRIENTE DIRECTA.**

Los datos de los lazos de las curvas (e histéresis) de magnetización para las pruebas de condiciones en corriente directa fueron obtenidos por medio de balística en el mismo tipo de circuito magnético uniforme como los usados para pruebas eléctricas de corriente alterna. Estos datos son propiamente aplicados al diseño de corriente directa solamente.

### **II.6.2 FLUJO VS LAZOS DE CORRIENTE EXCITANTE.**

Los lazos de corriente alterna muestran las relaciones instantáneas entre la densidad de flujo y la corriente excitante para la magnetización cíclica normal con forma de onda senoidal de flujo. Estos datos fueron obtenidos por medidas simultáneas tanto de la densidad de flujo de corriente alterna como de la corriente excitante, usándose un rectificador mecánico de ciclonización precisa, en conjunción con un inductor mutual excitante calibrado. Estos lazos no deben ser confundidos con los lazos de histéresis de corriente directa, porque en este caso tanto la corriente de Eddy (reflujo de agua contra la corriente) y los componentes de histéresis de la corriente están presentes. El área incluida por estos lazos de corriente alterna es proporcional a la pérdida total del núcleo por ciclo para las conducciones de prueba.

### **II.6.3 DATOS DE PERMEABILIDAD DE CORRIENTE ALTERNA INCREMENTAL.**

Las determinaciones de permeabilidad de corriente alterna incremental son hechas de los valores de la inductancia efectiva de corriente alterna, medidas en la presencia de una fuerza magnética polarizante, de corriente directa. Las medidas de permeabilidad incrementales como estas otras para propiedades de corriente alterna con flujo de componentes de corriente alterna senoidal, fueron hechos en un circuito magnético cerrado con coyunturas de reactancia despreciable.

### **II.7 EFECTOS DE FABRICACIÓN**

Los efectos determinantes de la tensión inducida entre laminación, por recortado, formado, riveteado o cualquier

operación de fabricación es casi siempre un caso de suma importancia cuando se trata con materiales orientados, estos efectos pueden ser eliminados por un temple de tensión relevada agradable después de la fabricación para su forma final.

Gran cuidado debe ejercerse para ensamblar las laminaciones (que son libres de tensión) para evitar alguna tensión apreciable debido a alguna encorvadura en el ensamble. Cuando el temple de tensión de relevo es impráctico, o cuando algunas tensiones en el ensamble son inevitables, estos defectos deberán ser compensados en el diseño.

### II.7.1 EFECTOS DE COYUNTURAS.

Las coyunturas en la estructura magnética pueden aumentar bastante los requerimientos de excitación total, especialmente cuando se opera a inducciones donde la permeabilidad pudiera ser normalmente mucho más alta. En algunos casos, donde el flujo es forzado a pasar perpendicularmente a las laminaciones, la pérdida del núcleo puede ser aumentada a la velocidad de las coyunturas. Solamente teniendo gran cuidado para minimizar su número y el goteo del flujo asociado, con ello, donde la corriente excitante más baja es de importancia prima, y donde el paso largo en el hierro es relativamente corto, el diseñador puede ganar mucho si da mayor consideración a las coyunturas en su diseño (Figura 2.4).

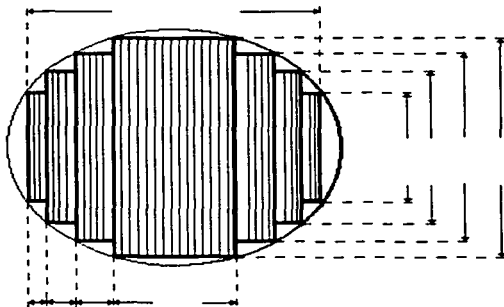


FIGURA 2.4 Hay que tomar en cuenta las coyunturas del laminado, al diseñar

### II.7.2 EFECTOS DE DISTRIBUCION DE FLUJO NO UNIFORME

Un factor usualmente pasado por alto, pero no siempre desatendible en el diseño del núcleo, es el radio del tramo máximo y mínimo del paso magnético. Si este radio es mucho más grande que la unidad, los elementos del ramo del paso magnético más cortos pueden ser operados a fuerzas magnetizantes excesivamente más altas que las fuerzas para los elementos más largos del paso magnético. Estos pueden causar un gran aumento en la densidad de flujo adentro de la periferia del núcleo comparada a la computación para el tramo del paso inferior. La no-uniformidad de la densidad en el flujo del núcleo en turno, causa la forma de onda del flujo en los extremos del paso magnético que sean torcidos, aun cuando el total sea senoidal.

Es más, los efectos de la forma de onda no senoidal, estarían presentes, a un grado que depende del radio del tramo de paso de unidad. El diseñador puede usar las curvas de excitación para encontrar el valor máximo y mínimo de la densidad de flujo, después de la computación máxima y mínima, lo mismo que todos los valores teóricos de la fuerza magnetizante (FIGURA 2.5).

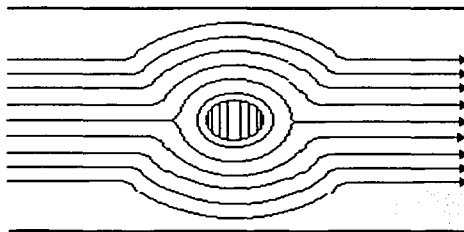


Figura 2.5 Deformación del flujo

### II.7.3 PERMEABILIDAD INCREMENTAL

Las curvas de permeabilidad incremental serán muy útiles en la estimación del diseño, donde ambos componentes C.D. y C.A. de flujo estén presentes. Los valores de permeabilidad son calculados de las inductancias C.A. medidos por la condición, donde la coordinación del componente de flujo C.D. (antes de



la aplicación del componente de C.A.) recae en lo normal de la curva de magnetización de corriente directa. La fuerza magnetizante de corriente directa en las curvas pueden ser comparadas a densidad de flujo de corriente directa por las curvas magnetizantes normales de corriente directa correspondientes.

Cuando el componente del flujo de corriente directa en una aplicación incremental varía, debe permitirse para los efectos de histéresis en el flujo componente de corriente directa. En este último caso, los valores de permeabilidad incremental no serán los mismos para disminuir los valores de fuerza polarizante de corriente directa que para los mismos valores de aumentar la fuerza polarizante, pero dependerán de las variaciones previas en el flujo de corriente directa.

Los reactores que traen ambos flujos de corriente alterna y corriente directa, usualmente requieren portillos de aire sustanciales para prevenir la saturación del núcleo por el componente de flujo de corriente directa. La aplicación de los datos de permeabilidad incremental a dichos diseños, y el diseño de trabajo para determinar el portillo de aire más apropiado puede ser simplificado por el uso del diseño de curvas. El diseño de reactantes y transformadores que llevan corriente directa.

Las curvas fueron preparadas basándose en la apropiación que el tramo de paso en hierro es enteramente paralelo a la dirección de arrollamiento, y que la densidad de flujo en el portillo de aire es la misma que en el "hierro".

Porque las condiciones en practica desvían variándose las sumas de esas para quienes los datos han sido preparados. Los valores del diseño de curvas deben de ser aplicados muy rigurosamente en el diseño; una concesión sustancial es frecuentemente necesaria para obtener el diseño efectivo.

El valor principal de las curvas es reducir el número de pruebas necesarias para ejecutar el mejor diseño. En las curvas, el valor del radio del tramo del portillo de aire para sumar el tramo del paso magnético que se aplica para varios valores de amperes-vueltas polarizante bajo condiciones ideales son mostradas como regiones donde el radio del portillo de aire es más efectivo. En la practica úsense radios de portillo de aire poco más altos (nunca más bajos). Si un diseño con temple requiere flujo en otras direcciones que sean estriados paralelos, como en núcleos

laminados E e I, los datos de curvas necesarias podrán ser obtenidos por una petición especial si las condiciones deseadas son especificadas. (Ver las Curvas de fabricantes).

## **II.8 TEMPLE DE TENSION RELEVANTE.**

Para utilizar de lleno las cualidades superiores magnéticas de los aceros eléctricos orientados, es necesario darles a las laminaciones recortadas o punzonadas, o el núcleo encordado, un temple de tensión relevante a temperaturas moderadas. Esta operación restaura propiedades magnéticas a los valores presentes antes que las lesiones de fabricación sean introducidas.

### **II.8.1 HORNOS PARA TEMPLAR.**

Ambos hornos, el continuo y el cajón o el horno tipo cochura son usados para el templado de tensión relevante. Los hornos antiguos han sido usados sucesivamente para el templado en gran escala de núcleos encordados. Partes uniformales son expuestas a la radiación y a la atmósfera de templar y producen gran uniformidad de temperaturas en todas las partes templadas. Esto reduce el tiempo necesario para templar. Aun así, en periodos limitados, la operación de hornos continuos son algunas veces una desventaja por su costo. El tipo cochura o cajón son los más usados comúnmente incluyéndose el horno tipo campana (un horno levanta una base fija). Figura 2.6

En hornos tipo cajón o cochura la carga eléctrica debe de ser apilada para que la variación de temperatura en la carga de temple esté razonablemente baja. Los hornos de cajón comúnmente tienen esta falta: la parte debajo de la carga a un centro geométrico que algunas veces se mueve lentamente tras el resto de la carga en temperatura. Esta lentitud en la temperatura debe de ser detenida a un mínimo. Todas las cubiertas y bases de temple, placas apiladas, mandriles y cubiertas interiores deben de ser hechos de materiales de carbón muy bajos, tales como el hierro ingot Armco. Los aceros orientados eléctricos Armco tienen el contenido de carbón muy bajo, poquito más que el error en el carbón de determinaciones en núcleos de laboratorios comerciales. Por eso a la temperatura de temple están hambrientos por el carbón de cualquier exposición, la carga levantará el carbón obtenible de la atmósfera que lo rodea y de cualquier

material de carbón más alto en su proximidad. La base y las placas apiladas del horno deben de ser planas. Esto es de importancia particularmente en las laminaciones recortadas o en la tensión relevada para transformadores de fuerza, las bases torcidas y placas apiladas afectarán lo plano de las laminaciones templadas. La falta de plano ondulado en la libre tensión, las laminaciones templadas reintroducirán tensiones cuando el núcleo está siendo apilado durante el acoplamiento del transformador.



Figura 2.6 Horno para núcleos de acero orientado, la foto muestra el momento en que se está sacando una carga y a la izquierda; los núcleos que fueron sacados.

Se recomiendan cubiertas interiores. Estas hacen posible el uso de la atmósfera controlada. La cubierta interior debe de ser diseñada para que la carga la lleve completamente como sea razonable y practica; las cubiertas interiores usualmente son selladas con arena seca y limpia.

#### **II.8.2 GRAVAMEN O PESO DE CARGA.**

Todo el aceite, grasa o cualquier otro material con contenidos altos de carbón, debe de ser removido de las laminaciones o núcleo antes de su temple de tensión

relevante, tales materiales extraños son altamente carbonizantes a los aceros eléctricos orientados.

El peso de carga compacta en la placa de temple es preferible de tal manera que la calefacción radiada de las paredes del horno de la tapa no pueda pegarle al filo de una porción de cada laminación o núcleo. La calefacción en el centro de la carga será retardada si la calefacción debe pasar primero por entre pilas adyacentes.

Las laminaciones cortas pueden ser templadas con sus dimensiones largas a través de la base del horno.

### II.8.3 ATMOSFERA DE TEMPLE.

Los aceros eléctricos orientados deberán de ser relevados de tensión en una atmósfera controlada no carbonizante ni siquiera a un material extremadamente bajo en el carbón y no oxidante al igual. Una atmósfera neutral o no carbonizante a un acero moderado o un acero áspero podría ser altamente carbonizante a los aceros eléctricos orientados.

Para muchas aplicaciones una atmósfera no explosiva seca de más de 90% de nitrógeno y menos que un 10% de hidrógeno, es recomendada. El nitrógeno puro amorfo desasociado y el hidrógeno requieren de un manejo cuidadoso porque son altamente combustibles y representan un riesgo explosivo. Cuando se usa amoníaco desasociado, deben hacerse provisiones para remover el amoníaco libre que está generalmente presente. El volumen de la atmósfera de temple necesitada por hora puede ser calculada por la siguiente fórmula general:

$I_n^3$  requeridos por hora = 5 a 10 X (Volumen de la cubierta interior del núcleo - El volumen de carga) -----(2.1)

$$C_m^3 = I_n^3 \times 16.387$$

La atmósfera de temple debe de ser introducida dentro de la cubierta interior para que alcance todas las partes de la carga. El punto relevante de la atmósfera siempre debe de ser menos que 90 a 95% de nitrógeno o el 5 a 10% de hidrogeno atmosférico.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### **II.8.4 TEMPERATURA DE TEMPLE**

La temperatura nominal del relevo de tensión recomendada para los aceros eléctricos orientados es de 790 a 800 °C con una tolerancia de 15 °C.

#### **II.8.5 PROCEDIMIENTOS DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO.**

La anchura de laminaciones, el método de apilar y el tamaño de la carga determina el tramo del ciclo de calentamiento y enfriamiento. Esto varía generalmente de 6 a 60 horas. El mejor control puede ser desarrollado por el uso temporal de un termoacoplado, uno en la parte más caliente de la carga y otro en la parte más fría (casi siempre abajo o en el centro).

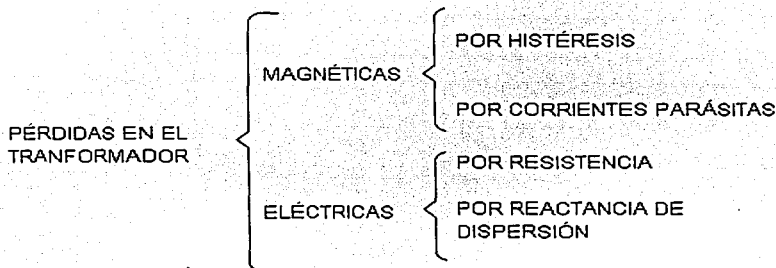
El calor a un promedio que ha de traer la parte más fría de la carga y a una temperatura y una velocidad práctica mayor que en un tiempo excedente de 815 °C en la parte más caliente. El remojo empieza cuando la parte más fría de la carga alcanza 770 °C y el remojo debe de ser suficientemente más largo para mantener la carga a una temperatura uniforme. El tiempo puede ser tan corto como ¼ hora para las laminaciones angostas, pero 5 horas pueden ser necesarias para laminaciones anchas.

El procedimiento de enfriamiento recomendado es el reverso del procedimiento de calentamiento. Esto quiere decir que el promedio de enfriamiento a las temperaturas más altas son más lentas que esas bajo los 425 °C. Repasando el tiempo-temperatura observado, con calentamiento o enfriamiento brusco pueden generarse torcimientos permanentes de las laminaciones por una contracción no uniforme.

### III PÉRDIDAS EN EL TRANSFORMADOR.

En un transformador real no se cumplen con rigurosidad los vínculos descritos, obligado por los materiales de que se dispone en la naturaleza no pueden desempeñar la transformación y la transferencia perfecta de potencia y aparecen algunas pérdidas, que no se pueden quitarse, no obstante, sí es admisible reducirlas a un valor imperceptible.

Las pérdidas se pueden organizar según el siguiente cuadro:



Cuadro 1 pérdidas en el transformador.

En este cuadro las pérdidas se clasifican en:

#### III.1 Pérdidas magnéticas.

Llamadas también pérdidas en el núcleo, estas se deben a ciertas limitaciones que tienen los materiales ferromagnéticos reales, comparados con el material ideal, como se describe a continuación.

- ♦ La permeabilidad del material ferromagnético no tiende a infinito, por lo que la corriente de excitación necesaria para magnetizar el núcleo no es despreciable, como se había supuesto en el transformador ideal.
- ♦ La permeabilidad del material ferromagnético no es constante, teniendo a bajar considerablemente con alto grado de excitación. En estas condiciones, el aumento de

corriente no logra aumento apreciable de flujo y se dice que el núcleo está saturado, lo que corresponde a la región extrema de la figura.3.1(a).

- El material ferromagnético tiene retentividad, esta denominación proviene de la tendencia de retener una parte del flujo con que fue magnetizado. En la figura 3.1(a) se observa que al disminuir la corriente de excitación, el flujo desciende por una trayectoria superior; con una corriente nula, el flujo conserva un pequeño valor, y con corriente negativa se genera la parte simétrica de la gráfica. Una corriente alterna hace variar el flujo según el perímetro de la figura 3.1(b), originando el ciclo de histéresis.
- El material ferromagnético es también conductor eléctrico.

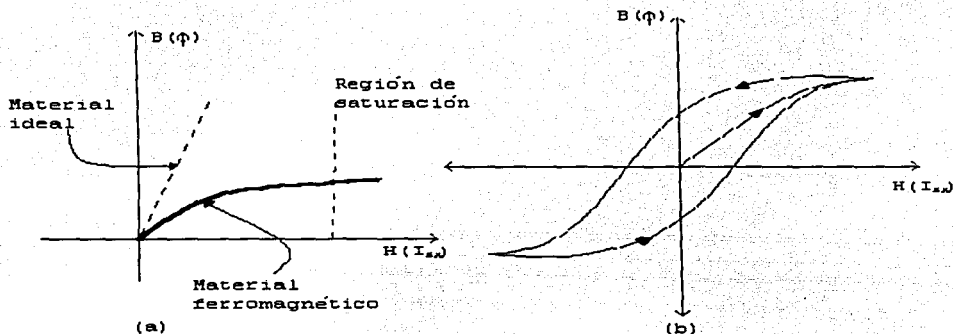


Figura 3.1 Pérdidas magnéticas (a) primera magnetización del núcleo  
(b) ciclo de histéresis

La última característica, ocasiona las pérdidas por corrientes parásitas, que se describen a continuación, y, las tres primeras características dan origen a las pérdidas por histéresis que se describen más adelante.

### III.1.1 PÉRDIDAS POR CORRIENTES PARASITAS

Las corrientes parásitas se producen debido a que el núcleo es conductor de electricidad. Esto ocasiona que se organicen circuitos en forma de espiras cerradas, rodeando las líneas

de flujo magnético. Como el flujo es variable en el tiempo, se inducen en las espiras, fuerzas electromotrices de acuerdo a la ley de Faraday, y estas a su vez producen corrientes circulantes en forma de remolino, como se ve en la figura 3.2

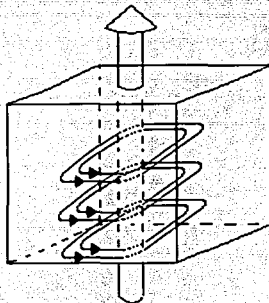


FIGURA 3.2 Pérdidas por corrientes parásitas

Quando varia el flujo de una fuerza a través de un núcleo de hierro, se induce en este una f.e.m., la cual da lugar en el mismo a corrientes que reciben el nombre de corrientes parásitas, corrientes de Eddy o corrientes de Foucault. La existencia de estas corrientes trae consigo una pérdida de energía o de potencia. El trabajo perdido reaparece en el hierro bajo la forma de calor. La pérdida por corrientes parásitas se calcula de la siguiente manera:

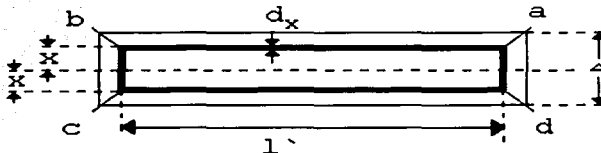


FIGURA 3.3 Sección transversal de una chapa de las que componen un núcleo de hierro.

En la figura 3.3 se ha representado la sección transversal de una chapa con espesor  $\Delta$ . Podemos imaginarnos la chapa descompuesta en un gran número de espiras cerradas en corto circuito, representadas cada una de ellas por un rectángulo a b c d. Supongamos que por el rectángulo pase perpendicularmente el flujo de inducción máximo  $\Phi_{\text{máx}}$ . Al cabo



de medio periodo pasa por la misma sección el mismo flujo, pero en sentido contrario; el flujo máximo será entonces  $\Phi_{\text{máx}}$ . En el rectángulo que representa una espira cerrada en corto circuito, se induce una f.e.m. debida a la variación del flujo, cuyo valor medio, es:

$$\varepsilon_m = 4\phi_{\text{máx}} N_B f 10^{-8} \text{ --- (3.1)}$$

Como se trata solamente de una espira, es  $N_B=1$ . Si  $\beta_{\text{máx}}$  es la inducción máxima, se tendrá:

$$\phi_{\text{máx}} = \beta_{\text{máx}} 2xl \text{ ---- (3.2)}$$

Y, por lo tanto,

$$\varepsilon_m = 8\beta_{\text{máx}} xl' f 10^{-8} \text{ ---- (3.3)}$$

Supongamos que el rectángulo, cuyo espesor en sentido perpendicular a la sección transversal es  $h$ , posea resistencia  $R$ . El valor medio de la intensidad de corriente es entonces:

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{R} = \frac{8\beta_{\text{máx}} xl' f}{R 10^8} \text{ ---- (3.4)}$$

La perdida por calor Joule es  $v^2/R$ , siendo  $v$  el valor eficaz.

Como la onda es senoidal  $v = \xi v_m$ , en donde  $\xi$  es el factor de forma. Este factor de forma, se calcula por medio de la relación entre  $v/v_m$  con  $v$  como valor eficaz, y  $v_m$  es el valor medio algebraico ( $2v_{\text{máx}}/\pi$ ), siendo  $\xi$  igual a 1.11.

Según esto, se obtiene para la perdida por calor Joule en el rectángulo la expresión

$$\frac{v^2}{R} = \left( \frac{8\beta_{\text{máx}} l' f \xi}{10^8} \right)^2 \cdot \frac{x^2}{R} \text{ ---- (3.5)}$$

En esta formula, deben introducirse  $x$  y  $l'$  en centímetros.

La resistencia que se obtiene para el rectángulo es

$$R = \rho \frac{l}{s} = \rho \frac{2(l+2x)}{h \cdot dx} \text{-----} (3.6)$$

Donde:  $\rho$  es la resistencia especifica del hierro, esto es, la resistencia de un alambre de 1 m de longitud y 1 mm<sup>2</sup> de sección; por lo tanto,  $l'$  y  $x$  deberán introducirse en metros, y  $h \cdot dx$  en milímetros cuadrados. Como  $x$  es muy pequeño con relación a  $l'$ , sé podrá despreciar, obteniéndose

$$\frac{v^2}{R} = \left( \frac{8\beta_{\text{max}} l' f \xi}{10^8} \right) x^2 \frac{100^2 h dx}{2l' \rho} \text{-----} (3.7)$$

Introduciendo el factor  $100^2$  se puede poner  $l'$ ,  $h$  y  $dx$  en centímetros.

La perdida de potencia por corrientes parásitas en todo el espesor  $\Delta$  de la chapa se encuentra por la integración desde  $x=0$  hasta  $x=\Delta/2$ :

$$P_p = \int_0^{\Delta/2} \left( \frac{8\beta_{\text{max}} l' f \xi}{10^8} \right)^2 \cdot \frac{h \cdot 100^2}{2l' \rho} \cdot x^2 dx$$

$$P_p = \frac{64\beta_{\text{max}}^2 l'^2 f^2 \xi^2}{10^6} \cdot \frac{h \cdot 100^2}{2l' \rho} \left| \frac{x^3}{3} \right|_0^{\Delta/2}$$

$$P_p = \frac{32\beta_{\text{max}}^2 l' f^2 \xi^2}{10^{12}} \cdot \frac{h \cdot l' \cdot \Delta^3}{3\rho \cdot 8}$$

$$P_p = \frac{4}{3} \left( \frac{\beta_{\text{max}} \Delta f \xi}{10^6} \right)^2 \cdot \frac{h l' \Delta}{\rho} \text{-----} (3.8)$$

El volumen de la chapa es  $\text{Vol.} = h l' \Delta$  expresado en centímetros cúbicos. Y la f.e.m. es senoidal, con el factor de forma  $\epsilon = 1.11$ . Introduciendo  $V$  en centímetros cúbicos y  $\Delta$  en milímetros se obtiene

$$P_p = 1.63 \frac{(\beta_{\text{max}} \Delta f)^2}{10^{11} \rho} \text{Vol.} \text{-----} (3.9)$$

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Siendo G el peso del hierro en kilogramos y  $\gamma$  su peso específico,

$$Vol. = \frac{G}{\gamma} \text{-----(3.10)}$$

Entonces

$$P_p = 1.63 \frac{(\beta_{\text{máx}} \Delta f)^2}{10^{11} \rho} \cdot \frac{G}{\gamma} \text{-----(3.11)}$$

Haciendo

$$\frac{1.63 \cdot 10 \cdot \Delta^2}{\rho \gamma} = \sigma \text{-----(3.12)}$$

La perdida por corrientes parásitas es entonces:

$$P_p = \sigma \left( \frac{f}{100} \cdot \frac{\beta_{\text{máx}}}{10000} \right)^2 G \text{-----(3.13)}$$

Estando  $P_p$  en watts,  $f$  en hertz,  $\beta_{\text{máx}}$  en gauss, y G en kilogramos.

En cuanto a  $\sigma$ , se obtiene el siguiente cuadro:

**TABLA 3.1 Valores para  $\sigma$  y  $\epsilon$  con diferentes clases de hierro**

Clase de hierro	Espesor de la chapa $\Delta$	$\epsilon$	$\sigma$	Cifra de pérdidas	
				$W_{10}$	$W_{15}$
Chapa corriente para dinamos.	1.0 Mm	4.4	22.4	7.8	17.6
	0.5 Mm	4.4	5.6	3.6	8.1
	0.35 mm	4.7	3.2	3.15	7.1
Chapa de alta aleación	0.5 mm	3.0	1.2	1.8	4.05
	0.35 mm	0.6	0.6	1.35	3.04

Las chapas con una adición de hasta 4% de silicio se denominan chapas aleadas. En ellas la resistencia específica  $\sigma$  es relativamente grande, y se obtiene de la formula

$$\rho = 0.099 + 0.12p \text{-----(3.14)}$$

Siendo p el contenido porcentual de silicio. Debido a la mayor resistencia específica, se reducen en ellas las pérdidas por corrientes parásitas, como se deduce de las formulas anteriores. La permeabilidad magnética  $\mu$  de las chapas aleadas es mayor que la de las chapas corrientes para

dinamos cuando la inducción es pequeña, y menor cuando esta es grande.

Las pérdidas por corrientes parásitas se pueden reducir si se les corta su trayectoria tan amplia, lo que se consigue haciendo el núcleo de láminas apiladas, en vez de columnas y yugos macizos, como se observa en la figura 3.4

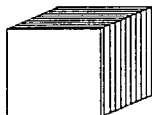


FIGURA 3.4 Reducción de las pérdidas mediante laminación

### III.1.2 PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS

Al pasar una corriente alterna por una bobina con núcleo de hierro se produce una imantación sostenida alternativa del hierro.

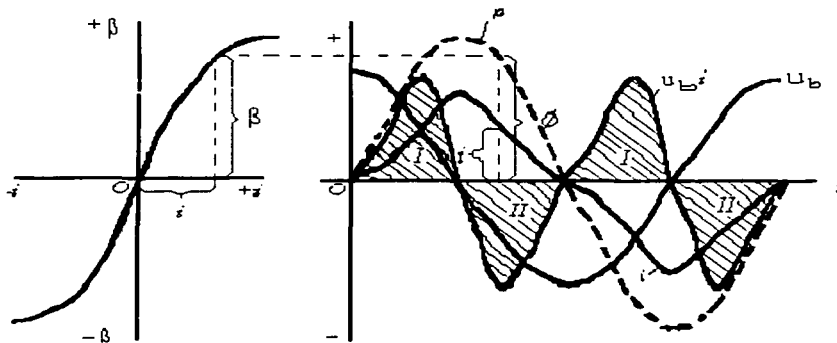


FIGURA 3.5 Curvas en el caso de bobinas con núcleo de hierro sin magnetismo remanente.

En la bobina se induce una f.e.m. que, si se desprecia la caída de tensión, por lo general es muy pequeña, es igual pero en sentido contrario a la tensión de los bornes. Si esta última, y, por consiguiente, la f.e.m., son senoidales, el flujo de inducción varía también de una manera sinusoidal, pero va retrasado  $90^\circ$  con relación a la f.e.m. inducida (figura 3.5). Si la bobina no contiene hierro, el flujo de la fuerza

varia proporcionalmente a la intensidad de la corriente, la cual estará en fase con el flujo e ira retrasada  $90^\circ$  con respecto a la tensión de los bornes. No se consume energía alguna, ya que la empleada para la formación del campo se recupera al desaparecer este. Pero si la bobina contiene un núcleo de hierro, el flujo de inducción no será ya proporcional a la intensidad de la corriente.

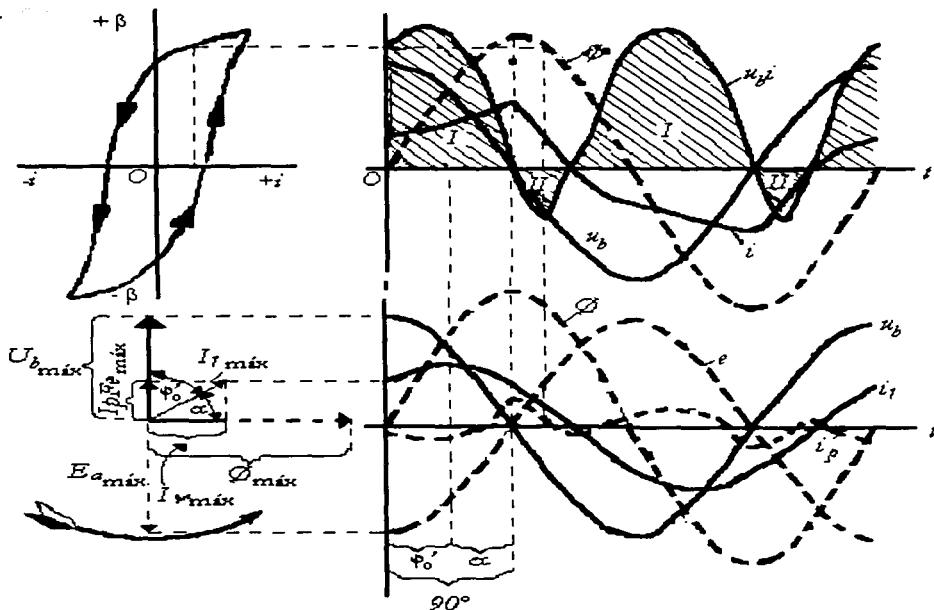


FIGURA 3.6 Curvas en el caso de bobina con núcleo de hierro con magnetismo remanente

Esto no variará ya en forma senoidal. La dependencia entre  $i$  y  $\phi$  se deducen de la figura 3.5.  $\beta$  y  $\phi$  están dibujadas en la misma escala. Para simplificar los valores de la figura 3.5 todo lo posible se hace  $N/l=1$ , con lo cual resulta  $N=iN/l=i$ . Si ahora se supone que el hierro no tenga magnetismo remanente, la rama ascendente de la curva de magnetismo será igual a la descendente, o, lo que es igual, el área que

encierra el ciclo de histéresis será igual a cero. Calculando los valores instantáneos  $u_b i$  de la potencia, se obtiene para las potencias positivas las mismas curva que para las negativas, o, lo que es igual, el área I es tan grande como el área II. El área I representa la cantidad de energía suministrada para formar el campo, mientras que la II equivale a la cantidad de energía recuperada al desaparecer aquél. No existe, por consiguiente, la pérdida de potencia o de energía.

Pero si el hierro tiene magnetismo remanente, la rama ascendente de la curva de magnetismo no es igual a la descendente, y el ciclo de histéresis encierra una cierta área (figura 3.6). La curva de corriente que se obtiene del mismo modo que el de la figura 3.5, no es tampoco senoidal, careciendo, además, de simetría con relación al valor máximo del flujo de fuerza; por esto, el curso de la curva positiva de potencia no es igual al de la parte negativa. El área I es mayor que la II, esto es, la energía positiva suministrada es mayor que la negativa, o recuperada; existe, por lo tanto, una pérdida de energía, que se obtiene de la diferencia de las dos áreas. Como fácilmente puede deducirse de ambas curvas, esta pérdida de energía es tanto mayor cuanto más grande sea el área del ciclo de histéresis.

La curva de corriente no senoidal puede descomponerse en armónicas. La curva  $i_1$  de la figura 3.6 es la onda fundamental, la curva  $i_p$  contiene todas las armónicas superiores. Solamente las armónicas de igual frecuencia dan potencia; por lo tanto, solamente la curva fundamental es de interés cuando se trate de calcular la potencia; su valor eficaz es  $I_1 = I$ . La onda fundamental está retrasada el ángulo  $\phi'_0$ , con relación a la tensión en los bornes. La potencia que se consume como consecuencia de la histéresis es, por lo tanto,

$$P_H = U_b I \cos \phi'_0 \text{ ---- (3.15)}$$

La corriente  $I$  va adelantada el ángulo  $\alpha$  con relación al flujo de inducción. Este ángulo recibe el ángulo de histéresis. Según la figura 3.6, es  $\phi'_0 = 90^\circ - \alpha$ . De aquí se deduce

$$P_H = U_b I \cos \phi'_0 = U_b I \cos(90^\circ - \alpha) \text{ ---- (3.16)}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$P_H = U_p I \text{ sen } \alpha \text{ -----(3.17)}$$

El procedimiento indicado permite tener en cuenta el ciclo de histéresis en el diagrama pero no es apropiado para él cálculo. Para la determinación de las pérdidas por histéresis se emplean más bien formulas empíricas, es decir, adquiridas por la experiencia. Puede emplearse la formula

$$P_H = \frac{\epsilon f \left( \frac{\beta_{\text{máx}}}{10000} \right)^2}{100} G \text{ -----(3.18)}$$

Significando:

- $P_H$ . - Las pérdidas por histéresis en watts.
- $f$ . - La frecuencia en hertz.
- $\beta_{\text{máx}}$ . - La inducción máxima en gauss.
- $G$ . - El peso del hierro en kilogramos.
- $\epsilon$ . - Factor tomado de la tabla 3.1.

Las pérdidas por histéresis se pueden reducir con aleaciones de pequeña área de histéresis (figura 3.7.1) y diseñando la sección transversal del núcleo de tal magnitud, que para el flujo que requiere la bobina se produzca un nivel bajo de saturación. La corriente se aproximaría más a la forma senoidal y su defasamiento se acercaría más a los 90° (figura 3.7.2).

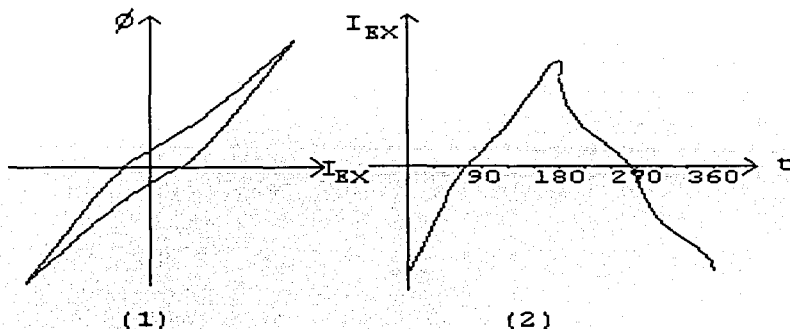


FIGURA 3.7 Reducción de las pérdidas magnéticas (1) núcleo de pequeña área de histéresis y con baja saturación. (2) Corriente defasada cerca de 90°.

Representación de las pérdidas magnéticas. Para poder analizar el comportamiento del transformador en un diagrama semejante al de la figura 1.10, se recurre al símbolo del transformador ideal tal como el de la figura mencionada, y del lado del embobinado que trabaje como primario se le agrega un circuito R-L.

Como las pérdidas magnéticas se presentan por el solo hecho de energizar el transformador, independientemente de que haya carga o no en el secundario, el circuito R-L tendría que ser paralelo; a la resistencia se le acostumbra representar por  $r_{he}$  (histéresis + Eddi) y a la inductancia por  $x_m$  (reactancia de magnetización) como se aprecia en la figura 3.8.

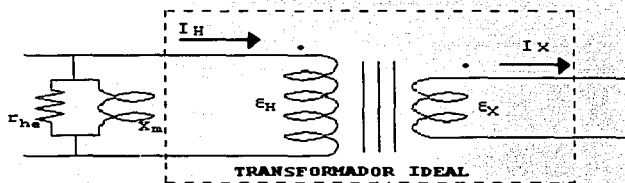


Figura 3.8 adición de las pérdidas magnéticas al transformador ideal

### III.2 PÉRDIDAS ELÉCTRICAS.

Las pérdidas eléctricas o pérdidas en el cobre se deben a determinadas características de los embobinados, como son:

El material tiene una resistividad mayor que cero (cero sería el caso de un material ideal).

Debe de existir una separación entre las espiras, las capas así como entre las bobinas y los núcleos, por la necesidad de interponer aislamientos.

#### III.2.1 PÉRDIDAS POR RESISTENCIA.

El alambre con el cual se devanan las bobinas (usualmente de cobre), tiene una resistencia. En transformadores pequeños es de fracciones de ohm, pero en los grandes, y en particular los de alta tensión llegan a ser de algunas unidades o decenas de ohm.

La corriente que pasa por esta resistencia provoca pérdidas de voltaje (ocasionando que la fuerza electromotriz no sea



igual al voltaje externo) y pérdidas de energía (que calientan los devanados).

### III.2.2 PÉRDIDAS POR REACTANCIA DE DISPERSIÓN.

La separación entre espiras y entre capas de las bobinas, y entre las propias bobinas y el núcleo, permiten que se desarrollen líneas de flujo magnético fuera del núcleo, que cierran a través del aire. Estas líneas de flujo se originan por las fuentes de corrientes de carga del transformador y reciben el nombre de flujos de dispersión.

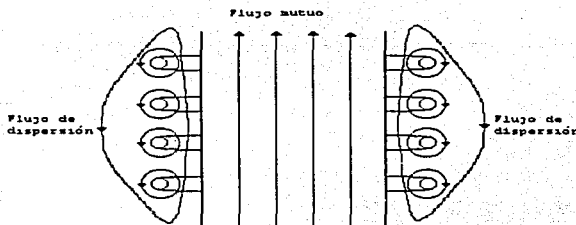


FIGURA 3.9 El flujo de dispersión

La figura 3.9 muestra un corte longitudinal del núcleo y el perfil de una bobina de pocas vueltas, en las que se han exagerado estas separaciones.

El flujo de dispersión, a diferencia del flujo mutuo, solamente eslabona una bobina, de modo que la bobina de alta tensión tiene su flujo disperso  $\phi_{dH}$  y la de baja tensión  $\phi_{dX}$ . La fuerza electromotriz total inducida en la bobina de alta tensión se debe al flujo total que eslabona en ella:

$$E_H = -N_H \frac{d\phi_H}{dt} \text{ -----(3.19)}$$

En donde este flujo total tiene dos componentes:

$$\phi_H = \phi_m + \phi_{dH} \text{ -----(3.20)}$$

por lo tanto, la fuerza electromotriz es:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$E_H = -N_H \frac{d\phi_m}{dt} - N_H \frac{d\phi_{dH}}{dt} \text{ -----(3.21)}$$

La componente inducida por el flujo mutuo es la misma que se estudio antes, y es la fuerza electromotriz correspondiente al transformador ideal.

$$-N_H \frac{d\phi_m}{dt} = \varepsilon_H \text{ -----(3.22)}$$

En cambio la componente inducida por el flujo disperso es una pérdida de voltaje que se suma a la pérdida de resistencia. Esta suma debe ser vectorial, pues las caídas de voltaje resistivas están en fase con la corriente, mientras que las fuerzas electromotrices inducidas, como se mostró en la figura 1.5, están en cuadratura con el flujo y, por consiguiente, también con la corriente.

Una consideración bastante práctica es que la fuerza electromotriz inducida por el flujo disperso se comporta como una pérdida de voltaje en una reactancia, que se puede expresar como:

$$-N_H \frac{d\phi_{dH}}{dt} = X_H I_H \text{ -----(3.23)}$$

Y al parámetro  $X_H$  se le conoce como reactancia de dispersión del embobinado de alta tensión.

De manera semejante, para el embobinado de baja tensión.

$$E_x = -N_x \frac{d\phi_x}{dt} \text{ -----(3.24)}$$

En donde

$$\phi_x = \phi_m + \phi_{dx} \text{ -----(3.25)}$$

Por lo tanto

$$E_x = -N_x \frac{d\phi_m}{dt} - N_x \frac{d\phi_{dx}}{dt} \text{ -----(3.26)}$$

Siendo

$$-N_x \frac{d\phi_m}{dt} = \epsilon_x \quad (3.27)$$

Y

$$-N_x \frac{d\phi_{dx}}{dt} = X_x I_x \quad (3.28)$$

Al parámetro  $X_x$  se le llama reactancia de dispersión del embobinado de baja tensión.

### III.3 REPRESENTACIÓN DE LAS PÉRDIDAS ELÉCTRICAS.

Un esquema que represente el proceder de un transformador real, tendría como parte central el elemento ideal, y tanto a la derecha como a la izquierda se agregan resistencias y reactancias como parámetros concentrados, en los que se dispararian las pérdidas. Un diagrama de esta naturaleza recibe el nombre de circuito equivalente y permite analizar el comportamiento del transformador bajo cualquier régimen de carga.

Las pérdidas eléctricas se deben a la circulación de las corrientes de carga. No se manifiestan cuando no hay carga en el transformador, y ascienden a su máximo valor permisible a plena carga. Este comportamiento se presenta mediante circuitos serie, que se agregan a la figura 3.8 a la entrada del primario y a la salida del secundario, sin afectar para nada el elemento central que sigue obedeciendo a las leyes del transformador ideal. El diagrama completo se muestra en la figura 3.10

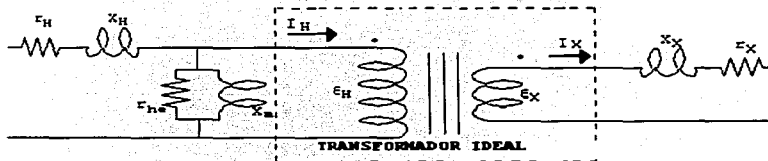


FIGURA 3.10 Adición de las pérdidas eléctricas al transformador ideal.

La adición de estos parámetros es muy similar a las pérdidas magnéticas, afuera del elemento ideal.

### III.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR.

El diagrama que se ha obtenido en la figura 3.10 se le conoce como circuito equivalente del transformador, ya que al aplicarle las técnicas de análisis de circuitos eléctricos, aparece el comportamiento de un transformador real. Las principales características que se analizan son:

- Variación del voltaje secundario con diferentes condiciones de carga.
- Evaluación de las pérdidas magnéticas, eléctricas y de la eficiencia.

En la figura 3.11.1 aparece un circuito equivalente al de la figura 3.10, al que se ha agregado el voltaje aplicado  $V_H$ , la corriente primaria  $I_p$  y el voltaje secundario  $V_x$ . Como circuito eléctrico esta incompleto, pues se supone que a la izquierda existe una fuente de energía y a la derecha una impedancia de carga. El transformador trabaja como reductor de voltaje.

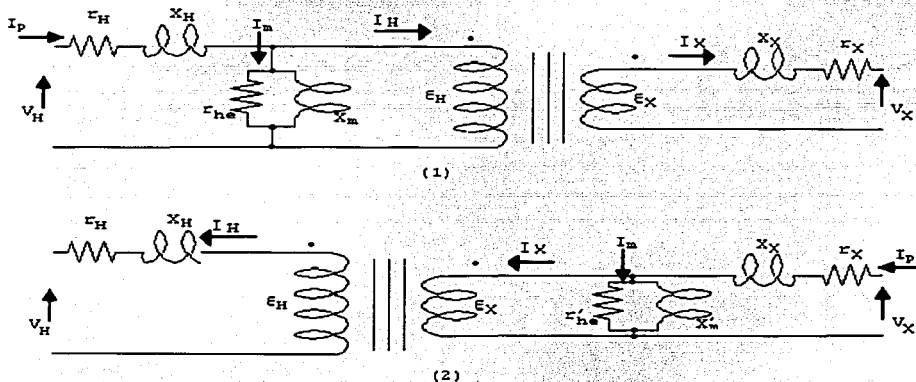


FIGURA 3.11 Circuito equivalente del transformador (1)Trabajando como reductor de voltaje (2)Trabajando como elevador de voltaje.

Si todos los razonamientos hechos hasta aquí hubieran comenzado con la elección de la baja tensión como primario,

se hubiera llegado finalmente al circuito equivalente de la figura 3.11.2, en donde el transformador trabaja como elevador de voltaje. Los parámetros de magnetización han quedado ahora del lado de baja tensión, que es por donde se excita el núcleo. Los parámetros de magnetización siempre están del lado primario.

Al excitar el transformador por el lado de baja tensión, se hace con menor voltaje y mayor intensidad de corriente, lo que ocasiona que los parámetros no tengan el mismo valor que en alta tensión. Con objeto de hacer esta distinción, en baja tensión se les ha llamado  $r'_{he}$  y  $X'_m$ .

El análisis de este circuito es algo laborioso, ya que existe un acoplamiento magnético y habría que aplicar la teoría de los circuitos acoplados, para lo cual sería necesario calcular los coeficientes de autoinducción e inducción mutua.

Para salvar estas dificultades se recurre a las transformaciones que se describen en los dos subtemas siguientes.

### III.5 TRANSFORMADOR DE IMPEDANCIA.

En todos los razonamientos anteriores se ha tratado al transformador como un elemento que transforma voltaje y que transforma corrientes simultáneamente, pero los voltajes y las corrientes se han estudiado por separado. Si se tienen en cuenta ambas variables combinadas, se puede deducir que también existe transformación de impedancia de carga.

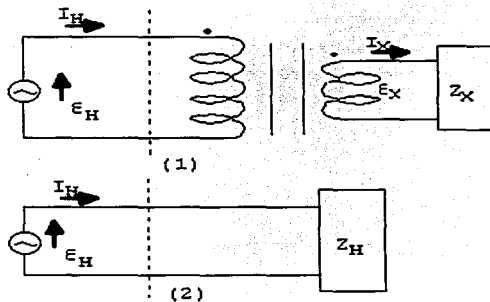


FIGURA 3.12 El transformador ideal como transformador de impedancia

Supóngase que por el momento no se puede ver a la derecha de la línea punteada en las figuras 3.12.1 y 3.12.2; por ejemplo, se puede tapar esta parte con una hoja de papel. A la izquierda se observan dos fuentes idénticas; ambas tienen el mismo voltaje  $E_H$  e igual corriente  $I_H$ , por lo que se supone que a la derecha también hay cargas idénticas.

Al descubrir ahora el lado derecho de las figuras se observa claramente que las cargas no son idénticas, sin embargo, el transformador de la primera figura ha cambiado las características de la impedancia  $Z_x$  de tal modo, que para la fuente resulta igual (o equivalente) a la impedancia  $Z_H$  de la segunda figura.

La impedancia de la primera figura tiene un valor:

$$Z_x = \frac{\epsilon_x}{I_x} \text{ -----(3.29)}$$

$$\epsilon_x = \frac{\epsilon_H}{a} \text{ -----(3.30)}$$

$$I_x = aI_H \text{ -----(3.31)}$$

Pero por las leyes del transformador ideal:

Por lo tanto:

$$Z_x = \frac{1}{a^2} \frac{\epsilon_H}{I_H} \text{ -----(3.32)}$$

En donde:

$$\frac{\epsilon_H}{I_H} \text{ -----(3.33)}$$

es la impedancia  $Z_H$  de la segunda figura, que se encuentra conectada directamente a la alta tensión generada por la fuente, de modo que:

$$Z_H = a^2 Z_x \text{ -----(3.34)}$$

Para pasar de la primera figura a la segunda, se elimina el transformador ideal y se conecta directamente la impedancia equivalente en alta tensión, cuyo valor es igual a la

impedancia de baja tensión multiplicado por en cuadrado de la relación de transformación.

### III.6 PRIMERA SIMPLIFICACIÓN DEL CIRCUITO EQUIVALENTE.

Aplicando la regla obtenida al final del subtema de transformador de impedancia a los circuitos de la figura 3.11, se elimina el transformador ideal y las impedancias del lado derecho se multiplican por  $a^2$ , con los que se obtienen los circuitos simplificados de la figura 3.13.

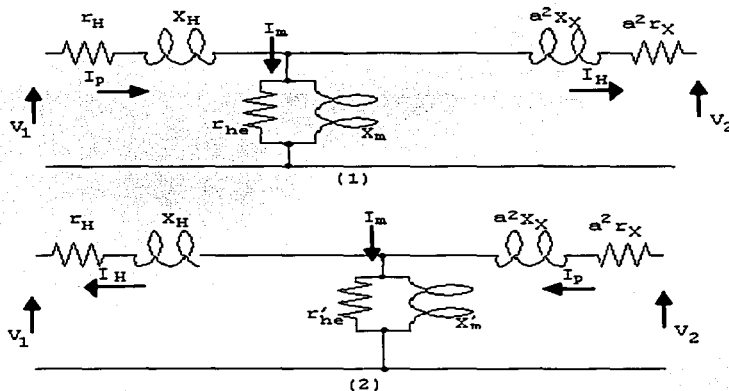


FIGURA 3.13 Circuito equivalente del transformador de alta tensión (1) Trabajando como reductor de voltaje (2) trabajando como elevador de voltaje

Analizar estos circuitos es mucho más fácil que los de la figura 3.12, puesto que ya no hay acoplamiento magnético, pero hay que tener cuidado de manejar todas las cantidades a niveles de la alta tensión.

Trabajar en el ámbito de alta tensión significa que voltajes y corrientes tomarán valores aproximados a los que corresponden al embinado de alta tensión, por ejemplo el voltaje primario será la alta tensión nominal y el voltaje secundario resultará una cantidad ligeramente diferente, pero en el mismo nivel. Igualmente las corrientes que se aplican al circuito son las de alta tensión.

Esto sugiere un cambio de nomenclatura, puesto que ya no hay ni alta, ni baja y por lo tanto no sería adecuado conservar  $V_H$  y  $V_X$ . Sean entonces  $V_1$  y  $V_2$ , en donde:

$$V_1 = V_H \text{ ---- (3.35)}$$

$$V_2 = a V_X \text{ ---- (3.36)}$$

Fuera de este cambio, la simplificación ha conducido a dos circuitos casi idénticos en la figura 3.13. Solamente difieren en la dirección de corriente.

Nótese también que en los dos circuitos aparecen los parámetros de magnetización  $r_{he}$  y  $X_m$  al nivel de alta tensión, puesto que también obedecen a la transformación:

$$r_{he} = a^2 r_{he} \text{ ---- (3.37)}$$

$$X_m = a^2 X_m \text{ ---- (3.38)}$$

Como las intensidades de corriente son las de alta tensión, se conserva la nomenclatura  $I_H$ , en donde:

$$I_H = \frac{I_p}{a} \text{ ---- (3.39)}$$

$I_p$  significa corriente primaria e  $I_m$  corriente de magnetización, ambas en el ámbito de alta tensión.

### III.7 SEGUNDA SIMPLIFICACIÓN DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

Considerando que la corriente de magnetización es pequeña comparada con la carga nominal, no se comete grave error al trasladar el circuito de magnetización al puerto primario, con lo que los cuatro parámetros de pérdidas eléctricas quedan en serie y se pueden reducir a dos, como aparece en los circuitos de la figura 3.14. Aunque el error es muy pequeño, es conveniente mencionarlo, por lo que a estos circuitos se les da el nombre de circuitos aproximados.

En estos circuitos se conservan las condiciones planteadas anteriormente, es decir.

$$V_1 = V_H \text{ ---- (3.40)}$$

$$V_2 = a V_X \text{ ---- (3.41)}$$

$$I_H = \frac{I_X}{a} \text{ ---- (3.42)}$$



Y, además, los parámetros de pérdidas eléctricas resultan:

$$R = r_H + a^2 r_x \text{ -----(3.43)}$$

$$X = X_H + a^2 X_x \text{ -----(3.44)}$$

El circuito equivalente aproximado resulta más fácil de analizar y tiene la ventaja de que los cuatro parámetros tal y como han quedado, se determinan a través de pruebas en laboratorio.

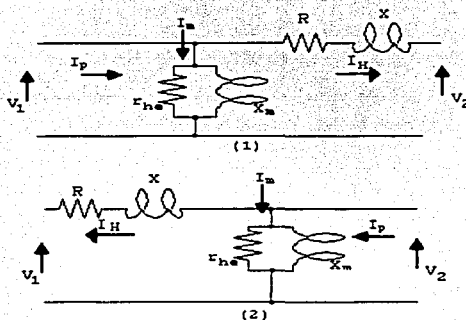


FIGURA 3.14 Circuito equivalente aproximado del transformador al nivel de alta tensión. (1) Trabajando como reductor de voltaje (2) Trabajando como elevador de voltaje

Cabe señalar, que también se pueden obtener circuitos equivalentes al nivel de baja tensión siendo los resultados los mismos.

### III.8 ASPECTOS PRÁCTICOS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

Si se tiene un transformador real, se puede someter a ciertas pruebas de laboratorio de las cuales se evalúan los parámetros del circuito equivalente de ese transformador en particular y se obtiene su comportamiento con diversas condiciones de carga.

#### III.8.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS.

Los parámetros de magnetización se calculan con los resultados de una prueba de laboratorio, haciendo trabajar el

transformador en circuito abierto, mientras que los parámetros de pérdidas eléctricas se obtienen de otra prueba en la que se trabaje el transformador en circuito corto.

### III.8.1.1 PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO.

Consiste de energizar el transformador por cualquiera de sus dos lados, a voltaje nominal y con una onda senoidal, mientras el otro lado se mantiene en circuito abierto. Se mide el voltaje, la corriente y la potencia consumida, como se puede apreciar en la figura 3.15.1.

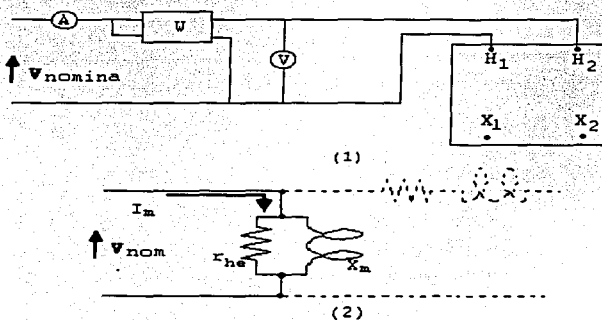


FIGURA 3.15 Prueba de circuito abierto (1) Diagrama de prueba. (2) Acción de la prueba en el circuito equivalente.

En la figura 3.15.2 se puede apreciar fácilmente que si a la derecha se tiene circuito abierto, los parámetros de pérdidas eléctricas no entran en acción y la corriente circulante va exclusivamente al circuito de magnetización.

De la prueba se obtiene:

Voltaje aplicado:	V Lectura del voltímetro. Debe coincidir con el voltaje nominal.
Corriente de excitación:	I lectura del amperímetro.
Potencia consumida:	P lectura del wattímetro.
Potencia aparente:	$S=VI$ ---- (3.45.a)
Potencia reactiva:	

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \text{ ---- (3.45.b)}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Considerando que las potencias real y reactiva en el circuito paralelo de la figura se formularían como:

$$P = \frac{v^2}{r_{he}} \text{-----(3.46)}$$

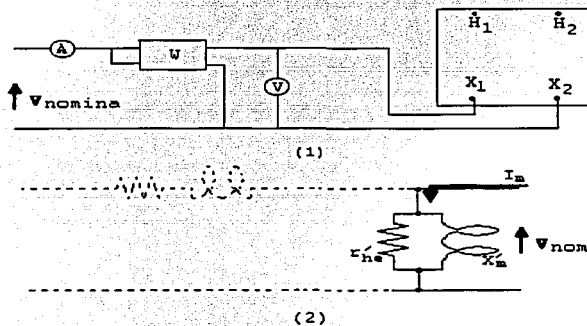
$$Q = \frac{v^2}{X_m} \text{-----(3.47)}$$

De ahí se obtienen los parámetros de magnetización.

$$r_{he} = \frac{V^2}{P} \text{-----(3.48)}$$

$$X_m = \frac{V^2}{Q} \text{-----(3.49)}$$

Cuando la alta tensión del transformador no se puede obtener con las fuentes reguladas del laboratorio, se recurre a energizarlo por el lado de baja tensión, como se muestra en la figura.3.16.1



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 3.16 Prueba de circuito abierto efectuada por baja tensión (1) Diagrama de prueba (2) Acción de la prueba en el circuito equivalente

Esta prueba equivale a trabajar el transformador como elevador de voltaje, con las condiciones de la figura

3.16.2, de manera que los parámetros de magnetización que se obtienen son al nivel de baja tensión.

Las operaciones iniciales para él cálculo de los parámetros son las mismas; solamente hay que tener en cuenta que se trabaja a niveles  $r'_{he}$  y  $X'_m$ , o sea:

$$r'_{he} = \frac{V^2}{P} \text{-----(3.50)}$$

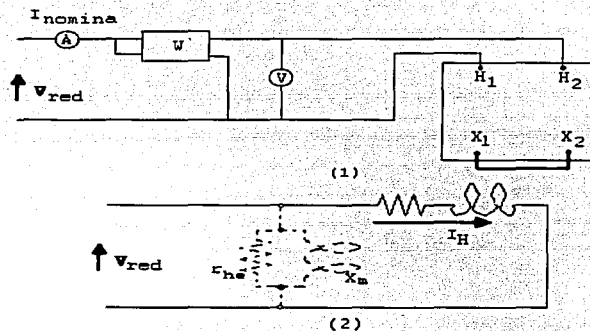
$$X'_m = \frac{V^2}{Q} \text{-----(3.51)}$$

Y para transferir al nivel de alta tensión:

$$r_{he} = a^2 r'_{he} \text{-----(3.52)}$$

$$X_m = a^2 X'_m \text{-----(3.53)}$$

### III.8.1.2 PRUEBA DE CORTO CIRCUITO.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 3.17 Prueba de corto circuito (1) Diagrama de prueba. (2) Acción de la prueba en el circuito equivalente.

Consiste en energizar el transformador por cualquiera de sus dos lados con corriente nominal, mientras del otro lado se mantiene en circuito corto. El voltaje necesario es de valor reducido respecto al nominal. Por lo que esta prueba se suele hacer del lado de alta tensión. Siempre se mide el voltaje,

la corriente y la potencia consumida como se puede apreciar en la figura 3.17.1.

La corriente de excitación que normalmente es pequeña a voltaje nominal, en esta prueba se hace despreciable, por lo que se toma en cuenta el circuito de excitación en la figura 3.17.2 y solamente se ha dibujado con línea punteada.

Se considera entonces, que la corriente aplicada actúa solamente en las pérdidas eléctricas.

De la prueba se obtiene:

Voltaje aplicado: V Lectura del voltímetro.  
 Corriente de excitación: I Lectura del amperímetro. Debe coincidir con el voltaje nominal.  
 Potencia consumida: P Lectura del wattímetro.  
 Potencia aparente:  $S=VI$ -----(3.54.a)  
 Potencia reactiva:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \text{ -----(3.54.b)}$$

Considerando que las potencias real y reactiva en un circuito serie se formularía como:

$$P = RI^2 \text{ -----(3.55)}$$

$$Q = XI^2 \text{ -----(3.56)}$$

De ahí se obtienen los parámetros de pérdidas eléctricas:

$$R = \frac{P}{I^2} \text{ -----(3.57)}$$

$$X = \frac{Q}{I^2} \text{ -----(3.58)}$$

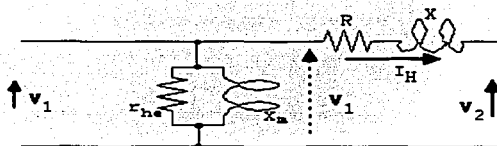


FIGURA 3.18 El circuito equivalente listo para analizarse

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### III.9 ESTUDIO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

Establecidos los cuatro parámetros del circuito equivalente aproximado, con libertad imaginamos que en vez de letras se tienen cantidades de ohm, en la figura 3.18, procediendo así al estudio, que comprendería esencialmente dos aspectos: pérdidas de voltaje y regulación, y pérdidas de energía y eficiencia,

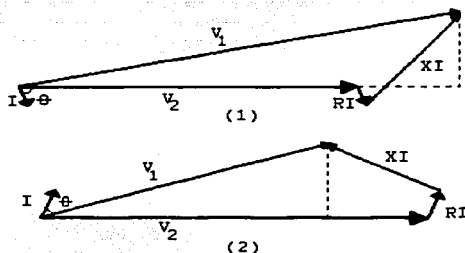
#### III.9.1 PÉRDIDAS DE VOLTAJE Y REGULACIÓN

Solo se presentan pérdidas de voltaje en los parámetros R y X, ya que el voltaje aplicado  $V_1$  se conserva en toda la parte izquierda de la figura 3.18, el estudio abarcara desde la línea punteada hasta el voltaje de salida  $V_2$

El voltaje de entrada es igual a las pérdidas en la resistencia y en la reactancia más el voltaje de salida. Como lo expresa la siguiente ecuación:

$$V_1 = V_2 + RI + XI \text{---(3.59)}$$

Esta ecuación se representa vectorialmente en la figura 3.19. Tomando nota que esta expresión en corriente alterna es vectorial, y en un problema de orden práctico, el fasor  $V_2$  es el que sirve de apoyo.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 3.19 Diagrama de fasores del circuito equivalente aproximado (1) con corriente retrasada (2) con corriente adelantada.

El voltaje de carga está dibujado en forma horizontal y representado por el fasor  $V_2$ . La corriente absorbida por la carga puede estar adelantada o atrasada respecto al voltaje  $V_2$ , (abarcando un caso intermedio de factor de potencia

unitario) teniendo dos opciones para generar los diagramas fasoriales de la figura 3.19.

La suma de los fasores  $V_2$ , mas el fasor RI en fase con la corriente y un fasor XI en cuadratura da por resultado el fasor  $V_1$  como lo plantea la ecuación 3.59.

Para determinar un triángulo rectángulo, se dibujaron las líneas punteadas, en este triángulo, la hipotenusa para la figura 3.19.1 con un factor de potencia en retraso, es  $V_1$  y el cateto horizontal es:

$V_2 + \text{Proyección horizontal de RI} + \text{Proyección horizontal de XI}$ ----(3.60)  
Y el cateto vertical:

$\text{Proyección vertical de RI} + \text{Proyección vertical de XI}$ ----(3.61)

El teorema de Pitágoras queda expresado como:

$$V_1^2 = (V_2 + RI \cos \theta + XI \sin \theta)^2 + (XI \cos \theta - RI \sin \theta)^2 \text{----(3.62)}$$

Con un razonamiento similar, el teorema de Pitágoras con un factor de potencia en adelanto queda:

$$V_1^2 = (V_2 + RI \cos \theta - XI \sin \theta)^2 + (XI \cos \theta + RI \sin \theta)^2 \text{----(3.63)}$$

Es importante mencionar que, las dos formulas tienen la misma estructura, y solo difieren en dos signos.

Puesto que el transformador real tiene impedancias en serie en su interior, su tensión de salida varia con la carga, aun si su tensión de alimentación se mantiene constante, por lo tanto, a la relación entre el voltaje perdido al dar carga del lado secundario, y el voltaje nominal del mismo lado, se llama *regulación de voltaje*. La regulación de voltaje a plena carga es una cantidad que compara el voltaje de salida del transformador en vacío con el voltaje de salida a plena carga. Este se expresa de las dos formas siguientes:

Por unidad:

$$\text{Reg} = \frac{V_0 - V_{pc}}{V_{nom}} \text{----(3.64)}$$

Por ciento:

$$\% \text{Reg} = \frac{V_0 - V_{pc}}{V_{nom}} \times 100 \text{----(3.65)}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En donde:

- $V_0$  -voltage secundario en vacío.
- $V_{pc}$  -Voltage secundario a plena carga.
- $V_{nom}$  -Voltage nominal del secundario.

En general, se considera conveniente tener una regulación de voltaje tan pequeña como sea posible. En el caso ideal no hay variaciones de voltaje, por lo tanto,  $Reg=0$ , y en la práctica la regulación representa la calidad de servicio que da el transformador considerándose mejor servicio mientras menor sea la regulación.

Para obtener la regulación de voltaje en un transformador se requiere entender las caídas de voltaje que se producen en su interior. Considerando el circuito equivalente del transformador simplificado de la figura 3.18. Los efectos de la rama de excitación en la regulación de voltaje del transformador puede, ignorarse, por lo tanto, solamente las impedancias en serie deben tomarse en cuenta. La regulación de voltaje de un transformador depende tanto de la magnitud de estas impedancias como del ángulo fase de la corriente que circula por el transformador. La forma más fácil de determinar el efecto de la impedancia y de los ángulos de fase de la corriente circulante dentro la regulación de voltaje del transformador es analizar el diagrama fasorial.

### III.9.2 PÉRDIDAS DE ENERGÍA Y EFICIENCIA

La energía que se pierde en el circuito únicamente es por el calor disipado en las resistencias, por lo que se tienen dos grupos de pérdidas:

Pérdidas magnéticas:

$$P_{mag} = \frac{V_1^2}{r_{he}} \text{ -----(3.66)}$$

Pérdidas eléctricas:

$$P_{el} = RI^2_H \text{ -----(3.67)}$$

Ya que la eficiencia es:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \text{ -----(3.68)}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Pero por la ley de la conservación de la energía

$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{salida}} + \text{Pérdidas} \text{---(3.69)}$$

Sabiendo que las pérdidas se pueden dar de dos maneras diferentes:

Pérdidas eléctricas.  
Pérdidas magnéticas.

Sustituyendo lo anterior en la ecuación 3.69, obtenemos la siguiente forma:

$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{salida}} + P_{\text{mag}} + P_{\text{eléc}} \text{---(3.70)}$$

Sustituyendo en la ecuación 3.68, queda finalmente:

$$\eta = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{salida}} + P_{\text{mag}} + P_{\text{el}}} \text{---(3.71)}$$

Y expresada en por ciento:

$$\% \eta = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{salida}} + P_{\text{mag}} + P_{\text{el}}} \times 100 \text{---(3.72)}$$

La eficiencia de los transformadores es muy alta, generalmente mayor de 90 %, debido a que se originan pérdidas muy pequeñas comparadas con su capacidad.

Otro punto que se toma en cuenta, es la potencia de salida, ya que es función del factor de potencia,

$$P = V \cos \theta \text{---(3.73)}$$

### III.10 Condiciones para la eficiencia máxima de un transformador.

Si  $R_{Xe}$  es la resistencia equivalente de los devanados primarios y secundarios referidos al lado circuito secundario,

$$R_{Xe} = R_H (N_x / N_H)^2 + R_x \text{---(3.74)}$$

=una constante para un transformador dado.

De aquí para cualquier corriente de carga  $I_2$ , se tiene:

$$\text{Pérdidas totales } RI^2 = I_x^2 R_x \text{ ---- (3.75)}$$

Y la eficiencia quedará como:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{I_x V_x \times \text{fp.}}{I_x V_x \times \text{fp.} + P_n + I_x^2 R_x} \\ &= \frac{V_x \times \text{fp.}}{V_x \times \text{fp.} + P_n / I_x + I_x R_x} \text{ ---- (3.76)} \end{aligned}$$

Siendo:

-  $P_n$ .- Pérdidas totales del núcleo.

Para un transformador normal,  $V_x$  es aproximadamente constante; de aquí para una carga con un factor de potencia dado, la eficiencia es máxima cuando el denominador de la ecuación 3.76 tiene un valor mínimo, por lo tanto, si derivamos el denominador, tenemos:

$$\frac{d}{dI_x} (V_x \times \text{fp.} + P_n / I_x + I_x R_x) = 0$$

Resolviendo la ecuación, queda:

$$-P_n / I_x^2 + R_x = 0 \text{ ---- (3.77)}$$

O también

$$I_x^2 R_x = P_n \text{ ---- (3.78)}$$

Para verificar que esta condición de un valor mínimo y no el máximo del denominador en la expresión (3.76),  $(-P_n / I_x^2 + R_x)$  debería de ser diferenciado con respecto a  $I_x$ , así que:

$$\frac{d}{dI_x} (-P_n / I_x^2 + R_x) = -2P_n / I_x^3 \text{ ---- (3.79)}$$

Puesto que la cantidad es positiva, la expresión (3.79) es la condición para valores mínimos en el denominador de la expresión (3.76) y por lo tanto el valor máximo de la eficiencia. De aquí que la eficiencia sea máxima cuando las pérdidas variables  $I^2R$  son iguales a las pérdidas del núcleo que son constantes.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La eficiencia adquiere sus valores más altos a factor de potencia unitario.

Es pertinente mencionar que la regulación a factor de potencia bajo y atrasada es grande y la pérdida de voltaje podría llegar a tal grado que dificultaría la correcta operación de algunas cargas.

Aumentando el factor de potencia disminuye la regulación y, por consiguiente, las fluctuaciones de voltaje, con el mejoramiento de la operación de las cargas

A factor de potencia adelantado, la regulación se vuelve negativa, lo que significa que en vez de pérdidas hay ganancia de voltaje, haciendo trabajar las cargas a un voltaje mayor del nominal, con el peligro de causarles daño.

### III.11 Eficiencia diaria total.

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

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

$$\text{Eficiencia diaria} = \frac{W_{\text{sal(total)}}}{W_{\text{ex(total)}}} = \frac{W_{01} + W_{02} + W_{03} + \dots}{W_{\text{sal(total)}} + W_{\text{perd(total)}}} \quad \text{--- (3.80)}$$

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

Obsérvese que las pérdidas de energía durante un periodo de 24 horas,  $W_{\text{perd(total)}}$ , constan de unas pérdidas en el hierro fijas para las 24 horas (ya que el transformador está siempre con tensión) más unas pérdidas de energía variables en el cobre que varían directamente con la fluctuación de carga durante las 24 horas del periodo. Obsérvese también que la

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ecuación 3.80 es un cociente de energía en lugar de potencias, o sea, se maneja un trabajo eléctrico en kWh.

*Potencia aprovechable:* las fluctuaciones son más notorias en este aspecto, ya que disminuyen por bajo voltaje y bajo factor de potencia a la vez, no pudiendo superar la corriente nominal del transformador por el riesgo de sobrecalentamiento y daño permanente a los aislamientos.

*En cuanto a la eficiencia,* a pesar de que las pérdidas permanecen constantes, la eficiencia varía, ya que es función de la potencia aprovechable y tiene sus valores más altos con factores de potencia elevados.

*Factor de potencia.* Por lo que se deduce de los comentarios anteriores, el mejor aprovechamiento del transformador se obtiene a factores de potencia elevados. Estas condiciones siempre son posibles de obtener, ya que el factor de potencia se puede corregir.

Usualmente el factor de potencia bajo se presenta en retraso, de manera que para corregirlo es necesario agregar capacitores al sistema.

No es recomendable corregir hasta el factor de potencia unitario. Desde el punto de vista económico, resulta costoso por el tamaño de los capacitores, y desde el punto de vista funcional, la energía oscilante en el sistema alcanza su valor máximo, produciendo efectos indeseables en los núcleos de los equipos, lo que se conoce con el nombre de ferrorresonancia.

## IV TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Un transformador trifásico se compone esencialmente de tres transformadores monofásicos con sus tres núcleos formando un solo conjunto como se muestra en las figuras 4.1a y 4.1b. Para los circuitos trifásicos se consigue una gran economía, tanto en el costo como en el espacio ocupado, si se utiliza solo un transformador trifásico en lugar de tres monofásicos, cada uno con su propio depósito (tanque). Los inconvenientes principales del transformador trifásico estriban en que cualquier avería en el arrollamiento de una fase deja todo el transformador fuera de servicio, y también en que la reparación es más costosa.

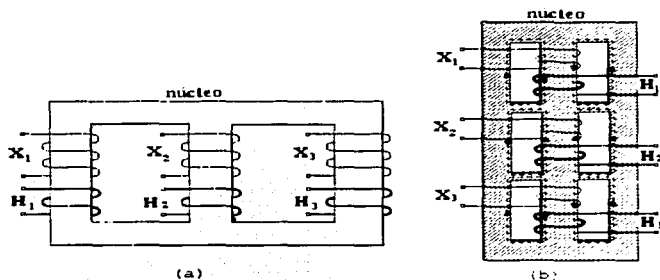


FIGURA 4.1 Transformadores trifásicos (a) tipo columna o core (b) tipo acorazado o shell.

### IV.1 CONSTITUCIÓN DEL TRANSFORMADOR DE TRES COLUMNAS.

Supongamos el banco de la figura 4.2(a), a partir de cargas equilibradas en los secundarios, en la figura 4.2(b) se han representado los vectores  $-E_1$  de cada uno de los transformadores 1, 2 y 3. También se han representado los flujos  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ , y  $\phi_3$ . La suma de estos nos da:

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 0$$

Si en la figura 4.2(a) se fundieran en una las tres columnas centrales, por la resultante no circularía flujo alguno. Si por innecesaria se suprime, quedan los caminos magnéticos representados en la figura 4.2(c), con notable ahorro de

acero eléctrico, así como de las correspondientes pérdidas, en relación con la figura 4.2(a).

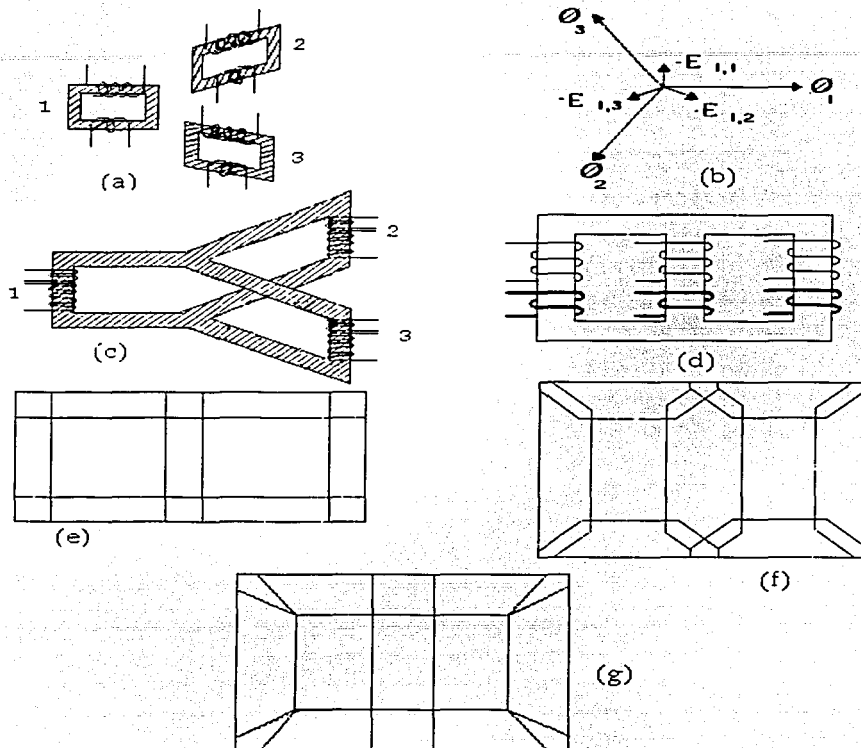


FIGURA 4.2 análisis deductivo de la construcción de un transformador trifásico tipo núcleo

No se olvide la constitución por láminas de los núcleos (laminación de acero al silicio de grano orientado). Es evidente que la constitución según la figura 4.2(c) ofrece dificultades. Supóngase que los núcleos 1 y 2 se sitúan en un mismo plano, y que los yugos de 3 se van acortando, hasta anularse, queda la configuración de la figura 4.2(d). La

facilidad constructiva es evidente, como se ha representado en la figura 4.2(e), a base de la disposición al solape.

Así se ha constituido en núcleo usual de los transformadores trifásicos. Los devanados pueden conectarse de distintas maneras, la más usual en nuestro sistema de distribución es la delta - estrella; la figura 4.3 representa dos transformadores conectados en estrella - estrella y triángulo - triángulo.

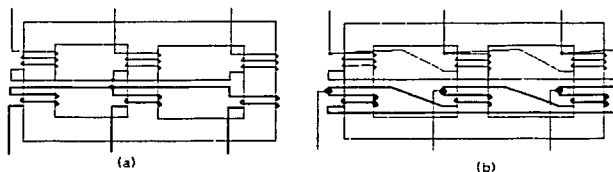


FIGURA 4.3 Constitución de los transformadores; (a) conexión Y - Y y (b) conexión  $\Delta$ - $\Delta$ .

Con tal núcleo trifásico, se crea una asimetría en los circuitos magnéticos. Es claro que el correspondiente a la columna central es más corto (faltan los yugos), luego entonces, requiere menor corriente de excitación, ( $I_0$ ). Esta asimetría es poco perceptible en carga, esencialmente con laminación de grano orientado que requieren corrientes pequeñas de excitación.

También, debemos mencionar la existencia de transformadores trifásicos con cinco columnas, llamados estos transformadores tipo acorazados (o tipo shell).

#### IV.2 TEORÍA DE LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EN ESTADO DE EQUILIBRIO

Al igual si se tratara de bancos trifásicos como de transformadores con núcleo de tres columnas, su estudio teórico, en el caso de cargas equilibradas, se remiten al de los transformadores monofásicos. Los diagramas vectoriales suelen trazarse a partir de tensiones de fase a neutro, sea el neutro real o ficticio, es decir, se dibujan como si todos los transformadores tuvieran la conexión estrella - estrella.

En la figura 4.4(a), se ha representado el diagrama vectorial en tales condiciones. Para no complicar, no se han trazado

los triángulos de tensiones compuestas (ABC y abc), que fácilmente se suplen con la imaginación.

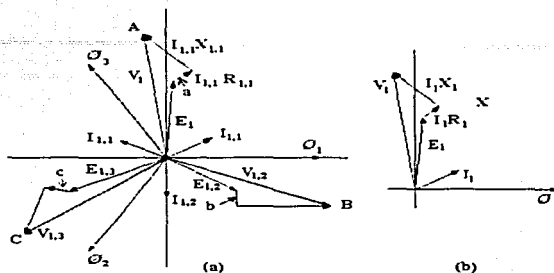


Figura 4.4 Diagrama vectorial de cargas equilibradas

En lo sucesivo, se evitará la reiteración que se aprecia en la figura (con defasamientos de  $120^\circ$ ), y nos limitaremos a dar el diagrama vectorial, a partir de tensiones de fase a neutro, de una de las fases (ejemplo la letra A), tal como se representa en la figura 4.4(b).

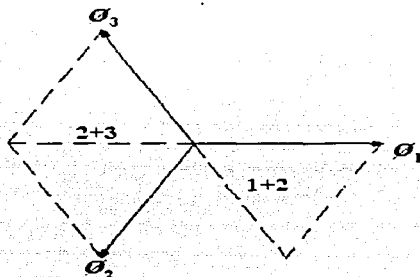


Figura 4.5 representación abstracta de la suma de flujos trifásicos

#### IV.3 NÚCLEOS TRIFÁSICOS.

Por cuanto a las variaciones de flujo en las tres fases, éstas se encuentran desplazadas  $120^\circ$ , pueden sumarse dos flujos cualesquiera, como se muestra en la figura 4.5, para obtener un flujo de la misma magnitud.



Ésta fascinante posibilidad ha sugerido varias maneras de construir bobinas, de modo que una pierna o rama común puedan llevar dos flujos, permitiendo economía en la construcción del núcleo y como consecuencia reducir las pérdidas.

Existe, por supuesto, él echo aún más fascinante de que la suma de los flujos es igual a cero, sugiriendo la posibilidad de que las tres piernas o ramas trifásicas estén conectadas de modo que no exista pierna de retorno como en la figura 4.6. este tipo de núcleo tiene menos peso, y consecuentemente, menos costo y menos pérdidas.

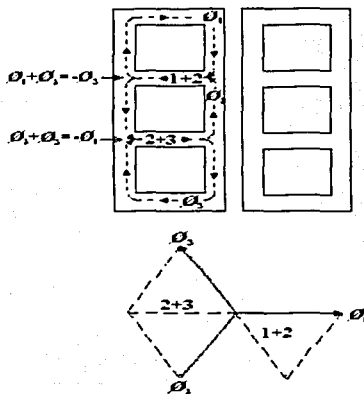


Figura 4.6 aplicación de la adición vectorial de los flujos en un núcleo trifásico para economizar material de núcleo

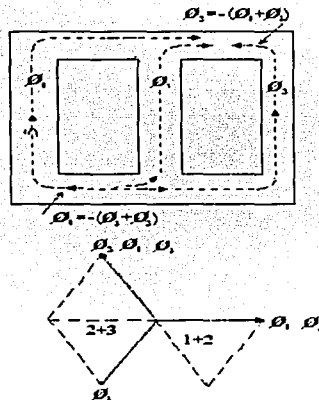


Figura 4.7 construcción del núcleo trifásico en que la suma vectorial de los tres flujos es igual a cero, eliminando así la necesidad de una trayectoria de retorno para el flujo

#### IV.4 CORRIENTES ARMÓNICAS Y FLUJOS EN NÚCLEOS TRIFÁSICOS.

Si los devanados están conectados de manera que no se suministre una trayectoria para la corriente desde el punto neutro (conexión Y), la corriente de tercera armónica (también de novena, decimoquinta, etc.) se suprime y como consecuencia, su sola ausencia actúa como corrientes armónicas equivalentes en el devanado, que tienden a producir correspondientes flujos armónicos. Sin embargo, en el tipo general de núcleo como se muestra en la figura 4.7, o cuando

hay básicamente solo tres piernas del núcleo para las tres fases, el flujo de la tercera armónica que regresa por el aire tiene el efecto sumamente indeseable de introducir corrientes en las partes metálicas cercanas; por ejemplo en bastidores de acero se provocan serias dificultades. Por supuesto, los amperes - vueltas que fluyen en bastidores u otras partes no pueden, posiblemente, ser superiores a los amperes - vueltas de mando, que son las componentes de tercera armónica de la corriente excitante. Esta no es, por lo general, una magnitud excesivamente grande, y si a propósito se dota de una resistencia suficientemente baja al circuito que recorre los bastidores, la pérdida puede ser mantenida dentro de límites razonables.

En cualquier caso, no obstante, el flujo de tercera armónica resulta muy inferior al valor que tendría si se dispusiera de un circuito de hierro para fluir y será mucho menor la tensión de tercera armónica inducida en cada devanado. El cálculo exacto del flujo es difícil, pero generalmente la tensión de tercera armónica será inferior al 2% de la onda fundamental.

#### **IV.5 DIVISIÓN DE LAS CORRIENTES DE TERCERA ARMÓNICA ENTRE TRAYECTORIAS ALTERNAS.**

Lo anterior ha sugerido tres distintas posibilidades que rigen la tensión y la corriente de la tercera armónica:

1. La corriente de tercera armónica puede fluir en un devanado conectado en delta, limitada solamente por la impedancia del transformador.
2. La corriente de tercera armónica puede también fluir del neutro del transformador al retorno a tierra, a través de cualquier impedancia que pueda existir en esta trayectoria.
3. Además, hemos visto que la tensión de tercera armónica que pueda existir para producir este flujo de corriente de tercera armónica, resultará muy reducida si el transformador se hace con un núcleo trifásico de tres columnas.

Estas tres condiciones pueden existir en combinación. Las variables que afectan la corriente y la tensión serán: 1) la impedancia del transformador, 2) la impedancia del neutro, 3) la impedancia de "secuencia cero" de un transformador con núcleo de tres piernas. El problema puede complicarse aún más por la adición de otro devanado. Obviamente, no es sencilla

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

la determinación de las corrientes y la tensión que existirán. Lo anterior se hace más fácil de explicar si se analiza la reactancia de los transformadores y los circuitos equivalentes.

#### IV.6 EL NÚCLEO TRIFÁSICO DE CINCO PIERNAS.

Este núcleo mostrado en la figura 4.8, presenta en el análisis un problema particularmente difícil. Este tipo de núcleo se usa en vez del tipo sencillo de tres piernas, principalmente a causa de su menor peso que permite embarques por ferrocarril de mayores capacidades en kVA, se usa también si es importante suministrar la trayectoria de retorno para el flujo de tercera armónica. Sin embargo, el problema introducido por esta estructura es que las trayectorias reales del flujo son inciertas y es, así mismo, incierto el cálculo de las pérdidas en el núcleo.

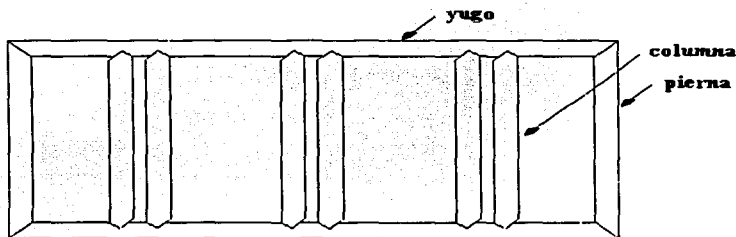


Figura 4.8 el núcleo trifásico de cinco piernas se usa comúnmente cuando es necesaria la menor altura posible o cuando debe suministrarse una trayectoria para el retorno del flujo de tercera armónica.

La incertidumbre sobre las trayectorias del flujo se debe al hecho de que los yugos superior e inferior no son suficientemente grandes para llevar todo el flujo de una columna. Aunque la tendencia natural del flujo es la de seguir el patrón de las tres piernas, como se muestra en la figura 4.7, los yugos se saturan y hacen que el exceso de flujo se "derrame" dentro de las piernas exteriores. Esto sucede únicamente en las crestas del flujo, con el resultado que éste no variara senoidalmente sino contendrá componentes armónicas adicionales

El cálculo exacto de la distribución y variación de este flujo se vuelve prácticamente imposible. En la figura 4.9, se

muestra un sencillo ejemplo que ilustra la dificultad del problema. Aquí hemos supuesto un núcleo diseñado con una sección transversal de los yugos igual a la mitad de la sección transversal de las columnas, y con características del hierro tales, que, la densidad del flujo (de cresta) en los yugos está limitada a la de las columnas.

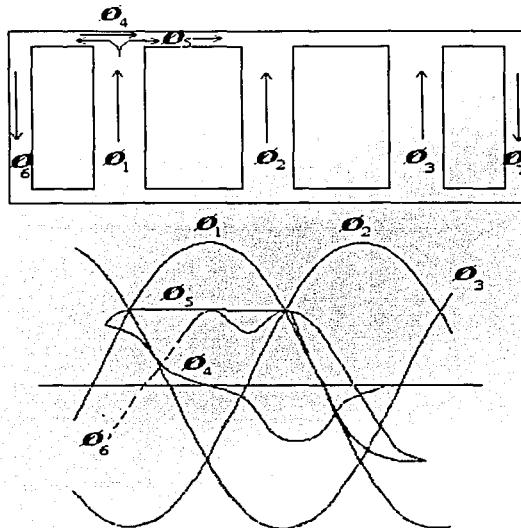


Figura 4.9 variación del flujo en un núcleo de cinco piernas. Aquí se supone que la condición un poco imaginaria de que el flujo de cresta en cada uno de los yugos o en las piernas exteriores, se limitara a la mitad del flujo de cresta de la columna adyacente interior. En un núcleo real, la densidad de cresta en los yugos será probablemente más alta y menos alta en piernas exteriores.

Esa característica es totalmente imaginaria, pero la idea es útil para mostrar las formas distintivas de la onda de flujo que se producen. En un núcleo real construido en esta forma, el flujo de cresta en los yugos excederá de hecho los valores mostrados y el flujo en las piernas exteriores será consecuentemente menor. Los valores exactos dependerán de las características del hierro y de los entrehierros y aun que se han diseñado medios de cálculo, es dudoso que un estudio teórico tenga realmente mucho valor. Un subsiguiente efecto

que agrega complicación se da si los devanados están conectados de manera que no se pueda fluir corriente de tercera armónica, la mayor parte de los diseñadores hacen uso extenso de curvas experimentales para el cálculo de las pérdidas y las corrientes de excitación en un núcleo de cinco piernas, más que en otros tipos de núcleos.

#### **IV.7 TRANSFORMACIÓN POLIFÁSICA**

En sistemas de potencia es necesario a menudo instalar bancos de transformadores monofásicos en conexiones trifásicas. Así tenemos, por ejemplo, conexiones: delta - delta, estrella - estrella, delta - estrella, estrella - delta y otras más, no muy usadas.

##### **IV.7.1 Conexión delta - delta.**

La conexión delta - delta, conocida también como triángulo - triángulo, lo conforman tres transformadores monofásicos idénticos contenidos en un mismo recipiente (figura 4.10). El arrollamiento secundario ab corresponde al primario AB; la polaridad de la terminal a es la misma que la de A. Los diagramas vectoriales desprecian la corriente magnetizante y las caídas por impedancia en los transformadores, y están dibujados para factor de potencia unitario entre la tensión de fase y la corriente de fase. De este modo,  $I_{AB}$  está en fase con  $V_{AB}$ . Como en los diagramas previos, las tensiones finales primarias y secundarias, y también las corrientes primarias y secundarias están en oposición de fase, así que  $V_{ba}$  corresponde a  $V_{AB}$ .  $I_{ba}$  esta en fase con  $V_{ba}$ , que corresponde a  $\cos \phi = 1$  entre la tensión de fase y la corriente de fase. Los diagramas vectoriales están mostrados para una carga equilibrada. Deberá notarse que las corrientes de la línea son  $\sqrt{3}$  veces la corriente de fase y están desplazadas  $30^\circ$  atrás de las corrientes de fase; el desplazamiento angular de  $30^\circ$  existe siempre para todas las cargas equilibradas, haciendo caso omiso del factor de potencia. Para transformadores idénticos, que tiene relaciones de transformación iguales e impedancias iguales, no existe corriente circulante en cualquiera de las deltas primaria o secundaria, y los transformadores se repartirán igualmente la carga total. La relación de transformación entre bancos es la misma que el transformador individual.

Resumiendo a expresiones matemáticas lo aquí comentado para la conexión  $\Delta$ - $\Delta$ , tenemos.

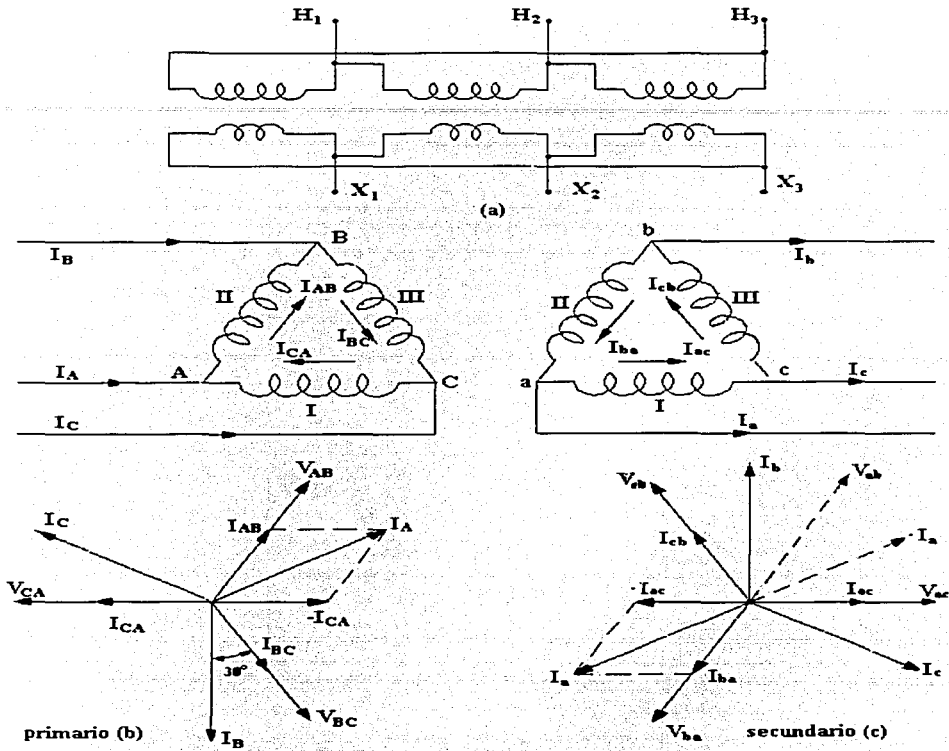


Figura 4.10 (a) conexión delta - delta de transformadores (b) esquema eléctrico y (c) diagramas vectoriales

Y

$$V_{LP} = V_{FP}$$

$$V_{LS} = V_{FS}$$

si que las tensiones de línea del primario y secundario guardan la relación:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}}{V_{FS}} = a \text{ ----- (4.1)}$$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

#### IV.7.2 Conexión estrella - estrella.

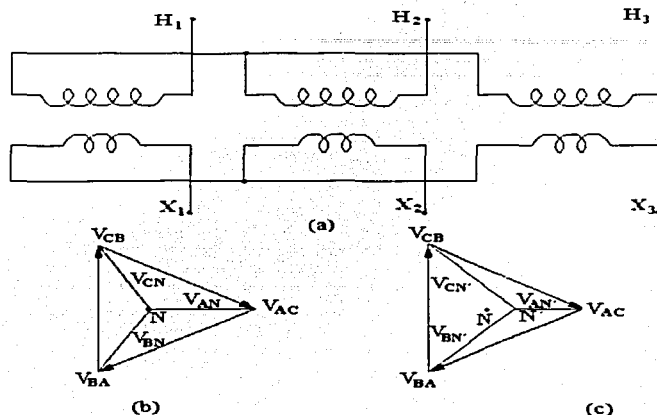


Figura 4.11 conexión estrella - estrella con neutro aislado: (a) esquema eléctrico, (b) carga equilibrada y (c) carga desequilibrada.

Para esta conexión pueden dibujarse los diagramas vectoriales en la misma forma que para la conexión  $\Delta-\Delta$ . La tensión de línea es  $\sqrt{3}$  veces la tensión de fase, y las dos están desplazadas entre sí  $30^\circ$ . La relación de tensión entre las tensiones o corrientes de la línea primarias y secundarias es la misma que para el transformador individual.

Los bancos Y - Y funcionan con los neutros conectados a tierra, esto es, el neutro del primario se conecta al neutro de la fuente de potencia. Con el neutro aislado, cualquier desequilibrio en la carga o cualquier carga monofásica conectada a través de un transformador, o bien entre líneas, causará un desplazamiento de la posición del neutro eléctrico, y las tensiones por fase estarán desequilibradas. Un neutro a tierra impide esta condición de funcionamiento no muy satisfactorio. La figura 4.11 muestra las condiciones existentes cuando se aísla el neutro. En la figura 4.11(b), la carga está equilibrada y en la figura 4.11(c), la carga está desequilibrada.

Con un neutro aislado, las componentes de la tercera armónica de la corriente en el primario se cancelan entre sí en las

fases y el flujo del transformador no es entonces senoidal, produciendo de este modo tensiones de fase no senoidales; no obstante, las tensiones de línea son senoidales. Tales tensiones armónicas son indeseables debido a los esfuerzos que éstas producen en el aislamiento de los arrollamientos. El uso de un neutro a tierra, o bien un arrollamiento terciario en  $\Delta$ , permitirá una trayectoria para la corriente de tercera armónica y producirá de este modo un flujo senoidal y una tensión de fase senoidal.

Resumiendo a expresión matemática, lo aquí comentado para la conexión Y - Y, tenemos:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}}{V_{FS}} = a \text{ ---- (4.2)}$$

#### IV.7.3 Conexión delta - estrella.

En la figura 4.12 se encuentran las conexiones y diagramas vectoriales para el arreglo  $\Delta$ -Y, alimentando una carga equilibrada de factor de potencia unitario. Los diagramas vectoriales pueden deducirse del diagrama de la figura 4.10. Se observa que las tensiones y corrientes de línea primarias y secundarias están defasadas entre sí  $30^\circ$ . La relación de las tensiones de la línea del primario al secundario es  $1/\sqrt{3}$  veces la relación de transformación para un transformador del banco. Ninguna dificultad aparece observando las corrientes de tercera armónica, ya que la existencia de una conexión en delta permite una trayectoria para estas corrientes. El uso de un banco semejante permite un neutro a tierra en el lado del secundario, proporcionando de este modo un servicio de 3 fases a 4 hilos. El desequilibrio en las cargas causa muy pequeño desequilibrio de la tensión, ya que el primario del transformador está conectado en delta.

Debido al desplazamiento de  $30^\circ$  entre las tensiones primarias y secundarias, no es posible poner en paralelo un banco semejante con un banco de transformadores  $\Delta - \Delta$  o bien Y -Y.



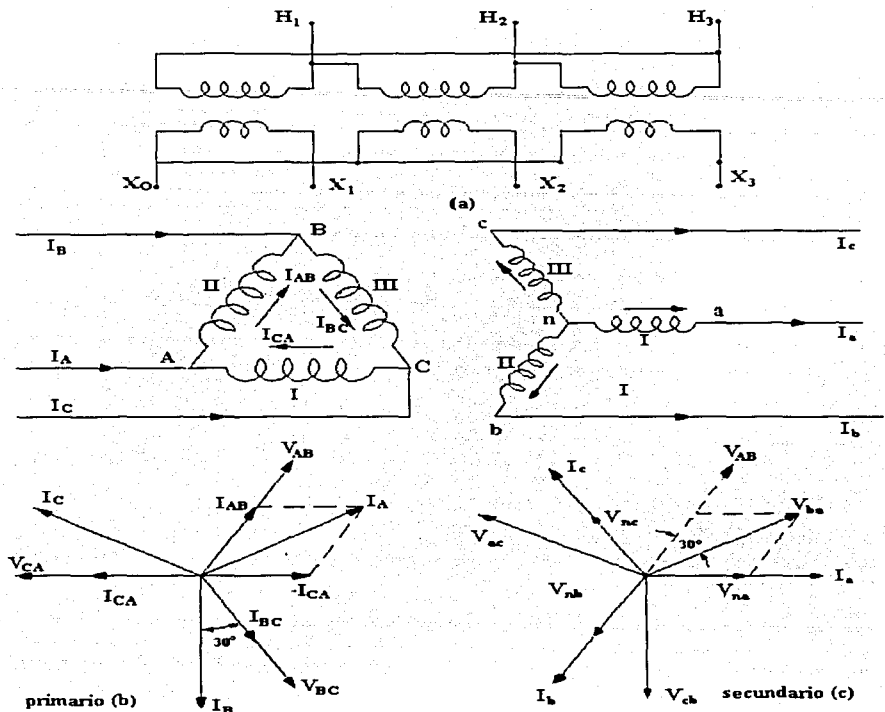


Figura 4.12 Conexión delta - estrella de transformadores: (a) esquema eléctrico, (b) y (c) diagramas vectoriales.

Los diagramas vectoriales del secundario de la figura 4.12(b) y (c) no aparecerán coherentes con los de la figura 4.10 a menos que se hagan girar  $180^\circ$ , causando de este modo que  $V_{ba}$  esté defasada ( $180^\circ + 30^\circ$ ) con respecto a  $V_{AB}$ . Esto es debido completamente a las direcciones arbitrarias asumidas como positivas en la dirección de las corrientes en estrella.

Si expresamos matemáticamente lo anterior, tenemos para la conexión  $\Delta - Y$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}}{\sqrt{3}V_{FS}}; \text{ pero } \frac{V_{FP}}{V_{FS}} = a$$

Entonces

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{a}{\sqrt{3}} \text{-----} (4.3)$$

#### IV.7.4 Conexión estrella - delta.

Esta conexión es muy similar a la conexión  $\Delta - Y$ . Aparece un defasamiento de  $30^\circ$  en las tensiones de línea entre el primario y el secundario, y las corrientes de tercera armónica fluyen en la  $\Delta$  para proporcionar un flujo senoidal. La relación entre las tensiones primarias y secundarias es  $\sqrt{3}$  veces la relación de espiras del transformador. Cuando funciona en  $Y-\Delta$ , se acostumbra y es conveniente conectar a tierra el neutro primario, conectándolo de este modo en 4 hilos.

La figura 4.13 muestra la conexión  $Y - \Delta$  de transformadores trifásicos. En esta conexión las tensiones primarias de línea y de fase cumplen la relación  $V_{LP} = \sqrt{3}V_{FP}$ , mientras que las tensiones secundarias de línea y de fase son iguales  $V_{LS} = V_{FS}$ . La relación de tensiones en fase es:

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

Así que la relación entre las tensiones de línea del primario y del secundario queda como:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{FP}}{V_{FS}}$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \sqrt{3}a \text{-----} (4.4)$$

En la conexión  $Y-\Delta$  no existen problemas con los componentes de tercera armónica de tensión, puesto que éstos se consumen en corriente circulante en el lado conectado en triángulo.

La conexión también es más estable bajo carga desbalanceada, ya que la delta redistribuye parcialmente cualquier desequilibrio que se presente.

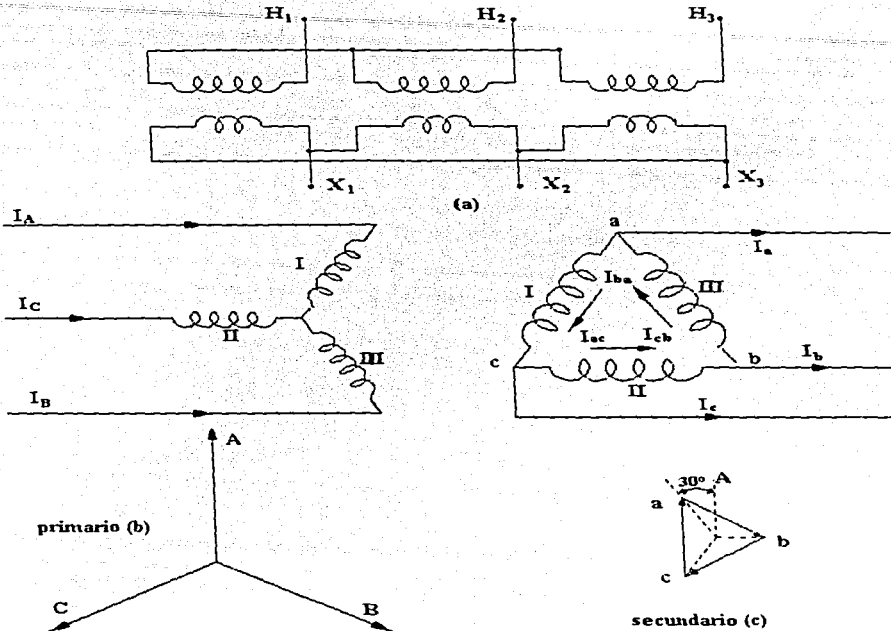
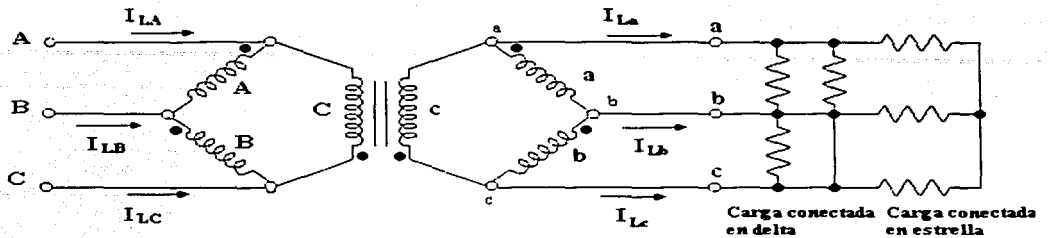


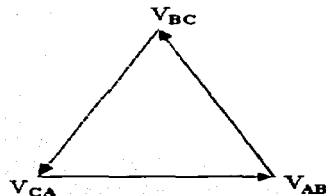
Figura 4.13 Conexión estrella - delta de transformadores: (a) esquema eléctrico, (b) y (c) diagramas vectoriales.

#### IV.8 TRANSFORMACIÓN TRIFÁSICA MEDIANTE DOS TRANSFORMADORES.

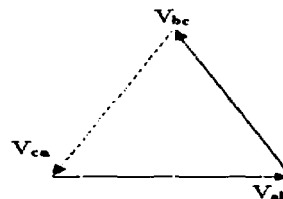
Además de las conexiones trifásicas normales de transformadores, existen otras formas de lograr transformación trifásica con solo dos transformadores. Todas las técnicas para lograrlo involucran una reducción en la capacidad de carga de los transformadores, pero algunas veces pueden justificarse económicamente hablando.



(a) La eliminación de un transformador de un sistema delta-delta produce un banco de transformadores V-V



(b) Tensión de línea aplicadas al primario V-V



(c) Tensiones secundarias de línea producidos por un banco de transformadores V-V

Figura 4.14 Banco de transformadores en delta abierta o V-V y relaciones fasoriales.

#### IV.8.1 Conexión delta abierta (V - V)

Si se daña el primario o el secundario de un transformador en un sistema delta - delta, o se abre en forma accidental, el sistema seguirá entregando energía a una carga trifásica. Si el transformador averiado se desconecta y se saca, como se ve en la figura 4.14a, al banco de transformadores que resulta se le llama sistema de delta abierta, ó V-V. El sistema continúa suministrando potencia trifásica a cargas conectadas en delta y en estrella sin cambio alguno de tensión por los motivos que se muestran en las figuras 4.14(b) y 4.14(c). La figura 4.14(b) muestra las relaciones vectoriales para las tensiones de trifásicas de línea aplicadas a los primarios del sistema V-V. Las relaciones vectoriales para las tensiones de fase y de línea que se inducen en los dos secundarios se muestran en la figura 4.14(c). Obsérvese que las tensiones de fase y de línea son los mismos.  $V_{ab}$  es la tensión de la que se induce en la bobina a la del secundario del transformador.  $V_{bc}$  es la tensión que se induce en la

bobina b del transformador. La suma vectorial de  $V_{ab} + V_{bc}$  produce  $V_{ca}$ , como se muestra en la figura 4.14(a) y 4.14(c). En consecuencia, se siguen produciendo tres tensiones de línea a  $120^\circ$  de distancia, en el sistema V-V.

Los volt-amperes que suministra cada transformador en un sistema V - V no es la mitad de los volt-amperes originales, sino más bien el 57.7 %. Ello se demuestra a continuación

Puesto que cada transformador en V - V entrega ahora corriente de línea y no de fase, los volt-amperes que suministra cada transformación en delta abierta, en comparación con los volt-amperes trifásicos totales son:

$$\frac{\text{VA por transformador}}{\text{Potencia } 3\phi \text{ total}} = \frac{V_F I_F}{\sqrt{3} V_L I_L} = \frac{V_L I_L}{\sqrt{3} V_L I_L} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.5774 \text{ ---- (4.5)}$$

La ecuación demuestra también que si tres transformadores en delta-delta entregan la potencia nominal y si se saca uno de ellos, la sobrecarga en cada uno de los dos que quedan es de 1.73 %, ya que el recíproco de la ecuación es la relación de la carga total a la carga por transformador.

Finalmente, esta relación implica también que si dos transformadores se trabajan en V - V y se cargan a la capacidad nominal, la adición de un tercer transformador aumenta la capacidad total en 173.2 %, o sea, en el factor  $\sqrt{3}$ . Así, con un aumento del 50 por ciento en el costo de un tercer transformador, la capacidad del sistema se eleva 73.2 por ciento y se convierte un sistema V - V en una delta - delta. Esto explica el porqué de algunas compañías eléctricas anticipándose a un incremento lento de las necesidades de energía de alguna zona determinada, pueden instalar un sistema V - V, para instalar un tercer transformador cuando surja la necesidad.

#### IV.8.2 Conexión T - T

Al igual que la transformación V-V, es posible emplear solo dos transformadores para dar una transformación trifásica si se conectan en T-T, Sin embargo, a diferencia del sistema V-V, el nombre del sistema T-T necesita de dos transformadores especiales, distintos entre sí. Como el sistema V-V, el nombre del sistema T-T se deriva de la apariencia de sus conexiones, como se ve en la figura 4.15(a).

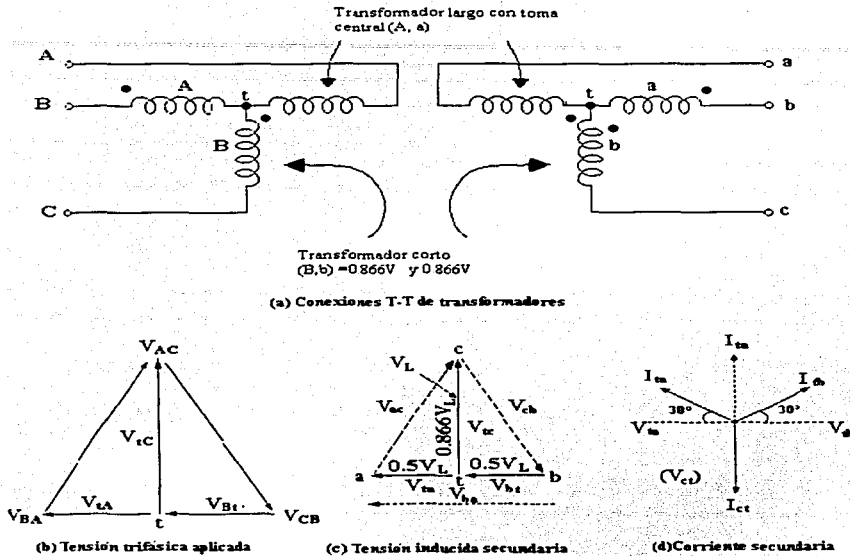


Figura 4.15 Conexiones de transformadores en T-T y relaciones de fase.

Los transformadores especiales que se necesitan para la conexión T-T son de un transformador, al que llamaremos transformador corto, por ser el que maneja menor tensión en el lado de alta tensión (A.T.), cuyas tensiones nominales primario y secundario son 0.866, o sea, el 86.6 por ciento de las tensiones nominales del primario y secundario del transformador largo o principal (A,a). El transformador principal es uno con dos salidas a la mitad de los devanados, o bien uno de varios devanados, que tiene dos devanados iguales primarios y secundarios cuya capacidad de tensión total del transformador conectado en serie es 1.15 veces, o sea, el 115 por ciento de las tensiones del primario y el secundario del transformador corto, respectivamente.

Las tensiones trifásicas que se aplican al primario de la T,  $V_{AC}$ ,  $V_{CA}$ , y  $V_{BA}$  se descomponen en  $V_{Bt}$ ,  $V_{Ta}$  y  $V_{Ct}$  para las polaridades instantáneas que se muestran, como se ve en la figura 4.15(b), en la que t es la unión o empalme entre el

transformador corto y la salida central del principal en la figura 4.15(a). las tensiones secundarias inducidas están en fase con los componentes que se indican para la tensión aplicada y se representan como vectores de línea llena en la figura 4.15(c).

Como se puede ver en la figura 4.15(c), la tensión de línea  $V_{bc}$  es la suma vectorial de  $V_{bt} + V_{tc}$ . Dado que  $V_{bt}$  es  $0.5 V_L$ , siendo  $V_L$  la tensión secundaria de la línea y  $V_{tc}$  es  $0.866 V_L$ , que es la tensión nominal del secundario del transformador corto, entonces:

$$V_{bc} = V_{bt} + V_{tc} \text{----(4.6)}$$

$$= 0.5 V_L + j0.0866V_L = V_L \text{ la tensión secundaria de línea.----(4.7)}$$

igualmente, como se muestra en la figura 4.15(c), la tensión de línea  $V_{ac}$  es:

$$\begin{aligned} V_{ac} &= V_{at} + V_{tc} = 0.5 V_L + j0.0866V_L \\ &= V_L \text{ la tensión secundaria de línea. ----(4.8)} \end{aligned}$$

Y la tensión de la línea  $V_{ba}$  es:

$$V_{ba} = V_{bt} + V_{ta} = -0.5 V_L + 0.5 V_L = V_L \text{----(4.9)}$$

Puesto que las tres tensiones secundarias de la línea que se muestran en la figura 4.15(c) son iguales (a  $V_L$ ), están en triángulo equilátero separados a  $60^\circ$ , y su relación fasorial es de  $120^\circ$  con lo cual producen una verdadera transformación trifásica de las tensiones originales de línea que se aplican al primario.

Las relaciones vectoriales entre corrientes y tensiones para el transformador principal, con salidas al centro, y el transformador corto respectivamente, se muestran en la figura 4.15(d). La suma vectorial de las corrientes es cero, como lo es en cualquier sistema trifásico verdadero. Sin embargo, obsérvese que la corriente en el transformador corto  $I_{tc}$  está en fase, a factor de potencia unitario, con su tensión  $V_{tc}$ . Pero también adviértase que las corrientes en el transformador principal preceden o están retrasadas  $30^\circ$  con respecto a sus tensiones de fase componentes. Esas relaciones de corriente explican el siguiente modo de la capacidad de ambos transformadores.

La carga total que suministra el transformador principal es:

$$\begin{aligned}
 VA_{\text{largo}} &= V_{\text{ta}} I_{\text{ta}} \cos 30^\circ + V_{\text{tb}} I_{\text{tb}} \cos 30^\circ \\
 &= 0.5 V_L I_L \cos 30 + 0.5 V_L I_L \cos 30 \\
 &= V_L I_L \cos 30 = 0.866 V_L I_L \text{ -----(4.10)}
 \end{aligned}$$

En las cuales  $V_L$  e  $I_L$  son las tensiones y corrientes secundarias de línea, respectivamente. Aunque la corriente de fase y de línea del transformador corto está en fase con su tensión respectiva de línea, también ese transformador disminuye su capacidad debido a que sus devanados están diseñados para  $0.866 V_L$  y por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 VA_{\text{corto}} &= V_{\text{ct}} I_{\text{ct}} = (0.866 V_L) I_L \\
 &= 0.866 V_L I_L \text{ -----(4.11)}
 \end{aligned}$$

como en el caso de dos transformadores en V-V, el transformador corto y el principal tienden cada uno la mitad de la carga total trifásica, ya que

$$VA_{\text{total}} = VA_{\text{largo}} + VA_{\text{corto}} \text{ -----(4.12)}$$

$$\sqrt{3} V_L I_L = \frac{\sqrt{3}}{2} V_L I_L + \frac{\sqrt{3}}{2} V_L I_L = 0.866 V_L I_L + 0.866 V_L I_L$$

Para transformaciones trifásicas las ecuaciones anteriores indican que no se tiene ventaja si se usa un banco T-T en comparación de una V-V, por varias razones. Un banco T-T necesita de transformadores especiales, más costosos, y de un arreglo especial de conexiones. El banco V-V se presta fácilmente a la adición del tercer transformador y cada transformador es uno convencional monofásico. Así, si se usan transformadores en T-T es difícil agregar un tercer transformador para obtener un banco delta-delta porque el transformador corto sólo tiene capacidad para  $0.866 V_L$ .

También se puede mostrar que el factor de disminución de capacidad para los transformadores en T-T y V-V es en realidad el mismo y que no se gana ventaja alguna, por lo tanto, mediante el empleo de transformadores T-T. La relación de la capacidad de carga del banco V-V por transformador a la carga total que cada transformador puede suministrar, si ambos se usan como transformadores conectados en una fase, es:

$$\frac{\text{kVA en V-V}}{2 \times (\text{kVA monofásico s})} \text{, o sea, } \frac{\sqrt{3} \text{kVA}}{2 \text{Kva}} = 0.866.$$



Este factor es exactamente el mismo que se tiene para cada transformador en arreglo T-T, como se ve en las ecuaciones 4.11 y 4.12.

Por estas razones, se usa poco el banco de transformadores T-T, excepto como introducción a la conexión Scott.

Al igual que los transformadores V-V, estrella-estrella y delta-delta, los transformadores T-T como se ve en la figura 4.15(b) y 4.15(c), no producen desplazamientos de fase, entre el primario y el secundario. Por lo tanto, se puede conectar el paralelo con cualquiera de los transformadores que no tengan ese corrimiento de fase, siempre que las tensiones primarias y secundarias sean las mismas y que se conserve la misma polaridad instantánea, como se muestra en la tabla 4.1

**Tabla 4.1 Tipos de transformadores trifásicos que se pueden conectar en paralelo**

Columna A (desplazamiento de fase = 0°)	Columna A (desplazamiento de fase = 30°)
Y - Y	
Δ - Δ	Δ - Y
T - T	Δ - Y
V - V	

Según la tabla 4.1, se puede conectar un transformador T-T en paralelo con un sistema V-V, con uno estrella-estrella o uno delta-delta, pero no con uno delta-estrella o estrella-delta. Así, cualquier transformador de la columna A se puede conectar en paralelo consigo mismo o con otro de esa columna. Igualmente, cualquier transformador de la columna B se puede conectar en paralelo con una combinación idéntica así mismo o a otra de la columna B. Ya que en ambos casos se produce un corrimiento de fase igual a 30°.

Ninguna de las combinaciones de transformadores de la columna A se puede conectar en paralelo con alguna de la columna B; en ninguna circunstancia, porque estas últimas producen un desplazamiento de fase de 30° entre las tensiones primarias y secundarias.

#### IV.9 CONEXIÓN SCOTT A TRANSFORMACIONES DE 3 A 2 FASES Y VICEVERSA

Cualquier sistema polifásico se puede transformar, empleando combinaciones o transformadores adecuados, a otro sistema polifásico. Dado un suministro trifásico es posible obtener cualquier sistema polifásico, desde con dos fases hasta con 24 fases o más. Se desea el empleo de transformadores debido a su eficiencia de conversión que es extremadamente alta.

El diagrama vectorial de la figura 4.15(c) que muestra las tensiones de fase que se inducen en los secundarios de los transformadores T-T sugiere que hay una relación de cuadratura entre los dos vectores. Esta es la misma relación que existe en los sistemas bifásicos y tetrafásicos. Ambas transformaciones se llevan a cabo empleando la llamada conexión Scott.

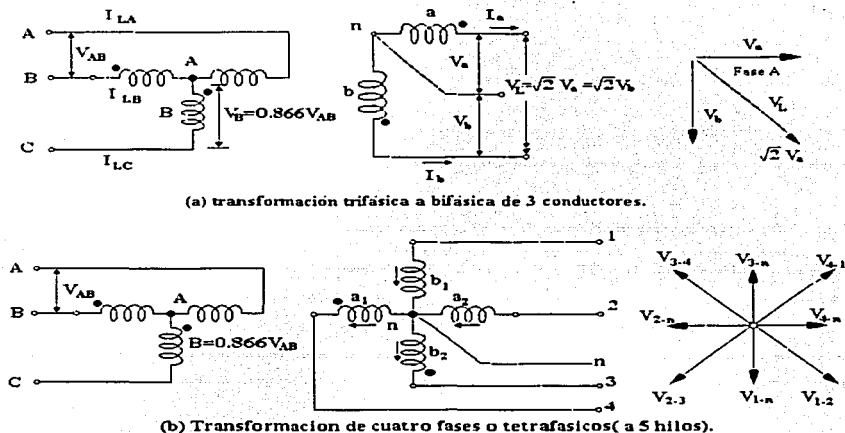


Figura 4.16 Conexiones Scott para transformaciones bifásica y de 4 fases a partir de suministro trifásico.

Al igual que la conexión T-T, se necesitan dos transformadores con salidas especiales. El transformador principal, que se muestra en la figura 4.16(a), tiene el primario con una salida al centro, o bien dos devanados conectados en serie. El transformador corto tiene una capacidad de tensión igual a  $\sqrt{3}/2$ , o sea, 0.866, de la

tensión nominal del transformador principal. Los secundarios de ambos transformadores tienen iguales tensiones nominales y pueden tener salidas centrales, sólo para cuatro fases, como se muestra en la figura 4.16(b).

Se produce un sistema de dos fases y tres conductores, o alambres, si se conectan las salidas de los transformadores y se saca un conductor neutro de esta unión, como se ve en la figura 4.16(a). Si se sacan las cuatro puntas de los dos transformadores (sin conexión alguna) se produce un sistema de dos fases y cuatro conductores. El diagrama vectorial de la figura 6.16a comprueba la relación entre las tensiones de fase y línea de un sistema bifásico, empleando la polaridad instantánea de los transformadores, tal como se indica. La tensión entre línea es:

$$V_L = \sqrt{2} V_F = \sqrt{2} V_a = \sqrt{2} V_b \text{----(4.13)}$$

Donde  $V_f$  es la tensión de fase, o la tensión inducida en uno de los transformadores  $V_a$  o  $V_b$ , figura 4.16(a).

Se obtiene un sistema bifásico de 5 conductores si se conectan las salidas centrales de los secundarios de los transformadores y se lleva un alambre neutro de esta conexión, como se ve en la figura 4.16(b). A este sistema se le llama de cuatro fases ( $4\phi$ ) y 5 conductores. Como se ve en el diagrama vectorial, produce cuatro tensiones de línea y cuatro tensiones de fase (de cualquier conductor al neutro). Las cuatro tensiones de línea están desplazadas  $90^\circ$  entre sí, y lo mismo sucede con las cuatro tensiones de fase. Las tensiones de línea son la suma vectorial de cualesquiera de las dos tensiones de fase y conserva la misma relación que se dio en la ecuación, o sea,  $V_L = \sqrt{2} V_F$ .

Se usa la conexión Scott para producir potencia trifásica a partir de alimentadores bifásicos, o al revés, en cantidades bastante grandes como para hacer trabajar motores y demás equipo polifásico a su tensión nominal. Así, una habitación que tenga servicio bifásico de tres conductores, de 155/110 V puede emplear fácilmente motores de inducción de jaula trifásicos para 440 V con relativa poca pérdida de energía, con una transformación de Scott de dos a tres fases. Como alternativa entre comprar un motor especial o nuevo en lugar de un que sea fácilmente asequible, más el costo de los transformadores, la última es normalmente menos cara, ya que los transformadores son menos costosos que las máquinas rotatorias de la misma potencia en KVA.

Las relaciones de tensión y corriente para la conexión Scott se obtiene suponiendo primero eficiencia unidad y relaciones de transformación unidad. Así, en la figura 4.16(a),

KVA de salida en  $2\phi$  = KVA de entrada en  $3\phi$

O sea

$$2V_a I_a = \sqrt{3} V_L I_L$$

Pero la relación de transformación unidad,  $V_L/V_a=1$ , y

$$2I_a = \sqrt{3} I_L$$

Dando cada una de las corrientes bifásicas ( $I_a$ ,  $I_b$ ) a la salida como:

$$I_a = I_b = \frac{\sqrt{3}}{2} I_L$$

Para la relación de transformación unidad.

De acuerdo con los amperes-vueltas de la carga de cualquier secundario de transformador deben ser iguales a los amperes-vueltas del primario, despreciando la corriente de magnetización, podemos escribir:

$$I_a N_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} I_L N_1$$

Ya que la relación de transformación  $a$  es  $N_1/N_2$  y la eficiencia es  $\eta$ , podemos escribir:

$$I_a = \frac{\sqrt{3}}{2} I_L a \eta = I_b \text{ para transformación de } 3\phi \text{ a } 2\phi \text{ ----- (4.14a)}$$

e

$$I_a = \frac{\sqrt{3} I_L}{2a\eta} = I_b \text{ para transformación de } 2\phi \text{ a } 3\phi \text{ ----- (4.14b)}$$

En donde:

- $I_a$  e  $I_b$ : son las corrientes de línea bifásicas.
- $I_L$ : es la corriente trifásica balanceada.
- $A$ : es la relación de transformación del primario al secundario.
- $\eta$ : es la eficiencia de los transformadores.

#### **IV.9.1 Transformación multifásica**

Es posible convertir de bifásica a cualquier número de fases mediante circuitos especiales de transformadores. Por ejemplo se crea corriente tetrafásica simétrica a partir de la Scott. Se adopta la conexión de cuatro cables y luego se conectan los centros de ambos secundarios. En este caso, se extrae un quinto cable o punto de estrella de este empalme de secundarios.

Existe un uso significativo de energía eléctrica hexafásica e incluso dodecafásica cuando se desean grandes cantidades de corriente directa. La energía eléctrica con mayor número de fases tiene significativamente menos fluctuación cuando se rectifica.

#### **IV.10 ARMÓNICAS EN TRANSFORMADORES.**

Siempre que se conecten en una malla tres transformadores monofásicos, o los secundarios de un transformador trifásico o polifásico de 6 fases, se usa un voltímetro como medida de precaución antes de cerrar la delta. Con frecuencia cuando se hace lo anterior, ya sea en el laboratorio o en el campo, el voltímetro no indica cero, ni indica una tensión como el doble de la tensión de fase. Sin embargo, hay reluctancia al cerrar el circuito de malla, en especial cuando la tensión puede ser alta y cuando se usa un voltímetro electrónico de alta impedancia. Como sabemos, la tensión se debe a una componente de tercera armónica (a  $90^\circ$ ) relativamente alto, que este presente en casi todos los transformadores comerciales de potencia, con excepción de los que tienen devanados terciarios o que son transformadores trifásicos tipo núcleo.

Todos los transformadores monofásicos, cuando se excitan a la tensión nominal, producen una tercera armónica. Esto se debe a que la curva de saturación de los núcleos de los transformadores comerciales aumenta abruptamente y se satura con rapidez, haciendo que la corriente de magnetización se distorsione. Así, una tensión puramente senoidal a una frecuencia fundamental produce una corriente de magnetización que contienen frecuencia fundamental más un componente grande de tercera armónica. En los transformadores monofásicos, la corriente de magnetización es pequeña en comparación con la corriente de carga y la onda de corriente que resulta, solo está ligeramente distorsionada. En consecuencia, en lo relativo a la operación monofásica, las armónicas apenas se notan y no constituyen un problema.

#### **IV.10.1 Armónicas en transformadores conectados en red.**

Quando se conectan tres transformadores monofásicos en delta o seis monofásicos en red, se observa una tensión debido a las armónicas antes de cerrar la malla. En un transformador trifásico, la segunda fase, digamos la fase B, está desplazada  $120^\circ$  con respecto a la fase de referencia, digamos a la fase A. La armónica de la fase B está desplazada  $3 \times 120^\circ$  o  $360^\circ$  con respecto a la fase A de referencia. Igualmente, la tercera armónica en la tercera fase (fase C) está desplazada  $240^\circ$  o  $720^\circ$  con respecto a la fase A de referencia. Así, es obvio que todas las terceras armónicas que se generan estén en fase entre sí y en fase con sus fundamentales respectivas. Esto explica también por qué la tensión de malla que se mide no es cero antes de cerrar dicha malla.

Pero cuando se cierra la malla, o se conecta un resistor entre sus terminales abiertas, la malla cerrada sirve como "trampa" para las corrientes armónicas. Todas las armónicas impares que se generan por la corriente de excitación del transformador se suman entre sí y forman corrientes de circulación alrededor de la delta, como lo hacen las corrientes fundamentales normales de fases en la delta. Si bien es cierto que la corriente adicional circulante que crean las armónicas se suma a las pérdidas óhmicas de potencia de los transformadores, la conexión en delta o en malla tienen la ventaja, en los sistemas delta-estrella de mantener el neutro en el centro geométrico de las tensiones de fase y de línea de la estrella del secundario.

#### **IV.10.2 Armónicas en transformadores conectados en estrella (Y)**

En los transformadores conectados en estrella no aterrizada, se suman entre sí las terceras armónicas y armónicas de órdenes impares, y tienden a forzar el neutro para sacarlo de su centro geométrico. Esto ocasiona un desequilibrio de las tensiones secundarias, tanto de fase como de línea. Además, como no hay trayectoria cerrada para las armónicas tanto el primario como el secundario de un transformador conectado en estrella-estrella, las ondas de tensión de salida también se distorsionan. Por este motivo, prácticamente nunca se usan

conexiones en estrella sin aterrizar en transmisión y distribución de potencia.

El neutro se mantiene en su centro geométrico si simplemente se conecta a tierra ya sea en el primario o en el secundario, o en ambos. Con ello se tiene un circuito cerrado para cualquier corriente desbalanceada, o corrientes armónicas al conductor neutro, como se muestra en la figura 4.17. Podemos considerar que esta figura es un esquema genérico que cumple cada situación de conexión a tierra. Por ejemplo, en la transformación estrella-delta, el neutro del primario del transformador se conecta con el neutro de la fuente, y con ello se suprimen las armónicas. En una transformación delta-estrella, el neutro del secundario, como se ve en la mitad derecha de la figura 4.17, se conecta ya sea con el neutro de una carga conectada en delta, o el neutro de una conectada en estrella, figura 4.18a. Cuando se usa la transformación delta-delta, no es necesario neutro alguno porque la conexión de la malla constituye trayectoria cerrada para las armónicas del transformador.

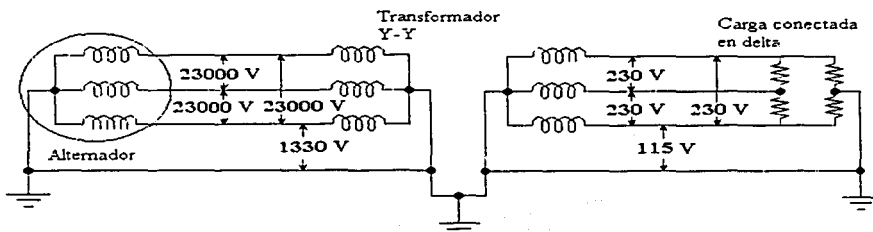


Figura 4.17 Alternador que suministra a un transformador estrella-estrella (Y-Y) con carga conectada en delta.

#### IV.11 Supresión de armónicas en transformadores con devanados terciarios.

En décadas recientes se han fabricado grandes transformadores para sistemas tanto de transmisión como de distribución de potencia con un tercer juego de devanados, aparte del primario y el secundario, a los que se les llama devanados terciarios. Esos devanados se emplean para suministrar potencia auxiliar para la subestación o para distribución local de potencia.

En algunas aplicaciones también se conectan ya sean capacitores sincronos o capacitores fijos de alta tensión a través de la salida, conectada en delta, de los devanados terciarios tanto para corrección de factor de potencia, como para regulación o ambas cosas. Pero la ventaja principal del uso de transformadores con devanado terciario es que la conexión en delta suprime cualquier tensión de armónicas que se puede generar en los primarios y secundarios conectados en estrella, de los transformadores de transmisión y distribución.

Se puede demostrar que los devanados terciarios conectados en delta tienden a actuar como sistema de control automático con retroalimentación. En el caso de corrientes de carga desbalanceadas en el secundario, que se refleja como corrientes desbalanceadas en el primario, se establece una mayor corriente de circulación en los devanados terciarios. Esto tiende a restablecer las tensiones de fase tanto del secundario como en el primario a sus magnitudes y ángulos normales de fase y con ello se reducen los desequilibrios en el secundario y en el primario.

Los transformadores de devanado terciario se fabrican en la actualidad con capacidades de MVA o kVA que llegan hasta el 35 por ciento de la capacidad total del transformador, sea de transmisión o distribución. El único transformador que nunca se fabrica con devanados terciarios en el trifásico tipo acorazado o de núcleo, que emplea laminaciones en forma de E. En este diseño, la suma de los flujos trifásicos siempre da cero en la columna del centro. El resultado es que no se generan terceras armónicas debido al flujo del transformador. Ya que no se producen terceras armónicas en este tipo de transformador puede incluso trabajar como transformador estrella-estrella sin el empleo de devanados terciarios. Es necesario decir que cuando se conecta ya sea en el primario o el secundario en delta no se tiene problemas con armónicas o de desequilibrio, aun cuando se usen tres transformadores monofásicos sin devanados terciarios.

#### **IV.12      IMPORTANCIA      DEL      NEUTRO      EN      TRANSFORMACIONES TRIFÁSICAS.**

El neutro es fundamental para la supresión de armónicas en sistemas estrella-estrella. Pero, además de esa función, en sistemas estrella-esrella, estrella-delta o delta-estrella, y

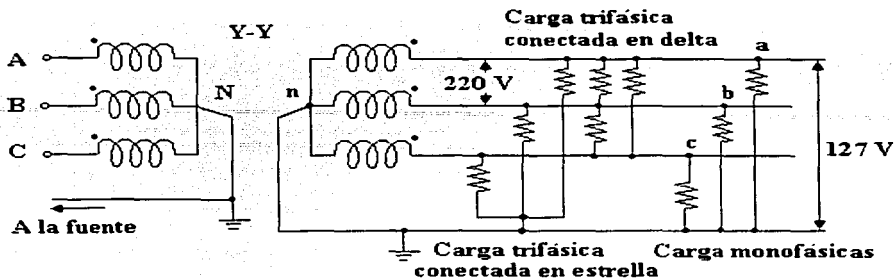


aun en algunos delta-delta, el neutro también da las siguientes ventajas:

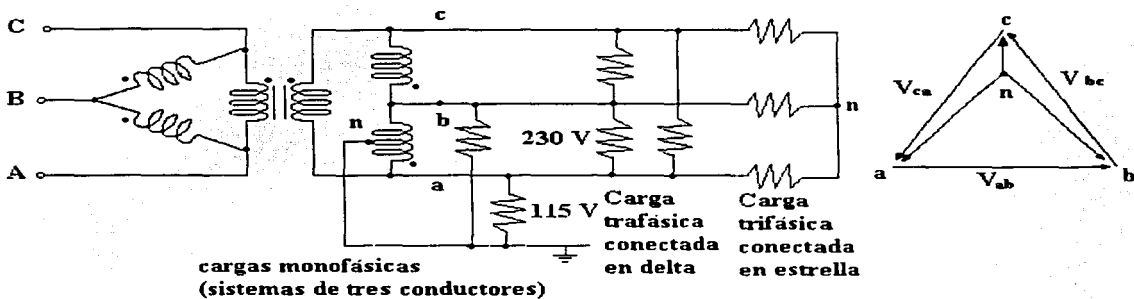
- Es una trayectoria para las corrientes de desequilibrio debidas a cargas desbalanceadas.
- Es un medio por el cual se puede suministrar servicio eléctrico dual: tanto de tensión trifásica mayor para mayores cargas de potencia o motores, como menor de una fase para cargas de alumbrado y de aplicaciones domesticas.
- Es un medio por el que las tensiones de fase, a través de cargas o transformadores conectados en estrella, se balancean con respecto a las tensiones de línea.

En la figura 4.18(a), se muestra un transformador estrella-estrella. El neutro de la fuente (un alternador o un transformador de mayor tensión) se conecta con el neutro de los primarios y secundarios del transformador y también se conecta con las cargas. Una carga trifásica conectada en estrella se conecta con el neutro para que cualquier desbalanceo de corrientes de fase no desequilibre las tensiones de fase. Las cargas trifásicas en delta se conectan entre los conductores a-b, b-c y c-a como se ve en la figura 4.18(a). las cargas monofásicas se conectan de una fase al neutro, como se muestra. Adviértase que, para un secundario en estrella la tensión monofásica es  $V_L\sqrt{3}$ , o sea,  $0.577 V_L$  de acuerdo con la teoría de circuitos trifásicos. Así, si las tensiones secundarias de línea  $V_L$  son 220 V, las tensiones secundarias de fase  $V_F$ , entre cualquier fase o línea y el neutro, es 127 V. Cualquier línea de un secundario conectado en estrella pueden dar tensiones monofásicas al neutro.

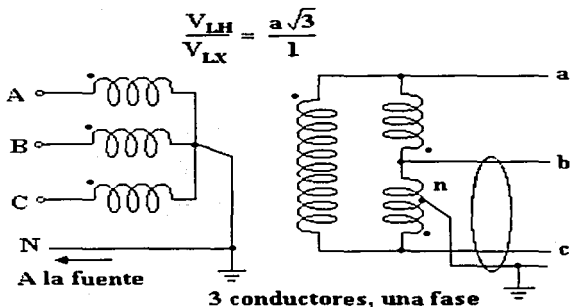
En la figura 4.18(b) se muestra una trayectoria delta-delta. Sólo un secundario puede conectar a tierra desde su centro. El primario nunca se aterriza debido a que con ello se pondría en corto el transformador con la fuente. El secundario con salida central da tensiones monofásicas que son la mitad de las tensiones de línea ( $V_L/2$ ). Obsérvese que las cargas trifásicas conectadas tanto en delta como en estrella se pueden conectar con el secundario de un transformador en delta.



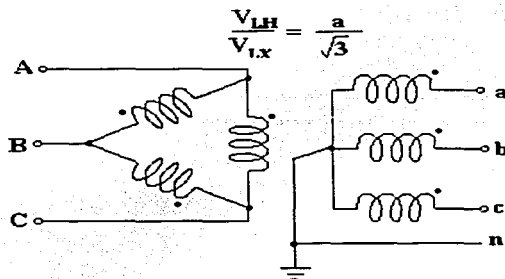
(a) Transformación Y-Y con cargas conectadas en estrella, en delta y carga monofásica



(b) Transformación delta-delta con cargas conectadas en estrella y en delta



(c) Transformación estrella-delta



(d) Transformación delta-estrella

FIGURA 4.18 Cargas monofásicas y trifásicas con neutro en varias transformaciones.

Sin embargo, si la carga trifásica conectada en estrella está desbalanceada, las corrientes desbalanceadas producen tensiones de fase desbalanceadas como se muestra en el diagrama vectorial de la figura 4.18(b). Además, si las cargas monofásicas están desbalanceadas, se produce un desequilibrio de tensiones monofásicas debido a la caída en la línea de transmisión de tres conductores. Así, la conexión neutra "flotante" de una transmisión delta-delta, con cargas conectadas en estrella con un neutro común, no evita el desequilibrio de tensión trifásica o monofásica.

En la figura 4.18© se muestra una transformación estrella-delta. Obsérvese que el neutro del primero está conectado a tierra con la fuente para suprimir las armónicas de éste. Se tiene un sistema monofásico de tres conductores por medio de un neutro sacado al centro entre las líneas b y c. Las líneas a, b y c pueden abastecer a cargas conectadas en estrella y en delta. Los sistemas estrella-delta son los que más se usan en los sistemas de distribución para bajadas de tensión, por que los transformadores primarios sólo necesitan estar aislados para la tensión de fase y no el de línea. Así, la tensión nominal primaria de los transformadores que se necesita para la transformación de 23000/230V, con configuración estrella-delta que se muestra en la figura 4.18(c), sólo es de 13300 V. Esa reducción de tensión conlleva un ahorro considerable en los costos de fabricación de los transformadores de alta tensión.

Igualmente, la transformación delta-estrella que se ve en la figura 4.18(d) se presta a transmisión de alta tensión porque una mayor tensión secundaria de línea en comparación con la capacidad de tensión del secundario del transformador. Así, se puede tener transmisión de 230/23000 V con transformadores cuyos devanados secundarios pueden resistir sólo 13300 V. Nótese en la figura 4.18(d) que se necesita un neutro en el secundario para suprimir las armónicas y dar el neutro necesario para los sistemas estrella-estrella.

Se hizo notar que los sistemas estrella-delta y delta-delta que se muestran en las figuras 4.18(d) y 4.18(c), respectivamente, sólo permiten que una fase de sus secundarios conectados en delta se conecte al centro con la tierra. La salida central y conexión a tierra de cualquier otro secundario conectado en delta pondría en corto al transformador.

#### IV.13 EL SISTEMA POR UNIDAD.

Los cálculos relacionados con máquinas, transformadores y sistemas de máquinas se llevan a cabo con frecuencia en la forma por unidad, es decir, con todas las cantidades pertinentes expresadas como fracciones decimales de cantidades pertinentes expresadas como fracciones decimales de valores base escogidos en forma adecuada. Todos los cálculos normales se lleva a cabo en estos valores por unidad, en lugar de los volts, amperes, ohms, etc., acostumbrados.

Hay dos ventajas de este sistema. Una es que las constantes de máquinas y transformadores quedan dentro de un rango numérico razonable estrecho cuando se expresan en un sistema por unidad relacionado con su capacidad. La corrección de sus valores se puede sujetar, por lo tanto, a una prueba aproximada y rápida. La otra ventaja es que se descarga al analista la molestia de referir las cantidades de los circuitos a uno u otro lado de los transformadores. Para sistemas complicados en los que intervengan muchos transformadores de distintas relaciones de vueltas, esta ventaja es apreciable porque se elimina una posible causa de fallas serias. El sistema por unidad también es útil para simular sistemas de máquinas en computadoras analógicas y digitales en análisis dinámicos y transitorios.

Se puede traducir las cantidades como tensión V; corriente I; potencia P; potencia reactiva Q; voltamperes VA; resistencia R; reactancia X; impedancia Z; conductancia G; susceptancia B y admitancia Y, a la forma por unidad y viceversa como sigue:

$$\text{Cantidad por unidad} = \frac{\text{cantidad real}}{\text{valor base de la cantidad}} \text{ ---- (4.15)}$$

En donde la "cantidad real" se refiere al valor en volts, amperes, ohms, etc. Hasta cierto punto, los valores base se pueden escoger en forma arbitraria, pero se deben seguir determinadas relaciones entre ellos para que sigan aplicándose las leyes eléctricas normales en el sistema por unidad. Así, para un sistema monofásico,

$$P_{\text{base}} \cdot Q_{\text{base}} \cdot VA_{\text{base}} = V_{\text{base}} I_{\text{base}} \text{ ---- (4.16)}$$

$$R_{\text{base}} \cdot X_{\text{base}} \cdot Z_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}}{I_{\text{base}}} \text{ ---- (4.17)}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Normalmente se escogen primero los valores de  $V_{A_{base}}$  y  $V_{base}$ ; con ello se establecen los valores de  $I_{base}$  y todas las demás cantidades en las ecuaciones y.

El valor de  $V_{A_{base}}$  debe ser el mismo en todo el sistema de que se trate. Cuando se encuentre un transformador, los valores de  $V_{base}$  son distintos en cada lado y deben estar en la misma relación de vueltas del transformador. Normalmente se escogen las tensiones nominales de los lados respectivos del transformador. Con ello se tiene en cuenta en forma automática el proceso de referir las cantidades a uno de los lados del transformador, usando las ecuaciones y para calcular e interpretar los valores por unidad.

Esto se puede ver refiriéndose al circuito equivalente del transformador monofásico. Si se escogen las tensiones base del primario y el secundario de modo que estén en relación de las vueltas de un transformador ideal, el transformador ideal por unidad tendrá una relación de vueltas igual a la unidad y por lo tanto se puede eliminar. El procedimiento llega a ser entonces el de traducir todas las cantidades a los valores por unidad, empleando estos valores en todas las técnicas normales de análisis de circuitos, y trasladando (o traduciendo) los resultados finales de nuevo a las formas más usuales.

Cuando sólo está implicado un dispositivo eléctrico, como por ejemplo un transformador, se usa en general la capacidad propia del dispositivo como base de voltamperes. Cuando se expresa en forma por unidad teniendo la capacidad nominal como base, las características de los transformadores de potencia y distribución no varían mucho en amplio rango de capacidades. Por ejemplo, la corriente de excitación queda en general entre 0.02 y 0.06 por unidad, a resistencia equivalente está entre 0.0005 y 0.02 por unidad, aplicándose los valores más pequeños a los transformadores grandes, y la reactancia equivalente está en general entre 0.015 y 0.10 por unidad, aplicándose los valores mayores a los transformadores grandes de alta tensión. Igualmente, los valores por unidad de las constantes de máquinas síncronas y de inducción caen dentro de un margen relativamente estrecho. Sin embargo, cuando intervienen varios dispositivos, se aconseja escoger arbitrariamente un valor de base de voltsamperes de modo que la misma base se use para todo el sistema. los valores por unidad (pu) se pueden cambiar de una a otra base mediante las siguientes relaciones:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$(P, Q, VA)_{pu \text{ en base } 2} = (P, Q, VA)_{pu \text{ en base } 1} \frac{VA_{base 1}}{VA_{base 2}} \text{-----} (4.18)$$

$$(R, X, Z)_{pu \text{ en base } 2} = (R, X, Z)_{pu \text{ en base } 1} \frac{(VA_{base 1})^2 VA_{base 1}}{(VA_{base 2})^2 VA_{base 2}} \text{-----} (4.19)$$

$$V_{pu \text{ en base } 2} = V_{pu \text{ en base } 1} \frac{VA_{base 1}}{VA_{base 2}} \text{-----} (4.20)$$

$$I_{pu \text{ en base } 2} = I_{pu \text{ en base } 1} \frac{V_{base 2} VA_{base 1}}{V_{base 1} VA_{base 2}} \text{-----} (4.21)$$

Quando se aplican a problemas trifásicos, se escogen los valores base para el sistema por unidad de modo que se mantengan las relaciones entre ellos para un sistema trifásico balanceado:

$$(P_{base}, Q_{base}, VA_{base})_{3\text{-fase}} = 3VA_{base \text{ por fase}} \text{-----} (4.22)$$

$$V_{base, \text{ línea a línea}} = \sqrt{3} V_{base, \text{ línea a neutro}} \text{-----} (4.23)$$

$$I_{base, \text{ por fase } \Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{base, \text{ por fase } Y} \text{-----} (4.24)$$

Al tratar con sistemas trifásicos se escogen generalmente primero la base trifásica de VA y la tensión base de línea a línea. Los valores base para tensiones y corrientes por fase son consecuencia de las ecuaciones 4.22, 4.23 y 4.24. Se siguen aplicando las ecuaciones 4.18, 4.19, 4.20 y 4.21 a los valores base por fase. Por ejemplo el valor base para impedancias conectadas en estrella se obtiene de la ecuación 4.19, siendo  $V_{base}$  igual a la tensión base al neutro, e  $I_{base}$  es igual a la corriente base por fase en la estrella; el valor base para impedancias conectadas en delta también se obtiene con la ecuación 4.19, pero tomando a  $V_{base}$  como la tensión de línea base e  $I_{base}$  como la corriente base por fase en delta. Dividiendo la ecuación 4.23 entre la 4.24 se demuestra que:

$$Z_{base, \text{ por fase } \Delta} = 3Z_{base, \text{ por fase } Y} \text{-----} (4.25)$$

Los factores de  $\sqrt{3}$  y 3 que relacionan las cantidades delta y estrella en volts, amperes y ohms en un sistema trifásico

balanceado, se toman en cuenta automáticamente de esta forma en el sistema por unidad, mediante los valores base. Los problemas trifásicos se pueden resolver en los sistemas por unidad como si fueran problemas monofásicos sin poner atención a los detalles de las conexiones de los transformadores, excepto para traducir los valores de volt-ampere-ohm hacia y desde el sistema por unidad.

#### **IV.14 ACOPLAMIENTO DE TRANSFORMADORES EN PARALELO**

Cuando la potencia pedida a un transformador alcanza el límite de su potencia nominal en kilovolt-amperes (kVA), o cuando se hace necesario una ampliación de la instalación alimentada, se presenta el problema de una mayor demanda de potencia. Cambiar el transformador existente por otro de mayor demanda no siempre resulta lo más viable, entonces existe la alternativa de acoplar en paralelo el transformador preexistente con su segundo transformador.

Se dice que dos transformadores marchan en paralelo cuando se hayan conectado eléctricamente borne a borne en el lado del primario y en el lado del secundario, siempre que los transformadores estén alimentados por la misma red y sirvan a la misma instalación, figura 4.19

##### **IV.14.1 Consideraciones rigurosas para que sea posible la conexión en paralelo**

En el lado del secundario, los transformadores en paralelo funcionan como dos generadores en paralelo. Ahora bien, se sabe que dos generadores en paralelo deben tener las f.e.m's. sensiblemente iguales y del mismo sentido con relación a la red que alimentan, ya que si no es así, la impedancia de los mismos es tan pequeña que se establecerá entre ellos una corriente muy intensa y, por lo tanto, peligrosa.

En consecuencia, en sistemas polifásicos, será preciso que las tensiones compuestas entre los bornes correspondientes se encuentran en fase y sean iguales, al igual que la frecuencia del sistema (60 Hz ó 50 Hz). Esto conlleva a satisfacer condiciones técnicas y económicas importantes para que el funcionamiento en paralelo sea posible y se realice de modo practico:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

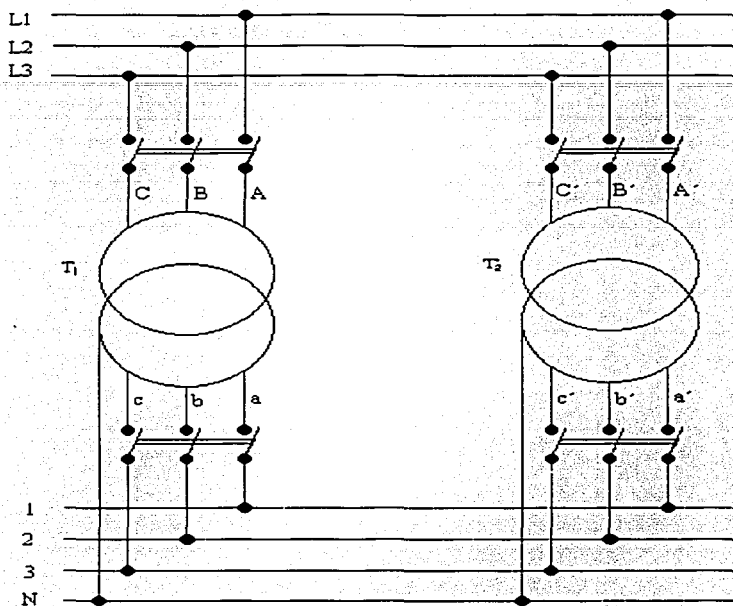


FIGURA 4.19 Esquema eléctrico de dos transformadores acoplados en paralelo

- Los desfases secundarios respecto al primario han de ser iguales para los transformadores que hayan de acoplarse en paralelo.
- El sentido de rotación de las fases secundarias ha de ser el mismo en todos ellos.
- Las relaciones de transformación entre las tensiones de línea han de ser idénticas (las tensiones nominales de los primarios y secundarios y, por consiguiente, las relaciones de vueltas, deben de ser idénticas).
- Las resistencias equivalentes y las reactancias equivalentes deben de tener la misma relación para evitar corrientes de circulación y la operación a distintos factores de potencia.



Las dos primeras condiciones son estrictamente necesarias: de no satisfacerse el acoplamiento es imposible; las dos últimas son necesarias para la buena marcha de la instalación. La manera más fácil de satisfacer estas condiciones es poner en paralelo transformadores con especificaciones idénticas y de la misma marca y modelo. Se debe de realizar un estudio cuidadoso cuando hay diferentes kVA nominales aunque la marca sea la misma.

#### IV.14.2 Transformadores no concordantes en paralelo

Se dice que un transformador concuerda con otro para propósitos de puesta en paralelo cuando:

- Los dos (o más) son verdaderamente idénticos, o
- Sus relaciones de transformaciones son idénticas, y las resistencias, reactancias e impedancias equivalentes son inversamente proporcionales a sus kVA nominales.

En un sentido práctico, si las impedancias equivalentes son casi inversamente proporcionales a sus kVA nominales, por lo común es suficiente. Con construcciones similares, si las impedancias concuerdan, las resistencias y las reactancias por lo general concuerdan lo suficiente para ser aceptables. Si una unidad fuera de construcción tipo núcleo y la otra construcción tipo acorazado, la probabilidad de una hermandad satisfactoria es mucho menos, se necesita una prueba para obtener los datos requeridos. La simple suma de impedancias si ejecutar la relación de fasores de corriente es suficiente si se trata de transformadores muy relacionados.

$$I_c = \left( \frac{V_{2a} - V_{2b}}{Z_{e2a} + Z_{e2b}} \right) \text{-----(4.26)}$$

Donde:

- $I_c$ : corriente de circulación
- $V_{2a}$  y  $V_{2b}$ : tensiones secundarias de los transformadores a y b
- $Z_{e2a}$  y  $Z_{e2b}$ : impedancias equivalentes del secundario reflejadas de los transformadores a y b

#### IV.14.3 Transformadores concordantes en paralelo

Cuando la relación de transformación es similar y las impedancias de los secundarios son casi inversamente

proporcionales a las cargas nominales del transformador existe una concordancia aceptable de cargas.

Quando los transformadores tienen sólo una ligera discordancia en cuanto a sus relaciones de tensiones (relaciones de transformación), se pueden usar en paralelo con precaución. La compartición de cargas en esas circunstancias es una función tanto de sus relaciones de transformación como de sus impedancias reflejadas. Esta situación se presenta cuando los transformadores tienen diferente regulación de tensión. En este caso, pueden tener la misma relación de tensiones a una carga y no a otra. El cálculo de una situación como ésta queda fuera del alcance de este texto. Es mejor hermanar la relación de transformación a.

#### **IV.14.4 Puesta en paralelo de transformadores trifásicos**

Quando se necesita la capacidad adicional en una instalación trifásica, los bancos de transformadores deben tener el mismo defasamiento para que la puesta en paralelo tenga éxito. Se tendrá presente que la conexión Y-Y y la  $\Delta$ - $\Delta$  no exista defasamiento del primario al secundario, así mismo, la conexión V-V y la T-T tampoco tienen defasamiento de fase. Tanto la Y- $\Delta$  como la  $\Delta$ -Y tiene un defasamiento de  $30^\circ$ . Una se puede poner en paralelo con la otra si se realizan comprobaciones cuidadosas con voltímetros antes de hacer las conexiones finales. Existe una posibilidad definida de un defasamiento de  $30^\circ$  en una instalación y un defasamiento de menos  $30^\circ$  (ó  $330^\circ$ ) en otra. Teniendo esto presente, los dos grupos que se dan en la tabla 4.1, son por lo tanto compatibles si las relaciones de tensión son idénticas.

Si una línea de transmisión tiene que ver con un banco de transformadores trifásicos en cada extremo, entonces, si una línea tuviera primero  $\Delta$ -Y elevadora y luego Y- $\Delta$  reductora, no había cambio de fase global. Esto se podría poner luego en paralelo con una  $\Delta$ - $\Delta$  elevadora y  $\Delta$ - $\Delta$  reductora, por ejemplo. Sin embargo, la línea de transmisión intermedia estaría defasada  $30^\circ$  distinta y no se podría poner en paralelo.

#### **IV.15 DISPOSICION CONSTRUCTIVA DE LOS TRANSFORMADORES SUMERGIDOS EN ACEITE**

Los transformadores más utilizados son los que emplean aceite como aislante. En la figura 4.20 puede apreciarse un

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

transformador de potencia trifásico, en él se pueden observar los accesorios que posee este dispositivo, los cuales se enumeran aquí:

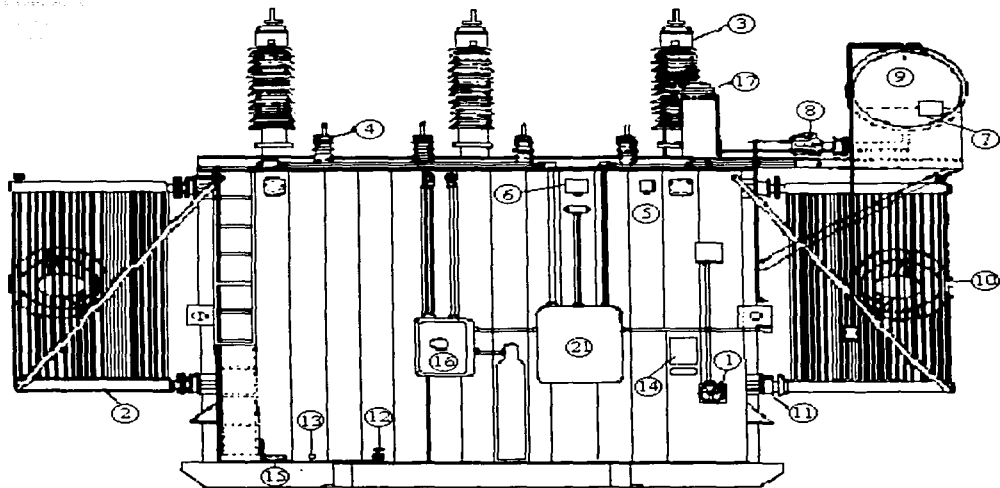


FIGURA 4.20 Vista general de un transformador de potencia.

- 1) Cambiador de derivaciones.
- 2) Radiadores.
- 3) Boquillas de alta tensión
- 4) - Boquillas de baja tensión.
- 5) - Termómetro contra incendio.
- 6) - Termómetro de punta caliente con contactos de alarma.
- 7) - Indicador de nivel con contactos de alarma.
- 8) - Relevador Buchholz.
- 9) - Tanque conservador.
- 10) - Ventiladores (para aire forzado).
- 11) - Válvulas de bloqueo para radiadores.
- 12) - Válvulas de drene de aceite.
- 13) - Válvulas de muestreo de aceite.
- 14) - Placa de datos.
- 15) - Equipo inercial.
- 16) - Placa de conexión a tierra.
- 17) - Válvula de sobrepresión.
- 18) - Pasamuros.

- 19) Transformadores de corriente.
- 20) Apartarrayos.
- 21) Caja de conexiones.

A continuación se describen algunos de ellos.

#### IV.15.1 Cambiador de derivaciones:

El cambiador de derivaciones se emplea para la variación de voltajes en los transformadores aumentando o suprimiendo vueltas o espiras de un devanado (siempre del lado de alta tensión), con lo que se logra un nivel mantener estable la tensión requerida o la más adecuada.

Los cambiadores de derivaciones pueden ser de dos tipos:

- Cambiador de derivaciones sin carga.
- Cambiadores de derivaciones con carga.

El primero se usa cuando la variación de tensión es poco frecuente y se ajusta únicamente cuando el transformador puede ser desconectado de la línea. Normalmente este ajuste es de operación manual aunque puede ser automático.

En la figura 4.21 se observa un cambiador bajo carga clase 115 KV.



FIGURA 4.21 Vista de un cambiador de derivaciones bajo carga clase 115 KV.

El segundo tipo se usa cuando la variación de voltaje (regulación) debe hacerse sin interrupción del servicio y puede ser de accionamiento manual o automático. El funcionamiento de este tipo de dispositivo es muy delicado por lo que su construcción debe de ser muy esmerada.

#### IV.15.2 Radiadores:

Los Radiadores son una parte fundamental del transformador dado que por medio de estos y con ayuda del aceite se irradia el calor generado por las pérdidas en el

transformador. El número y dimensiones de estos se calcula de acuerdo con las pérdidas a disipar. (ver figura 4.20)

#### **IV.15.3 Boquillas de alta y baja tensión:**

Las boquillas o bushings son dispositivos que se usan para sacar las terminales de salida de los transformadores del interior de estos.

Las boquillas son del tipo condensador. En la figura 4.22 se muestra una boquilla clase 115 KV.

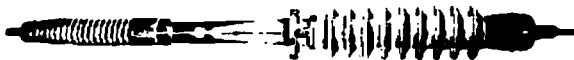


FIGURA 4.22 Boquilla tipo condensador para clase 115 KV.

#### **IV.15.4 Termómetro con contactos de alarma:**

El indicador de temperatura del líquido es usado para indicar la temperatura del nivel superior a la que se encuentra el líquido del transformador y estos tienen microswitches internos que pueden ser usados para control de ventiladores e iniciar o energizar una alarma.

El termómetro es montado con su bulbo sensor de temperatura en una capucha o campana la cual se extiende dentro de la parte superior sobre líquido del transformador y es asegurada con una tuerca de unión.

La campana o capucha es hermética al líquido permitiendo así quitar el termómetro sin bajar el nivel del líquido o romper el sello del transformador.

La calibración de la carátula esta en °C con una aguja amarilla o blanca para indicar la temperatura del nivel del líquido y una aguja roja para indicar la máxima temperatura la cual ha sido alcanzada desde el último ajuste. Para ajustar la aguja de máxima lectura, remover el magneto y removerla a través de la superficie de la carátula. (Ver figura 4.23).

TEST CON  
FALLA DE ORIGEN

Los indicadores normalmente son equipados con dos microswitchs los cuales son operados por levas en la flecha de la aguja indicadora.

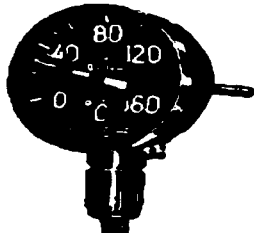


FIGURA 4.23 Vista frontal de un termómetro con contactos de alarma.

#### IV.15.5 Termómetro de punta caliente con contactos de alarma.

Los indicadores del punto mas caliente TCP, se utilizan en transformadores que requieren de un circuito de alarma o desconexión y control sobre el equipo de ventilación forzada.

El indicador es operado por un elemento bimetálico y una bobina calefactora, esta última tiene como función calentar el elemento a la temperatura, del punto mas caliente del devanado en el transformador, haciendo circular por ella una corriente que es, en todo momento proporcional a la corriente de carga.

En el indicador se encuentran montados tres o cuatro micro-interruptores-calibrados a diferentes niveles de temperatura; los dos primeros operan en el circuito de control del equipo de ventilación forzada, el tercero, el circuito de alarma construido por cualquier momento de señalización y el cuarto un disparo del interruptor del equipo. De este modo estos instrumentos cumplen con tres funciones: indican la temperatura máxima alcanzada dentro de un transformador, proporciona el enfriamiento adicional por medio de los ventiladores cuando ello es requerido y operan un circuito de alarma disparo cuando por cualquier falla; la temperatura alcanza un valor tal que pueda dañar los aislamientos del transformador(figura 4.24).

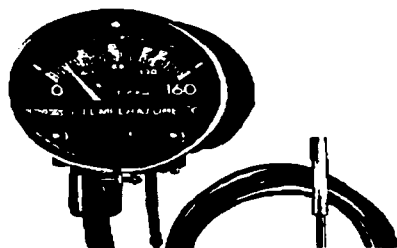


FIGURA 4.24 Vista frontal de un termómetro de punta caliente con contactos de alarma

#### IV.15.6 Indicador de nivel con contactos de alarma:

El medidor magnético de nivel de líquido es usado para indicar el nivel de líquido aislante en el tanque principal del transformador y en los compartimentos asociados, consiste en un brazo flotante y magnético en un lado de la parte de ajuste por el líquido y un segundo magneto con aguja indicadora en el otro lado. La aguja puede ser removida cada vez que el líquido este abajo del nivel a 25 °C.

Las medidas que tienen los microswitchs de acción instantánea pueden ser alambrados para dar una señal de alarma cuando el nivel del líquido alcance un punto demasiado bajo para una operación segura del transformador.

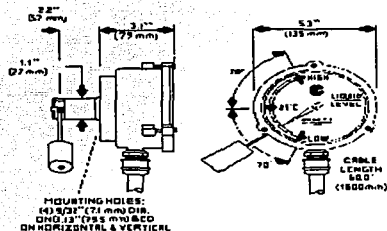


FIGURA 4.25 Vista frontal de un indicador de nivel con contactos de alarma.

Una leva en la flecha indicadora opera el switch cuando la aguja caiga en la marca de "low" en la carátula. Cuando el

nivel del líquido aumenta la aguja indica el cambio, pero el microswitch no liberara el circuito de alarma hasta que el punto haya avanzado de 5 a 10 grados arriba de la marca de "low". (Figura 4.25).

#### IV.15.7 Relevador buchholz:

La acción del relé Bulchholz esta basada en el hecho de que cualquier accidente que sobrevenga a un transformador, este precedido de una serie de fenómenos, sin gravedad, a veces imprescindibles pero que, a la larga, conducen a la destrucción del transformador. Por lo tanto, bastara con detectar los primeros síntomas de la perturbación y avisar el hecho mediante una señal acústica u óptica; no es necesario, en este caso, poner el transformador inmediatamente fuera de servicio sino tener en cuenta la circunstancia y desacoplar el transformador cuando lo permitan las condiciones de la explotación.

En la figura 4.26 se presenta un relé Bulchholz.

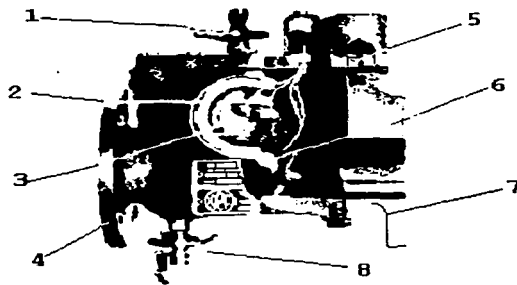


FIGURA 4.26 Corte parcial de un relé Bulchholz

1. -Llave de evacuación de los gases, que puede servir para el control de alarma y de desconexión.
2. -Flotador de alarma.
3. -Mirilla graduada de vidrio.
4. -Brida de unión al transformador
5. -Agujeros roscados para circuitos controlados.
6. -Flotador de desconexión.
7. -Brida de unión al depósito conservador de aceite.
8. -Llave de vaciado, que puede servir para el control de desconexión.



Como puede apreciarse, el relé Bulchholz es un aparato compacto de poco volumen y de fácil montaje, provisto, generalmente de bridas que empalmen de entrada y salida, que permitan montarlo en serie sobre la canalización que une el transformador con él depósito conservador de aceite.

Lleva dos flotadores, uno de alarma, y otro de desconexión, y un receptáculo de captación de los gases contenidos en el aceite. Una pequeña mirilla situada en el receptáculo permite examinar el gas y juzgar la naturaleza del defecto por el color y la cantidad de gas.

Una válvula de purga permite recoger el gas acumulado como elemento de juicio de la importancia del defecto y su eventual agravación; la cantidad de gas recogido en un tiempo dado, es en función de estos dos factores.

La posición del flotador de alarma depende del nivel de aceite en el receptáculo, siendo este nivel función, a su vez, de la presión de los gases que contiene el aceite, en cuanto al flotador de desconexión, su posición depende del caudal de aceite y de gas que circulan desde el transformador al depósito conservador.

Para una determinada posición de los flotadores, previamente fijada, basculan los contactos de mercurio, uno para cada flotador que aseguran, respectivamente, la puesta en marcha de la alarma y de la protección contra los agentes atmosféricos.

La pequeña llave de paso situada en la parte superior del relé, puede usarse para las pruebas de funcionamiento de los flotadores. Conectando una bomba de aire a esta llave de paso provista de un racord especial, con algunos golpes se puede introducir la cantidad de aire necesaria para inclinar el flotador de alarma y por lo tanto para cerrar los contactos.

Veamos ahora como funciona el relé Bulchholz. El receptáculo A, normalmente lleno de aceite, contiene como hemos dicho, dos flotadores B1 y B2, móviles alrededor de ejes fijos (figura 4.27) si, a consecuencia de un defecto poco importante, se introducen pequeñas burbujas de gas, estas se elevan en la cuba del transformador y estas se dirigen hacia el tanque conservador de aceite. Siendo captadas por el aparato y almacenadas en el receptáculo, donde el nivel de aceite baja progresivamente, a medida que las burbujas llenan el espacio superior del receptáculo, como consecuencia, el

FALTA DE ORIGEN  
TESIS CON

flotador superior B1, se inclina y, cuando la cantidad de gas es suficiente cierra sus contactos C1, que alimenta el circuito de alarma (figura 4.28).

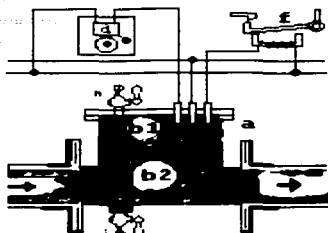


FIGURA 4.27 Funcionamiento del relé Bulchholz en caso de servicio normal del transformador.

Si continua el desprendimiento de gas, el nivel de aceite en el receptáculo baja hasta que los gases pueden alcanzar la tubería que los lleva hasta el deposito conservador.

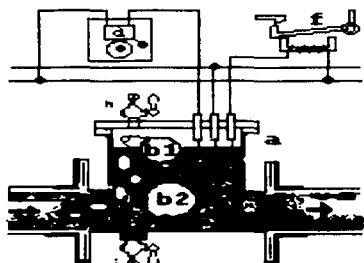


FIGURA 4.28 Funcionamiento del relé Bulchholz en caso de aparición de pequeños defectos en el transformador.

Una observación de la cantidad y aspecto de los gases desprendidos permite localizar la naturaleza y la gravedad del defecto. El color de estos gases da una buena indicación sobre el lugar donde se han producido el defecto, por ejemplo:

Gases blancos:	Proceden de la destrucción de papel.
Gases amarillos:	Proceden de la destrucción de madera.
Gases negros ó grises:	Proceden de la descomposición del aceite.

El flotador interno B2 conserva su posición de reposo mientras sea lento el desprendimiento de gases.

Si el defecto se acentúa (figura 4.29), el desprendimiento se hace violento y se producen grandes burbujas, de tal forma que como consecuencia del choque de aceite refluye bruscamente a través de la tubería, hacia el depósito conservador de aceite. Este flujo de aceite encuentra al flotador B2 y lo acciona, lo que provoca el cierre de los contactos C2. Estos accionan, a su vez. El mecanismo de desconexión F de los disyuntores de los lados de alta y baja tensión del transformador, poniendo a este fuera de servicio.

Se obtiene el mismo resultado, en caso de una sobrecarga peligrosa para el transformador, bien porque la corriente de carga resulta demasiada elevada o bien como consecuencia de un corto circuito en la red secundaria. En este caso, las numerosas y pequeñas burbujas expulsadas de todo el bobinado como consecuencia del calentamiento de los arrollamientos, actúan como si se tratara de algunas burbujas grandes, es decir, a la manera de un choque que obliga a refluir el aceite, el cual acciona al flotador B2. Esta acción es tan rápida que la desconexión de los disyuntores se produce antes de que el transformador haya quedado afectado por la sobrecarga.

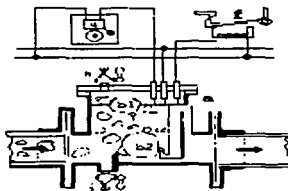


FIGURA 4.29 Funcionamiento del relé Bulchholz en caso de aparición de un grave defecto en el transformador.

Todavía hay que añadir que la aparición de las pequeñas burbujas gaseosas se manifiesta solamente cuando la temperaturas de los bobinados se eleva hasta el punto en que el aceite se desintegra en el interior de los bobinados. Por lo tanto, la temperatura de estos no puede elevarse por encima de los 150 °C, que es la temperatura de desintegración del aceite; por otro lado, esta temperatura puede ser soportada pasajeramente por los bobinados, sin conveniente, es decir, según la magnitud de la corriente de sobrecarga.

esta temperatura se alcanza mas o menos rápidamente. En el instante en que se alcanza el relé Bulchholz provoca la puesta fuera de tensión del transformador, lo que quiere decir que el relé Bulchholz constituye una protección de máxima intensidad, con características de tiempo dependiente de la sobrecarga.

En las condiciones de servicio que se encuentra en la práctica, muchas veces se producen cortocircuitos de corta duración, por ejemplo, producción de un arco entre los aisladores de polos diferentes o contactos entre conductores de línea. Estas sobrecargas no accionaran el relé Bulchholz si su duración es suficientemente corta para que no sea alcanzada la temperatura crítica de 150 °C, aun para sobrecarga de muy poca duración, el relé Bulchholz entraría en funcionamiento y pondría fuera de servicio al transformador. Por lo tanto, y hasta cierto punto, este dispositivo puede considerarse también como una protección selectiva.

La protección Bulchholz no funciona por la acción de los movimientos del aceite, lo que resulta de su calentamiento normal. Tampoco funciona bajo la acción de los movimientos del aceite que resultan de los esfuerzos electrodinámicos sobre las bobinas. Para que funcione el flotador de desconexión es necesario un brusco desplazamiento del aceite, debido a un fuerte desprendimiento gaseoso.

Los contactos C1 y C2 también entran en funcionamiento cuando bajo el nivel del aceite por debajo del límite determinado, sea por defecto de vigilancia, sea por figura de cuba. Finalmente, también sería captado por el relé, el aire que pudiera encontrarse en el interior del transformador.

A continuación, y como resumen de lo estudiado hasta ahora, vamos a dar la relación de los defectos más importantes que pueden ser captados por el relé Bulchholz.

- a) En caso de ruptura de una conexión, se produce un arco que se alarga rápidamente por función de los conductores y que, cebandose enseguida en otra parte del bobinado, puede provocar corto circuito con todas sus desastrosas consecuencias, este arco desintegra al aceite y los defectos de este tipo también quedan señalados por las humaredas se aceite que escapan del tanque.

- b) En caso de defecto del aislamiento a la masa, ante todo se produce un arco entre este punto del bobinado y la cuba o cualquier otra parte del cuerpo del transformador, este arco desintegra y descompone el aceite, que afluye hacia el sitio del bobinado, rompiendo el arco, lo que provoca serias quemaduras, frecuentemente este defecto a tierra esta ocasionado por sobretensiones.
- c) En caso de corto circuito o de sobrecarga brusca se produce antes que nada, un fuerte aumento de temperatura, principalmente en las capas interiores del bobinado. El aceite contenido en las bobinas queda bruscamente desintegrado y descompuesto. Los gases que resultan son lanzados violentamente al exterior del arrollamiento como si se tratara de una explosión, bajo la forma de pequeñas burbujas, rechazando una cantidad de aceite correspondiente.
- d) Como consecuencia de modificaciones en las propiedades químicas del aceite, que reduce su rigidez electrostática puede suceder que algunos sitios quedan sometidos a solicitaciones electrostáticas particularmente elevadas. Se producen descargas que, al principio no tiene importancia pero cuya continuada repetición, puede afectar seriamente el transformador. Evidentemente, estas descargas descomponen al aceite y provocan la formación de gases. Las emanaciones que se forman en el aceite y producen los mismos resultados.
- e) Si las juntas entre los núcleos y las culatas están mal realizadas o si el aislamiento de los remaches que aprietan los paquetes de las laminas están deteriorado, pueden producirse intensas corrientes de Fonocault. Este accidente también provoca un aumento local de temperatura, vaporizando al aceite y provocando a la formación de gases.

La sola enumeración de estos defectos, que pueden ser detectados por el relé Bulchholz, indica ya la importante función protectora de este dispositivo. Si algunas veces, resulta impotente para impedir un deterioro del transformador que protege, no es menos cierto que, en todos los casos, impedirá que la falla se haga mayor, asta el punto de exigir, para su reparación, un gran costo económico y de tiempo. Particularmente, el empleo del relé Bulchholz impedirá, muy seguramente, las peligrosas explosiones e incendios de aceite

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

que pueden producirse como consecuencia de una falla en el transformador.

La condensación eventual de agua solamente puede producirse en el tanque conservador; para impedir que el agua condensada fluya hacia el tanque principal, la tubería de enlace sobresale ligeramente en el interior del tanque conservador la tubería de aire de este, esta provista de un descargador de aire.

#### IV.15.8 Tanque conservador:

Es un simple deposito de expansión de lamina de acero, es cilíndrico y esta soportado sobre el tanque del transformador, por encima del nivel de la tapa. El tanque conservador esta equipado con varios agujeros a los que se conectaran las correspondientes tuberías, cada una con una misión propia:

- Una en la parte superior para el llenado del tanque conservador.
- En la parte interior lleva; una para la conexión del tanque principal a través del relevador Bulchholz. Otra para el vaciado del tanque conservador, una tercera que sirve para el muestreo del aceite conservador y una última para la conexión con el secado de silica gel.

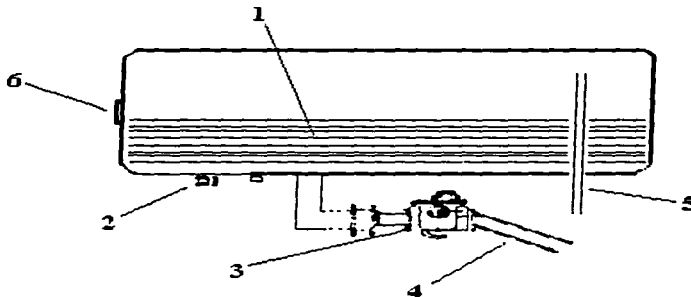


FIGURA 4.30 Partes principales de un tanque conservador.

1. Aceite.
2. Válvula de drene.
3. Válvula de muestreo.
4. Tubería a tanque principal y relé Bulchholz.
5. Tubería a deposito de silica gel.
6. Indicador de nivel de aceite.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El tanque conservador cumple con tres funciones importantes:

- a. *Mantener constante el nivel de aceite.* En defecto, el aislamiento del transformador se establece teniendo en cuenta la presencia del aceite aislante. Por lo tanto, es esencial que el tanque del transformador este siempre lleno de aceite, a pesar de la dilatación o contracción del volumen de aceite, en función de las variaciones de temperatura.
- b. *Impedir el envejecimiento del aceite.* Con la condición del oxígeno y sales minerales que actúan como catalizador, se produce en el aceite de los transformadores una reacción de envejecimiento cuya velocidad esta favorecida por la temperatura. Este envejecimiento se traduce en un aumento de la acidez y la formación de compuestos que atacan la celulosa provocando la degradación de las características eléctricas de los aislantes.
- c. *Impedir la absorción de la humedad.* Los aceites utilizados por el aislamiento de los transformadores son muy higroscopicos; por otra parte, su contenido de agua afecta a su rigidez dieléctrica. Por ejemplo, en un aceite muy bien secado, basta una absorción de agua de 1 por 1000 para que la resistencia a la perforación caiga de 120 KV a 50 KV. Además, la absorción de agua por el aceite entraña el riesgo de una concentración de humedad en los aislamientos de los arrollamientos y cables de alimentación, algunos de los cuales son muy higroscopicos, con el consiguiente peligro de una reducción de sus propiedades aislantes.

Para mantener un nivel de aceite en el transformador, el tanque esta sobredimensionado, para contener aproximadamente un 10 % del volumen total de aceite, con lo que se puede hacer frente a cualquier variación del nivel de aceite debido a dilataciones, contracciones, variaciones de carga, etc.

Para reducir la oxidación del aceite, este solamente esta en contacto con el aire sobre una superficie relativamente pequeña. Además, la temperatura del aceite en el conservador es menos elevada que en el tanque principal (figura 4.30).

Existe otro sistema de preservación de aceite el cual consiste en una bolsa de hule sintético, con composición

química especial, el cual no se deteriora con el contacto con aceite aislante; se coloca en interior del tanque conservador sirviendo de barrera entre la cámara de gases y el aislante; además, absorbe los cambios de volumen que sufre el aceite por la variación de temperatura.

#### IV.15.9 Ventiladores:

Se usan cuando se tiene un transformador del tipo aire forzado y sirven para dar más capacidad de radiación a un transformador y por lo tanto, transformar una mayor potencia que si fuera solo con enfriamiento natural.

Estos son controlados automáticamente con ayuda de sensores de temperatura con microswitchs o manualmente. (ver figura 4.31)

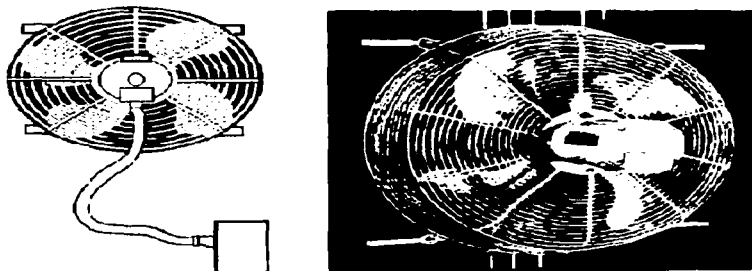


FIGURA 4.31 Ventilador normalmente usado para transformadores enfriados por aire forzado; colocado en la parte lateral superior de un radiador.

#### IV.15.10 Válvulas de bloqueo par radiadores:

Este accesorio se conecta entre la pared del tanque y el cabezal del radiador en la parte superior e inferior con el fin de que cuando se embarque la unidad sin radiadores solo baste con cerrarse las válvulas de bloqueo para sellar el transformador en estas partes, además, cuando se requiera realizar un mantenimiento en los radiadores que requiera que se separen del tanque, solo se bloquee la válvula y se procede a separar el radiador. (ver figura 4.32).





FIGURA 4.32 Vista frontal de una válvula de bloqueo.

#### IV.15.11 Válvula de drene de aceite:

Esta sirve para efectuar el llenado de aceite del transformador por su parte inferior o el vaciado por medio de la misma. (Figura 4.33).

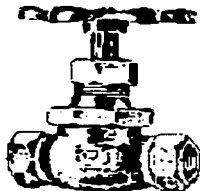


Figura 4.33 Válvula de drene de aceite

#### IV.15.12 Válvula de muestreo:

Esta válvula tiene el fin de servir para sacar muestras de aceite y ser estudiadas para hacer un dictamen del estado del mismo y va colocada en la parte inferior al igual que la válvula de drene. (ver figura 4.34).



FIGURA 4.34 Válvula de muestreo de aceite.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



además, posee una serie de contactos de protección y de alarma. (Figura 4.36).

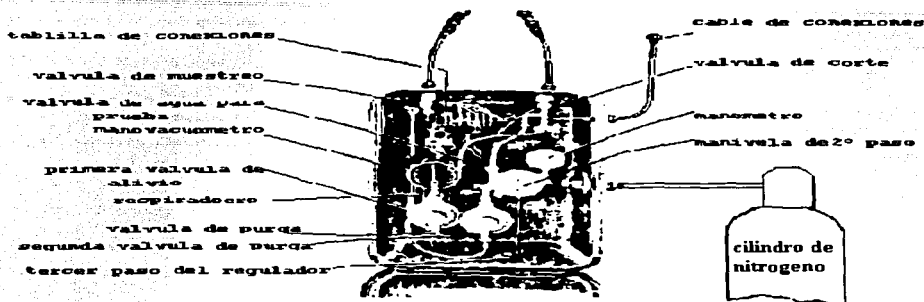


FIGURA 4.36 Vista general de un equipo inerte.

#### IV.15.15 Placa de conexión a tierra:

Esta sirve para aterrizar el tanque del transformador al sistema de tierras de la subestación. (ver figura 4.20).

#### IV.15.16 Válvula de sobrepresión:

Este accesorio se monta sobre la cubeta del transformador, está diseñado para liberar presiones peligrosas las cuales se pueden generar dentro del tanque en el transformador. Cuando una presión determinada es excedida, una relación de presión levanta el diafragma y desahoga el tanque del transformador.

La presión anormal seguida de un arco es a menudo suficiente para romper el tanque, si no se instala una válvula de sobrepresión. En la figura 4.37 podemos ver una válvula de sobrepresión con sus accesorios principales.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



FIGURA 4.37 Corte parcial de una válvula de sobrepresión.

#### IV.15.17 Pasamuros:

Los pasamuros son de un material baquelizado o de resina epoxica y sirven para pasar las terminales del secundario de los transformadores de corriente colocados en el interior del transformador hacia el exterior (figura 4.38)

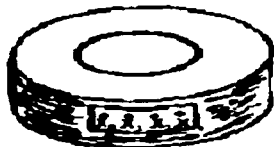


FIGURA 4.38 Vista general de un pasamuros.

#### IV.15.18 Transformadores de corriente:

Los transformadores de corriente reducen la corriente primaria a 5 amperes generalmente para uso de amperímetros y medidores, relevadores de sobrecarga, tierra, elementos de corriente de wáttmetros y medidores, relevadores direccionales, diferenciales de distancia y otros aparatos más. Opera también las bobinas de disparo de interruptores en la protección en serie.

La selección de los transformadores de corriente debe basarse en la precisión deseada en la medición y la carga debe conectarse. (figura 4.39)



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 4.39 Vista general de un transformador de corriente.

#### **IV.15.19 Apartarrayos:**

Los apartarrayos son dispositivos empleados para la protección de un transformador o línea de alta tensión contra sobretensiones que provienen de descargas atmosféricas (rayos directos e indirectos) y de perturbaciones en la red de alta tensión, originadas por las ondas eléctricas que emiten las maniobras de conexiones y desconexiones de estas redes.

En la figura 4.40, se observa un apartarrayos del tipo MWL de la marca BROWN BOVERI.

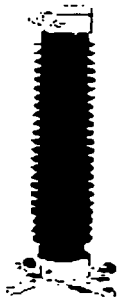


FIGURA 4.40 Vista general de un apartarrayos marca BROWN BOVERI.

#### **IV.15.20 Caja de conexiones.**

La caja de conexiones es la parte a donde llegan las terminales de microswichts, secundario de los transformadores de corriente, ventiladores, etc., siendo una parte fundamental en el control y protección del transformador. (ver figura 4.20).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## V CÁLULO DE TRANSFORMADORES

Un transformador en servicio en un sistema eléctrico, tiene ciertas características nominales que han sido en parte fijadas por el usuario, y en parte adoptadas por el proyectista.

Estas características que son objeto de garantías se comprueban en ensayos.

### V.1 CONDICIONES NORMALES DE SERVICIO

Las normas fijan condiciones normales de servicio, a saber:

- Altitud de la instalación (hasta 1000 metros sobre el nivel del mar)
- Temperatura del refrigerante, por ejemplo para aparatos refrigerados por aire, la temperatura del aire ambiente no debe exceder los 40 °C.

Además, en las normas se fijan temperaturas mínimas del aire y valores promedios diarios y anuales que, si se previese excederlos, es indispensable indicarlos claramente al nivel de especificación.

Ya se ha dicho que las normas fijan las condiciones normales de servicio, pero en la aplicación puede ocurrir que se tengan funcionamientos que se aparten de las condiciones normales esta situación debe ser indicada por el usuario.

- Sobreelevación de temperatura es la diferencia entre la temperatura en distintas partes de la máquina y la temperatura ambiente.

La sobreelevación de temperatura de los arrollamientos, núcleo y aceite de los transformadores diseñados para funcionar a altitudes que no excedan las normales no deben superar los límites que se indican en las tablas 5.1 y 5.2.

Cuando el transformador está diseñado para funcionar en lugares donde la temperatura del aire de refrigeración excede los valores indicados en las normas, la sobreelevación de temperatura admisible para los arrollamientos, núcleo y aceite, lógicamente se debe reducir.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**TABLA 5.1 - Límites de temperatura para transformadores secos**

Parte de la máquina	Modo de refrigeración	Clase de aislamiento	Máxima sobreelevación de temperatura (° C)
Arrollamientos: (valor medio medido por variación de resistencia)	Aire, natural o forzado	A	60
		E	75
		B	80
		F	100
		H	125
Núcleo y otras partes situadas: a) Próximo a los arrollamientos b) No próximo a los arrollamientos	Todos los tipos	-----	a) Como para los arrollamientos b) No puede alcanzar un valor que dañe el núcleo y materiales adyacentes

**TABLA 5.2 - Límites de temperatura para transformadores en aceite u otro líquido dieléctrico (Clase A)**

Parte de la máquina	Máxima sobreelevación de temperatura (° C)
Arrollamientos: (valor medio medido por variación de resistencia)	65 cuando la circulación del aceite es natural o forzada pero no dirigida 70 cuando es forzada y dirigida
Temperatura máxima del aceite (próximo a la tapa): Medida con termómetro	60 cuando el transformador tiene tanque conservador o es hermético 55 cuando no tiene tanque conservador ni es hermético
Núcleo, partes metálicas y materiales magnéticos	La temperatura no debe alcanzar, en ninguna parte, valores que dañen el núcleo, el aceite y los arrollamientos

Para potencias de 10 MVA o mayores la reducción que se aplica a la sobret temperatura coincide con el exceso de temperatura del aire de refrigeración.

Para potencias menores la sobre elevación se deberá reducir del siguiente modo:

- ♦ Si el exceso de temperatura es menor o igual a 5 °C se reduce en 5 °C.
- ♦ Si el exceso de temperatura es mayor de 5 °C y como máximo igual a 10 °C se reduce en 10 °C.

Si el transformador esta diseñado para operar a una altura mayor de 1000 m, pero es ensayado a una altura normal, los límites de sobre elevación de temperatura indicados se deben

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

también reducir en un cierto porcentaje en proporción a la altura.

Para cada modo de refrigeración, por cada 500 m o fracción de 500 m por encima de los 1000 m la reducción se indica en la tabla 5.3

**TABLA 5.3: Porcentaje de reducción del límite de sobreelevación de temperatura**

<b>Circulación de aire</b>	<b>natural</b>	<b>forzado</b>
Transformadores en aceite	2.0%	3.0%
Transformadores secos	2.5%	5.0%

En rigor los límites de sobreelevación de temperatura que se fijan, y que dimensionan a la máquina desde el punto de vista térmico, y se utilizan en la verificación de sus prestaciones, están fijados con un criterio de temperatura máxima de las zonas más calientes de manera de que los materiales y en particular los aislantes conserven sus propiedades.

En consecuencia es aceptable utilizar un transformador controlando que la temperatura de su zona más caliente quede contenida en un valor de seguridad independientemente de la condición ambiental, y en esta forma la máquina es aprovechable en todo momento al máximo, este criterio aunque no contemplado (aún) por las normas permite (de todos modos) un aprovechamiento más racional del mismo.

Además, es de fundamental importancia verificar la ausencia de puntos calientes peligrosos, a fin de obtener máquinas de elevado grado de confianza.

Sin embargo, la forma de onda de la tensión de alimentación que caracteriza el ambiente eléctrico en el que operará el transformador (la norma la supone aproximadamente senoidal), y para transformadores polifásicos, la tensión de alimentación debe ser aproximadamente simétrica (ninguna norma indica el grado de asimetría).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## V.2 CARACTERISTICAS NOMINALES.

Las características nominales son datos que se basan en las condiciones de servicio, y definen las prestaciones a efectos de las garantías y condiciones de ensayo especificadas.

- Tensión nominal (en valor eficaz) de un arrollamiento es la tensión aplicada u obtenida en vacío entre bornes de línea de un arrollamiento de un transformador polifásico o entre bornes de un arrollamiento monofásico.
- Relación de transformación nominal es la que existe entre las tensiones nominales de los distintos arrollamientos para la toma principal.

La tolerancia en la relación (real del transformador construido) fijada por las normas es 0.5% de la relación nominal; en el caso de transformadores cuya tensión de cortocircuito es baja la tolerancia es 1/10 del porcentaje de impedancia. Esto no es aplicable a los autotransformadores (en razón de su muy baja impedancia).

Por ejemplo para un transformador con impedancia 3% la tolerancia de la relación de transformación será 0.3%

- Frecuencia nominal es aquella a la cual el transformador está destinado a funcionar (normalmente 50 o 60 Hz).
- Potencia nominal, es el valor convencional de la potencia aparente (kVA o MVA), que establece las bases para el diseño, la construcción, las garantías del fabricante y los ensayos, determinando el valor de la corriente nominal que puede circular con la tensión nominal aplicada, de acuerdo con las condiciones especificadas.

La potencia nominal asignada corresponde a un servicio continuo, sin embargo, los transformadores pueden ser sobrecargados ocasionalmente. Las normas fijan indicaciones y criterios a aplicar en algunos casos particulares.

Debe notarse que si el transformador tiene diferentes modos de refrigeración, a cada uno le corresponde una potencia y la potencia nominal es la mayor.

Para transformadores de más de dos arrollamientos, se debe indicar la potencia nominal de cada arrollamiento.

La mitad de la suma aritmética de los valores de las potencias de los arrollamientos da una estimación aproximada

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

de las dimensiones de un transformador de más de dos arrollamientos en relación con uno de dos arrollamientos.

- Corriente nominal es el valor que se obtiene dividiendo la potencia nominal de un arrollamiento por la tensión nominal de dicho arrollamiento y por el factor de fase apropiado (raíz de tres en los transformadores trifásicos).

A fin de destacar el significado convencional de la definición de potencia nominal, debe notarse que si a un arrollamiento de un transformador bifásico se le aplica su tensión nominal, y se carga hasta que por él circule la corriente nominal, la potencia en juego coincide con la definida como potencia nominal del transformador.

En el otro arrollamiento circula también la corriente nominal, mientras que la tensión en bornes de este depende del factor de potencia de la carga, y en consecuencia, la potencia que puede medirse en este punto está afectada por el rendimiento del transformador.

- Nivel de aislamiento, es el conjunto de valores que caracterizan la aptitud de los arrollamientos a soportar las sollicitaciones dieléctricas que se presentan en servicio.

Generalmente el nivel de aislamiento se expresa con el valor (eficaz) de tensión de ensayo a frecuencia industrial (aplicada durante 1 minuto), y cuando corresponde el valor de tensión (pico) de ensayo de impulso (onda de impulso normalizada 1.2/50 microsegundos).

El aislamiento puede ser uniforme cuando ha sido prevista en todo punto para soportar la tensión de ensayo contra masa que corresponde al extremo lado línea del arrollamiento. En cambio cuando varía desde el valor previsto para el lado línea hasta un valor menor del lado neutro, se denomina aislamiento gradual.

Un arrollamiento con aislamiento gradual no puede ser sometido a un ensayo de tensión aplicada de valor mayor al correspondiente al nivel de aislamiento en el extremo neutro.

El transformador debe ser apto para instalación expuesta (a sobretensiones de origen atmosférico) cuando se instala conectado a líneas aéreas directamente o mediante pequeños

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

tramos de cable; o puede no ser apto, y en tal caso solamente se lo puede instalar en redes de cables subterráneos.

- Topes de regulación son determinados puntos de los arrollamientos a los cuales se accede con conductores de conexión y elementos destinados a variar el número de espiras eléctricamente activas, o variar los conexiones.
- Tope principal es el tope al cual se refieren las características nominales.
- Campo de regulación es la diferencia entre la máxima y la mínima tensión en vacío, expresada en general, en valor relativo a una tensión tomada como referencia (generalmente la nominal).
- Pérdidas: son las potencias activas absorbidas por el transformador. Convencionalmente a los efectos de la garantía y de las tolerancias, se consideran las siguientes pérdidas características.
  - (a) Pérdidas en vacío: es la potencia activa absorbida por el transformador en las condiciones nominales de frecuencia y tensión con todos los arrollamientos no excitados abiertos en sus bornes de línea (tolerancia fijada por las normas +15% con la condición de que las pérdidas totales no excedan en más del 10% el valor garantizado).

Las conexiones de todos los arrollamientos deben corresponder con las condiciones para la cual es válida la garantía y, en particular para la prueba, deben ser puestos eventuales arrollamientos para la compensación de armónicos, en las condiciones de funcionamiento.

Las tensiones aplicadas para la prueba deben ser prácticamente senoidales, lo que puede comprobarse midiendo entre terminales de línea con voltímetros de valor medio, tarados en valor eficaz para onda senoidal. Se miden contemporáneamente el valor eficaz de las mismas tensiones con voltímetros normales de valor eficaz y si las mediciones no son iguales, las normas indican las correcciones que se deben realizar en el valor de las pérdidas medidas.

- (b) Pérdidas debidas a la carga: es la potencia activa absorbida por el transformador en el ensayo de cortocircuito para cada par de arrollamientos, que corresponde a la carga del arrollamiento de menor potencia del par, a la temperatura de referencia (85 °C), en las condiciones nominales de frecuencia y corriente, con los restantes arrollamientos abiertos en sus bornes de línea

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

(tolerancia fijada por las normas +15% debiéndose cumplir también que las pérdidas totales no excedan en más del 10% el valor de garantía).

- (c) Pérdidas totales: convencionalmente se considera como valor de las pérdidas totales la suma de las pérdidas en vacío y de las pérdidas en carga. No se toma en consideración la potencia absorbida por los elementos o motores auxiliares (bombas, ventiladores) que debe ser indicada por separado (tolerancia fijada por las normas +10%).
- Tensión de cortocircuito: la tensión de cortocircuito de un par de arrollamientos es la tensión, a la frecuencia nominal, que se debe aplicar a uno de ellos para que en el otro, que debe estar cortocircuitado en sus bornes, se establezca la corriente nominal, los eventuales arrollamientos no pertenecientes al par que se está ensayando están abiertos en sus bornes de línea.

Se expresa en general en valor relativo respecto a la tensión nominal del arrollamiento alimentado.

El valor de la tensión de cortocircuito, válido a los efectos de la garantía, es el correspondiente al tope principal de los arrollamientos considerados.

Si la toma principal corresponde a la posición media de los topes (o a una de las dos posiciones medias) se pueden presentar las siguientes condiciones que definen la tolerancia en la tensión de cortocircuito:

- Transformadores de dos arrollamientos: tolerancia  $\pm 10\%$
- Transformadores de más de dos arrollamientos: tolerancia  $\pm 10\%$  para un par de arrollamientos especificados (sino se indica lo contrario se entiende el par de mayor potencia); y tolerancia 15% para otro par de arrollamientos.

Para cualquier otro tope, la tolerancia se aumenta con un porcentaje igual a la mitad de la variación del factor de toma (en %) entre la toma principal y la toma considerada.

Convencionalmente, en lo referente a los valores de garantía, las pérdidas debidas a la carga y las tensiones de cortocircuito se debe dar a una determinada temperatura de referencia (que representa la temperatura media del arrollamiento).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Esta temperatura es de 75 °C u 85 °C para los aislamientos de la clase A, E, B y de 115 °C para aquellos de la clase F, H, C.

- Corriente de vacío: es la corriente (valor eficaz) que circula por un arrollamiento cuando se aplica a los bornes de línea la tensión nominal a la frecuencia nominal, estando los otros arrollamientos abiertos en sus bornes de línea.

La corriente de vacío no es senoidal sino deformada por la característica no lineal del hierro.

En transformadores polifásicos la corriente de vacío puede ser distinta en los diferentes bornes de línea (en las diferentes fases). En este caso se adopta como valor de corriente de vacío el valor medio aritmético de las corrientes (tolerancia +30%).

Los valores de tolerancias que se han indicado, son los fijados por las normas internacionales (IEC) y en general son adoptados por las normas de los distintos países.

Estas tolerancias son las que se deben respetar, debiendo el proyectista evaluar los riesgos de superarlas y analizar en etapa de proyecto los posibles errores constructivos que pueden llevar a su realización fuera de tolerancia y susceptible de una degradación del valor de su producto y quizás de rechazo.

### V.3 CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO

El proyectista que encara el cálculo de dimensionamiento de un transformador conoce las características nominales que debe satisfacer su proyecto, Además, la especificación del equipo lo conduce a ciertas adopciones, y otras debe elegir las con su mejor criterio, quedando definido:

- Tipo de transformador (en aceite o seco)
- Método de refrigeración
- Tipo de núcleo
- Forma constructiva del arrollamiento
- Tipo de conductor y sus características
- Geometría del núcleo
- Material utilizado

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Con esta base el proyectista inicia el cálculo tratando de utilizar en la mejor forma los materiales, conduciendo el cálculo para obtener el proyecto requerido.

El concepto que califica el proyecto es el económico; se trata de lograr una máquina, que satisfaciendo los requerimientos de especificación, ofrezca todas las garantías y su costo sea el mínimo. En particular al comparar transformadores se tienen en cuenta el costo de las pérdidas, y a veces otros costos de operación, mantenimiento etc.

Es necesario adoptar acertadamente ciertos parámetros que condicionan el diseño para lograr el mínimo costo referido.

En rigor se adoptan parámetros básicos, se avanza en el proyecto, se hacen cálculos de verificación, eventualmente se retorna sobre los parámetros adoptados retocándolos, y rehaciendo en consecuencia los cálculos (al menos en parte).

Una sucesión de pasos, en los que se realizan acciones de proyecto conduce al resultado deseado, la máquina a construir se encontrará proyectada.

Distintos autores fijan criterios y modos de conducir el cálculo. En este trabajo se ha adoptado uno de los posibles.

Si se plantea el cálculo, se observa que las incógnitas son muchas más que las ecuaciones que se pueden escribir, y como frecuentemente ocurre con los problemas de ingeniería, se deben hacer adopciones que se basan en la experiencia.

La experiencia que utilizamos en este trabajo se ha extraído de la bibliografía disponible; quien efectivamente construye después de calcular, encuentra otra fuente de experiencia en sus construcciones.

Se construye, se ensaya, se controla, y se incorpora la experiencia que surge de los resultados, a los datos de diseño de que dispone el proyectista.

#### **V.4 DESARROLLO DEL CÁLCULO**

Proponemos desarrollar el cálculo dividiéndolo en una sucesión de pasos independientes que conducen a una solución, (no necesariamente adecuada).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cada paso partiendo de los datos, y tablas que conducen a obtener resultados intermedios. A medida que se avanza en el cálculo, se observa la conveniencia de ajustar valores para mejorar los resultados, y hacer más adecuada la condición de diseño. Para fines de aprendizaje de la metodología de cálculo, los lazos correctivos y los ajustes reiterados no son útiles.

Con una definición correcta de los pasos de cálculo, solamente se encara el cálculo y dimensionamiento electromagnético del transformador. Los resultados deben ser evaluados y verificados teniendo en cuenta otros aspectos, como el térmico, electrodinámico, dieléctrico etc.

Además, se hacen comentarios oportunos respecto de diseños alternativos, formas constructivas, y otras modalidades de cálculo posibles.

#### V.4.1 Datos de partida

Los datos fundamentales que se especifican en las demandas de transformadores son, generalmente, las tensiones primarias y secundarias de línea, de donde se deduce las tensiones de fase primaria ( $V_H$ ) y secundaria ( $V_x$ ) con carga, para  $\cos\theta=1$  ó 0.8, y la capacidad  $S=V_x I_x$ . En kVA; en el cálculo, es requisito tomar en cuenta ciertos parámetros eléctricos de diseño, como el por ciento de impedancia(%Z), el por ciento de corriente de excitación (% $I_o$ ), las pérdidas en vacío ( $P_{FE}$ ), las pérdidas de carga ( $P_{Cu}$ ) y la eficiencia. Estos parámetros como restricciones de garantía.

A manera de ilustrar la técnica de diseño y el cálculo, sigamos el ejemplo siguiente:

Diseñar un transformador trifásico tipo poste de 75 kVA, 13200/220-127 Volts, 60 Hz, 65 °C y  $\pm 2$  derivaciones en A.T. de 2.5 % c/u, conexión  $\Delta$ -Y.

Como el transformador trifásico consiste, esencialmente, de tres transformadores monofásicos idénticos; tenemos que dividir la potencia trifásica entre tres, entonces:

$$kVA_{io} = \frac{kVA_{to}}{3} = \frac{75kVA}{3} = 25kVA \text{ ----- (5.1)}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Consideraremos de entrada, que el transformador tendrá un arreglo de bobina: baja tensión - alta tensión (B.T. - A.T.), y que en el devanado de baja tensión se usara hoja de aluminio en lugar de solera de cobre; esto a conveniencia de reducir el peso en el transformador y desde luego, los efectos electromecánicos producidos por las corrientes de cortocircuito. También cabe mencionar que, por requerirse en los sistemas eléctricos un buen numero de transformadores de distribución, actualmente se requiere diseñar estos usando núcleos arrollados (tipo Wescor) en lugar de usar núcleos apilados; dado que a esta construcción tiene ventajas en la producción en serie, y, además, resultan ser más eficientes en la operación. La figura 5.1 muestra un transformador monofásico con arreglo B.T. - A.T.

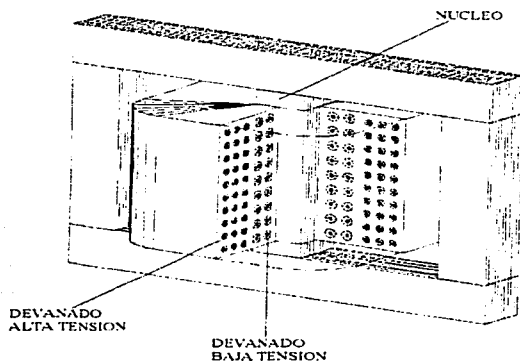


FIGURA 5.1 Transformador monofásico con arreglo B.T.-A.T. y con núcleo apilado

#### V.4.2 Cálculo de tensiones y corrientes en los devanados.

Para la bobina del primario, por ser conexión delta, la tensión de la línea será igual a los Volts / bobina. Considerando las derivaciones extremas y la nominal tenemos:

Posición No.	1	3	5
Voltios de línea	13860	13200	12540

Y la corriente nominal en el primario,

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



$$I_p = \frac{kVA}{V_p} = \frac{25kVA}{13.2kV} = 1.89A \text{ ----- (5.2)}$$

La corriente en las posiciones 1 y 5,

$$I_{p1} = \frac{kVA}{V_{p1}} = \frac{25kVA}{13.86kV} = 1.80A. \text{ ----- (5.3)}$$

$$I_{p5} = \frac{kVA}{V_{p5}} = \frac{25kVA}{12.54kV} = 1.99A. \text{ ----- (5.4)}$$

Para la bobina del secundario, la tensión de fase será de 127 Volts, a continuación tenemos:

$$I_{sf} = \frac{kVA}{kV} = \frac{25kVA}{0.127kV} = 196.85A. \text{ ----- (5.5)}$$

#### V.4.3 Cálculo del número de vueltas, sección del conductor.

Número de vueltas y sección del conductor.

##### V.4.3.1 Determinación del número de vueltas (o espiras).

La determinación inicial del número de vueltas en los devanados de un transformador de distribución, puede efectuarse por cualesquiera de las dos formas siguientes:

- > A partir de algún diseño similar disponible.
- > Mediante la determinación empírica de la relación  $V_t =$  Volts/vuelta. En caso puede emplearse la fórmula,

$$V_t = 1.1 \sqrt{\frac{kVA}{(Z/5)^{1/2}}} \text{ ----- (5.6)}$$

En donde:

- Z: %de impedancia (2%), de la tabla 5.4,
- $KVA_{1\phi}$ : kVA monofásicos del transformador (25 kVA);

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla 5.4 Impedancias normalizadas**

Fases	Volts en A.T.	%Z
1φ	13200	2 a 3
	13200YT/7620	
3φ	13200	2 a 3
	23000	2 a 3.25
	35000	2 a 3.5

Y por lo tanto

$$N_1 = \frac{V_1}{V_i} \text{-----(5.7)}$$

y

$$N_2 = \frac{V_2}{V_i} \text{-----(5.8)}$$

Despejando valores

$$V_i = 1.1 \sqrt{\frac{25}{(2/5)^{1/2}}} = 1.1 \sqrt{\frac{25}{0.6325}} = 6.9159$$

También puede usar la expresión siguiente:

$$V_i = \frac{1}{c} \sqrt{(\text{rendimiento en volt- amperes})_{30}} \text{-----(5.8)}$$

Donde el rendimiento se expresa en volts-amperes y c toma valores dependiendo del tipo de núcleo a usar:

Tipo columna (o core)-----c=40 - 70  
 Tipo acorazado (o shell)-----c=25 - 40

Para diseños preliminares puede suponerse un valor promedio. Los valores bajos del coeficiente c corresponden a tensiones bajas y frecuencias altas.

Y más directamente se pueden usar los kVA monofásicos, en la forma de la expresión siguiente:

$$V_i = c \sqrt{kVA} \text{-----(5.9)}$$

Donde c toma valores dependiendo del tipo de núcleo a usar y de los valores de tensión y frecuencia.

Tipo columna-----c=0.6 - 0.9

Tipo acorazado----c=0.9 - 1.3

Volviendo al cálculo y por conveniencia del diseño, determinaremos primero el número de vueltas del devanado secundario

$$N_2 = \frac{V_2}{V_1} = \frac{127V}{6.9159} = 18.36 \text{ espiras}$$

Por razones de manufactura este valor lo tenemos que ajustar a un número entero, el mediano próximo es 18 espiras. Con este dato recalcularemos los Volts/vuelta, para así determinar el número de espiras del devanado primario:

$$V_1 = \frac{127}{18} = 7.056;$$

Entonces, tenemos que:

$$N_1 = \frac{V_1}{V_2} = \frac{13200}{7.056} = 1870.87 \text{ espiras.}$$

En números redondos

$$N_1 = 1871 \text{ espiras (nominales)}$$

Pero recordemos que tenemos derivaciones arriba y abajo del valor nominal; para efectos de diseño y de construcción calcularemos el valor superior, o sea, para la posición 1 (tap 1) del cambiador de derivaciones, por lo tanto:

$$N_{1t} = \frac{13860}{7.056} = 1964.41 \\ \approx 1965 \text{ espiras.}$$

Al considerar el porcentaje del 5% arriba del valor nominal del número de vueltas, obtendríamos el mismo valor anterior:

$$1824 \text{ espiras} \times 1.05 = 1965 \text{ espiras}$$

En resumen para la regulación de la tensión en el transformador, tenemos:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Posición 1	13860 Volts	1964 espiras
Posición 2	13530 Volts	1918 espiras
Posición 3	13200 Volts	1871 espiras
Posición 4	12870 Volts	1824 espiras
Posición 5	12540 Volts	1777 espiras

El desarrollo de los devanados se presenta en la figura 5.2.

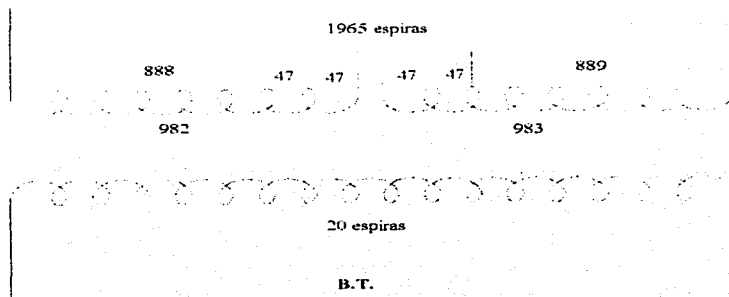


FIGURA 5.2 Esquema del desarrollo de devanados de B.T. Y A.T.

#### V.4.3.2 Cálculo de calibres del conductor.

Para el cálculo de calibres del conductor, es común tomar una densidad de corriente ( $\delta$ ) que este dentro de los valores siguientes: 2.5 a 3.5 amperes/mm<sup>2</sup>, para transformadores sumergidos en aceite, y de 1.5 a 2.5 amperes/mm<sup>2</sup> para transformadores tipo seco. Para nuestro ejemplo tomemos una densidad de corriente de 2.5 amperes/mm<sup>2</sup>, entonces los calibres serán:

➤ Para la bobina de A.T. consideramos la corriente para la posición 5, que es ligeramente mayor a la corriente nominal; entonces:

$$A_{\text{cond}} = \frac{I_{ps}}{\delta} = \frac{1.99A}{2.5 A/mm^2} = 0.7974 \text{ mm}^2 \text{ -----(5.10)}$$

De tablas este valor corresponde a un calibre núm. 18 AWG.

El calibre para la bobina de B.T., será de:

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

De tablas, esta área corresponde a un calibre núm. 3/0 AWG.

$$A_{\text{cond}} = \frac{I_s}{\delta} = \frac{196.85\text{A}}{2.5\text{ A/mm}^2} = 78.74\text{ mm}^2$$

Aquí cabe aclarar que por algunas cuestiones técnicas, no conviene usar conductor redondo; más favorablemente conviene usar solera de cobre u hoja de aluminio para el mejor aprovechamiento del factor de espacio. También cabe aclarar que usar solera u hoja tienen ventajas e inconveniencias, dependiendo de la forma de la sección del núcleo a adoptar. Para núcleos cruciformes se usa solera; para núcleos rectangulares es preferible la hoja de aluminio. En este diseño de transformador, usaremos un núcleo trifásico acorazado, del tipo arrollado (WESCOR) con sección rectangular, ver figura 5.3(a).

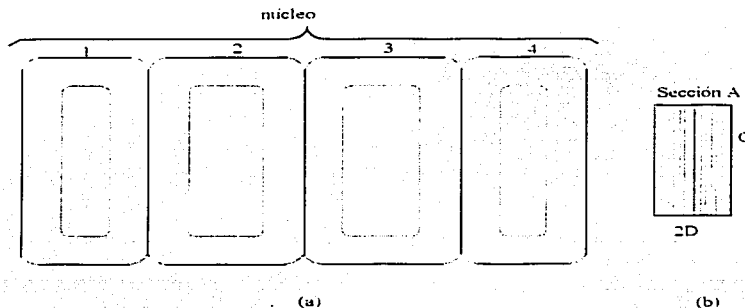


FIGURA 5.3 Núcleo arrollado de cuatro arcadas, para transformador trifásico tipo acorazado.

El usar hoja de aluminio, lógicamente se debe suponer que se devanara una espira por capa, lo que redundará en una disminución considerable de la reactancia inductiva en el enrollado secundario.

#### V.4.4 Cálculo de la sección transversal del núcleo y sus dimensiones geométricas.

Como ya hemos determinado el número de vueltas de los devanados, primario ( $N_p$ ) y secundario ( $N_s$ ), ahora, para el

cálculo de la sección transversal del núcleo necesitamos de una densidad de flujo (B). Para núcleos arrollados es recomendable usar esta entre 15000 a 17000 gauss, y para núcleos apilados de 13000 a 1500 gauss. Entonces nos fijamos una densidad de flujo magnético (B) de 16000 gauss, entonces, con la ecuación general del transformador, podemos calcular la sección del núcleo (A), figura 5.3(b).

$$A = \frac{V \times 10^4}{4.44 fNB} \text{ (cm)} \text{-----(5.11)}$$

$$V=13200 \text{ Volts y } f=60 \text{ Hz.}$$

Dando valores a la expresión, tenemos:

$$A = \frac{13200 V \times 10^4}{4.44(60)(1871)(16000)}$$

$$A = 165.5 \text{ cm}^2 \text{ (área neta)}$$

Otra forma de proceder para encontrar el área transversal del núcleo es, aplicando la fórmula experimentada siguiente:

$$A = \sqrt{7.09(45.6kVA_{10})} \text{ cm}^2 \text{-----(5.12)}$$

O también

$$A = \sqrt{21.27(45.6kVA_{10})} \text{ cm}^2 \text{-----(5.13)}$$

Para densidades de flujo (B), de 1500 a 1600 gauss.

Si usamos acero eléctrico grado M-4<sup>3</sup> en la construcción de núcleos arrollados, el factor de apilamiento ( $f_e$ ) lo podemos considerar entre los valores de 0.95 a 0.97. en núcleos apilados el  $f_e$  está entre 0.93 y 0.95. Para nuestro calculo, usemos  $f_e=0.97$ , entonces:

$$A_n = A_f f_e \text{-----(5.14)}$$

Donde:

- >  $A_n$ : área neta
- >  $A_f$ : área física
- >  $f_e$ : factor de apilamiento (o de laminación), también conocido como factor de espacio.

Despejando al  $A_f$  de la ecuación 5.14,

$$A_f = \frac{A_n}{f_e} \text{-----(5.14a)}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

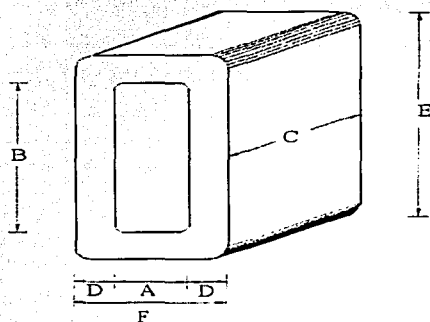
Dando valores

$$A_f = \frac{165.5182}{0.97} = 170.6374 \text{ cm}^2$$

Para secciones transversales rectangulares, como lo es nuestro caso, la proporción de ancho de lamina (C), al espesor de la laminación (D) de la arcada (ver figura 5.4), lo podemos considerar:

C = (2 a 3) 2D, para núcleo tipo acorazado.

C = (1.4 a 2) D, para núcleo tipo columna.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 5.4 Representación de una arcada del núcleo

Si tomamos un ancho de lámina (C) de 19.0 cm y consideramos en el diseño un núcleo tipo acorazado, entonces podemos calcular su espesor (2D), en función del área física ( $A_f$ ), figura 5.5 De aquí:

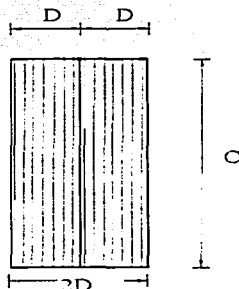
$$2D = \frac{A_f}{c} = \frac{170.6374}{19} = 8.98 \text{ cm (89.8 mm)} \text{-----(5.15)}$$

Si verificamos la proporción de ancho C/2D, tenemos un valor de 2.11 veces. El número de laminaciones para formar el paquete o el espesor (2D), lo determinamos considerando el espesor de la lamina a usar; se ha mencionado que el acero eléctrico grado M4 tiene un espesor de 0.28 mm (0.011"), entonces requerimos enrollar:

$$\text{No. de laminaciones} = \frac{2D}{0.28} = \frac{89.8}{0.28} = 320.74 \approx 321 \text{ vueltas -----(5.16)}$$

La altura de la ventana (B) del núcleo, usualmente es de 2.5 a 3.5 veces el espesor (2D); si se toma el valor de 3.25, se tiene:

$$\begin{aligned} B &= 2D \times 3.25; \text{-----}(5.17) \\ B &= 8.98 \times 3.25 \\ &= 29.19 \text{ cm.} \end{aligned}$$



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 6.5 Corte de la sección transversal del núcleo.

Para el cálculo de las dimensiones de otras formas de núcleo (por ejemplo secciones cruciformes) existen otros procedimientos.

#### V.4.5 Cálculo de las dimensiones generales de la bobina y del ancho de la ventana de las arcadas del núcleo.

Con lo que sé ha avanzado hasta aquí en el cálculo preliminar, se tienen los datos principales para poder dimensionar las bobinas del transformador y el ancho de ventana de las arcadas del núcleo.

##### V.4.5.1 Dimensionado de las bobinas

a) Bobina de B.T.

El conductor a usar para devanar la bobina de B.T., se ha seleccionado la hoja de aluminio (foil de aluminio); esto implica hacer ajustes en el valor de la sección transversal del conductor. Para el cobre tenemos una  $A_{\text{cond}} = 65.614 \text{ mm}^2$ , y para el aluminio debemos compensar el área en un 61% para que



halle equivalencia de conductividad y de pérdidas de carga.

$$A_{\text{cond}}(\text{Al}) = A_{\text{cond}}(\text{Cu}) \times 1.61 \text{-----}(5.18)$$

$$A_{\text{cond}}(\text{Al}) = 78.74 \text{ mm}^2 \times 1.61$$

$$A_{\text{cond}}(\text{Al}) = 126.77 \text{ mm}^2.$$

O también:

$$A_{\text{cond}}(\text{Al}) = \frac{I_s}{\delta} = \frac{196.85 \text{ A}}{1.59 \text{ A/mm}^2} = 123.8 \text{ mm}^2 \text{-----}(5.10a)$$

Donde  $\delta$  es la densidad de corriente para el aluminio, cuyo valor es considerado en proporción inversa a la conductividad del cobre.

Para calcular la altura del devanado de baja tensión, se debe de considerar el nivel básico de impulso (NBI), así tenemos que para la baja tensión correspondiente a una clase de aislamiento de 1.2 kV y un NBI de 30 kV, ver tabla 5.5. Luego, la altura efectiva del devanado (figura 5.6) será de:

$$h_s = B - 2(d_a + r_c); \text{-----}(5.19)$$

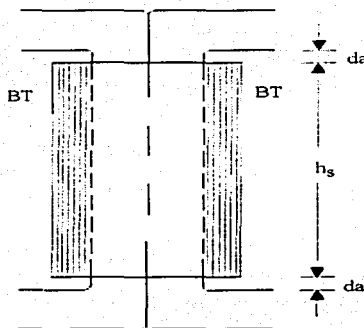


FIGURA 5.6 Corte transversal del devanado de B.T.

Donde:

- B: altura de la ventana del núcleo
- $d_a$ : distancia aislamiento axial (colar + aislamiento del núcleo)
- $r_c$ : 3.17 mm (radio de curvatura del núcleo)

dando valores a la ecuación anterior, tenemos:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla 5.5 Distancias mínimas para aislamientos mayores**

Clase Aisl.	Pruebas dieléctricas		Aislamiento entre bobinas de A.T.-B.T., aislamiento radial A.T.-núcleo				collar	Aisl. yugo	Aisl. Entre fases	Claro bobina - tanque
	Impulso (NBI)	Potencial aplicado	Tubo de papel	Conducto de aceite	envolvente	Total tolerancia				
	KV		milímetros							
1.2	3.	10	1.5	-	-	1.7	6.5	1.5	1.7	15
5	60	19	-	3	1	4.5	6.5	2.0	4.7	20
8.7	75	26	0.4	3	1	4.9	10	2.0	5.0	25
15	95	34	0.9	3	1	5.5	13	2.5	6.0	28
15	110	34	1.4	3	1	6.0	20	3.0	8.0	30
25	150	50	2.5	3	1.8	8.3	32	4.5	10.0	40
34.5	200	70	4.8	3	1.8	10.8	51	4.5	13.0	50

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

$$h_s = 29.19 \text{ cm} - 2(0.8 \text{ cm} + 0.317 \text{ cm}) \\ = 26.954 \text{ cm} (269.54 \text{ mm}),$$

Consultando las tablas 5.6 Y 5.7, de calibres BWG de láminas de aluminio, tenemos que el más próximo para el área calculada es tomar el calibre 26 BWG con un ancho de 269.54 mm, así como papel kraft tratado (insuldur) de 0.127 mm (0.005'') de espesor como aislamiento entre capas.

**Tabla 5.6 lámina de aluminio lisa.**

En rollo de 91.4 cm de ancho.

ALEACIONES 2S-H14 TEMPLE MEDIO DURO Y SUAVE					
	Calibre B.W.G.			Peso aproximado	
	No.	mm	pulgadas	Kg. por metro lineal	Kg. por m <sup>2</sup>
2	16	1.651	0.065	4.036	4.470
4	18	1.245	0.049	3.080	3.370
6	19	1.070	0.042	2.376	2.600
8	20	0.889	0.035	2.202	2.410
10	22	0.711	0.028	1.755	1.920
12	24	0.559	0.022	1.380	1.510
14	26	0.457	0.018	1.132	1.239
16	38	0.051	0.002	0.125	1.138

El espesor o dimensión radial de la bobina de B.T., será de:

$$d_{BT} = 20 (0.457 \text{ mm} + 0.127 \text{ mm}) = 11.68 \text{ mm},$$

si a esta dimensión le damos un 5% de tolerancia por concepto de uso de cintas para sujeciones o amarres, tenemos

$$d_{BT} = 12.21 \text{ mm} \times 1.05 = 12.264 \text{ mm}$$

La longitud de la vuelta media ( $l_{vms}$ ) del devanado secundario (fig. 5.7) se calcula con la siguiente expresión:

$$l_{vms} = 2(C + 2D) + \pi(2(d_{aisl}) + d_{BT}) \text{-----}(5.20)$$

donde:

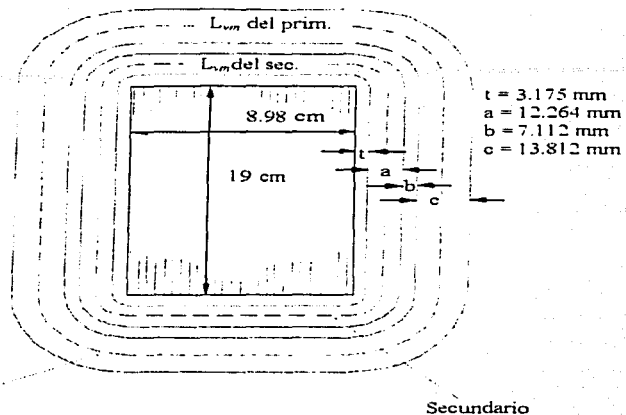
C: ancho de la lámina

D: espesor del paquete de laminación de arcada

$d_{aisl}$ : espesor de aislamiento tubo de devanado

$d_{BT}$ : espesor del devanado de baja tensión.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Primario Secundario  
 FIGURA 5.7 Croquis mostrando el arreglo de las bobinas primaria y secundaria sobre una pierna del núcleo y la longitud media por vuelta de cada embobinado o devanado

Dando valores a la ecuación anterior, tenemos

$$\begin{aligned}
 l_{vms} &= 2(19 \text{ cm} + 8.98 \text{ cm}) + \pi(2(0.317 \text{ cm}) + 1.2264 \text{ cm}) \\
 &= 56.61 \text{ cm} + 6.013 \text{ cm} = 61.8078 \text{ cm}.
 \end{aligned}$$

la longitud total del conductor requerido, será:

$$\begin{aligned}
 l_{BT} &= N_s \times l_{vms} \text{----(5.21)} \\
 &= 20 \times 61.8078 \text{ cm} \\
 &= 1112.54 \text{ cm} (11.1254 \text{ m}).
 \end{aligned}$$

A la longitud total del conductor de B.T. habrá que sumarle las distancias de guías o salidas a las boquillas, un 10% no sería demasiado, entonces:

$$\begin{aligned}
 l_{BT} &= l_{BT} \times 1.10 \text{----(5.22)} \\
 &= 11.1254 \text{ m} \times 1.10 \\
 &= 12.2379 \text{ m}
 \end{aligned}$$

El peso del conductor ( $P_{A1}$ ) por bobina será de:

$$P_{A1} = V_{A1} \times P_c \text{-----(5.23)}$$

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Tabla 5.7 lámina de aluminio lisa.

En rollo de 60.9 cm de ancho.

ALEACIONES 2S-H14 TEMPLE MEDIO DURO Y SUAVE					
	Calibre B.W.G.			Peso aproximado	
	No.	mm	pulgadas	Kg. por metro lineal	Kg. por m <sup>2</sup>
18	16	1.651	0.065	2.722	4.470
20	18	1.245	0.049	2.052	3.370
22	19	1.070	0.042	1.573	2.600
24	20	0.889	0.035	1.468	2.410
26	22	0.771	0.028	1.169	1.920
28	24	0.559	0.022	0.920	1.510
30	26	0.457	0.018	0.755	1.239
32	28	0.357	0.014	0.588	0.965
34	30	0.305	0.012	0.504	0.37
36	32	0.229	0.009	0.378	0.621
38	34	0.178	0.007	0.294	0.483
40	36	0.102	0.004	0.168	0.276
42	38	0.051	0.002	0.084	0.138

Donde:

$V_{A1}$  = volumen del conductor (26.95 x 0.0457 x 1223.79)

$P_a$  = peso específico del aluminio (3.7 gr/cm<sup>3</sup>)

Dando valores a la expresión anterior, tenemos:

$$P_{A1} = (1507.23 \text{ cm}^3) \times 3.7 \text{ gr/cm}^3 \\ = 5577.62 \text{ gramos} = 5.577 \text{ Kg}$$

b) Bobina de A.T.

Dimensionar la bobina de alta tensión no es fácil, pero tampoco es complicado, se requiere de una buena práctica en el diseño y contar con la información técnica de fabricantes experimentados - sobre todo, en cuanto al manejo de distancias dieléctricas se refiere- y según los niveles de tensión a operar. La tabla 5.5 nos da algunos valores a considerar, y que, generalmente le llamamos "collares" (fig. 5.8).

El conductor a usar para devanar la bobina de A.T. (de cálculo) necesario es un calibre No. 18 AWG. Para la clase de aislamiento de 15 kV, requerimos un conductor aislado con doble capa de barniz; de información técnica de productos magneto, seleccionamos el alambre con barniz doble formanel.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

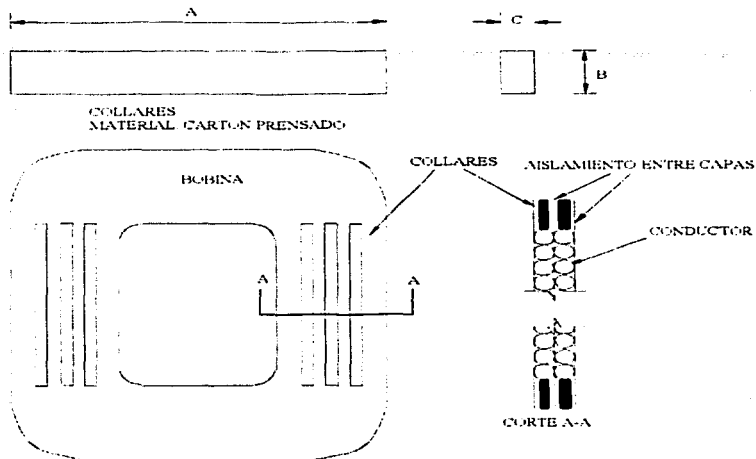


FIGURA 5.8 Colocación de collares en el devanado de la bobina de A.T.

Luego, calculemos la altura ( $h_p$ ) efectiva del devanado de A.T.:

$$h_p = B - 2(d_a + r_c) \text{-----(5.24)}$$

Donde:

$d_a$ : distancia del aislamiento axial (collares para tensión clase 15 kV (ver tabla 5.5)

B: altura de la ventana del núcleo

$r_c$ : radio de curvatura del núcleo

Aplicando valores,

$$h_p = 29.19 \text{ cm} - 2(1.55 \text{ cm} + 0.317 \text{ cm}) \\ = 29.19 \text{ cm} - 3.734 \text{ cm} = 25.456 \text{ cm} (254.56 \text{ mm})$$

conociendo la altura efectiva del devanado de A.T., podemos calcular el número de espiras por capa:

$$\text{espiras/capa} = \frac{h_p}{d_{\text{cond}}} \text{-----(5.25)}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

donde:

$h_p$ : altura efectiva del devanado primario

$d_{cond}$ : diámetro del conductor

dando valores, se tiene:

$$\frac{254.56 \text{ mm}}{1.097 \text{ mm}} = 232.05 \text{ espiras por capa}$$

el número de capas requeridas lo obtenemos al dividir el número total de espiras entre las espiras por capa, así tenemos:

$$\frac{1965}{232} = 8.4698$$

$$\cong 9 \text{ capas}$$

por conveniencia, desde el punto de vista dieléctrico, se ajusta el número de espiras por capas a 220, entonces:

$$\frac{1965}{220} = 8.93$$

$$\cong 9 \text{ capas}$$

En la última capa se devanan 205 espiras. En la figura 5.9 Se muestra el arreglo de salidas de guías de A.T. y B.T.

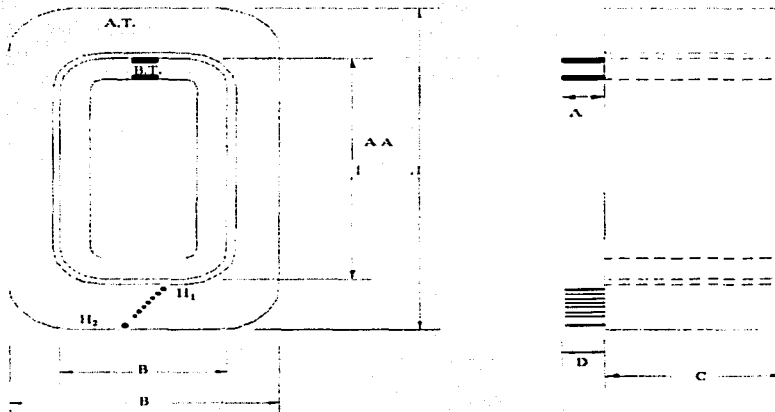


FIGURA 5.9 Croquis mostrando el arreglo de bobina B.T.-A.T. y la salida de las guías en los cabezales

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### V.4.5.2 Cálculo de aislamientos menores (bobina de A.T.)

- Aislamiento entre vueltas ( $V_v$ ) en volts/vuelta

$$V_v = \frac{V}{N} \text{F.s.} \text{-----} (5.26)$$

F.s.=1.5 y N= No. de vueltas en posición de mayor tensión.

$$V_v = \frac{13800}{1965} \times 1.5 = 25.95 \text{ (para la prueba de potencial inducido)}$$

Y

$$V_v = \frac{95000}{1777} \times 1.5 = 80.19 \text{ (para la prueba de impulso)}$$

N= No. de vueltas en posición de menor tensión.

Al consultar las características eléctricas del conductor aislado, vemos que los valores calculados están por debajo de los especificados por el fabricante.

- Aislamiento entre capas ( $V_c$ ) en volts/capa

$$V_c = \frac{2V \times v_{pc}}{N} \text{F.s.} \text{-----} (5.27)$$

F.s.=1.8 y  $v_{pc}$ =220 vueltas por capa

$$V_c = \frac{2(34000)220}{1965} \times 1.8 = 13703.8 \text{ volts (13.7 kV)}$$

Y

$$V_c = \frac{2(95000)220}{1777} \times 1.8 = 42341 \text{ volts (42.34 kV)}$$

Si entramos con estos valores a las curvas de comportamiento (figura 5.10) Obtenemos un espesor de aislamiento de 0.381 mm (0.015'').

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



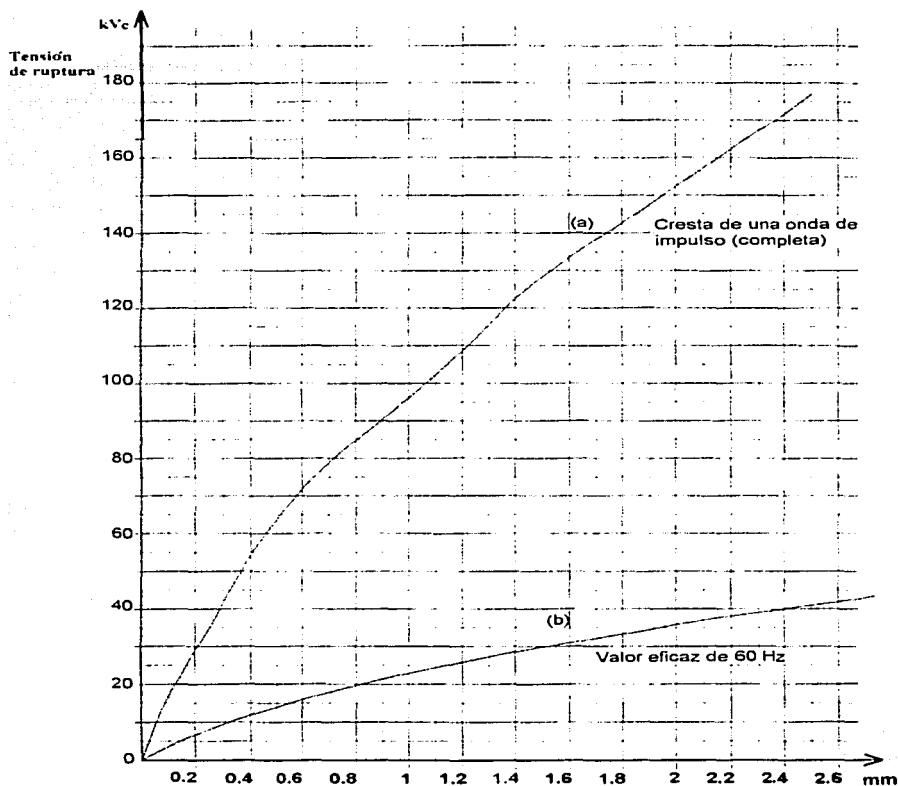


FIGURA 5.10 Características de ruptura del papel kraft sumergido en aceite.

- (a) ruptura ante onda de impulso.
- (b) ruptura ante tensiones de 60 Hz.

El espesor total de la bobina lo determinamos en función de los materiales que intervienen en la construcción:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Material	Espesor radial en mm	
Tubo de devanado (o casquillo):		
Cartón prensado (presspan o pressboard)		3.175
Bobina de baja tensión (B.T.): conductor + aislamiento		12.264=a
Aislamiento A.T.-B.T.		
Papel kraft tratado (insuldur)	0381	7.112=b
Formaducto de cartón prensado	6.35	
Papel kraft tratado	0.381	
Bobina de alta tensión (AT):		
Nueve capas del conductor cal. No. 18	9.873	13.812=c
Aislamiento entre capas (papel kraft tratado de 0.254 mm).	3.429	
Sobreaislamientos en la última capa (papel y cinta de algodón).	0.51	
Total		36.363

La longitud de la vuelta media del devanado primario (fig. 5.7), se calcula de la forma siguiente:

$$l_{vmp} = 2(C+2D) + \pi(2(d_{casq} + d_{BT} + d_{aisl AT-BT}) + d_{AT}) \quad (5.28)$$

dando valores, tenemos:

$$l_{vmp} = 2(19\text{cm} + 8.98\text{cm}) + \pi(2(0.3175\text{cm} + 1.2264\text{cm} + 0.7112\text{cm}) + 1.3812\text{cm}) \\ = 55.96 \text{ cm} + 18.51 \text{ cm} = 74.47 \text{ cm}$$

la longitud del conductor requerido, será de

$$l_{tAT} = N_{pl} \times l_{vmp} \quad (5.29)$$

siendo :  $N_{pl} = 1965$  espiras (en la posición 1 del cambiador de derivaciones);

dando valores tenemos:

$$l_{tAT} = 1965 \times 74.47 \text{ cm} \\ = 146334.05 \text{ cm} \quad (1463.34 \text{ m}) \\ \approx 1.463 \text{ km.}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El peso del conductor por bobina debe de ser de:

$$1.463 \text{ km} \times 7.32 \text{ kg/km} = 10.7091 \text{ kg} \approx 10.71 \text{ kg.}$$

#### V.4.5.3 Determinación del ancho de ventana del núcleo y peso de la arcada

En la figura 5.3, Observamos que existen cuatro arcadas, de las cuales las arcadas 2 y 3 son iguales en tamaño y peso, y las arcadas 1 y 4 también son iguales pero diferentes de 2 y 3. Si hacemos un esquema del conjunto de núcleo-bobina, podemos deducir del porque diferentes arcadas (fig. 5.11).

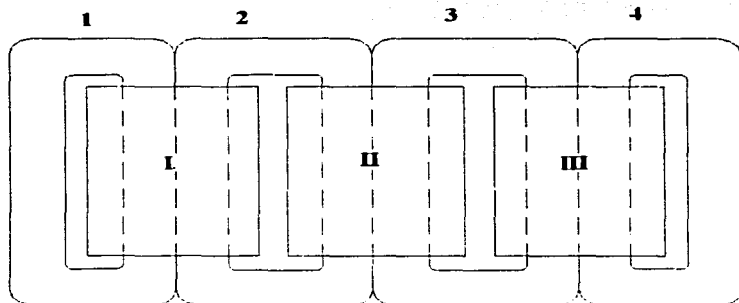


FIGURA 5.11 Diagrama de corte del conjunto núcleo-bobina.

En esta figura, vemos que las arcadas 1 y 4 se aloja un espesor de bobina, y en las arcadas 2 y 3 se alojan dos espesores de bobinas. Entonces, calcularemos en las arcadas dos anchos (A) de ventana; llamaremos arcadas chicas la 1 y 4, y arcadas grandes la 2 y 3, figura 5.12.

De la figura 5.12, C= ancho de lámina, y

$$\begin{aligned} A_1 &= \text{espesor de bobina} + \text{aislamiento al núcleo} \text{ ----(5.30)*} \\ &= 36.363 \text{ mm} + 2.5 \text{ mm} = 38.863 \text{ mm} (3.886 \text{ cm}) \\ &\approx 3.89 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$A_2 = 2(\text{espesor de bobina}) + \text{aislamiento entre bobinas (de fases diferentes)} \text{ ----(5.31)*}$$

$$=2(36.363 \text{ mm}) + 6 \text{ mm} =78.726 \text{ mm} \quad (7.8726 \text{ cm}) \\ \approx 7.87 \text{ cm.}$$

la longitud media de la arcada chica ( $l_{m1}$ ), se calcula aplicando la expresión siguiente:

$$l_{m1} = 2(A_1 + B) + \pi(D) \quad (5.32)$$

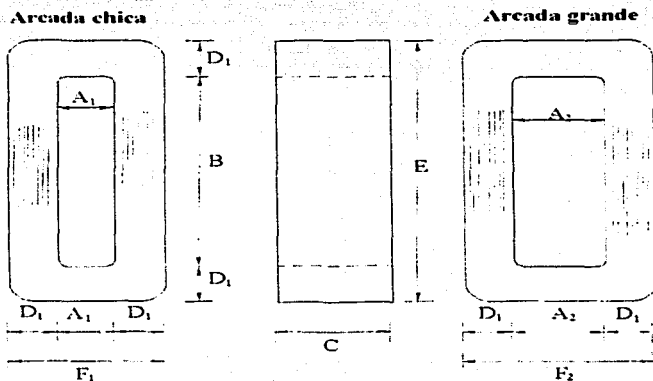


FIGURA 5.12 Representación física de las arcadas.

Sabemos que  $2D = 8.98 \text{ cm}$ , por lo tanto  $D = 4.49 \text{ cm}$ .

Dando valores a la fórmula anterior, tenemos,

$$l_{m1} = 2(3.886 + 29.19) + \pi(4.49) \\ = 66.152 + 11.482 = 80.25 \text{ cm.}$$

El peso de esta arcada se calcula con la fórmula 5.23 Ya conocida, por lo tanto,

$$P_1 = V_{Fe1} \times P_e.$$

Donde:

$P_1$ : peso del acero eléctrico.

$P_e$ : peso específico del acero ( $7.65 \text{ gr/cm}^3$ ).

$V_{Fe1}$ : volumen del acero eléctrico.

Dando valores a la expresión anterior, tenemos:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$\begin{aligned}
 P_1 &= (19 \times 4.49 \times 80.25) \times 7.65 \\
 &= 52381.04 \text{ gramos (52.381 kg)} \\
 &= 52.4 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

la longitud media de la arcada grande ( $l_{m2}$ ) será de:

$$\begin{aligned}
 l_{m2} &= 2 (A_2 + B) + \pi (D) \text{----(5.33)} \\
 &= 2(7.872+29.19) + \pi (4.49) \\
 &= 88.229 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

el peso de la arcada grande será de:

$$\begin{aligned}
 P_2 &= V_{F_2} \times P_c \text{----(5.34)} \\
 &= (19 \times 4.49 \times 88.229) 7.65 \\
 &= 57585.6 \text{ gramos (57.585 kg)} \\
 &= 57.59 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

El peso total del núcleo trifásico deberá ser la suma de las cuatro arcadas; por lo tanto:

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \text{----(5.35)}$$

Donde  $P_1 = P_4$  y  $P_2 = P_3$ ,

Dando valores,

$$P_t = 2 (52.4) + 2 (57.59) = 219.98 \text{ kg}$$

#### V.4.6 Diseño dieléctrico del transformador.

El diseño dieléctrico de cualquier maquina eléctrica consiste en determinar las características y dimensiones de cada uno de los aislamientos utilizados, en este caso del transformador, de tal forma que se asegure una operación dieléctrica confiable. En la figura 5.13. se muestran los aislamientos más importantes que forman parte de un transformador de distribución con núcleo arrollado y bobinas tipo concéntricas. De acuerdo con la constitución de dichas figuras, se tiene:

- Aislamiento bajo la bobina o tubo de devanado (papel o cartón prensado),
- Aislamiento entre vueltas (barniz o esmalte),
- Aislamiento entre capas (papel kraft o insuldur),

- Aislamiento para collares (papel o cartón prensado),
- Aislamiento entre devanados de B.T. y A.T.,
- Aislamiento para envoltorio de la A.T. (papel kraft, insuldur o crepe),
- Aislamiento entre bobinas y yugo,
- Aislamiento entre devanados exteriores y núcleo, tanque o herrajes,
- Aislamiento entre bobinas de fases diferentes.



FIGURA 5.13 Aislamientos que forman parte de un transformador.

Las estructuras aislantes empleados en los transformadores se caracteriza por ser de geometría diversa y algunas veces irregulares. Por ese motivo, la predicción del comportamiento dieléctrico de los aislamientos resulta muy complicada.

#### V.4.6.1 Cálculo de aislamientos menores.

Los aislamientos entre vueltas, capas y secciones de un devanado se conocen como aislamientos menores. Su determinación depende fundamentalmente del tipo de construcción de bobina. Como una referencia útil a continuación se describe el caso de bobinas tipo capas.

##### a) Aislamiento entre vueltas

En transformadores de distribución este aislamiento no constituye problema alguno, puesto que existen conductores aislados con doble y triple capa de barniz. Puede verificarse

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

tanto en baja frecuencia como al impulso, mediante la expresión:

$$V_v = \frac{V}{N} \text{ F.s.} \text{-----} (5.26)$$

Donde:

- V: tensión aplicada,
- N: número de vueltas,
- F.s.: factor de seguridad (puede usarse F.s. = 1.8 en baja frecuencia y F.s. = 1.5 en impulso),
- V<sub>v</sub>: esfuerzo dieléctrico entre vueltas.

El valor de V<sub>v</sub> deberá ser menor a la tensión de ruptura del aislamiento empleado (papel o barniz).

b) Aislamiento entre capas

El aislamiento entre capas puede estimarse con la fórmula:

$$V_c = \frac{2V \times v_{pc}}{N} \text{ F.s.} \text{-----} (5.27)$$

Donde :

- V: tensión aplicada,
- V<sub>pc</sub>: vueltas por capa,
- V<sub>c</sub>: esfuerzo dieléctrico entre capas,
- F.s.: factor de seguridad (F.s. = 1.8 para baja frecuencia; F.s. = 1.8 para impulso en bobinas de 15 kV y menores, y F.s. = 2.5 para impulso entre bobinas de 25 y 34.5 kV).

El aislamiento a utilizar puede determinarse de las curvas de la figura 6.10. Las tensiones de ruptura del aislamiento elegido deberán de exceder los valores calculados para V<sub>c</sub>.

Varios diseñadores de transformadores de distribución manejan con mucha estimación el modelo matemático siguiente,

$$\text{espesor de aislamiento entre capas (d}_{ait}\text{)} = \left[ \frac{\left( \frac{1.15 \times \text{NBI} \times \text{No. de secciones}}{\text{No. de capas a la V}_n} \right)^{\frac{4}{3}}}{39.37} \right] \text{ (mm)} \text{---} (5.36)$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Donde:

- NBI: nivel básico de impulso (kV)
- $V_n$ : tensión nominal de la A.T.

El número de secciones depende del diseño de la bobina: para el ejemplo, se maneja una sola sección de la bobina de A.T. la bobina de varias secciones se caracteriza cuando se diseña esta para construcción tipo dona.

c) Aislamiento en la zona de derivaciones.

El aislamiento entre capas deberá verificarse para el esfuerzo que se produce entre las capas en donde se rompió el conductor para sacar las derivaciones (generalmente en la bobina de A.T.) esto se logra al sustituir  $V_{pc}$  = número de vueltas fuera. Es usual reforzar las capas mencionadas con aislamiento adicional.

#### V.4.6.2 Selección de aislamientos mayores

Como una estructura aislante es irregular, su campo eléctrico no es uniforme. Esta circunstancia causa que la determinación analítica de los aislantes en los transformadores resulte complicada. Por esta razón, cuando se desea conocer la rigidez dieléctrica de alguna estructura aislante, es necesario recurrir a la experimentación.

Para una selección práctica de aislamientos mayores, puede referirse a la tabla 5.5

#### V.4.7 Pérdidas en el transformador y eficiencia.

Se admite que existen dos tipos fundamentales de pérdidas:

V.4.7.1 Pérdidas en el hierro: por histéresis y por corrientes parásitas (aproximadamente a las pérdidas del ensayo de vacío). Ver tabla 5.8.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



A partir de la inducción ( $B=16000$  gauss) y de las curvas específicas del material a usar (acero al silicio de grano orientado M-4), se obtiene

Pérdidas en el núcleo = 1.2 W/kg  
 Pérdidas aparentes en el núcleo = 1.85 VA/kg

Tabla 5.8 Valores de pérdidas sin carga en transformadores de distribución

Tipo de alimentación	Capacidad kVA	Clase de aislamiento					
		Hasta 15 kV		Hasta 25 kV		Hasta 35 kV	
		En vacío	totales	En vacío	totales	En vacío	totales
Monofásicos	5	30	107	38	112	63	118
	10	47	178	57	188	83	199
	15	62	244	75	259	115	275
	25	86	368	100	394	145	419
	37.5	114	513	130	552	185	590
	50	138	633	160	684	210	736
	75	186	834	215	911	270	988
	100	235	1061	265	1163	320	1266
167	365	1687	415	1857	425	2028	
Trifásicos	15	88	314	110	330	135	345
	30	137	534	165	565	210	597
	45	180	755	215	802	265	848
	75	255	1142	305	1220	365	1297
	112.5	350	1597	405	1713	450	1829
	150	450	1976	500	2130	525	2284
	225	750	2844	820	3080	900	3310
	300	910	3644	1000	3951	1100	4260
500	1330	5561	1475	6073	1540	6586	

Si se considera en factor de destrucción del 10%, entonces se tiene:

$$\text{Pérdidas en el núcleo } (P_{Fe}) = 1.2 \text{ W/kg} \times (219.98/3) \text{ kg} \times 1.1 \text{ ----} (5.37) \\ = 96.77 \text{ W}$$

$$\text{VA de excitación} = 1.98 \text{ VA/kg} \times (219.98/3) \text{ kg} \times 1.1 \text{ ----} (5.38) \\ = 149.19 \text{ VA}$$

$$\text{la corriente de excitación } (I_0) = 149.19/127 = 1.175 \text{ amperes ----} (5.39)$$

o bien

$$\% I_{xc} = 149.19 / (10 \times 25) = 0.5968 \text{ (de la } I_5) \text{ ----} (5.40)$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

V.4.7.2 Pérdidas en el conductor (cobre y aluminio) por efecto Joule, aproximadamente pérdidas del ensayo en corto circuito.

Para el conductor de B.T. la resistencia eléctrica del mismo lo obtenemos de la fórmula:

$$R = \rho_{Al} \frac{L}{a} \text{ ohms ----- (5.41)}$$

Donde:

$$\rho_{Al} = 0.0284 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \text{ (para el aluminio);}$$

Dando valores para la expresión anterior, tenemos

$$R = 0.0284 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \times \frac{12.2379 \text{ m}}{126.77 \text{ mm}^2}$$

$$= 0.0027416 \text{ ohms } (0.2741 \times 10^{-2} \Omega)$$

Las pérdidas por efecto Joule ( $P_{BT}$ ) están dadas por la expresión siguiente:

$$P_{BT} = RI^2 = 0.0027416 \times (196.85)^2 \text{ ----- (5.42)}$$

$$= 106.2379 \text{ Watts a } 20^\circ\text{C}$$

Corrigiendo la resistencia y las pérdidas a  $85^\circ\text{C}$ , tenemos

$$R_C = R[1 + \alpha(T_2 - T_1)] \text{ ----- (5.43)}$$

Donde

- $T_2 = 85^\circ\text{C}$  (temperatura elevada)
- $T_1 = 20^\circ\text{C}$  (temperatura ambiente)
- $\alpha = 0.0039$  (coeficiente de la temperatura para el aluminio).

Dando valores,

$$R_C = 0.27416 \times 10^{-2} [1 + 0.0039(85 - 20)]$$

$$= 0.34366 \times 10^{-2}$$

Entonces, las pérdidas a esta temperatura serán:

$$P_{BT} = R_C I^2 = 0.34366 \times 10^{-2} (196.85)^2$$

$$= 133.169 \text{ Watts}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Para el conductor de A.T su resistencia eléctrica la obtenemos de la manera siguiente:

$$R = l_{CAT} \times \text{ohms/km} \text{ ---- (5.44)}$$

Ohms/km=21 para el calibre #18 AWG.

$$= 1.463 \text{ km} \times 21$$

$$= 30.7145 \text{ ohms a } 20^{\circ}\text{C};$$

Las pérdidas por efecto Joule ( $P_{AT}$ ), son

$$P_{AT} = RI_p^2 = 30.7145 (1.89)^2 \text{ ---- (5.42)}$$

$$= 109.72 \text{ Watts}$$

corrigiendo el valor de la resistencia a  $85^{\circ}\text{C}$ , tenemos:

$$R_c = R[1 + \alpha(T_2 - T_1)]$$

$$\alpha_{Cu} = 0.0038,$$

dando valores a la expresión anterior:

$$R_c = 30.7145[1 + 0.0038(85 - 20)]$$

$$= 38.3 \text{ ohms.}$$

las pérdidas a la temperatura corregida son:

$$P_{AT} = R_c I_p^2 \text{ ---- (5.42)}$$

$$= 38.3 (1.89)^2$$

$$= 137.38 \text{ Watts}$$

también puede usar la expresión matemática siguiente para calcular las resistencias a cualquier elevación de temperatura práctica:

$$\frac{R_1}{R} = \frac{T_0 + T_1}{T_0 + T} \text{ ---- (5.45)}$$

$T_0 = 234.5$  para el cobre,

$T_0 = 225$  para el aluminio,

$T =$  temperatura inicial (o ambiente) en  $^{\circ}\text{C}$

$T_1 =$  temperatura final (o elevada) en  $^{\circ}\text{C}$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### V.4.7.3 eficiencia del transformador

la eficiencia del transformador con carga, vale:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \text{----- (5.46)}$$

siendo:

- $P_1$ : potencia absorbida por el primario (VA),
- $P_2$ : potencia cedida por el secundario (VA),
- $P_{Fe}$ : pérdidas en el hierro,
- $P_{Cu}$ : pérdidas por efecto Joule.

La eficiencia a factor de potencia unitario ( $\cos\phi=1$ ), como transformador trifásico será:

$$\% \eta = \left( \frac{75000 \times 1}{75000 \times 1 + 3(96.77 + 133.16 + 137.38)} \right) 100$$

$$\% \eta = 98.55\%$$

Y a factor de potencia de 0.8 ( $\cos\phi=0.8$ ), se tiene:

$$\% \eta = \left( \frac{75000 \times 0.8}{75000 \times 0.8 + 3(80.63 + 376.73)} \right) 100$$

$$\% \eta = 98.19\%$$

#### V.4.8 Impedancia del transformador.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La impedancia del transformador ( $Z$ ), también conocida como impedancia de dispersión o tensión de impedancia se obtiene de la expresión siguiente:

$$\% Z = \sqrt{(\% R)^2 + (\% X)^2} \text{----- (5.47)}$$

En los transformadores de distribución la componente resistiva de la impedancia puede ocupar una porción importante; por esta razón, deberá especificarse la temperatura a la cual se ha calculado él por ciento de impedancia ( $\%Z$ ). Normalmente la impedancia del transformador se calcula para 75°C ó 85°C para transformadores con elevación de temperatura de 55°C ó 65°C respectivamente.

V.4.8.1 Resistencia equivalente y % de resistencia (%R)

La resistencia equivalente vista desde la A.T. Si  $P_{AT}=I^2R_e$ , despejando a  $R_e$  tenemos

$$R_e = \frac{P_{AT}}{I_1^2} = \frac{194.85}{(1.89)^2} = 54.55 \text{ohms, valor ya calculado} \text{-----} (5.42b)$$

$$\%R = \frac{P_{AT}}{10kVA} = \frac{194.85}{10(25)} = 0.7794\%$$

V.4.8.2 Por ciento de la reactancia de dispersión (%X).

El por ciento de la reactancia de dispersión se determina por la fórmula empírica siguiente

$$\%X = \frac{(kVA / \text{fase})(f / 60)v_m \gamma}{22.14 \alpha N_{ab} V_1^2} \text{-----} (5.48)$$

En donde

- f: frecuencia en Hz.
- $V_m$ : promedio de las longitudes de las vueltas medias de B.T. y A.T. (en mm),  
 $V_m = (l_{vmp} + l_{vms}) / 2 = (74.4702 + 61.8077) / 2$   
 $V_m = 68.13895 \text{ cm} = 681.3895 \text{ mm}$ ,
- $\gamma = (a+c/3) + b$ ----- (5.49)
- $\alpha = (a+b+c)3 + (h+1)/2 = \text{longitud de la trayectoria del flujo disperso}$ ----- (5.50)
- a: espesor promedio de la bobina de B.T., en mm,
- b: espesor promedio del espacio alta-baja, en mm,
- c: espesor promedio de la bobina de A.T., en mm,
- $V_1 = \text{volts vuelta (E/N)}$ ,
- $N_{ab}$ : número de espacios alta-baja ( $N_{ab}=1$  para los devanados concéntricos,  $N_{ab}=2$  para tres devanados concéntricos), y
- l, h= alturas de las bobinas de B.T. y A.T. respectivamente.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Aplicando valores para determinar  $\gamma$  y  $\alpha$  tenemos:

$$\begin{aligned}\gamma &= (12.2641 + 13.812/3) + 7.112 = 23.98 \text{ y} \\ \alpha &= (12.264 + 7.112 + 13.812/3) / 3 + (254.56 + 269.54) / 2 \\ &= 273.11271\end{aligned}$$

conociendo los valores de  $\alpha$  y  $\gamma$  se puede calcular el  $\%X$ :

$$\begin{aligned}\%X &= \frac{(25\text{kVA})(60/60) \times 681.3895 \times 23.98}{22.14 \times 273.11271 \times 1 \times (7.0556)^2} \\ \%X &= 1.3571\%\end{aligned}$$

conociendo los valores de  $\%R$  y  $\%X$ , calculamos finalmente el por ciento de impedancia ( $\%Z$ ):

$$\begin{aligned}\%Z &= \sqrt{(0.779)^2 + (1.3571)^2} \\ \%Z &= \sqrt{0.607 + 1.841} \\ \%Z &= 1.56\%\end{aligned}$$

#### V.4.9 Regulación de tensión

La regulación de tensión se calcula a través de la expresión matemática siguiente:

$$\%R_{\text{cg}} = \frac{E_2 - V_2}{V_2} \times 100 \text{----- (5.50)}$$

En donde:

- $E_2$ : es la fem inducida en el secundario en vacío (ensayo en vacío).
- $V_2$ : es la tensión en el secundario a plena carga del transformador (ensayo con carga).

#### V.4.10 Hoja de cálculo para diseño.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

RESUMEN DE CÁLCULOS DEL TRANSFORMADOR

1. Volts por vuelta: 7.06		
Devanados	B.T.	A.T.
2. Número total de vueltas	20	1965
3. Número de bobinas	1	1
4. Número de espiras por capa	1	220
5. Número de capas	20	19
6. Corriente a plena carga (A)	196.85	1.89
7. Densidad de corriente (A/mm <sup>2</sup> )	1.59 Al	2.5 Cu
8. Secc. Transv. de cada conductor (mm <sup>2</sup> )	126.77	0.7974
9. Dimensión del conductor desnudo (mm)	269.54 x 0.457	No. 18 AWG
10. Derivaciones en A.T.		±2.5 % c/u
11. Pared del tubo de devanado (mm)	3.175	
12. Aislamiento entre capas (mm)	0.127	0.381
13. Construcción radial (mm)	12.264	13.812
14. Altura efectiva de devanados (mm)	269.54	254.56
15. Collares (mm)	6.5	13
16. Altura física de devanados (mm)	282.54	280.56
17. Longitud media por vuelta (cm)	61.8078	74.47
18. Longitud total (m)	12.2379	1463.34
19. Peso del conductor (kg)	5.577	10.71
20. Resistencia a 85°C (ohms)	0.34366 x 10 <sup>-2</sup>	38.3
21. Pérdidas en el conductor	133.169	137.38
El circuito magnético (núcleo)		
22. Dimensiones de la ventana (cm)	3.89 x 29.19 y .87 x 29.19	
23. Dim. de la sec. transversal (cm)	4.49 x 19	
24. Sección transversal física (cm <sup>2</sup> )	170.62	
25. Ancho de lámina acero al Si (cm)	19	
26. Peso del núcleo por arcada (kg)	52.4 y 57.59	
27. Pérdidas en el núcleo (W)	96.77	
28. Densidad de flujo (B) en gauss	16000	
29. Corriente de excitación (A)	1.175	
Eficiencia e impedancia		
30. Efic. factor de potencia unitario	98.55%	
31. Efic. factor de potencia (0.8)	98.19%	
32. Impedancia en por ciento	1.56%	

Los datos proporcionados en este resumen, están dados para cada banco monofásico, excepto la eficiencia, por lo que hay que considerar que el banco trifásico lo componen tres transformadores monofásicos, compartiendo un núcleo trifásico acorazado y de construcción arrollado

## V.5 ASPECTOS TÉRMICOS DE LOS TRANSFORMADORES.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los transformadores se calientan debido a las pérdidas en el cobre (Cu) de los arrollamientos y a las pérdidas en el hierro (Fe) del núcleo. Este calor ha de disiparse para mantener la temperatura de los devanados del transformador por debajo del valor para el cual el aislamiento comienza a degradarse. Los transformadores de baja tensión de muy pequeña

potencia pueden disipar su calor por convección el medio ambiente y por radiación directa, y no se sumergen en aceite. Los transformadores para tensiones superiores a 1000 volts están colocados ordinariamente dentro de recipientes de acero, llenos de aceite aislante. El aceite mejora el aislamiento y al producirse corrientes de convección en el mismo, toma el calor de las superficies de los arrollamientos y del núcleo para conducirlo a la superficie del tanque y radiadores (sí los tiene), y de ahí disiparse por convección y radiación al medio ambiente. Esta es la forma para refrigerar los transformadores de distribución. Para potencias superiores a 500 kVA. Existen tres métodos de enfriamiento del aceite:

- 1) El tanque esta equipado con radiadores exteriores, y podría elevar considerablemente la potencia del mismo disponiendo de ventiladores para lanzar aire contra los radiadores.
- 2) Puede enfriarse el aceite mediante circulación de agua fría por serpentines de tubo de cobre sumergido en el aceite y colocados en las paredes del tanque.
- 3) El aceite circula a través de un refrigerante exterior por medio de una bomba.

El transformador tipo seco es refrigerado por aire a presión, y se ideó en parte para evitar el peligro de inflamación del aceite del transformador, así como para evitar el peso del aceite y del tanque. Actualmente, solamente se usan en casos especiales y nunca para tensiones superiores a 13200 V.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## Conclusiones<sup>1</sup>

La teoría de operación del transformador es la misma para todo tipo de transformadores, sin embargo, en el diseño constructivo existen diferentes técnicas y metodologías para el cálculo.

Como la forma de construcción presentada en el ejemplo, es utilizada ahora por grandes fabricantes de transformadores adoptando el uso de núcleos arrollados y aún más práctico es el uso de núcleos arrollados con sección rectangular como el que se ha manejado en el diseño ejemplificado. Esta forma constructiva de núcleo garantiza la mayor eficiencia del transformador.

Como se puede observar, la Norma Oficial Mexicana Nom-SEDE-1999 REQUISITOS DE SEGURIDAD PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN en el punto 5.2.2 establece que cualquier transformador con alimentación trifásica, capacidad hasta 15 kVA y clase de aislamiento hasta 15 kV, debe tener un valor máximo de 255 W para las pérdidas en vacío y 1142 W para las pérdidas totales en el transformador

De los resultados obtenidos en el diseño presentado en el capítulo quinto, los valores de las pérdidas sin carga son de 96.77 W, valor por debajo al requerido en la norma oficial mexicana. También las pérdidas totales en el diseño presentado, son de 181.88 W. Cumpliendo con la norma en un amplio margen al mostrado.

No hay que olvidar que en la norma, en su punto 5.2.1 nos presenta los valores de las eficiencias mínimas permitidas para los transformadores de distribución<sup>1</sup>. Para el ejemplo desarrollado, la eficiencia con un factor de potencia unitario encontrada es de 85.55%, valor que supera a la eficiencia mínima permitida por la norma, que es del 85%.

Por otro lado, si se cambiaran algunos valores en el desarrollo del cálculo, más en particular, los valores de la impedancia, que puede variar de dos a tres por ciento, el valor de la densidad del cobre que varía de 2.5 a 3.5 amperes por milímetros cuadrados para transformadores sumergidos en aceite, el valor del ancho de la lámina C por sus dimensiones

<sup>1</sup> Ver anexo 3

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

que son dos a tres veces el valor de 2D y el valor de la ventana D que igualmente puede variar de 2.5 a 3,5 veces el espesor de 2d. Los resultados de las eficiencias pueden variar y no cumplir con la norma oficial. Por ejemplo, haciendo los cálculos para un transformador con los mismos datos que se usaron en el ejemplo del capítulo quinto, que son 75 kVA, tres fases, 13200/220-127 Volts, 60 Hz, 65 °C y  $\pm 2$  derivaciones en A.T. de 2.5% c/u, conexión  $\Delta - Y$ . Y variando el valor de la impedancia (Z) a 3%, la densidad del cobre ( $\delta_{Cu}$ ) a 3 A/mm<sup>2</sup> y el valor de C igual a 21 cm. El valor de la eficiencia ya no cumple con la norma, ya que al realizar el cálculo nos da como resultado el resumen de cálculo presentado a continuación, con una eficiencia de 98.2%. Sin olvidar que se afectan también los calibres y peso de los conductores, ancho y peso del núcleo. En cuanto a las pérdidas en el conductor de B.T. y A.T aumentan, por el contrario, las pérdidas en el núcleo disminuyen

### RESUMEN DE CÁLCULOS DEL TRANSFORMADOR

Con Z=3%,  $\delta_{Cu}$ = 3 A/mm<sup>2</sup> y C= 21 cm.

1. Volts por vuelta: 7.06		
Devanados	B.T.	A.T.
2. Número total de vueltas	20	2183
3. Número de bobinas	1	1
4. Número de espiras por capa	1	200
5. Número de capas	20	11
6. Corriente a plena carga (A)	196.85	1.89
7. Densidad de corriente (A/mm <sup>2</sup> )	1.86 Al	3 Cu
8. Secc. Transv. de cada conductor (mm <sup>2</sup> )	105.63	0.663
9. Dimensión del conductor desnudo (mm)	15.2 x 0.483	No. 19 AWG
10. Derivaciones en A.T.		$\pm 2.5$ % c/u
11. Pared del tubo de devanado (mm)	3.175	
12. Aislamiento entre capas (mm)	0.127	0.254
13. Construcción radial (mm)	12.81	14.08
14. Altura efectiva de devanados (mm)	215.2	205.16
15. Collares (mm)	6.5	13
16. Altura física de devanados (mm)	28.2	231.16
17. Longitud media por vuelta (cm)	62.63	75.391
18. Longitud total (m)	13.79	1646
19. Peso del conductor (kg)	5.3	9.6
20. Resistencia a 85°C (ohms)	$0.4693 \times 10^{-2}$	54.55
21. Pérdidas en el conductor	188.33	194.85
El circuito magnético (núcleo)		
22. Dimensiones de la ventana (cm)	3.95 x 23.75 y 8.0 x 23.75	
23. Dim. de la sec. transversal (cm)	3.655 x 21	
24. Sección transversal física (cm <sup>2</sup> )	153.5	
25. Ancho de lámina acero al Si (cm)	21	
26. Peso del núcleo por arcada (kg)	39.30 y 44	
27. Pérdidas en el núcleo (W)	80.63	
28. Densidad de flujo (B) en gauss	16000	

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

29.	Corriente de excitación (A)	0.952
Eficiencia e impedancia		
30.	Efic. factor de potencia unitario	98.2%
31.	Efic. factor de potencia (0.8)	97.76%
32.	Impedancia en por ciento	2.26%

En conclusión el diseño óptimo de un transformador se logra alcanzando la eficiencia mínima requerida por la norma. Sin sobrepasar las pérdidas máximas presentadas en la norma.

Aunque el requisito fue de que se mantenga la eficiencia a cierto nivel elevado, trae como consecuencia el aumento en el costo del transformador. Por lo tanto, el diseño óptimo será aquel que de cómo resultado un costo mínimo de operación durante toda su vida de servicio, y el costo de la energía pérdida a causa de la baja eficiencia tiene que contrapesarse con la inversión en el transformador requerida para limitar las pérdidas a fin de obtener una alta eficiencia.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## ANEXO 1

### TABLAS DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS ALAMBRE MAGNETO DATOS DE ALAMBRE DESNUDOS ALAMBRES REDONDOS DE COBRE Y ALUMINIO

ALAMBRE CALIBRE AWG	Diámetro en milímetros			Area sección transversal		Resistencia a 20°C C.D 100% conductividad cobre	
	mínimo	nominal	máximo	Milímetros circulares	Mm <sup>2</sup>	Ohms / km	Ohms / kg
4/0	11.567	11.684	11.801	136.51	107.21	0.1608	0.0001687
3/0	10.3	10.404	10.508	108.24	85.01	0.2028	0.0002684
2/0	9.174	9.266	9.357	85.86	67.43	0.2557	0.0004265
1/0	8.171	8.252	8.334	68.10	53.49	0.3223	0.0006779
1	7.275	7.348	7.422	53.99	42.41	0.4066	0.001078
2	6.477	6.543	6.609	42.81	33.62	0.5128	0.001715
3	5.768	5.827	5.885	33.95	26.67	0.6466	0.002728
4	5.138	5.189	5.215	26.93	21.15	0.8152	0.004336
5	4.575	4.620	4.643	21.34	16.77	1.028	0.0069
6	4.074	4.115	4.135	16.23	13.3	1.297	0.01079
7	3.630	3.665	3.683	13.43	10.55	1.631	0.01742
8	3.231	3.264	3.282	10.65	8.367	2.061	0.0277
9	2.878	2.906	2.921	8.445	6.632	2.6	0.0441
10	2.563	2.588	2.601	6.698	5.261	3.277	0.07006
11	2.281	2.304	2.316	5.308	4.168	4.14	0.112
12	2.032	2.052	2.062	4.211	3.307	5.21	0.177
13	1.811	1.829	1.839	3.343	2.627	6.56	0.0281
14	1.613	1.628	1.636	2.650	2.082	8.28	0.447
15	1.435	1.450	1.458	2.103	1.651	10.4	0.711
16	1.278	1.290	1.298	1.664	1.307	13.2	1.11
17	1.132	1.151	1.156	1.325	1.04	16.6	1.79
18	1.013	1.024	1.029	1.049	0.823	21	2.86
19	0.902	0.912	0.917	0.832	0.653	26.4	4.55
20	0.805	0.813	0.818	0.661	0.519	33.7	7.2
21	0.716	0.724	0.726	0.524	0.412	41.9	11.4
22	0.635	0.643	0.645	0.413	0.324	53.2	19.4
23	0.569	0.574	0.577	0.329	0.259	66.6	29
24	0.505	0.511	0.513	0.261	0.205	82.4	46.3
25	0.450	0.455	0.457	0.207	0.162	106	73.6
26	0.399	0.404	0.406	0.163	0.128	135	118
27	0.358	0.361	0.363	0.130	0.102	169	186
28	0.317	0.320	0.323	0.102	0.0804	214	300
29	0.284	0.287	0.290	0.0824	0.0647	266	363
30	0.251	0.254	0.257	0.0645	0.0507	340	755
31	0.224	0.226	0.229	0.0511	0.0401	430	1200
32	0.201	0.203	0.206	0.0412	0.0324	532	1840
33	0.178	0.180	0.183	0.0324	0.0255	675	2970
34	0.157	0.160	0.163	0.0256	0.0201	857	4790
35	0.140	0.142	0.145	0.0202	0.0159	1090	7680
36	0.124	0.127	0.130	0.0161	0.0127	1360	12100
37	0.112	0.114	0.117	0.0130	0.0103	1680	18400
38	0.099	0.102	0.104	0.0104	0.00811	2130	29500
39	0.086	0.089	0.091	0.0079	0.00621	2780	50300
40	0.075	0.079	0.081	0.0062	0.00487	3540	81800
41	0.068	0.071	0.074	0.0050	0.00397	4340	123000
42	0.061	0.063	0.066	0.0040	0.00317	5440	193000
43	0.053	0.056	0.058	0.0031	0.00245	7030	322000
44	0.048	0.051	0.053	0.0026	0.00203	8510	472000

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**DATOS DE ALAMBRE DESNUDOS  
ALAMBRES REDONDOS DE COBRE Y ALUMINIO**

Resistencia a 20°C C.A. 61.8% conductividad		Peso				Alambre Calibre AWG
ALUMINIO		COBRE		ALUMINIO		
Ohms/km	Ohms/kg	Kg/km	M/g	Kg/m	M/g	
0.6.02	0.000897	953.2	0.001049	289.7	0.003451	4/0
0.3281	0.01429	755.8	0.001323	229.8	0.004353	3/0
0.4127	0.002271	599.5	0.001688	182.3	0.005485	2/0
0.5217	0.003609	475.5	0.002103	144.6	0.006915	1/0
0.6578	0.005739	377	0.002652	114.6	0.008722	1
0.8297	0.00009127	298.9	0.003345	90.9	0.011	2
0.046	0.01452	237.1	0.004218	72.09	0.01388	3
0.319	0.02308	188	0.005319	57.15	0.0175	4
0.664	0.03673	149	0.005709	45.34	0.02205	5
2.098	0.05836	118.2	0.008459	35.94	0.02783	6
2.644	0.09273	93.8	0.01066	28.51	0.03507	7
3.333	0.1473	74.38	0.01344	22.62	0.04421	8
4.206	0.2348	58.95	0.01696	17.33	0.05577	9
5.302	0.3728	46.77	0.02138	14.2	0.0706	1
6.69	0.593	37.1	0.027	11.3	0.0887	11
8.43	0.944	29.4	0.034	8.95	0.112	12
10.63	1.5	23.4	0.0428	7.1	0.141	13
13.39	2.38	18.5	0.054	5.61	0.178	14
16.9	3.79	14.7	0.0681	4.46	0.224	15
21.3	5.04	11.6	0.086	3.53	0.284	16
26.8	9.55	9.24	0.108	2.81	0.355	17
33.8	15.2	7.32	0.137	2.23	0.448	18
42.6	2.2	5.81	0.172	1.77	0.564	19
53.8	28.4	4.61	0.217	1.4	0.712	20
67.9	60.8	3.56	0.273	1.11	0.900	21
86	98.1	2.88	0.347	0.878	1.14	22
108	154	2.3	0.435	0.701	1.42	23
136	247	1.82	0.549	0.552	1.81	24
172	392	1.44	0.693	0.439	2.28	25
218	628	1.14	0.878	0.347	2.88	26
273	990	0.908	1.1	0.275	3.64	27
348	1600	0.715	1.4	0.217	4.6	28
430	2470	0.575	1.74	0.137	5.69	29
551	4030	0.45	2.22		7.32	30
		0.357	2.8			31
		0.288	3.47			32
		0.227	4.4			33
		0.179	5.59			34
		0.141	7.08			35
		0.113	8.88			36
		0.0912	11			37
		0.0721	13.9			38
		0.0552	18.1			39
		0.0433	23.1			40
		0.0353	28.3			41
		0.0282	35.5			42
		0.0218	45.9			43
		0.018	55.5			44

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**ALAMBRE MAGNETO DE COBRE: DOBLE CAPA DE BARNIZ**

Calibre AWG	Diámetro								Peso kg/km	Long. m/kg	Resis. a 20°C ohms/km
	En mm				En pulg.						
	Desnudo	Cubierto			Desnudo	Cubierto					
		Nominal	Mínimo	Nominal		Máximo	Nominal	Mínimo			
8	3.254	3.315	3.363	3.409	0.1285	0.1305	0.1324	0.1342	75.024	13.32	2
9	2.906	2.959	3.002	3.043	0.1114	0.1165	0.1182	0.1198	59.475	16.81	2.6
10	2.588	2.642	2.682	2.720	0.1019	0.104	0.1056	0.1071	47.214	21.18	3.2
11	2.305	2.367	2.395	2.431	0.0907	0.0928	0.0945	0.0957	37.460	26.68	4.1
12	2.053	2.108	2.193	2.172	0.08008	0.0829	0.0842	0.855	29.800	33.55	5.2
13	1.828	1.882	1.913	1.943	0.072	0.0741	0.0753	0.0765	23.660	42.26	6.5
14	1.628	1.681	1.709	1.737	0.0641	0.0662	0.0673	0.0684	18.750	53.46	8.2
15	1.45	1.501	1.529	1.557	0.0571	0.0591	0.0602	0.0613	14.80	57.13	10.4
16	1.291	1.344	1.369	1.392	0.0508	0.0529	0.0539	0.0548	11.829	94.53	13.1
17	1.15	1.201	1.220	1.250	0.0453	0.0473	0.0483	0.0492	9.404	106.3	16.5
18	1.024	1.074	1.097	1.118	0.0403	0.0423	0.0432	0.0440	7.470	133.8	20.9
19	0.912	0.96	0.983	1.003	0.0359	0.0378	0.0387	0.0395	5.937	164.8	26.4
20	0.812	0.861	0.879	0.897	0.032	0.0339	0.0346	0.0353	4.702	212.6	33.1
21	0.723	0.770	0.787	0.805	0.0285	0.0303	0.0310	0.0317	3.734	267.7	41.9
22	0.644	0.686	0.704	0.721	0.0253	0.0270	0.0277	0.0284	2.961	337	53.1
23	0.573	0.617	0.632	0.648	0.0226	0.0243	0.0249	0.0255	2.355	422	65.6
24	0.511	0.544	0.569	0.582	0.0201	0.0218	0.0224	0.0229	1.875	533	84.0
25	0.455	0.495	0.510	0.523	0.0179	0.0195	0.0201	0.0206	1.495	668	106
26	0.405	0.442	0.457	0.470	0.0159	0.0174	0.0180	0.0185	1.188	845	134
27	0.361	0.399	0.409	0.419	0.0142	0.0157	0.0161	0.0165	0.943	1059	168
28	0.321	0.356	0.356	0.376	0.0126	0.0140	0.0144	0.0148	0.749	1332	214
29	0.286	0.320	0.330	0.340	0.0113	0.0126	0.0130	0.0134	0.596	1675	266
30	0.255	0.284	0.295	0.305	0.01	0.0112	0.0115	0.0120	0.473	2113	341
31	0.227	0.257	0.267	0.274	0.0089	0.0101	0.0105	0.0108	0.3779	2645	429
32	0.202	0.231	0.241	0.249	0.008	0.009 1	0.0095	0.0098	0.3035	3328	531
33	0.18	0.206	0.216	0.224	0.0071	0.008 1	0.0085	0.0088	0.2397	4171	675
34	0.16	0.183	0.191	0.198	0.0063	0.007 2	0.00075	0.0078	0.1888	5295	856
35	0.143	0.163	0.170	0.178	0.0056	0.0064	0.0067	0.0070	0.1502	6653	1085
36	0.127	0.145	0.152	0.16	0.005	0.0057	0.0060	0.0063	0.1194	8368	1361
37	0.113	0.132	0.140	0.145	0.0045	0.0052	0.0055	0.0057	0.0953	10483	1679
38	0.101	0.117	0.124	0.130	0.004	0.0046	0.0049	0.0051	0.0757	13202	2126
39	0.09	0.102	0.109	0.114	0.0035	0.004 0	0.0043	0.0045	0.0599	16675	2778
40	0.08	0.091	0.096	0.102	0.0031	0.0036	0.0038	0.0040	0.0474	21065	3543
41	0.071	0.081	0.086	0.091	0.0028	0.0032	0.0034	0.0036	0.0374	26666	4342
42	0.0635	0.071	0.076	0.081	0.0025	0.0028	0.0030	0.0032	0.0296	33768	5444
43	0.0558	0.0693	0.068	0.073	0.0022	0.0025	0.0027	0.0029	0.0237	42264	7033
44	0.0508	0.058	0.063	0.068	0.002	0.0023	0.0025	0.0027	0.0189	52913	8510

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

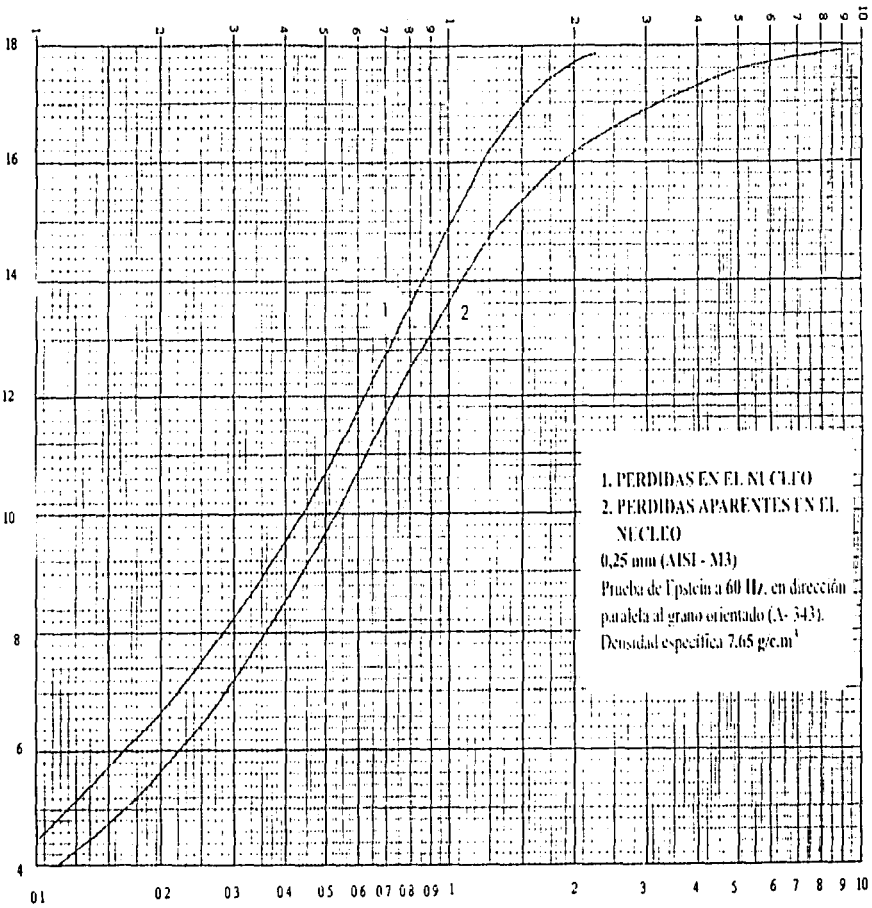
**ALAMBRE MAGNETO DE COBRE: TRIPLE CAPA DE BARNIZ**

Calibre AWG	Diámetro								Peso kg / km	Long. m / kg	Resis. a 20°C ohms / km
	En mm				En pulg.						
	Desnudo	Cubierto			Desnudo	Cubierto					
		Nominal	Mínimo	Máximo		Nominal	Mínimo	Máximo			
8	3.264	3.345	3.393	3.442	0.1285	0.1317	0.1336	0.1355	75.21	13.29	2.062
9	2.906	2.99	3.033	3.076	0.1114	0.1176	0.1194	0.1211	59.64	16.76	2.6
10	2.588	2.672	2.713	2.753	0.1019	0.1052	0.1068	0.1084	47.36	21.14	3.27
11	2.305	2.388	2.426	2.461	0.0907	0.094	0.0955	0.0969	37.6	26.59	4.13
12	2.053	2.134	2.169	2.202	0.08008	0.084	0.0854	0.0867	29.93	33.59	5.21
13	1.828	1.91	1.941	1.971	0.072	0.0752	0.0764	0.0776	23.76	42.08	6.56
14	1.628	1.109	1.737	1.765	0.0641	0.0673	0.0684	0.0695	18.8	53.16	8.28
15	1.45	1.529	1.557	1.585	0.0571	0.0602	0.0613	0.0624	14.98	66.72	10.4
16	1.291	1.369	1.394	1.417	0.0508	0.0539	0.0549	0.0558	11.9	84	13.1
17	1.15	1.227	1.252	1.275	0.0453	0.0483	0.0493	0.0502	9.463	105.63	16.59
18	1.024	1.1	1.123	1.143	0.0403	0.0433	0.0442	0.0450	7.529	132.78	20.9
19	0.912	0.986	1.006	1.026	0.0359	0.0388	0.0396	0.0404	5.981	169.19	26.4
20	0.812	0.884	0.902	0.919	0.032	0.0348	0.0355	0.0362	4.743	210.67	33.1
21	0.723	0.792	0.81	0.828	0.0285	0.0312	0.0319	0.0326	3.779	264.56	41.9
22	0.644	0.709	0.726	0.742	0.0253	0.0279	0.0286	0.0292	2.990	334.32	53.1
23	0.573	0.64	0.655	0.668	0.0226	0.0252	0.0258	0.0263	2.395	417.37	66.6
24	0.511	0.574	0.589	0.602	0.0201	0.0226	0.0232	0.0237	1.904	525	84
25	0.455	0.516	0.531	0.544	0.0179	0.0203	0.0209	0.0214	1.514	660.1	106
26	0.405	0.462	0.475	0.488	0.0159	0.0182	0.0187	0.0192	1.203	830.5	134
27	0.361	0.417	0.427	0.437	0.0142	0.0164	0.0168	0.0172	0.9567	1044	168
28	0.321	0.373	0.383	0.394	0.0126	0.0147	0.0151	0.0155	0.7633	1309	21
29	0.286	0.338	0.348	0.358	0.0113	0.0133	0.0137	0.0141	0.6085	1643	266
30	0.255	0.302	0.312	0.323	0.01	0.0119	0.0123	0.0127	0.4836	2067	341
31	0.227	0.272	0.282	0.292	0.0089	0.0107	0.0111	0.0115	0.3853	2594	429
32	0.202	0.246	0.256	0.267	0.008	0.0097	0.0101	0.0105	0.3080	3246	531
33	0.18	0.221	0.231	0.241	0.0071	0.0087	0.0091	0.0095	0.2455	4072	675
34	0.16	0.196	0.206	0.213	0.0063	0.0077	0.0081	0.0084	0.1949	5130	856
35	0.143	0.175	0.185	0.193	0.0056	0.0069	0.0073	0.0076	0.1554	6430	1085
36	0.127	0.157	0.168	0.175	0.005	0.0062	0.0066	0.0069	0.1240	8057	1361
37	0.113	0.145	0.152	0.157	0.0045	0.0056	0.0059	0.0062	0.0982	10182	1679
38	0.101	0.127	0.135	0.142	0.004	0.005	0.0053	0.0056	0.0782	12775	2126
39	0.09	0.112	0.119	0.127	0.0035	0.0044	0.004	0.005	0.0621	16076	2778
40	0.08	0.099	0.107	0.112	0.0031	0.0039	0.0042	0.0044	0.0494	20240	3543
41	0.071	0.089	0.096	0.102	0.0028	0.0035	0.0038	0.0040	0.0392	25454	4342
42	0.0635	0.079	0.0863	0.0914	0.0025	0.0031	0.0034	0.0036	0.0312	31999	5444
43	0.0558	0.0711	0.0762	0.0812	0.0022	0.0028	0.003	0.0032	0.0251	39763	7033
44	0.0508	0.066	0.0711	0.0762	0.002	0.0026	0.0028	0.0030	0.202	49411	8510

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

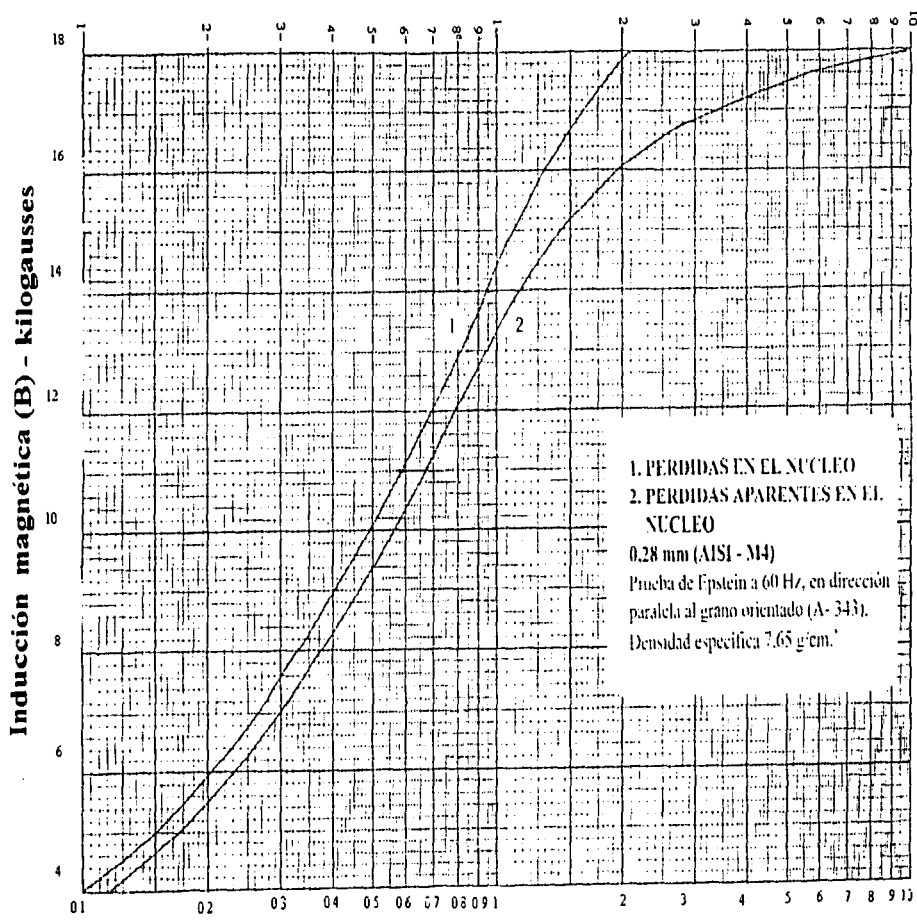
Inducción magnética (B) - kilogausses



Pérdidas en el núcleo (W/kg) - Pérdidas aparentes en el núcleo (VA/kg)

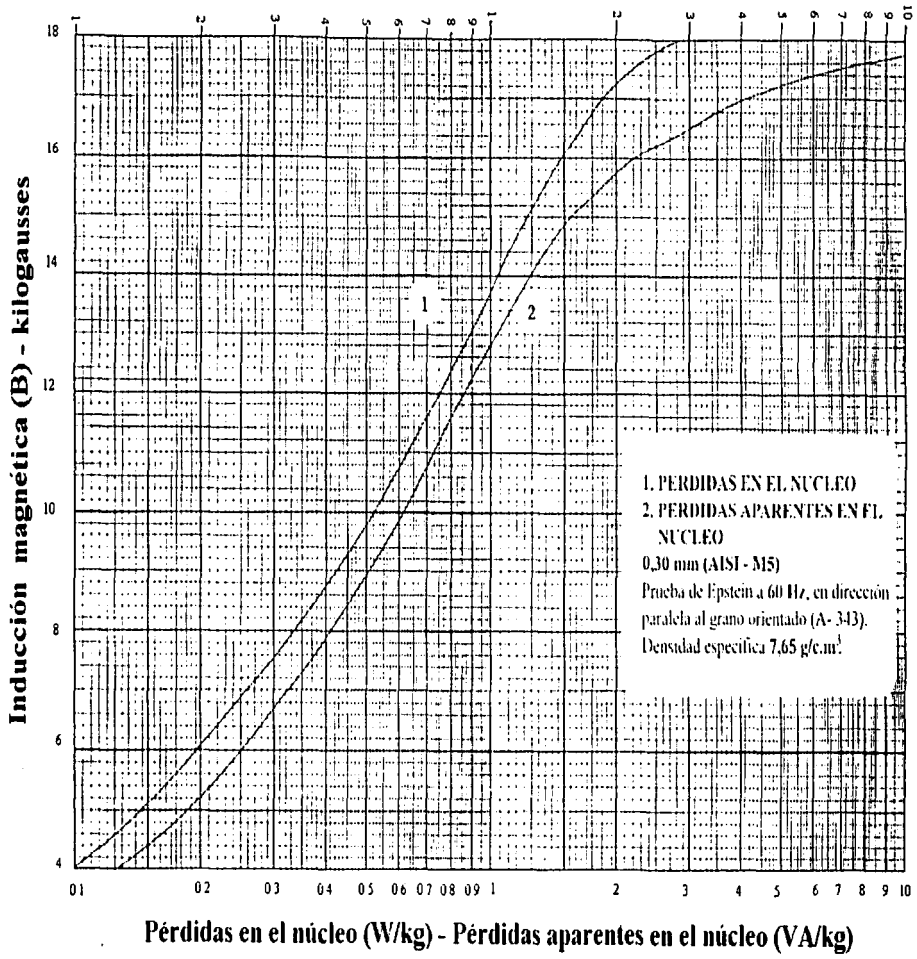
ANEXO 2  
GRAFICAS DE LOS ACEROS ELÉCTRICOS  
GRANO ORIENTADO





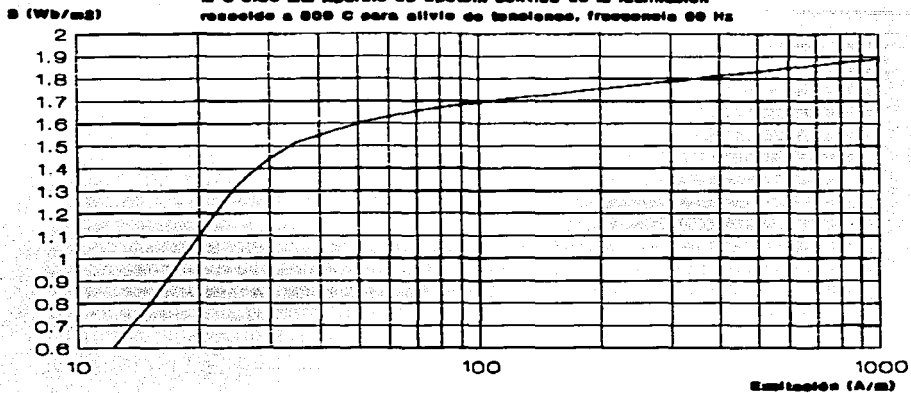
Pérdidas en el núcleo (W/kg) - Pérdidas aparentes en el núcleo (VA/kg)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



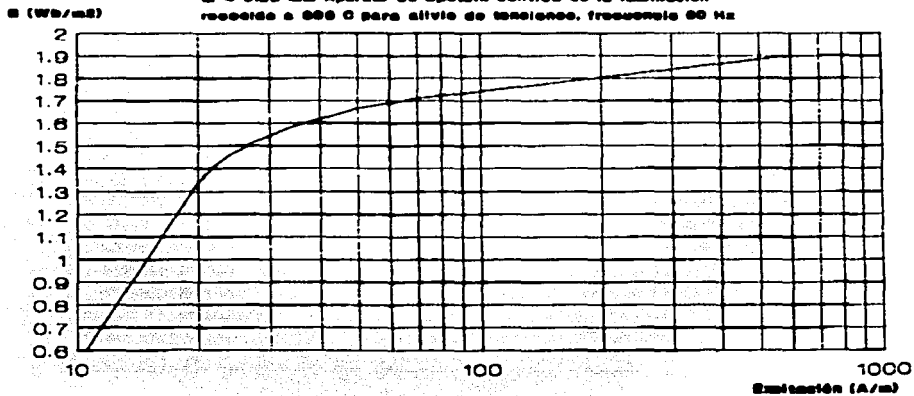
### CURVA DE EXCITACION (Valor eficaz)

M-3 0.20 mm Aparato de Epstein centrado de la laminación  
recocido a 800 C para alivio de tensiones, frecuencia 60 Hz



### CURVA DE EXCITACION (Valor eficaz)

M-4 0.20 mm Aparato de Epstein centrado de la laminación  
recocido a 800 C para alivio de tensiones, frecuencia 60 Hz

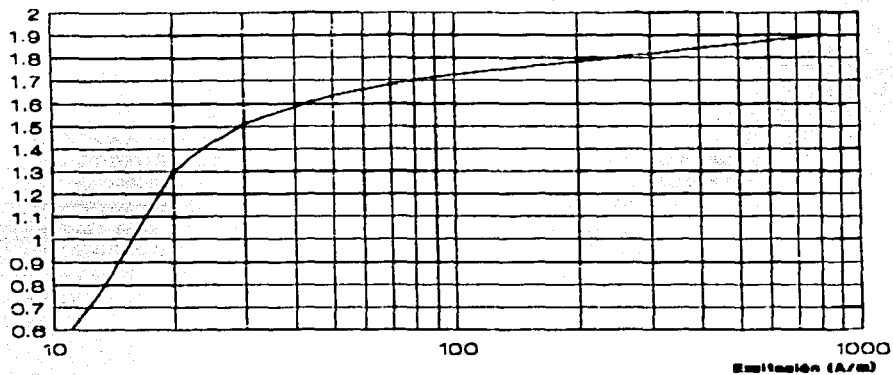


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### CURVA DE EXCITACION (Valor eficaz)

M-3 0.50 mm Aparato de Epstein con tubo de la laminación  
recocida a 600 C para alivio de tensiones, frecuencia 50 Hz

$B$  (Wb/m<sup>2</sup>)



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### ANEXO 3

Tablas 1 y 2 de la Norma Oficial Mexicana **NOM-002-SEDE-1999** Requisitos de seguridad y eficiencia para transformadores de distribución

**TABLA 1**  
**Eficiencias mínimas permitidas para los transformadores de distribución**

(Eficiencias en %)

Tipo de alimentación	Capacidad kVA	Clase de aislamiento		
		Hasta 15 kV	Hasta 25 kV	Hasta 35 kV
		En vacío totales	En vacío totales	En vacío totales
Monofásicos	5	97.90	97.80	97.70
	10	98.25	98.15	98.05
	15	98.40	98.30	98.20
	25	98.55	98.45	98.35
	37.5	98.65	98.55	98.40
	50	98.76	98.65	98.55
	75	98.90	98.80	98.70
	100	98.95	98.85	98.75
	167	99.00	98.90	98.80
Trifásicos	15	97.95	97.85	97.75
	30	98.25	98.15	98.05
	45	98.35	98.25	98.15
	75	98.50	98.40	98.30
	112.5	98.60	98.50	98.40
	150	98.70	98.60	98.50
	225	98.75	98.65	98.55
	300	98.80	98.70	98.60
	500	98.90	98.80	98.70

1. Los transformadores de distribución con capacidades intermedias a las contempladas en esta tabla deben cumplir con las eficiencias para la capacidad preferentemente inmediata superior

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

**TABLA 2**  
**Pérdidas en vacío y totales máximas permitidas**  
 (unidades en W)

Tipo de alimentación	Capacidad kVA	Clase de aislamiento					
		Hasta 15 kV		Hasta 25 kV		Hasta 35 kV	
		En vacío	totales	En vacío	totales	En vacío	totales
Monofásicos	5	30	107	38	112	63	118
	10	47	178	57	188	83	199
	15	62	244	75	259	115	275
	25	86	368	100	394	145	419
	37.5	114	513	130	552	185	590
	50	138	633	160	684	210	736
	75	186	834	215	911	270	988
	100	235	1061	265	1163	320	1266
167	365	1687	415	1857	425	2028	
Trifásicos	15	88	314	110	330	135	345
	30	137	534	165	565	210	597
	45	180	755	215	802	265	848
	75	255	1142	305	1220	365	1297
	112.5	350	1597	405	1713	450	1829
	150	450	1976	500	2130	525	2284
	225	750	2844	820	3080	900	3310
	300	910	3644	1000	3951	1100	4260
500	1330	5561	1475	6073	1540	6586	

**NOTAS:**

1. Estas pérdidas son máximas y no se admiten tolerancias
2. En las pérdidas totales se incluyen las pérdidas debidas a la carga, corregidas a la temperatura de referencia.
3. Los transformadores de distribución con capacidades intermedias a las contempladas en esta tabla deben cumplir con las pérdidas establecidas para la capacidad preferentemente inmediata superior.

**TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN**

## BIBLIOGRAFÍA

Avelino Pérez, Pedro. *Transformadores de distribución (Teoría, cálculo, construcción y pruebas)*, Segunda Edición, Editorial Reverté, S.A., México, 1991.

Escuela del técnico electricista (tomo 7). *Teoría, cálculo y construcción de transformadores*, Editorial Labor, S.A. Barcelona, 1969. (3ª edición)

Escuela del técnico electricista (tomo 2). *Fundamentos de la electrotecnia*, Editorial Labor, S.A. Barcelona, 1957. (3ª edición).

Camarena M., Pedro. *Transformadores eléctricos industriales (reparación diseño y construcción)*, Segunda edición, Cia. Editorial Continental, S.A. de C.V., México, 1987.

Pérez Amador Barrón, Víctor. *Generadores, motores y Transformadores eléctricos*, Facultad de ingeniería UNAM, México, 1992.

E.E. Staff-M.I.T. *Circuitos magnéticos y transformadores*, Editorial Reverté, Buenos Aires, 1980.

Dr. en Ing. Reborá, Gino. *La construcción de maquinas eléctricas*. Editorial Científico - Medica, Barcelona, 1969.

*Manual de operación y mantenimiento Voltran transformadores*  
Kosow, Irvin L. *Maquinas eléctricas y transformadores*, Editorial Reverté, México, 1975

Ras Cliva, Enrique. *Transformadores de potencia de medida y de protección*, Editorial Marcombo, Barcelona, 1975.

Enríquez Harper, Gilberto. *Transformadores*, Editorial Limusa, México, 1987.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN