



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES.

CAMPUS ARAGÓN

MANUFACTURA Y DISEÑO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE 18/24/30 MVA 115 000 V.A.T. DELTA 13 800/7967 V.B.T. ESTRELLA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA: ROBERTO ALONSO VÁZQUEZ

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ASESOR: ING. ABEL VERDE CRUZ





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.

DEDICATORIA

Con todo cariño a mi madre, que me ha dado todo

Juana Vázquez Roque

Y en paz descance a mi padre

Roberto Alonso Mejía

A mis hermanos

Gumercindo y Karen Berenice

A mi novia

Vianey Labastida Correa

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por haberme permitido culminar algo muy importante en mi vida. Por darme la salud y el entusiasmo de querer seguir adelante y la suerte de tener un trabajo digno y próspero.

Mi más sincero agradecimiento a mi madre por su apoyo incondicional en todo momento, por la confianza que hasta ahora me ha tenido y por hacer de mí un hombre de bien.

A Vianey Labastida por su amor y comprensión, en todo momento, por la ayuda en la escritura de este trabajo y por darme el aliento de seguir adelante.

A la familia Jiménez Núñez por el apoyo moral que en el algún momento necesite y por ofrecerme su amistad y confianza.

A todos mis amigos y compañeros de trabajo por la amistad que me han brindado y su compañerismo en el trabajo.

Al comité revisor de esta tesis integrado por:

Ing. Abel Verde Cruz.

Ing. José Ramón Mejía Roldán.

Ing. Juan Antonio Villanueva Ortega.

Ing. José Luis Estrada García.

Ing. Pablo Luna Escorza.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I N D I C E

CAPITULO 1

CONCEPTOS Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TRANSFORMADOR

1.0	Introducción	1
1.1	Definición del transformador	2
	1.1.1 Principio de funcionamiento	2
1.2	Corriente de excitación	3
	1.2.1 Corriente de carga	4
1.3	Flujos magnéticos y relación de transformación	5
1.4	Circuito equivalente del transformador	7
	1.4.1 Diagrama vectorial del transformador con carga	9
1.5	Rendimiento del transformador	10
1.6	Clasificación de las pérdidas en el transformador	13
	1.6.1 Pérdidas por Histéresis	14
	1.6.2 Pérdidas por Corrientes de Foucault	16
	1.6.3 Pérdidas por Efecto Joule	17
	1.6.4 Pérdidas por Flujos de Dispersión	18
1.7	Conexiones de los transformadores	20
	1.7.1 Conexión estrella- estrella	20
	1.7.2 Conexión delta- delta	22
	1.7.3 Conexión delta- estrella	24
	1.7.3 Conexión estrella- delta	25

1.8	Medio refrigerante	27
1.8.1	El aire	27
1.8.2	Aceite dieléctrico	27
1.8.3	Líquidos dieléctricos no inflamables	27
1.8.4	El agua	28
1.9	Tipos de sistemas de enfriamiento	28
1.9.1	Tipo OA	28
1.9.2	Tipo OA/FA	29
1.9.3	Tipo OA/FA/FOA	29
1.9.4	Tipo FOA	30
1.9.5	Tipo OW	30
1.9.6	Tipo FOW	30

CAPITULO 2

CIRCUITO MAGNETICO DEL TRANSFORMADOR

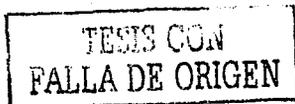
2.0	Introducción	32
2.1	Definición de núcleo	33
2.2	Elemento constructivo del circuito magnético	36
2.2.1	Material de laminación	36
2.2.2	Troqueladas y ensambles del núcleo	38
2.2.3	Construcción y forma típica del núcleo	41
2.2.4	El factor de apilamiento	44
2.2.5	El factor de destrucción	45
2.3	Características electromagnéticas del núcleo	45
2.3.1	Flujo y corriente	46
2.3.2	Flujo y voltaje	47
2.3.3	Densidad de flujo	47
2.3.4	Intensidad de campo magnético	48
2.3.4	Permeabilidad	49
2.3.5	Reluctancia	50
2.4	Saturación del núcleo	51
2.4.1	La curva de saturación	52

2.5	Resonancia	55
2.5.1	Resonancia del núcleo del transformador	55
2.6	Flujo en el núcleo y corrientes armónicas	57
2.6.1	Corrientes armónicas	58
2.6.2	Corrientes de tercera armónicamente trayectorias alternas	58
2.7	Pérdida en el hierro y de los volts- amperios de excitación	59
2.8	Diseño de núcleos con Acero al Silicio de grano orientado	61

CAPITULO 3

DEVANADOS DEL TRANSFORMADOR

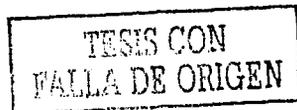
3.0	Introducción	62
3.1	Teoría y principio de operación	63
3.2	Definición del devanado	65
3.2.1	Disposición constructiva de los arrollamientos	66
3.3	Tipos de Devanados	68
3.3.1	Devanado cilíndrico en capas	69
3.3.2	Devanado helicoidal	70
3.3.3	Devanado continuo o superpuesto	72
3.4	Polaridad propia de un devanado	77
3.4.1	Polaridad relativa de los arrollamientos de una misma fase	79
3.4.2	Desfase entre las tensiones de una transformación trifásica	80
3.5	Sentido de bobinado de un devanado	83
3.6	Conductores de bobinas	88
3.7	Sistemas de aislamiento	91
3.7.1	Papel y Cartón	93
3.7.2	Aceite	95
3.7.3	Aceite de Silicona	96
3.7.4	Barnices y Resinas	97



CAPITULO 4

FUNDAMENTOS DE CALCULO DE TRANSFORMADORES

4.0	Introducción	91
4.1	Diseño eléctrico	93
4.1.1	Datos generales del transformador	93
4.2	Dimensionamiento de las partes activas	93
4.3	Cálculo de los volts/espira	95
4.3.1	Cálculo de espiras en devanado primario y secundario	96
4.4	Cálculo de la densidad de flujo	97
4.4.1	Selección y cálculo del área del núcleo	97
4.5	Densidad de Corriente	100
4.6	Los ampers/vuelta por unidad de longitud en la columna	101
4.7	Aislamiento entre devanados y entre devanados y núcleo	102
4.8	Distancias entre partes vivas y tierra	103
4.9	Dimensionamiento de los transformadores trifásicos	104
4.10	Diseño de un transformador de potencia	105
CONCLUSIONES		140
APENDICE (Glosario)		154
BIBLIOGRAFIA		158



INTRODUCCION

Elementos primarios del transformador.

A principios del siglo XIX, en los inicios del uso de la electricidad, la energía eléctrica era generada y distribuida con corriente directa, es decir, corriente que va de un polo negativo a un polo positivo manteniéndose invariable la polaridad de la fuente de voltaje.

Debido a la caída de voltaje a lo largo de las líneas de transmisión, los circuitos eléctricos de este tipo debían ser relativamente cortos a fin de aprovechar al máximo la energía. Esto requería tener plantas generadoras cercanas a los centros de consumo, lo que resultaría poco práctico y muy costoso.

Tal fue el estado de la parte concerniente a la electricidad cuando, entre 1831 y 1832, dos físicos Sir Michael Faraday de la Real Institución de Londres Inglaterra y Joseph Henry, en la Academia de Albania (Nueva York) en los Estados Unidos, descubrieron independientemente el principio de la inducción electromagnética, por medio de la combinación de las dos leyes del magnetismo. En tales trabajos, ellos descubrieron el concepto primitivo del transformador, "un núcleo construido de hierro, el cual tenía dos bobinas devanadas (primario y secundario), adecuadamente colocadas una con respecto a la otra y acopladas simultáneamente por una inducción mutua.

La energía eléctrica con una relación voltaje-amperaje puede ser convertida o transformada en una energía eléctrica de diferente relación voltaje-amperaje. El cambio del campo magnético ocurre cuando deliberadamente variamos la intensidad de la corriente.

Dado que el flujo de la corriente en un alambre en forma de bobina, produce un campo magnético, la corriente alterna produce un campo el cual se expande y se colapsa repetidamente, invirtiendo la polaridad en cada inversión de la dirección de la corriente. Cuando este campo corta a un conductor, un voltaje es inducido en él.

Faraday descubrió que una corriente eléctrica fluyendo en una bobina de alambre alrededor de un pedazo de hierro dulce, podría convertir el hierro en un magneto y que si este magneto era colocado en otra bobina de alambre, un galvanómetro conectado a las terminales de la bobina secundaria, este podría ser excitado. El dispositivo de Faraday demostró (un primitivo transformador de impulso) el principio en el cual se basa la operación del transformador.

Un transformador es un dispositivo que recibe energía eléctrica de una fuente a determinado voltaje y entrega prácticamente la misma energía con un voltaje diferente, que suele ser mayor o menor que el primero. Este dispositivo tiene la particularidad de que funciona de esta manera solamente con corriente alterna, o sea, cuando la polaridad de la fuente de voltaje es cambiante.

En 1882, un francés Lucien Gaulard y un inglés, John D. Gibbs, fueron subvencionados por una patente inglesa para la realización de un sistema de distribución en corriente alterna que uso dispositivos llamados "generadores secundarios" (transformadores) para subir y bajar los voltajes. El sistema eléctrico de Gaulard-Gibbs, el cual tiene un núcleo abierto, fue demostrado por primera vez en 1882 en una exhibición eléctrica en el acuario Westminster en Londres Inglaterra, y en una exhibición en Turin, Italia al año siguiente.

Entre los visitantes a la exhibición de Turin, estuvieron tres jóvenes ingenieros electricistas de Hungría, Max Deri, Otto Blathy y Karl Zipernowsky, ellos rotaron las limitaciones del núcleo abierto de hierro del sistema Gaulard-Gibbs. De regreso a casa, modificaron el sistema y obtuvieron dos patentes australianas en 1885. Ese mismo año, los tres ingenieros obtuvieron el privilegio de emplear el término "transformador" por primer vez.

La exhibición de Budapest en 1885 brindo a los señores Blathy y Karl Zipernowsky la primero y real oportunidad de demostrar el uso práctico de su transformador. La exhibición tuvo efecto a nivel mundial, trayendo consigo la curiosidad de un americano muy importante que fue Goerge Westinghouse, inventor del freno de aire para ferrocarril.

El genio de Westinghouse inmediatamente reconoció la potencialidad del nuevo dispositivo y del sistema y vio una gran opción. Adquirió varios de los "generadores secundarios" que fueron embarcados a su compañía La Union Switch and Signal en donde comenzó a rediseñarlas, tanto mecánicamente como eléctricamente. En enero de 1886, fue fundada la Westinghouse Electric Company para fabricar y promover equipos de corriente alterna. Al mes siguiente, la Westinghouse adquirió los derechos en América de las patentes de Gaulard-Gibbs y subsecuentemente comisionó a su jefe de ingeniería eléctrica; William Stanley, para apoyar el desarrollo del transformador.

Stanley trabajó arduamente en el sistema y monto su propio laboratorio en una fábrica de hule abandonada y rápidamente demostró el sistema de corriente alterna, a una escala práctica así;

Con algunos de los transformadores que él construyó en Pittsburg y otros fabricados en Great Barrington y utilizando las cornizas de las casas hechas de madera de olmo, en las tranquilas calles, instaló sus alambres y montó un sistema completo que alimentó a 12 tiendas, 2 hoteles, 2 consultorios, una barbería y las oficinas de teléfonos y de servicio postal. Con los detalles de las pruebas mientras la construcción progresaba, todo fue preparado rápidamente para la gran demostración al público. En la noche del 20 de Marzo de 1886, fueron encendidas 150 lámparas en las calles y tiendas ante la admiración de los vecinos del lugar.

En el suceso de esta demostración llevo a Westinghouse y a sus socios a establecer el sistema de corriente alterna a una escala comercial. Por Septiembre de 1886, el sistema en corriente alterna habia sido experimentado en Lawrenceville, Pensilvania, a cuatro millas de la planta Westinghouse y tambien fue instalado en Bufalo, Nueva York en Noviembre del mismo año.

En esta etapa del juego, pareció que los sistemas en corriente alterna, ofrecian ventajas económicas hasta que fueron desafiados por los defensores del sistema en corriente directa. Entre los oponentes al sistema en corriente alterna estaba Tomás Alba Edison y sus socios, quienes solicitaron una legislación para prohibir el uso de "La mortífera corriente alterna".

La guerra de las corrientes.

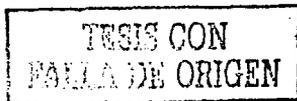
No obstante que el sistema en C.A. demostró muchas ventajas sobre el sistema en C.D., el sistema en C.A. tenia dos limitaciones; no era práctico para motores, limitándose su uso solo en la iluminación, además no habia aparatos para la medición del consumo en C.A.

Los rápidos avances eléctricos alcanzados por la compañía eléctrica Westinghouse y William Stanley no estuvieron sin controversias para determinar cual de los dos sistemas, el de C.D. o el de C.A., deberían de ser seleccionados para hacer frente a las demandas eléctricas en los Estados Unidos.

El debate sobre los pros y los contras de los sistemas en C.D. y en C.A., el cual se inició en 1886 terminó en 1888; las fuerzas de Edison lanzaron un ataque directo al sistema en C.A. de la Westinghouse. Ellos enfocaron sus esfuerzos a un solo punto: la seguridad. El golpe final a los sistemas en C.A. llegó cuando los Edisonianos citaron a la primera ejecución en Nueva York con la silla eléctrica alimentada con C.A., como un ejemplo del peligro del uso de la C.A.. A raíz de estos ataques, la agrupación de la Westinghouse opto por ignorar el reto y se concentró a perfeccionar los dos defectos del sistema en C.A.

En la investigación de las soluciones de las limitaciones de la C.A., Eliu Thomson, un profesor americano de química y mecánica, elaboró experimentos extensivos con la repulsión magnética en C.A., los cuales empleó para construir el motor de inducción pionero (esta es una de las 632 patentes de Thomson, entre las cuales se encuentra también el uso del aceite mineral como un medio aislante/refrigerante en el transformador, obtenido en 1887). Fue una de las demostraciones de Thomas lo que llamó la atención de un joven científico yugoslavo llamado Nikola Tesla.

Tesla llagó a ser contratado por la Westinghouse y comenzó a realizar experimentos para mejorar el sistema en C.A., incluyendo el uso de la electricidad utilizando dos o más corrientes alternas que al último llegó a ser conocido como sistema polifásico.



O.B. Shallenberger, otro ingeniero de la Westinghouse descubrió accidentalmente el principio que sirvió como base para la medición de la energía eléctrica en C.A.. A finales de los 80's, esto llegó a ser aparentemente una muestra de que el sistema alternamente estaba ganando la delantera al sistema en C.D.. Para verano de 1890, la ventaja en la "batalla de las corrientes" fue para la C.A. con toda justicia. En 1892, después de salvar una serie de problemas de desarrollo, la Westinghouse Electric Company consiguió lanzar al mercado el "motor Tesla".

A esto siguieron un gran número de victorias a favor de la Westinghouse. La decisión en 1894 de emplear un sistema en C.A. para transmitir energía desde las Cataratas del Niágara a Búfalo en Nueva York (a 22 millas), representa la marca del nivel de auge más alto de la 19ª. Centuria de investigación y desarrollo y propiamente sentenció a la transmisión en C.D. al estado de una tecnología inactiva.

Con esto se inicia el uso de circuitos de transmisión en corriente alterna; a partir de entonces, este ingenioso dispositivo se convierte en una pieza clave en el proceso de transmisión y distribución de la energía eléctrica.

Reactivación de la tecnología de la C.D.

Las primeras transmisiones en C.D. operaron a bajos voltajes, de tal manera que este sistema no pudo ser empleado para la transmisión a grandes distancias debido a los prohibitivos costos del cobre. Además, un gran número de las centrales de energía tuvieron que estar localizadas muy cerca de los consumidores, resultando con ello, un costo elevado en el mantenimiento y en el suministro seguro de agua y del combustible.

A pesar de estas limitaciones, reveladas en los primeros años de la industria de la energía eléctrica, la C.D. en alta tensión (HVDC), esta hoy en día emergiendo, en algunos casos como un camino económico para transmitir electricidad. "Después de todo ¡Edison no podía haber estado equivocado!. Una tecnología hecha con un equipo de estado sólido y un rayo láser, hace posible el envío de C.D. eficientemente a grandes distancias. El primer sistema Norteamericano en HVDC fue una línea en 1977. Transmite energía a 456 millas del Centro de Dakota del Norte, a Duluth, Minnesota.

Después, una serie de rectificadores controlados de Silicio (SCRs), llamados válvulas de tiristores, convirtieron la energía de C.D. en C.A. para distribuirla a las casas y a las fábricas.

Otros numerosos ejemplos en el mundo indican el incremento del papel que esta jugando actualmente la transmisión en C.D.. Los proyectos de transmisión en HVDC ahora en operación y otros en construcción tienen rangos de voltajes de operación de 500 a 800 kV (Estados Unidos y La Unión Soviética) y la distancia de transmisión se extiende hasta 1050 millas (1700 km) en Zaire, África. Menos aislamiento, millas reducidas de derecho de vía y menos pérdidas de energía en C.D., están demostrando ser de una gran ventaja en la transmisión en C.D..

Aún cuando los sistemas de energía en C.D. están mostrando ser ventajosos, primeramente para propósitos de transmisión, los sistemas en C.A. tienen que continuar por mostrar una gran flexibilidad y sus múltiples usos, especialmente para distribución residencial.

Con la corriente alterna, es posible subir y bajar el voltaje económicamente por medio de los transformadores. Debido a que el transformador tiene elevadas eficiencias (98-99.5%), ellos son muy económicos para transmitir energía eléctrica a tensiones elevadas en C.A. y bajarlas a voltajes bajos en los cuales esta energía puede ser utilizada. Por el contrario, no es fácil convertir las altas tensiones de C.D. en bajas tensiones en C.A., a las cuales la energía puede ser utilizada, ni la C.D. puede ser convertida fácilmente de bajas tensiones a tensiones de transmisión elevadas.

Flexibilidad de los sistemas en C.A.

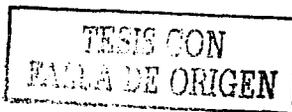
La flexibilidad práctica del uso de la C.A., esta demostrada por su amplio uso en la industria, actualmente, más del 95% de la energía eléctrica usada comercialmente, es generada en C.A., no obstante, esto no significa que la aplicación en los lugares domésticos e industriales, sea superior al uso de la C.D.. En efecto, su mayor ventaja (de la C.A.) es que la C.A. puede ser lo suficientemente flexible para ser convertida en C.D. y entonces puede ser utilizada en la vecindad inmediata del lugar de generación. Tal uso ha sido demostrado en las Cataratas del Niágara, donde la energía de las cataratas es empleada para generar energía alterna y luego se convierte en C.D. para usarse en las industrias electroquímicas de los alrededores.

Dado que la energía en C.A. puede ser transmitida económicamente a grandes distancias, es factible generar energía eléctrica en grandes cantidades en una sola central de generación y entonces distribuirse sobre un área comparativamente grande.

Objetivos de trabajo.

Los objetivos de este trabajo son:

- 1) Dar a conocer el proceso de manufactura realizada en transformadores de potencia, principalmente de los elementos esenciales del funcionamiento (circuito magnético, circuito eléctrico)



- 2) Dar las características de diseño que debe tener un transformador de potencia principalmente con una capacidad de 18/24/30 MVA.

En México existen diversas compañías dedicadas a la fabricación de transformadores, tanto de distribución como de potencia, cada una de ellas utiliza quizás el mismo método de cálculo en tanto a cuestiones eléctricas se refiere; pero en cuestiones de ensamble y manufactura son netamente muy diferentes.

Cada una de ellas utiliza métodos de ensamble y manufactura de acuerdo a la tecnología y experiencia que se tenga, básicamente difieren en los tipos de material que se utilizan, los procedimientos empleados, y la forma de construcción empleada. En "Voltran Transformadores" se cuenta con un procedimiento único y original.

La información contenida en este trabajo consiste en su mayoría de los procesos de manufactura utilizados en los elementos principales del transformador realizados principalmente en Voltran, aunque en algunos casos se generalizo en criterios de diseño y elementos básicos de ensamble.

Se pretende con esto, presentar en este trabajo los procesos de manufactura utilizados en transformadores de potencia y las bases de diseño de los mismos. El desarrollo de esta trabajo esta organizado en 4 capitulos los cuáles se describen brevemente a continuación.

En el capítulo 1 se presentan los principios y conceptos básicos del transformador así como de sus propiedades eléctricas en los que se basa el funcionamiento del mismo. Se describen las pérdidas que se presentan, las conexiones posibles y los tipos de enfriamiento utilizados.

En el capítulo 2 se habla del circuito magnético del transformador, los métodos de ensamble y construcción, del material utilizado y de las propiedades electromagnéticas del mismo.

En el capítulo 3 se habla del circuito eléctrico del transformador, los tipos de construcción, los conductores utilizados, los sentidos de bobinado y de los sistemas de aislamientos empleados.

En el capítulo 4 se describen las características de diseño de los transformadores de potencia, los criterios utilizados y los métodos de cálculo utilizados en cada etapa de diseño.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 1

CONCEPTOS Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TRANSFORMADOR.

1.0. Introducción.

Los transformadores son los elementos principales que se encuentran invariablemente en un sistema eléctrico por grande o pequeño que éste sea; estos equipos han contribuido de manera muy importante al desarrollo de la industria eléctrica, hasta las magnitudes, en que actualmente se encuentran.

Debido a que es posible la transformación de los parámetros de tensión y corriente, se tiene la posibilidad de transmitir a grandes distancias, grandes volúmenes de energía eléctrica permitiendo esto disponer de las fuentes (centrales generadoras) por retiradas que se encuentren de los centros de consumo.

Son también los equipos eléctricos más eficientes que se conocen, ya que al no tener partes en movimiento, no existen pérdidas, por fricción o rozamiento, y, por otra parte, la calidad de los materiales ferromagnéticos que componen al núcleo se ha incrementado, lo cual contribuye a que las eficiencias sean del orden del 98 al 99%.

Se puede decir entonces que se incluyen bajo la denominación general de transformadores a aquellos dispositivos estáticos, es decir, sin partes móviles, destinados a transferir energía de un circuito a otro, siendo el enlace común entre ambos circuitos, un flujo magnético.

El transformador no es, propiamente una máquina eléctrica, pues el concepto "máquina" presupone siempre órganos en movimiento y el transformador es, como hemos dicho, un dispositivo estático, además, en las máquinas eléctricas, o bien hay conversión de energía eléctrica en energía mecánica (motores) o conversión de energía mecánica a energía eléctrica (generadores); es decir, siempre existe un cambio de energía de una clase, en energía de otra clase diferente.

Por el contrario, en los transformadores solamente se modifica energía eléctrica de unas características a otras (principalmente tensión y corriente), sin tener que alterar o modificar la frecuencia.

En el campo de la industria eléctrica existe una gran cantidad de diferentes tipos y clasificación de transformadores que se diferencian básicamente en el tipo de trabajo que dicho transformador vaya a desarrollar, así como también de las características eléctricas del sistema eléctrico en que va a operar.

Se distinguen básicamente por tipo de construcción (núcleo tipo acorazado o núcleo tipo columnas), número de fases (monofásico o trifásico), tipo elevador o reductor (utilizados en centrales generadoras o sub-estaciones eléctricas) y el tipo de conexión que va desde una delta-estrella (la más usual y comercial) hasta conexiones más especiales y un poco más complicadas tal es el caso de una estrella-estrella o un z-zag (utilizadas principalmente en instalaciones muy especiales).

1.1 Definición del transformador.

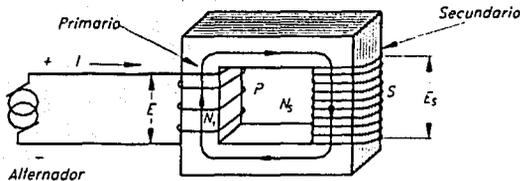
Un transformador es un dispositivo en el cual dos o más circuitos eléctricos están acoplados a través de un flujo magnético común variable con el tiempo, que basado en el principio de la inducción electromagnética, transfiere energía eléctrica de un circuito a otro, sin que exista contacto físico entre ambos, pero si unidos por un campo magnético.

Físicamente, estos circuitos están constituidos por bobinas enrolladas alrededor de un núcleo de material ferromagnético, y normalmente la transferencia de energía va acompañada de cambios en los valores de tensión y de corriente, pero no de frecuencia e impedancia.

1.1.1 Principio de funcionamiento.

El efecto que permite al transformador funcionar como tal, se conoce con el nombre de "inducción electromagnética", como se mencionó anteriormente, este efecto solo se presente en circuitos de corriente alterna.

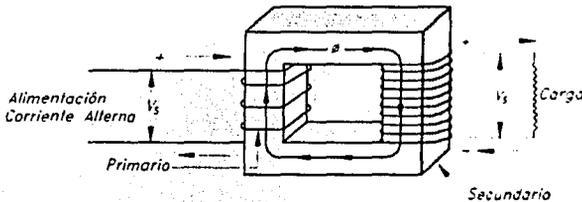
Para explicar este fenómeno consideremos un transformador elemental compuesto por una parte eléctrica y una parte magnética, como se ilustra en la (fig. 1.1).



(fig. 1.1) Se ilustra como ocurre el efecto de inducción electromagnética.

La parte eléctrica está integrada por dos devanados o bobinas, una que recibe la energía que se denomina primario y otra que entrega la energía que se denomina secundario. Entre estos devanados no existe conexión eléctrica. La parte magnética esta formada por un núcleo de acero que enlaza a los dos devanados.

Cuando se aplica un voltaje a las terminales del primario del transformador (fig. 1.2) fluirá una corriente en el devanado primario que engendrará un flujo magnético alterno; este flujo viajando a través del núcleo, enlaza al devanado secundario induciendo así un voltaje en el secundario. La corriente que fluye en el devanado o arrollamiento primario está misteriosamente limitada por la presencia del núcleo de hierro. Si se conecta una carga a las terminales del secundario, fluirá una corriente en el secundario. La corriente primaria aumentará en el instante en que comience a fluir la corriente secundaria. La razón de este fenómeno no es notoria o evidente.



(Fig. 1.2) Se ilustra un transformador ideal con carga.

El voltaje inducido guarda una relación directa con el número de vueltas del devanado, esto es, si en el secundario tenemos más vueltas que en el primario, estaremos elevando el voltaje y si por el contrario tenemos menos vueltas en el secundario que en el primario, estaremos reduciendo el voltaje. A esto se le llama "relación de transformación".

1.2. Corriente de excitación.

Considérese inicialmente que no existe carga conectada en el secundario, es decir que únicamente circula corriente por la bobina del primario y que esta corriente produce un flujo magnético que se concentra totalmente en el núcleo.

En estas condiciones la corriente presente se denomina corriente de vacío (I_0) del transformador, conocida también como "corriente de excitación", que genera la f.m.m. que produce el flujo mutuo ϕ y compensa también las pérdidas del núcleo o pérdidas en vacío. La I_0 consiste de dos componentes:

- La componente de magnetización I_m que ocasiona que el flujo magnético circule por el núcleo.
- La componente de energía I_c en cuadratura con I_m , que corresponde a la corriente de pérdidas en el núcleo.

Puesto que las pérdidas son pequeñas y el primario es muy inductivo, lo tiene un retardo de 90° (fig. 1.1) con respecto a la tensión V_1 en las terminales. También se tiene que, para todas las cargas ordinarias, la f.e.m. E_1 inducida en el primario por el flujo es casi igual en magnitud a la tensión en terminales el primario V_1 , y difiere en ella sólo ligeramente, debido a la pequeña impedancia del primario. Luego como V_1 es constante, la f.e.m. inducida debe ser casi nula, y el flujo también debe ser aproximadamente igual para todas las cargas normales y, por lo tanto, la f.e.m. que lo produce, lo mismo que las pérdidas en el hierro, deben ser prácticamente constantes. Así, la corriente de excitación será aproximadamente constante para todas las cargas normales del transformador.

Podemos decir entonces que la corriente de excitación puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$I_0 = \sqrt{I_m^2 + I_c^2} \quad (\text{ec. 1.1})$$

Generalmente la corriente I_c es menor del 10% de la corriente I_0 , por lo cual su influencia sobre la corriente en vacío es imprescindible (menos de 0.5%). Es también muy pequeño el ángulo α en cuyo valor está retrasado el flujo ϕ de la corriente I_0 y que a menudo se llama ángulo de retraso magnético.

La corriente I_c influye un poco más sobre la forma y la fase de la corriente en vacío. Sólo tendremos en cuenta las pérdidas por histéresis, ya que en los transformadores de acero al silicio laminado en caliente éstas constituyen aproximadamente el 85% de la potencia.

1.2.1. Corriente de carga

Si se aplica una carga al secundario (fig 1.2) se tendrá una corriente I_2 en éste, cuya magnitud y defasamiento respecto a la tensión en las terminales de dicho secundario quedará determinada por las características de la carga. Sin embargo, en cada instante, la dirección de la corriente en el secundario debe ser tal que se oponga a las variaciones del flujo, de acuerdo con la ley de Lenz, que establece que una corriente inducida tiene siempre una dirección que se opone a la causa que lo produce. En la figura anteriormente mencionada se supone que la dirección del flujo es la de las manecillas del reloj y que aumenta.

Si la corriente en el secundario I_2 generase el flujo, según la regla del sacacorchos, penetraría por la terminal superior (fig 1.2). Como I_2 se opone al flujo ϕ , debe realmente salir por dicha terminal. La corriente en el secundario I_2 tiende entonces a reducir el valor del flujo común en el núcleo del transformador. Si el flujo se reduce, la f.e.m. del primario se reduce también, lo que permite que circule más corriente por él, suministrando la energía requerida por el aumento de potencia debida a la carga del secundario, que permite al primario absorber de la línea de alimentación la energía requerida por el incremento de potencia exigida por el secundario.

La variación de la f.e.m. en el primario al pasar de operación en vacío a operación en plena carga es aproximadamente de 1 ó 2%. Como la f.e.m. es proporcional al flujo común ϕ , el valor del flujo ϕ varía sólo ligeramente dentro de los límites del trabajo del transformador, y, por lo tanto, los *amperes-vuelta* netos que actúan en el núcleo permanecen esencialmente invariables. El aumento de *amperes-vueltas* debidas a la carga del secundario debe equilibrarse, pues, con los *amperes-vueltas* debidos al aumento de intensidad de corriente en el primario. Como el flujo se mantiene prácticamente constante, la corriente de excitación debe conservarse esencialmente constante.

1.3 Flujos magnéticos y relación de transformación.

Con respecto al transformador de la (fig. 1.1), sea N_1 el número de vueltas de la bobina P y N_2 el número de vueltas de la bobina S. En la sección anterior se estableció que la corriente de la bobina primaria produce un flujo alrededor del núcleo; este flujo eslabona a ambas bobinas y es una función senoidal dependiente del tiempo.

$\phi = \phi_m \text{ sen } \omega t$ de acuerdo con la Ley de Faraday la tensión inducida en la bobina primaria es:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{ec. 1.2})$$

$e = -N \phi_m \omega \cos \omega t$ si $\omega = 2\pi f$ entonces:
 $e = -2\pi f N \phi_m \cos \omega t$

y el valor eficaz correspondiente a e queda:

$$e = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \phi_m = 4.44 f N \phi_m \quad \text{el flujo máximo es } \phi_m = B_m A;$$

en donde: B_m = Densidad del flujo máximo por lo tanto la ecuación anterior puede escribirse:
 A = Sección transversal del núcleo

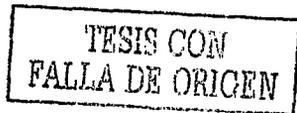
$$e = 4.44 f N A B_m \quad (\text{ec. 1.3})$$

a esta expresión se le suele llamar, con toda razón, la *ecuación general del transformador*. Si nos referimos al arrollamiento del lado primario, la tensión inducida es:

$$e = 4.44 f N_1 A B_m \quad \text{y para el secundario:} \quad e = 4.44 f N_2 A B_m$$

Ahora bien, si el circuito a la bobina S se cierra conectando una carga, (fig. 1.2), una corriente I_2 circula y se producen los flujos magnéticos siguientes:

ϕ_{d1} = Flujo disperso producido por I_1 . Eslabona únicamente a la bobina primaria.



ϕ_{d2} = Flujo disperso producido por I_2 . Eslabona únicamente a la bobina secundaria.

ϕ_{m} = Flujo mutuo producido por la diferencia $N_1 I_1 - N_2 I_2$.

La dirección de la corriente I_0 es tal que el flujo mutuo producido por ella se opone a aquel producido por el devanado P y por lo tanto tiende a nulificar el flujo en el núcleo. Esta acción causa que la tensión inducida en P se reduzca y consecuentemente presenta oposición a la tensión de la fuente; el resultado de esta perturbación es un incremento en la corriente primaria que finalmente restablece el flujo mutuo al valor previo al cierre del circuito de carga.

Este incremento de la fuerza electromotriz puede expresarse como:

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 - N_2 I_2 \quad (\text{ec. 1.4})$$

En un transformador bien diseñado la corriente de excitación es muy baja comparada con la corriente de carga en el primario, de tal forma que la ecuación anterior se define como:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad \therefore \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{ec. 1.5})$$

Esta ecuación representa la "relación de transformación" entre las corrientes primaria y secundaria. Como se observa es inversamente proporcional a la relación de vueltas del transformador.

Por otro lado, se puede observar también que el voltaje inducido guarda una relación directa con el número de vueltas del devanado, esto es, si en el secundario tenemos más vueltas que en el primario, estaremos elevando el voltaje y si por el contrario tenemos menos vueltas en el secundario que en el primario, estaremos reduciendo el voltaje; a esta relación de vueltas, o de tensiones inducidas, es llamada también *relación de transformación*, y es representada por el símbolo α , así que:

$$\alpha = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \quad (\text{ec. 1.6})$$

La ecuación anterior, es constante, mientras que la relación $E_1 : E_2$ varía cerca del 1 al 8%, dependiendo de la carga y del factor de potencia.

Cuando la tensión del primario dado V_1 es reducido a una tensión del secundario bajo V_2 , se dice que es un paso atrás del transformador, contrariamente, si la tensión es elevada, este el llamado un paso adelante del transformador. En un paso atrás del transformador la relación de transformación es más grande que la unidad, mientras que en un paso adelante del transformador, es menor que la unidad; en la práctica, como quiera que sea, es frecuente especificar la relación de transformación α como un número más grande que la unidad.

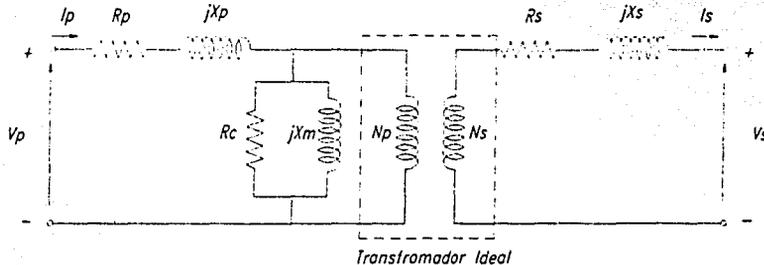
1.4 Circuito equivalente del transformador.

El circuito equivalente de un transformador puede ser considerado, convenientemente, suponiendo que éste es equivalente a un transformador ideal, por lo que es un transformador que no tiene pérdidas ni flujo de dispersión y un núcleo ferromagnético de permeabilidad infinita, no requiriendo de corriente de magnetización, y entonces nos permite representar para las imperfecciones del transformador actual por medio de un circuito adicional o impedancias insertadas entre la fuente y el devanado primario y entre el secundario y la carga.

Así, en la (fig. 1.3), P y S representan los devanados primario y secundario de un transformador ideal, R_p y R_s son resistencias iguales para las resistencias del devanado primario y secundario del transformador real. Similarmente, las reactivancias inductivas X_p y X_s representan las reactivancias de los devanados debido al flujo de dispersión en el transformador real.

El modelo del transformador debe considerar los siguientes conceptos:

- Pérdidas en el cobre determinadas por $I^2 p R_p + I^2 s R_s$.
- Pérdidas por corrientes de Foucault debidas al calentamiento de tipo resistivo en el núcleo.
- Pérdidas por histéresis, que se deben al reagrupamiento de los dominios magnéticos en el núcleo durante cada semiciclo.
- Flujos de dispersión del primario y secundario, que originan las autoinductancias primaria y secundaria.

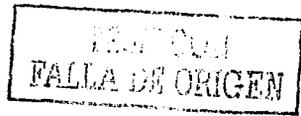


(fig. 1.3) circuito equivalente de un transformador.

Las pérdidas en el cobre se representan colocando las resistencias R_p y R_s en los arrollamientos primario y secundario respectivamente.

El flujo de dispersión primario y secundario se representan mediante las reactivancias de los arrollamientos primario y secundario jX_p y jX_s respectivamente.

Los efectos de las corrientes de magnetización I_m se representan por la reactancia jX_m conectada en las terminales de la fuente de alimentación.



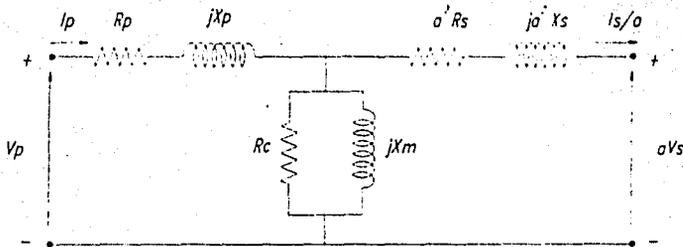
La reactancia inductiva jX_m es tal que toma una corriente igual a la corriente de magnetización I_m del transformador real; esta corriente tiene las siguientes características:

- Es proporcional (en la región no saturada) al voltaje aplicado.
- Se atrasa 90° con respecto al voltaje aplicado.

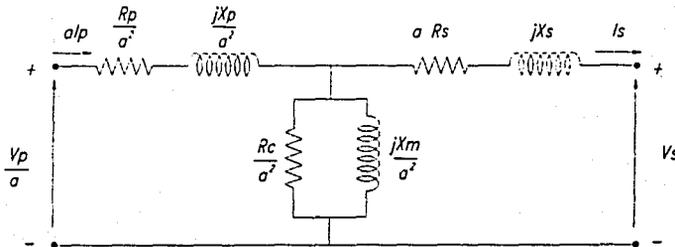
Los efectos de la corriente de pérdidas en el núcleo debido a la histéresis y a las corrientes de Eddy son representados por el resistor R_c de valor tal que toma una I_p igual a la componente de pérdidas del núcleo de la corriente primaria, por tanto, $I_p^2 R$ es igual a las pérdidas del núcleo del transformador real.

Como la corriente de magnetización y la corriente de pérdidas en el núcleo no son lineales, entonces jX_m y R_c proporcionan excelentes aproximaciones de los efectos de excitación reales.

A partir de la (fig. 1.3) se puede obtener el circuito equivalente del transformador referido al primario como se indica en la siguiente ilustración:



(fig. 1.4) Circuito equivalente del transformador referido al primario

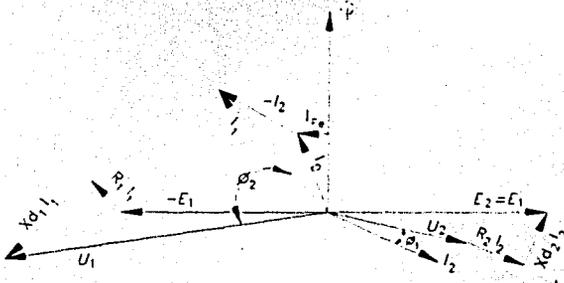


(fig. 1.5) Circuito equivalente del transformador referido al secundario

La corriente de excitación ocasiona caídas de voltaje despreciables en el arrollamiento primario debido a que su valor no excede el 5% de la corriente nominal primaria (y en ocasiones es todavía menor el porcentaje comparada con la corriente de carga del transformador). Por esta razón no se comete un error significativo

1.4.1. Diagrama vectorial de un transformador con carga.

En la (figura 1.4) se representa el diagrama de funcionamiento del transformador con carga en el secundario; en ella aparecen todos los vectores correspondientes a los valores elementales del transformador.



(fig. 1.4) Diagrama vectorial del transformador con carga

Por conveniencia nos permitimos suponer un número igual de vueltas en el devanado primario y secundario, así que $E_1 = E_2$. ambos E_1 y E_2 atrasados por el flujo 90° , como se presenta en la (fig. 1.4) y $-E_1$ representa la tensión a través del primario del transformador ideal (la tensión es igual en magnitud pero opuesto a la f.e.m., de aquí el signo negativo). Se supone que el movimiento de avance de los vectores se efectúa en sentido contrario a las manecillas del reloj.

Partiremos del vector del flujo, que es el que circula por el circuito magnético y que aparece en diagrama en posición vertical. Dicho flujo induce en el arrollamiento secundario una fuerza electromotriz cuyo valor se obtiene por la conocida fórmula

$$e = 4.44 \Phi N_2 f \cdot 10^{-8} \text{ voltios} \quad (\text{ec. 1.7})$$

siendo en ella N_2 el número de espiras del arrollamiento secundario, y f la frecuencia en hercios o periodos por segundo.

La corriente que recorre el arrollamiento secundario da origen a caídas de tensión, de las cuales una es debida a la resistencia óhmica y otra a la autoinducción, y tiene por valor, respectivamente:

$I_2 R_2$ = Caída de tensión debido a la resistencia del secundario.

$I_2 X_2$ = Caída de tensión debido a la reactancia de dispersión del secundario.

Cuyos vectores representativos estarán en fase con I_2 para la primera y en cuadratura para la segunda.

La fuerza electromotriz E_2 será, pues, la resultante de los vectores anteriormente $I_2 R_2$, $I_2 X_2$ y U_2 , siendo este último el de la tensión secundaria, que si trata de un circuito inductivo estará adelantado con respecto a I_2 y se verificará que $U_2 < E_2$. Se aprecia también en el diagrama, como es sabido que el vector E_2 está retrasado en 90° con respecto al del ϕ .

La corriente I_1 que circula por el arrollamiento primario da origen también en éste a dos caídas de tensión, debidas así mismo a la resistencia óhmica de dicho arrollamiento y a su autoinducción, cuyos valores son:

$I_1 R_1$ = Caída de tensión debido a la resistencia del primario.

$I_1 X_1$ = Caída de tensión debido a la reactancia de dispersión del primario.

En la misma forma, el vector U_1 o tensión aplicada en los bornes del primario, será la resultante de los vectores $I_1 R_1$, $I_1 X_1$ y E_1 . este último es el de la fuerza electromotriz, que esta adelantada 90° con respecto al del ϕ .

Los vectores de las fuerzas electromotrices E_2 y E_1 se encuentran en oposición de fase, es decir, retrasada una de otra 180° . Se observa en el diagrama que si bien los vectores E_2 y E_1 están en oposición de fase, no ocurre lo mismo con U_2 y U_1 o con I_2 y I_1 debido ello a las respectivas caídas de tensión en el primario y en el secundario.

1.5 Rendimiento del transformador.

El rendimiento del transformador, como de cualquier máquina eléctrica, esta determinada por la potencia entregada y esta expresa en unidades de potencia activa, o sea, en kilovatios o vatios; esta potencia entregada esta definida por la relación de la potencia útil a la potencia absorbida:

Si W = es la potencia útil o cedida en kW.
 W_d = la potencia perdida o disipada en kW.
 W_a = la potencia absorbida o de entrada en kW.
 η = el rendimiento o eficiencia en %.

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{potencia de salida}}{\text{potencia de entrada}} = \frac{W}{W_a} 100 = \frac{W}{W + W_d} 100 \quad (\text{ec. 1.8})$$

Ahora bien, el transformador es un dispositivo eléctrico cuyo rendimiento es particularmente elevado debido, por una parte, a la ausencia de pérdidas mecánicas por rozamiento y, por otra parte, a la pequeña reluctancia de su circuito magnético, desprovisto de entrehierros, por lo que un pequeño consumo de energía es suficiente para crear una inducción elevada. Este rendimiento es un número próximo a la unidad, por lo que con la expresión expuesta anteriormente resulta poco precisa la determinación del rendimiento. Para alcanzar esta exactitud, haciendo posible la determinación del rendimiento con la regla de cálculo, hemos de transformar la expresión anterior como sigue:

$$\eta = \frac{W_a - W_d}{W_a} = 1 - \frac{W_d}{W + W_d} \quad (\text{ec. 1.9})$$

Teniendo en cuenta que:

Potencia absorbida = Potencia suministrada al primario P₁.

Potencia útil = Potencia proporcionada por el secundario P₂.

Podemos deducir otra expresión del rendimiento

$$\eta = \frac{P_1 - P_{fe} - P_{cu}}{P_1} = 1 - \frac{P_{fe} + P_{cu}}{P_1} \quad (\text{ec. 1.10})$$

Como además

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \phi$$

$P_{fe} = P_0$ (potencia absorbida en vacío)

$$P_{cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 = R_{cc} I_1^2$$

Tendremos que

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + R_{cc} I_1^2}{V_1 I_1 \cos \phi} \quad (\text{ec. 1.11})$$

Recordemos que:

$P_{fe} =$ pérdidas en vacío (pérdidas en el hierro que son fijas e inalterables)

$P_{cu} = R_{cc} I_1^2 =$ pérdidas en el cobre (son variables y dependen de la carga).

Es decir, que el rendimiento de un transformador será máximo cuando se cumpla la relación:

$$\text{Pérdidas en el Hierro} = \text{Pérdidas en el Cobre.}$$

En la figura 1.7 se expresan las curvas de rendimiento de un transformador para distintos factores de potencia, así como las pérdidas en el cobre y en el hierro y la condición de máximo rendimiento.

Técnicamente, un transformador se caracteriza por la relación:

$$\alpha = \frac{\text{Pérdidas en el cobre a potencia nominal}}{\text{pérdida en el hierro}}$$

el valor de α está comprendido entre los siguientes límites:

$\alpha = 3$ a 5 para transformadores centrales (gran potencia).

$\alpha = 6$ a 10 para transformadores de distribución (pequeña potencia).

Los elevados valores de α para transformadores de pequeña potencia, se deben a que estos transformadores trabajan casi siempre con cargas pequeñas.

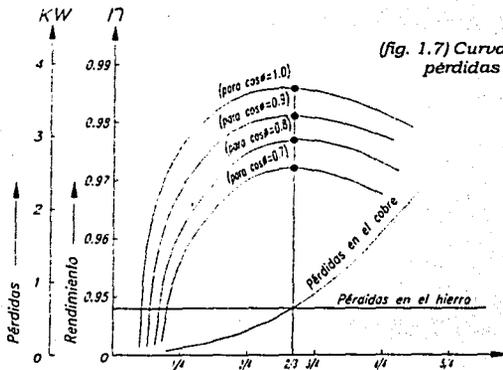
Para hallar el rendimiento de un transformador a cualquier valor de carga, se introduce el índice de carga definido por la relación:

$$C = I_2 / I_{2N}$$

En donde I_{2N} = corriente de plena carga.

Y teniendo en cuenta que las pérdidas en el hierro son fijas mientras que las pérdidas en el cobre son aproximadamente proporcionales al cuadrado de la corriente de carga, el valor del rendimiento a una carga cualquiera es:

$$\eta = 1 - \frac{P_{fe} + c^2 P_u}{c P_1} \quad (\text{ec. 1.12})$$



(fig. 1.7) Curvas de rendimiento y de pérdidas de un transformador.

$$\text{Relación} \quad \frac{\text{Potencia de servicio}}{\text{Potencia nominal}}$$

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

1.6 Clasificación de las pérdidas en el transformador.

En los transformadores, como en cualquier otro dispositivo eléctrico, se producen pérdidas de potencia. Una de estas pérdidas se producen ya en vacío y se conservan inalteradas en carga, por lo que se conocen con el nombre de *pérdidas en vacío*; otra parte de las pérdidas solamente aparecen cuando el transformador está en carga y dependen, esencialmente, de la carga, siendo aproximadamente proporcionales a ésta; se denominan *pérdidas debidas a la carga*.

Las *pérdidas en vacío* son las que se producen en el circuito magnético a causa de la histéresis y de las corrientes de Foucault debidas al flujo en el núcleo, y por lo tanto son esencialmente *pérdidas en el hierro*. Aunque con el transformador en vacío también aparecen pérdidas por efecto Joule en el arrollamiento primario, ocasionadas por la corriente de excitación. Esta última da lugar también a un pequeño flujo de autoinducción y consiguientes pérdidas adicionales en el cobre, cuya magnitud es, sin embargo, insignificante.

Las *pérdidas debidas a la carga* se producen en los circuitos eléctricos primario y secundario del transformador; se denominan también *pérdidas en el cobre*. Se deben al efecto Joule por efecto del paso de la corrientes primaria y secundaria por los respectivos arrollamientos y valen:

$$P_{cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 = R_{cc} I_1^2 \quad (\text{ec. 1.12})$$

Por lo tanto, son proporcionales a la corriente de carga.

Durante el funcionamiento en carga del transformador aparecen simultáneamente las pérdidas en vacío y las pérdidas debidas a la carga, de forma que las pérdidas totales valen:

$$P_t = P_{fe} + P_{cu} \quad (\text{ec. 1.13})$$

De ellas, las pérdidas en el hierro son *pérdidas fijas* e independientes de la carga, y las pérdidas en el cobre son *pérdidas variables* y dependientes de la carga.

Naturalmente, en los transformadores con arrollamientos de aluminio, la expresión "pérdidas en el cobre" debe sustituirse por *pérdidas en el aluminio*.

Cabe hacer algunas consideraciones sobre las pérdidas de los transformadores. Las pérdidas en el hierro o pérdidas en vacío de un transformador tienen gran importancia durante la explotación ya que, por no depender de la carga, provocan un consumo de energía incluso cuando el transformador no consume, es decir, en los periodos de paro; esta energía debe ser pagada por el usuario ya que los contadores de energía se instalan siempre en los primarios de los transformadores.

Por otra parte, se ha demostrado experimentalmente que las pérdidas en el hierro son aproximadamente proporcionales al cuadrado de la inducción; es decir que, desde el punto de vista del usuario son preferibles las inducciones bajas.

1.6.1. Pérdidas por Histéresis.

La aparición de pérdidas por histéresis está íntimamente asociada al fenómeno por el cual una región atravesada por un campo magnético, absorbe energía. Si la región no es el vacío, tan sólo una parte de la energía tomada del circuito eléctrico se almacena y recupera totalmente de la región, al suprimir el campo magnético. El resto de la energía se convierte en calor a causa del trabajo realizado sobre el material en el medio cuando responde a la imanación.

Las pérdidas por histéresis se deben a la tendencia de la característica $B(H)$ del material de recorrer un lazo cuando se aplica a dicho material un campo magnético cíclico.

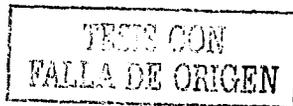
Es importante distinguir entre histéresis y pérdidas por histéresis. El fenómeno conocido por el nombre de histéresis es el resultado de la propiedad del material de conservar su imanación o de oponerse a una variación del estado magnético. La pérdida por histéresis es la energía convertida en calor a causa del fenómeno de la histéresis y, según suele interpretarse, está asociada solamente a una variación cíclica de fuerza magnetomotriz. Esta interpretación es el resultado de la amplia utilización técnica del material sometido a campos magnéticos cíclicos y de la relativamente gran importancia de los datos de pérdidas representativos de esta forma de utilización.

Ahora considérese una bobina toroidal cuyo núcleo consta de hierro no magnetizado. Si la corriente se incrementa desde cero hasta un valor I , la intensidad de H aumenta linealmente con I de acuerdo con la expresión $H = nI$. Además, el campo total B también se incrementa cuando aumenta la corriente como se muestra en la figura 1.6. en el punto O , los dominios están orientados al azar, correspondiendo a $B_m = 0$. cuando el campo externo aumenta, los dominios tienden a alinearse y están completamente alineados en el punto a . En este punto, el núcleo de hierro está próximo a la saturación. (la condición de saturación corresponde al caso donde todos los dominios están alineados en una misma dirección.)

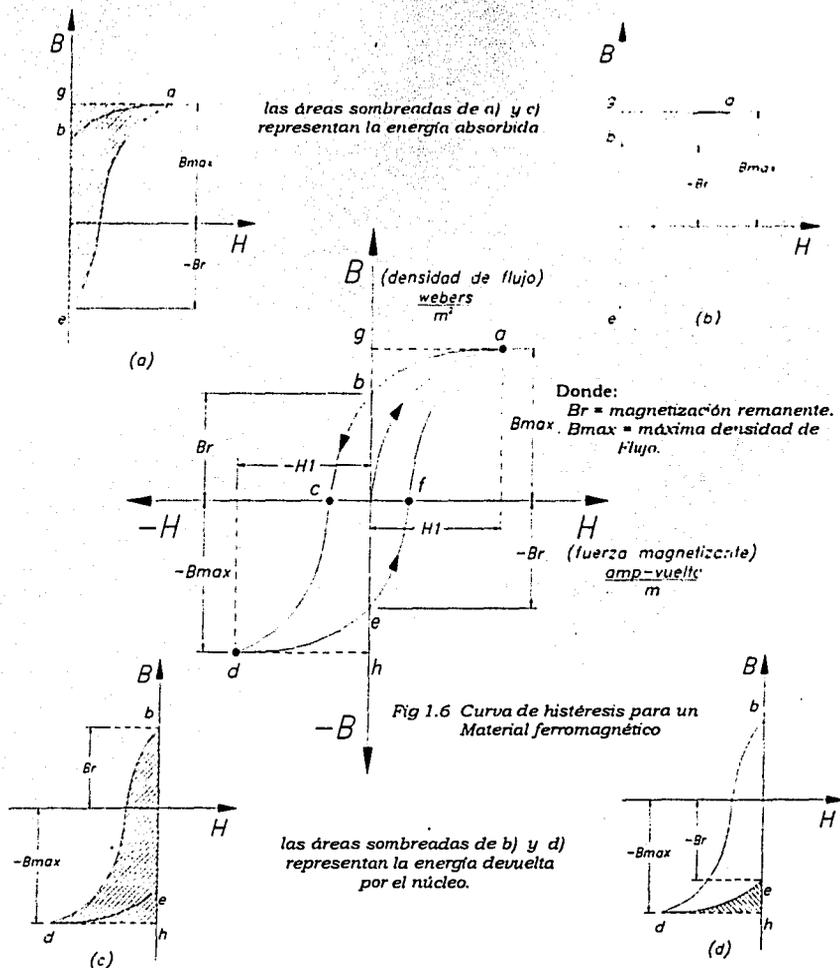
Después, supóngase que la corriente se reduce hasta cero, eliminando así el campo externo. La curva de B en función de H , llamada *curva de magnetización*, ahora sigue la trayectoria ab . Obsérvese que en el punto b el campo B no es cero, aún cuando el campo externo $B_o = 0$. esto se explica por el hecho de que el núcleo de hierro está ahora magnetizado debido a la alineación de un gran número de dominios (es decir, $B = B_m$). En este punto, se dice que el hierro tiene una *magnetización remanente*. Si se invierte el campo externo en dirección y se incrementa su intensidad con una corriente inversa, los dominios dentro de la muestra se reorientarán hasta llegar a desmagnetizarse en el punto c don de $B = 0$. al seguir aumentando la corriente inversa ocasiona que el hierro sea magnetizado en dirección opuesta, aproximándose a la saturación en el punto d .

Una secuencia similar de eventos ocurre cuando la corriente se reduce hasta cero y entonces se incrementa en la dirección original (positiva). En este caso, la curva de magnetización sigue la trayectoria def . si la corriente se aumenta lo suficiente, la curva de magnetización regresa al punto a , donde la muestra nuevamente tiene su máxima magnetización.

El efecto descrito, llamado *histéresis magnética*, muestra que la magnetización de las sustancias ferromagnéticas depende de la historia de la sustancia así como de la intensidad del campo aplicado. (la palabra *histéresis* literalmente significa "estar retrasado").



Se dice en algunas ocasiones que las sustancias ferromagnéticas tienen memoria ya que permanecen magnetizadas después de que se retira el campo magnético externo: su forma y tamaño depende básicamente de las propiedades de la sustancia ferromagnética y de la intensidad del campo magnético aplicado.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

1.6.2. Pérdidas por corriente de Foucault.

Durante la remagnetización del acero, surgen de éste, fuerzas electromotrices en la dirección determinada por la palma de la mano derecha. En esta misma dirección circulan las corrientes originadas por estas fuerzas electromotrices y llamadas *parásitas*, de *Foucault* o de *torbellino*.

Quando cambia el flujo en la laminación de un núcleo, se induce en ésta un voltaje como se muestra en la (fig. 1.8). La corriente que fluye en respuesta a este voltaje es conocida como una corriente parásita o de Eddy. La teoría clásica ha estimado que el flujo esta uniformemente distribuido en la laminación en todo tiempo, de manera que puede ser calculado el voltaje inducido en la laminación misma.

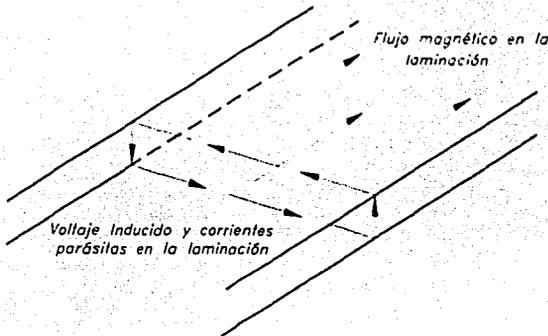


Fig 1.8 Se induce un voltaje en la superficie de la laminación

De hecho, sin embargo, el hierro del núcleo no es homogéneo. El flujo no está de ninguna manera uniformemente distribuido en la laminación, particularmente en los hierros orientados. La estructura de "dominio" del hierro magnético resulta en una distribución del flujo en grado sumo ininteligible matemáticamente, de manera que en realidad la pérdida por corriente parásitas no puede ser calculada por ningún método sencillo.

Provocando pérdidas de energía estas corrientes contribuyen al calentamiento del acero y reducen el rendimiento de la máquina. Para disminuir el efecto nocivo de estas corrientes el inducido (núcleo) se hace de chapas o laminaciones de acero de pequeño espesor (habitualmente de 0.5mm) aisladas con un barniz dieléctrico o con su propia oxidación.

Al calcular las pérdidas por corrientes de Foucault suponemos lo siguiente:

- 1) Que el espesor de la chapa de acero es insignificante en comparación con su altura y longitud.
- 2) Que la inducción varía con el tiempo en forma sinusoidal y se distribuye uniformemente por el espesor de la chapa, con otras palabras, despreciamos el efecto de blindaje de las corrientes parásitas que surgen en la chapa.
- 3) Que la permeabilidad magnética del acero y su resistencia específica permanecen constantes. En este caso la f.e.m. inducida en la chapa puede ser considerada proporcional a la frecuencia de remagnetización f y a la inducción B .

1.6.3. Pérdidas por efecto Joule.

Las pérdidas en los arrollamientos son debidas al efecto Joule por el paso de las corrientes a través de los bobinados primario y secundario. Estas, desde luego, varían con el aumento de temperatura, porque cuando mayor sea, mayor es también la resistencia de aquellos circuitos. Además es sabido que en corriente alterna la resistencia de un conductor aumenta con respecto al valor que obtendría por el paso de corriente continua, siendo por ello el efecto pelicular o superficial.

Las pérdidas de I^2R son a menudo llamadas como pérdidas en el cobre ocurridas en los arrollamientos primario y secundario del transformador. Estas pérdidas son causadas por la resistencia del conductor al flujo de corriente eléctrica; provocando así el movimiento de moléculas que causan en gran medida fricción y calor en el conductor.

Esta energía generada por el movimiento puede ser calculada por la siguiente fórmula:

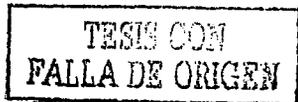
$$kVA = (\text{volts})(\text{amperes}) = VI$$

de acuerdo con la Ley de Ohm; la diferencia de potencial a través de la resistencia está dada por $V = RI$, es decir que la diferencial de potencial esta relacionada por la resistencia del conductor y el flujo de corriente que pasa por él. Por lo tanto las pérdidas de los kVA asociadas con la resistencia en el conductor se pueden obtener sustituyendo lo siguiente $V = RI$ en la ecuación anterior, entonces obtendremos que:

$$kVA = (RI) (I) = I^2 R$$

Esta es una pérdida significativa y es igual o mayor a la pérdida sin carga. Para poder reducir dichas pérdidas y hacer que el transformador opere eficazmente se tienen las siguientes consideraciones:

La corriente (I) que es parte esencial de las pérdidas por las $I^2 R$ es un parámetro que por cuestiones de diseño del transformador no podemos alterar o cambiar; solo podemos cambiar es este caso resistencia del conductor.



La resistencia del conductor puede ser reducida utilizando un material que tenga una baja resistividad y una área de sección transversal uniforme sin tener que agregar significativamente el costo del transformador.

Se ha encontrado que el cobre es el mejor conductor por lo que se refiere al peso, tamaño, costo y resistencia por lo tanto no podemos cambiar el material del conductor y solo hay dos maneras de poder reducir la pérdidas de $I^2 R$.

- Una de ellas es aumentando el área de la sección transversal del conductor.
- La otra es reduciendo la longitud del conductor.

Una sección transversal mucho más grande permite que la corriente fluya a través del conductor con menos resistencia reduciendo así la fricción y el calentamiento en el conductor. Por otro lado la resistencia del conductor es directamente proporcional a la longitud del conductor, por consiguiente, reduciendo la longitud del conductor reducimos su resistencia. Otro contribuyente además de las pérdidas por las $I^2 R$ son las pérdidas presentadas por las corrientes circulantes del conductor.

1.6.4. Pérdidas por Flujos de Dispersión.

Cuando se conecta una carga al secundario, y fluye una corriente, las amperios-vuelta de la bobina secundaria tienden a producir un flujo común; al mismo tiempo, suficiente flujo debe concatenar las vueltas del primario, para producir el voltaje inducido en la bobina primaria (voltaje aplicado, menos el perdido en el resistor del primario).

Así, un flujo activo debe pasar alrededor del núcleo para producir estos voltajes. De hecho, estos flujos no se separan para nada, sino se combinan. Es posible formarse una pronta imagen de la combinación para la situación de carga reactiva, en que el flujo de dispersión esta efectivamente en fase con el flujo activo y a su vez los amperios-vuelta del secundario desvian el flujo, alejándolo del núcleo y haciéndolo escaparse entre los devanados; de aquí que se le llame "flujo de dispersión o de escape".

Por otro lado y visto de otra manera podemos decir más prácticamente que debido a la reluctancia del material que constituyen a los núcleos reales y la forma geométrica economizada de los mismos, y en algunas ocasiones a la presencia del entre-hierro, algunas líneas de flujo generado por la corriente magnetizante en el bobinado primario no llegan al secundario.

La manera de reducir los flujos indeseables que representan una pérdida de energía es devanar los embobinados lo más adheridos posibles al núcleo y muy juntos entre sí, utilizando devanados concéntricos, doblemente concéntricos y superpuestos.

La pérdida por dispersión es una pérdida por corrientes parásitas que produce el flujo de fuga al penetrar en la superficie de otros componentes conductores, tales como el núcleo, las abrazaderas del núcleo, y el tanque.

Manufactura y Diseño de Transformadores de Potencia.

Pérdidas	Origen	Causa	Naturaleza	Carácter	Localización		
PERDIDAS	EN VACIO	Flujo Magnético	Magnética	Nominales	En las chapas		
				Indeterminadas	En los pasadores y elementos de montaje		
		Común	Corriente de Foucault	Nominales	En las chapas		
				Indeterminadas	En las rebabas, pasadores, etc.		
		Corriente Inductora	Efecto Joule	Nominales	En las Bobinas		
	Flujo de Autoinducción	Efecto Superficial	Adicionales	En las bobinas y partes metálicas por el flujo disperso			
	Flujo Electrostático y Corrientes de Fuga	Histéresis Dieléctrica y Conducción	Empíricas	En los aislantes		En el Aislamiento	
	TOTALES	AUMENTO DEBIDO A LA CARGA	Flujo Magnético	Magnética	Nominales	En las chapas	
					Indeterminadas	En los pasadores y elementos de montaje	
Común			Corriente de Foucault	Nominales	En las chapas		
				Indeterminadas	En las rebabas, pasadores, etc.		
Corriente de Carga			Efecto Joule	Nominales	En las Bobinas		
Flujo de Autoinducción	Efecto Superficial	Adicionales	En las bobinas y partes metálicas por el flujo disperso				

Tabla 1.1 Descripción esquemática de las pérdidas en el transformador

1.7 Conexiones de los transformadores B ϕ .

En los sistemas B ϕ se entiende por conexión la forma de entrelazar entre sí los arrollamientos de las distintas fases. El convenio sobre la utilización de letras para designar abreviadamente las diferentes conexiones, es el siguiente:

Conexión en delta:	D (en el primario)	d (en el secundario).
Conexión en estrella:	Y (en el primario)	y (en el secundario).
Conexión en zig-zag:	Z (en el primario).	Z (en el secundario).

Ejemplos:

Un transformador estrella-delta se designa	Yd.
Un transformador estrella-zigzag se designa	Yz.
Un transformador delta-estrella se designa	Dy.

Las conexiones utilizadas en la práctica están normalizadas en grupos de conexión; estos grupos de conexión caracterizan las conexiones de los arrollamientos (primario y secundario) y el desfase entre las fuerzas electromotrices correspondientes a ambos arrollamientos. Cada grupo se identifica con una cifra o *Índice de conexión* que, multiplicada por 30°, da como resultado el desfase δ en retraso, que existe entre las tensiones del mismo género (simples o compuestas) del secundario respecto al primario del transformador en cuestión.

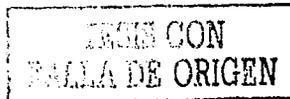
1.7.1 Conexión estrella-estrella (Yy).

La conexión estrella-estrella tiene las siguientes características:

- 1) las tensiones en las fases dependen de las cargas y de las características magnéticas del núcleo. Es posible que una fase tenga nula o escasa tensión y el resto tenga exceso de potencial.
- 2) La tercera armónica no puede existir en forma de intensidad, porque no hay regreso para ella. Solamente se une el neutro del primario con el neutro del generador; pero entonces la tercera armónica del generador puede llegar al transformador en forma de potencial y pasar a la línea, donde se manifiesta como una tensión de triple frecuencia entre los polos y el neutro secundario. Si éste se halla conectado a tierra, el caso se agrava, porque puede ocurrir resonancia en la línea debido a la capacitancia de la tierra.

Estos inconvenientes pueden anularse, conservando íntegramente las propiedades favorables mediante el montaje de un *arrollamiento terciario o devanado terciario* que, tal como se indica en la (fig. 1.9) esta conectado en delta y cerrado en cortocircuito sobre sí mismo.

Para comprender como funciona el devanado terciario en caso de desequilibrio de carga, vamos a suponer (fig. 1.10) el mismo caso expuesto en el párrafo anterior de carga secundaria entre una sola fase y el neutro y cuyo valor es de 100 A. Siguiendo los mismos razonamientos expuestos en el párrafo anterior se puede deducir fácilmente los valores de las corrientes que circulan por los distintos arrollamientos, tal como se expresa en la (fig 1.10).



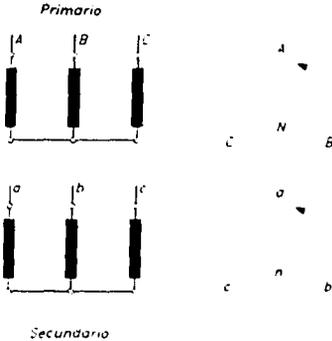


Fig. 1.9 transformador trifásico en conexión Y-Y, y desfase nulo (grupo de conexión Y-y0)

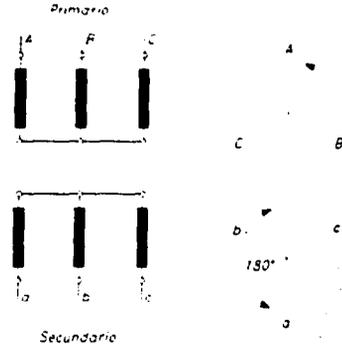


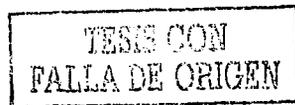
Fig. 1.10 transformador trifásico en conexión Y-Y, y desfase a 180° (grupo de conexión Y-y6)

En este caso, las fuerzas magnetomotrices, primaria y secundaria, debidas a esta sobrecarga, se compensan en cada columna, con lo que desaparecen los flujos adicionales y, con ellos, los inconvenientes que resultaban de las cargas desequilibradas. Su funciona el transformador con carga desequilibrada, lo único que ocurre es que no se utiliza a plena carga. Debe preverse la magnitud de la carga desequilibrada para calcular el devanado terciario ya que, si bien su tensión es diferente, la potencia del devanado terciario es función directa del desequilibrio de cargas. Otra ventaja de este sistema de conexión es que también el devanado terciario puede utilizarse para suministrar otras cargas locales a la tensión más conveniente.

De hecho, así se hace en las centrales, donde los devanados terciarios de los transformadores, alimentan muchas veces los circuitos de control y las instalaciones auxiliares, y en las estaciones transformadoras, donde a veces se emplean para la alimentación de un compensador de fase sincrónico, con objeto de mejorar el factor de potencia de la red.

Ventajas:

- Conexión más económica para pequeñas cargas de alto voltaje.
- Ambos neutros accesibles para aterrizamiento, o para formar un sistema balanceado de 4 hilos.
- La capacitancia entre vueltas es relativamente alta, por lo tanto, la severidad del esfuerzo dieléctrico debido a transitorios de voltaje es atenuada.
- Si una fase resulta fallada, es posible utilizar las dos restantes.
- Bajo condiciones de operación normal, el voltaje máximo a tierra en cada fase es solo $1/\sqrt{3}$ del voltaje de línea, graduándose hasta prácticamente cero en el neutro.



Desventajas.

- Los neutros son inestables a menos que se aterricen solidamente.
- Unidades trifásicas de polaridad opuesta no pueden operar en paralelo.
- La falla de una fase en un sistema trifásico, lo hará inoperable hasta ser reparado.

1.7.2 Conexión delta -delta (D-d).

Esta conexión representada en la (fig. 1.11), se distingue porque los arrollamientos están conectados directamente a dos hilos de la línea en ambos lados, lo cual determina de manera precisa la tensión aplicada y desarrollada en cada arrollamiento. Además, los tres de cada lado forman un circuito cerrado por el cual puede fluir una corriente ficticia que tenga igual sentido en las tres fases al mismo tiempo, como en la tercera armónica. En efecto, si las fundamentales hacen entre sí 120° , las terceras hacen 360° entre sí y quedan en las condiciones indicadas.

Existen cuatro posibilidades de conexión que corresponden a las siguientes condiciones:

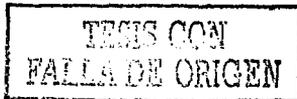
- 1) Las terminales de línea primaria y secundaria pueden ser homólogos o de opuesta polaridad.
- 2) La sucesión de estas terminales en el circuito interno pueden ser la misma para ambos sistemas.

Sin embargo, la condición (1) no tiene sentido práctico ya que, como esta enlazada la salida de un arrollamiento con la entrada de otro, siempre hay directamente conectados dos terminales de distinta polaridad y basta con cambiar la designación de la fase a que se supone pertenece el terminal común, para convertirlo de polaridad positiva a negativa o viceversa.

De esta forma, en la práctica se emplean solamente dos grupos de conexión que corresponden, respectivamente a un desfase nulo (*D-d 0*, fig. 1.12) y a un desfase de 180° (*D-d 6*, fig. 1.13).

Cada arrollamiento debe soportar la tensión total de la línea correspondiente y, si la corriente es reducida, resulta un número muy elevado de espiras, de pequeña sección. Por el contrario, para bajas tensiones y elevadas corrientes de carga, como la corriente por fase es inferior a la corriente de línea, se puede disminuir la sección para la misma densidad de corriente, en la proporción $1/\sqrt{3}$ y el tamaño de los conductores resulta más apropiado.

Como no se dispone de neutro ni en el primario ni en el secundario, no es posible la protección a tierra ni la alimentación de redes de cuatro conductores y estos inconvenientes limitan extraordinariamente su campo de aplicación.



La conexión delta-delta permite la circulación local de los terceros armónicos de intensidad, repartidos entre los arrollamientos primarios y secundarios (armónicos en fase, sobre arrollamientos en serie), sin provocar perturbaciones inductivas a lo largo de las líneas.

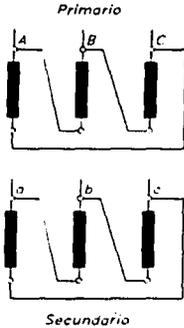


Fig1.12 trafo. En conexión Dd y desfase de 0° (conexión Dd0).

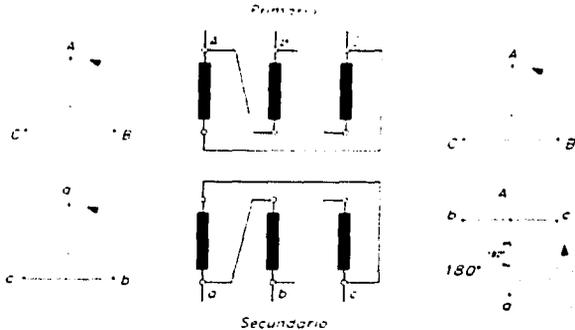


Fig. 1.13 trafo. En conexión Dd y desfase de 180° (conexión Dd6).

Ventajas:

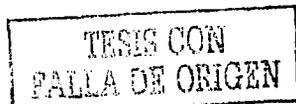
- Con una fase dañada, se puede operar en conexión delta-abierta para suministrar $1/\sqrt{3}$ de la potencia total trifásica.
- Es la conexión más económica para transformadores de alta corriente y bajo voltaje.
- Los voltajes de terceras armónicas, se eliminan por la circulación de corrientes armónicas a través de la delta.

Desventajas:

- No se dispone de puntos neutros, a menos que se utilicen aparatos auxiliares.
- No se puede alimentar un sistema de 4 hilos a menos que se utilicen aparatos auxiliares.
- El número de vueltas y la cantidad de aislamiento por fase es máximo.

La conexión delta-delta se emplea tanto para elevar la tensión como para abatirla; y cuando las condiciones del sistema o las necesidades exigen que el sistema secundario esté puesto a tierra, puede hacerse la conexión de uno de los hilos, o del centro de una de fases (cuando hay doble secundario o derivación central) a tierra.

Por otro lado dicha conexión puede convertirse en delta-abierta (V-V), una de las conexiones irregulares más empleadas; para cuestiones de mantenimiento o reparación.



1.7.3. Conexión delta - estrella (D-y).

Esta disposición (fig. 1.14), se distingue por varios motivos:

- 1) La tensión del lado estrella puede ser de 4 hilos, uno de ellos llamado neutro.
- 2) Las tensiones principales de un circuito y las principales de otro no están en fase aunque lleven esos hilos la misma nomenclatura; A-B no está en fase con a-b, hay 30° de diferencia.
- 3) El circuito del lado estrella comprende 2 fases en serie.
- 4) La tensión secundaria en la línea es 1.73 veces mayor que en las fases.
- 5) La tercera armónica tiene una delta por donde circular localmente y las condiciones a este respecto son las mismas que en la delta-delta. Las tensiones primarias están bien definidas, por conexión directa, y las secundarias por inducción; tanto entre hilos polares y neutro como de polo a polo.

En esta conexión existen dos posibles formas de cerrar la delta del primario y otras dos formas de situar el punto neutro de la estrella secundaria, resultan cuatro posibilidades de montaje, que son las siguientes:

Desfase de 30° (Dy1).

Desfase de -30° (Dy11).

Desfase de 150° (Dy5).

Desfase de -150° (Dy7).

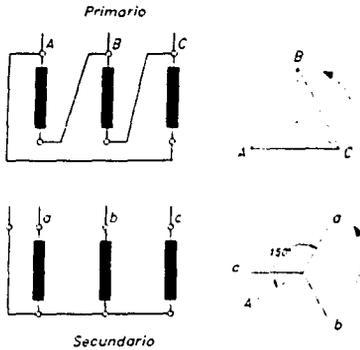
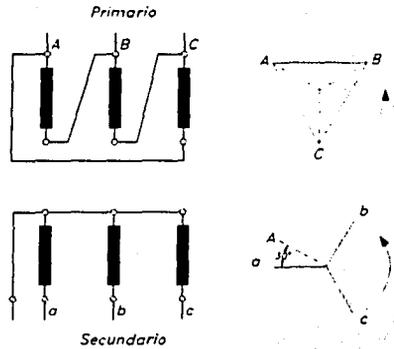


Fig.(1.14) conexión delta-estrella y Desfase de 150° (grupo Dy5)



Fig(1.15) conexión delta-estrella y desfase de -30° (grupo Dy11)

De estos grupos de conexión, en la práctica se utilizan el $Dy1$ (fig. 1.14) y el $Dy11$ (fig. 1.15). Es fácil comprobar que los cambios cíclicos de conexiones no producen nuevos tipos de desfases. En cambio, si en lugar de alimentar el transformador por un sistema directo de fuerzas electromotrices A B C, se alimenta por un sistema inverso A C B, el desfase cambia de signo. El desfase (positivo o negativo) entre las fuerzas electromotrices primarias y secundarias, puede reducirse siempre a 30° , sin necesidad de modificar las conexiones internas del transformador; pero no obtenerse ni la coincidencia ni la oposición de fases entre unas y otras.

En todos los grupos de conexión delta-estrella, la relación de transformación (es decir, la relación en vacío entre dos tensiones simples o compuestas) es la siguiente:

$$r = n1/\sqrt{3}n2.$$

Este sistema de conexión es el más utilizado en los transformadores elevadores y se emplea profundamente, en plantas generadoras para elevar la tensión a centenares de Kilovolts y en sistemas de distribución primaria y secundaria para alimentar los circuitos de 4 hilos.

Ventajas:

- Voltajes de terceras armónicas se eliminan por la circulación de corriente armónica en la delta del primario.
- El neutro del secundario puede ser aterrizado o aislado para alimentar un sistema de 4 hilos.
- Es posible alimentar un sistema desbalanceado de 4 hilos y los desbalances en voltaje son relativamente pequeños, siendo proporcional sólo a la impedancia interna de los devanados.

Desventajas:

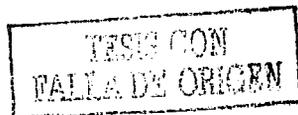
- la falla de una fase saca de servicio al transformador.

Entre las aplicaciones más importantes en esta conexión, es que es comúnmente usada para transformadores reductores para alimentar sistemas de 4 hilos; (s también usada en transformadores elevadores.

Al aterrizar el neutro del secundario, esta conexión proporciona aislamiento para la corriente de secuencia cero, lo cual permite controlar el circuito de secuencia cero desde el secundario, siendo totalmente independiente del primario.

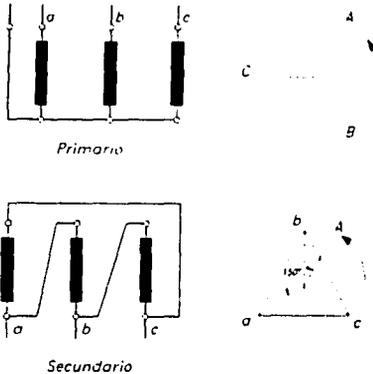
1.7.4 Conexión estrella-delta (Yd).

Las propiedades de esta conexión son casi las mismas que las del caso anterior ya que la diferencia principal consiste en que la transferencia de energía se hace en sentido contrario, es decir, la estrella está del lado primario y la delta está en el lado secundario. De aquí se deduce que las tensiones primarias no están definidas directamente por conexión a los hilos, sino por reacción secundaria, y que es posible que existan diferencias apreciables entre aquellas cuando la impedancia de los arrollamientos dificulte en cierto grado el paso de corrientes niveladoras de flujo en los brazos que forman la delta.



Existen también cuatro posibilidades de conexión, de las cuales, dos afectan a la polaridad de las terminales, las otras dos a la interconexión de los arrollamientos; los grupos de conexión posibles son:

Desfase de 30° (Yd1).
Desfase de 150° (Yd5).



Desfase de -30° (Yd11).
Desfase de -150° (Yd7).

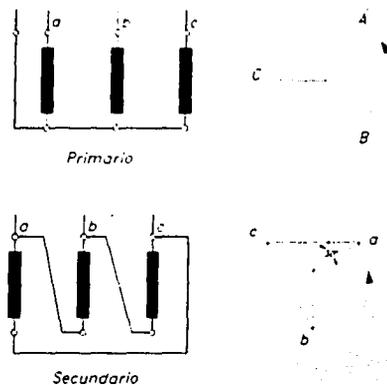


Fig.(1.16) conexión estrella-delta y Desfase de 150° (grupo Yd5)

Fig(1.17) conexión estrella-delta y desfase de -30° (grupo Yd11)

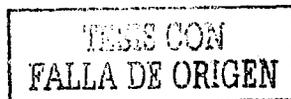
De estos grupos de conexión, el más utilizado en la práctica es el Yd1 (fig. 1.16), aunque algunas veces se emplea también el designado por Yd11 (fig. 1.17). También en este caso, cualquiera que sea la forma en que estén conectados entre sí los arrollamientos primario y secundario, es siempre posible obtener un desfase único de 30° entre las fuerzas electromotrices primaria y secundaria de la línea, sin variar las conexiones internas del transformador. Con este sistema no es posible obtener ni la coincidencia ni la oposición de fases. El empleo más frecuente y eficaz de este tipo de conexión es en transformadores reductores para centrales, estaciones transformadoras y finales de línea, conectando en estrella el lado de alta tensión y en delta el lado de baja tensión.

Ventajas:

- La presencia de la delta en el secundario elimina los terceros armónicos del flujo.
- El neutro del primario se mantiene estable por la delta del secundario, y por lo tanto puede ser aterrizado.
- Es la conexión más deseable para grandes transformadores reductores.

Desventajas:

- No se dispone de neutro en el secundario, a menos que se utilice un aparato auxiliar.
- La falla de una fase saca de servicio al transformador.



1.8 Medio refrigerante.

En los transformadores pequeños la superficie es relativamente grande frente al volumen. La refrigeración por radiación y por convección natural suele ser suficiente para mantener la temperatura de funcionamiento por debajo del máximo que puede soportar el aislamiento sin reducir seriamente su duración. Sin embargo al aumentar el tamaño de un objeto; el volumen crece con el cubo de sus dimensiones lineales, mientras que el área de éste lo hace con el cuadrado.

Con esto se ve que al aumentar el tamaño del área o hay que proveer medios artificiales para facilitar la refrigeración, esto se logra dotando de conductos de ventilación a los devanados, aumentando las dimensiones de radiación del tanque y adicionando elementos que ayuden a una rápida disipación del calor que se genera en la unidad. Los refrigerantes más empleados son: el aire, el aceite dieléctrico, líquidos dieléctricos altamente inflamables y el agua.

1.8.1 El aire:

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

1.8.2 Aceite dieléctrico:

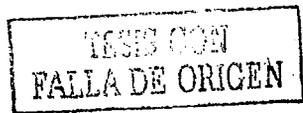
La experiencia ha demostrado que uno de los mejores medios de refrigeración es el aceite dieléctrico, ya que el tiempo que facilita la extracción del calor del núcleo y del devanado, proporciona cualidades aislantes apreciables. El aceite debe tener gran rigidez dieléctrica, poca viscosidad, punto de congelación bajo y punto de ignición elevado, debiendo estar exento de ácidos corrosivos, álcalis y azúfres.

1.8.3 Líquidos dieléctricos:

Cuando las necesidades de refrigeración son elevadas y se desea evitar el peligro de incendio por causa del medio refrigerante del transformador, se usan compuestos químicos conocidos comercialmente como *pyranol*, *inertor* o *chlorextol*. Estos compuestos no son volátiles, ni combustibles, ni explosivos y son suficientemente fluidos para circular libremente en los devanados. Tienen gran rigidez dieléctrica sirviendo por ello al mismo tiempo de aislante y refrigerante.

1.8.4 El agua:

El agua tiene utilidad como medio refrigerante cuando se coloca en serpentines llenos de este líquido, estos van alrededor del transformador o de sus radiadores, para ayudar a disipar el calor que generan cuando se encuentran funcionando con carga. El agua se hace circular por medio de una pequeña bomba.



1.9 Tipos de sistema de enfriamiento.

Las pérdidas de carga y las de sin carga en transformadores de potencia generan calor. La función de los sistemas de enfriamiento es la de disipar este calor (pérdidas) y mantener la elevación de la temperatura promedio de las bobinas así como la elevación de la temperatura superior del aceite del transformador en un valor menor a 55°C o 65°C (según lo requiera el cliente) sobre la temperatura ambiente del medio refrigerante. Con estas elevaciones de temperatura generalmente es aceptado que la vida de los aislamientos en el transformador sea "Normal", si es que no existen sobrecargas significantes en la unidad durante su vida.

En transformadores de potencia, casi todo el calor es generado por el núcleo y las bobinas, este calor es transmitido al medio refrigerante (generalmente aire o agua) a través del aceite interno del tanque a los intercambiadores de calor montados exteriormente.

Se puede considerar como regla general que el uso de aire como medio refrigerante es común donde la temperatura ambiente del aire es "Baja" (menos de 40°C) y donde el aire no es excesivamente corrosivo.

Se usa agua como medio refrigerante cuando no hay problemas para alimentar agua, cuando la temperatura ambiente no baja de 0° C, también se recomienda su uso donde la circulación del aire es restringida como en el caso de los transformadores para horno o donde el aire es altamente corrosivo.

De acuerdo al medio refrigerante existen los siguientes tipos:

1.9.1 Tipo OA.

Es un transformador sumergido en aceite con enfriamiento natural. Este es el enfriamiento más común frecuentemente es el que resulta 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 provisto de enfriadores tubulares o de radiadores separables.

El tanque del transformador es por sí solo el más eficiente enfriador tipo OA. El tanque disipa calor por convección natural y por radiación, desafortunadamente el tanque no tiene el área suficiente para disipar todas las pérdidas para unidades mayores de 150 KVA. Para transformadores de potencia grandes es necesario aumentar la superficie de radiación por lo que se requiere colocar radiadores los cuales pueden estar montados directamente al tanque o en forma de bancos separados cuando no es posible colocarlos directamente al tanque.

El aspecto importante de construcción de estos sistemas es el de obtener la suficiente circulación de aceite por los radiadores disipando así el calor generado en la parte interno del transformador, disminuyendo puntos calientes y aumentar la vida de los aislamientos



1.9.2 Tipo OA/FA.

Sumergido en aceite con enfriamiento a base de aire forzado. Esta unidad es básicamente del tipo OA a la cual se le agregan ventiladores para aumentar la disipación del calor en las superficies de enfriamiento, y por lo tanto, aumentar los KVA de salida del transformador. El empleo de este sistema de enfriamiento está indicada cuando la unidad debe de soportar sobrecarga durante periodos cortos, pero cuya ocurrencia se espera con ciertas frecuencias dentro de las condiciones normales de trabajo y que deben ser tolerados sin afectar el funcionamiento normal del transformador.

Es muy poco común tener transformadores mayores de 20 MVA enfriados únicamente por el sistema OA. En unidades mayores generalmente son usados moto-ventiladores con lo que se incrementa la eficiencia del enfriamiento hasta 4 veces, esto requiere menos radiadores, lo cual hace más compacta la unidad. Las desventajas mayores al usar ventiladores son:

- a) Un incremento en el nivel de ruido.
- b) Agregar dispositivos de control y protecciones eléctricas.
- c) Aumentar el mantenimiento.
- d) La necesidad de alimentaciones auxiliares de energía.

Es muy común en Norteamérica (incluyendo México) el uso de pequeños ventiladores de alta velocidad generalmente entre 600 mm y 750 mm de diámetro trabajando a una velocidad de hasta 1725 revoluciones por minuto. La práctica Europea es usar mucho menos ventiladores más grandes en diámetro 1200 mm y a menor velocidad hasta 850 revoluciones por minuto. Rara vez hay gran diferencia en nivel de ruido o eficiencia de enfriamiento por lo que la selección final está basada en la disponibilidad.

1.9.3 Tipo OA/FA/FOA.

Transformador sumergido en aceite con enfriamiento propio, con enfriamiento a base de aceite forzado. El régimen del transformador tipo OA sumergido en aceite puede ser aumentado por ejemplo combinado de bombas y ventiladores. En la construcción se usan los radiadores desprendibles normales, con la adición de ventiladores montados sobre dichos radiadores o bombas conectadas a los cabezales de los mismos.

El aumento de la capacidad se hace en dos pasos:

- 1) Se usan la mitad de los radiadores y la mitad de bombas, para lograr el aumento de 1.33 veces la capacidad sobre el diseño OA.
- 2) Se usan la totalidad de los ventiladores y las bombas, con lo que se consigue un aumento de 1.667 veces el régimen OA.

En arranque y parada de los ventiladores y bombas son controladas por la temperatura del aceite, por medio de controles automáticos que seleccionan la secuencia de operación al aumentar la carga del transformador.

1.9.4 Tipo FOA.

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

Para transformadores de grandes pérdidas es con frecuencia necesario mejorar la eficiencia del enfriamiento más allá que el sistema FA. Esto se puede lograr en dos formas:

- a) Agregando bombas al sistema FA ya descrito.
 - b) Mediante el uso de intercambiadores de calor FOA "compactos".
- a) Para el caso de agregar bombas el arreglo de enfriamiento radiador ventilador, la mejora principal en la eficiencia del enfriamiento no es por la relación de un mayor flujo de aceite a través de los radiadores, pero si por una mayor relación de flujo a través de los devanados así que invariablemente debemos bombear directamente el aceite al devanado. Esto incrementa la relación de flujo dentro de los devanados y reduce la diferencia de temperatura entre el conductor y el aceite, y de esta manera nos permite operar el aceite a una temperatura más elevada y mayor que la ambiental; sin exceder la elevación de la temperatura garantizada del devanado. El resultado es que necesitamos usar pocos radiadores y ventiladores cuando las bombas están en uso. El beneficio de usar bombas con radiadores y ventiladores es que todavía hay un rango alto OA cuando ventiladores y bombas no están operando.
- b) Los enfriadores FOA "Compactos" son usados cuando no se requieren un rango OA o FA sustancial. Este tipo de enfriador usa tubos de aleta (con frecuencia de aluminio), y ventiladores de un alto volumen de aire en el lado del aire; el aceite es bombeado a través de los tubos de aleta mediante bombas de alto volumen. Con frecuencia el interior de los tubos está provisto de "Provocadores de turbulencias" para el aceite, de esta manera se mejora la eficiencia del enfriador.

1.9.5 Tipo OW.

Sumergidos en aceite, con enfriamiento por agua. Este tipo de transformador esta equipado con un cambiador de calor tubular colocado fuera del tanque. El principio de este tipo de enfriamiento es que la circulación se realiza mediante el bombeo de agua fría a través del interior de los tubos mientras que pasa el aceite caliente haciendo contacto con el exterior de los tubos.

Una fuga de agua del enfriador al transformador podría provocar un desastre, por esta razón los tubos están doblemente reforzados. La entrada y salida del agua está arreglada de tal manera que cualquier fuga de agua en el espacio entre las dos paredes de los tubos sea visible y detectada inmediatamente.

El material del tubo de entrada de agua está seleccionado desde el punto de vista de sus propiedades químicas del agua para evitar problemas de corrosión. El uso de este tipo de enfriador no es muy común porque es más económico el uso del tipo de enfriador FOW (OFWF).

1.9.6 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. La única diferencia entre este tipo de enfriamiento y el OW es que, el aceite es impulsado por bombas potentes a través del enfriador. Esto hace al enfriador más eficiente y más compacto. Por lo tanto, no se tiene que depender de la circulación natural del aceite. El enfriador puede estar montado en cualquier posición horizontal o vertical, a nivel del suelo o cualquier otro nivel.

Estos enfriadores son siempre usados en transformadores tipo horno donde el espacio está limitado y la circulación del aire está limitada. Otra aplicación usual de estos tipos de enfriadores es en los transformadores que operan en las centrales hidroeléctricas de potencia donde hay un abastecimiento confiable de agua fría no corrosiva.

Uno de los problemas con los enfriadores OW y FOW es que se necesita limpiar los tubos periódicamente para evitar depósitos de lodo o calcio, ya que esto reduce la eficiencia del enfriador con el tiempo. El fabricante del enfriador siempre da un "factor de suciedad" en el diseño; esto significa que una cierta acumulación de depósitos es permitida antes que se requiera la limpieza. También, el fabricante del transformador siempre permite un buen acceso a los cabezales de los tubos para facilitar, el uso de varilla para la limpieza.

CAPITULO 2

CIRCUITO MAGNETICO DEL TRANSFORMADOR

2.0 Introducción.

El transformador comprende, esencialmente, un circuito magnético sobre el que están montados arrollamientos de cobre o de aluminio, generalmente separados entre sí. A pesar de esta simplicidad, se han ideado muchas variantes constructivas para los transformadores en vistas al ahorro de material magnético o de arrollamientos, a la facilidad de transporte, al menor dimensionado, a su funcionamiento en condiciones anormales de servicio, etc.

El estudio de todas estas variantes constructivas resultaría farragoso ya que la mayoría de ellas no tienen, actualmente, aplicación práctica y otras variantes están todavía en período experimental y no puede decirse, de forma definitiva, si su funcionamiento será satisfactorio.

Por todas estas razones, en el presente capítulo solamente se estudiarán las variantes constructivas y los elementos estructurales de los transformadores generalmente empleados en el transporte y distribución de la energía eléctrica. En algunos casos, se describirán también algunos tipos de transformadores generalmente empleados en el transporte y distribución de la energía eléctrica. Se describirán también algunos tipos de transformadores especiales que, por su diseño o por las características de funcionamiento resultan de interés para los profesionales de la electricidad.

Se puede decir que, en actualidad, la mayoría los transformadores construidos, se pueden agrupar en dos sistemas constructivos:

- 1 Transformadores acorazados, con arrollamiento alternados; también llamado tipo "Shell" y es aquel en el cual el núcleo se encuentra cubriendo los devanados de baja y alta tensión.
- 2 Transformadores no acorazados con arrollamientos concéntricos; también conocido como tipo columna o "Core" y es aquel en el cual las bobinas abarcan una parte considerable del circuito magnético.

Se usa básicamente como circuito magnético el hierro, esto con el fin de reducir la reluctancia del circuito del flujo, de manera que para inducir éste se requiera tan poca corriente como sea posible. Por otra parte los núcleos no pueden hacerse de una sola pieza sólida de hierro, porque éste actuaría como si fuera una vuelta en corto circuito, permitiendo en el núcleo una corriente circulante y causando así una pérdida muy alta. Por lo tanto los núcleos deben estar hechos de laminaciones o sus equivalentes para reducir esta pérdida.

2.1 Definición de Núcleo.

El circuito magnético es la parte componente del transformador que tiene como función principal conducir el flujo magnético acoplado así magnéticamente los circuitos eléctricos del transformador. El circuito magnético se conoce comúnmente como núcleo.

Según el tipo de núcleo los transformadores se clasifican en:

- 1) *transformadores de columnas*, en los cuales los devanados envuelven las columnas del núcleo. Se conoce también como tipo "Core". En esta construcción, el núcleo proporciona un solo circuito magnético formado por un yugo inferior, un yugo superior y 2 ó 3 columnas verticales o piernas para 1 ó 3 fases respectivamente. Los devanados son ensamblados concéntricamente en cada una de las piernas del núcleo, de esta manera, el circuito eléctrico rodea o envuelve al circuito magnético.
- 2) *transformadores acorazados*, en los cuales los devanados están envueltos parcialmente por el núcleo. En esta construcción conocida también como tipo "shell" los devanados forman un anillo y el núcleo se ensambla envolviendo a cada pierna de los devanados, formando así 2 ó más circuitos magnéticos rodeando al circuito eléctrico.

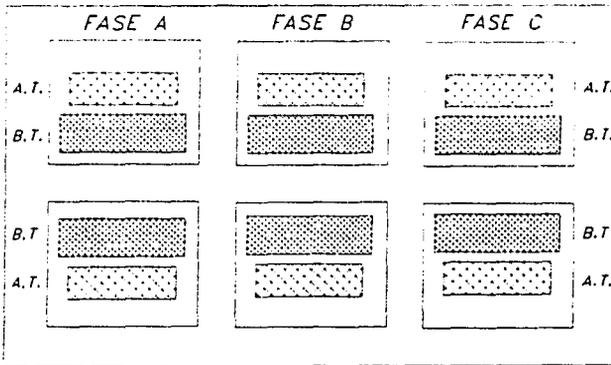


Fig 2.2 Disposición esquemática de un transformador trifásico Tipo acorazado (visto de frente)

DISEÑO TIPO COLUMNAS.	DISEÑO TIPO ACORAZADO.
1.-Menor volts/vuelta.	Mayor volts/vuelta.
2.-Mayor número de vueltas	Menor número de vueltas
3.- las bobinas están más cerca del la pared del tanque, por lo cual se requiere una distancia muy grande entre bobinas y tanque.	El núcleo está más cerca de la pared del tanque, por lo cual se requiere una distancia muy pequeña entre núcleo y tanque.
4.- La disposición de los cambiadores de derivaciones en las tres fases se montan a un lado de las bobinas, por consiguiente, las guías de los "taps" son relativamente cortas	La disposición de los cambiadores de derivaciones en las tres fases se encuentran en la parte superior de las fases lo cual implica guías de "taps" largas.
5.- Cuando de extrae del tanque la unidad, las bobinas son visibles para su inspección.	Cuando se desmonta la unidad solo la parte superior de las bobinas puede inspeccionarse.
6.- El número de grupos alta-baja (espacios H-L) está limitado.	Diseño bastante flexible para formar varios grupos alta-baja.
7.- Las bobinas de alta tensión se devanan continuamente lo cual minimiza las soldaduras para conectar bobina a bobina.	Cada bobina se devana separadamente por lo cual se requieren más soldaduras entre bobinas.
8.- Solo una pequeña parte del núcleo soporta el ensamble de las bobinas.	Una gran parte de la bobinas es soportada por la estructura aislante y el núcleo.
9.- Se requiere de ductos especiales y barreras para dirigir el flujo de aceite y asegurar un buen enfriamiento.	Las bobinas están dispuestas verticalmente lo cual permite un eficiente flujo de aceite en ambas caras de las mismas.

Tabla 2.1 Comparación técnica entre un transformador tipo columnas y otro tipo acorazado.

En los transformadores de columnas, el circuito magnético está constituido, como ya se mencionó anteriormente, por 2 o 4 columnas verticales para los transformadores monofásicos, y 3 o 5 columnas (fig. 2.2), también verticales, para los transformadores trifásicos, reunidas entre sí por culatas o yugos horizontales, para permitir que se cierre el flujo magnético.

Para que este flujo atraviese la mayor sección de hierro posible, la sección de columnas debe acercarse al máximo a la sección circular, para lo que se reúnen paquetes de chapas de diferentes anchos, entre los que se practican canales para la refrigeración del circuito magnético.

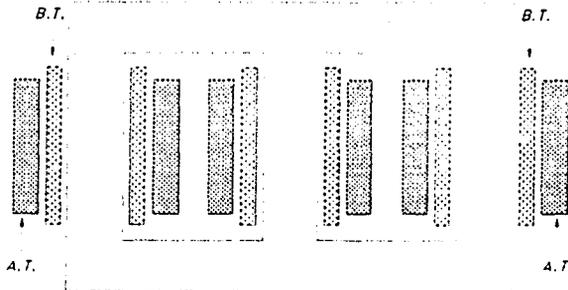
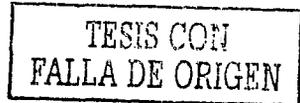


Fig 2.2 Disposición esquemática de un transformador trifásico
Tipo columnas (visto de frente)

Hasta ahora, los transformadores acorazados se habían utilizado casi exclusivamente para pequeños transformadores monofásicos y en algunas aplicaciones especiales. Pero, desde hace algún tiempo, los transformadores trifásicos de muy elevada potencia se realizan también con este sistema constructivo, que parece tener bastante aceptación en el empleo futuro de transformadores para transporte y distribución de energía eléctrica.

En este sistema constructivo, los núcleos del circuito magnético, de sección rectangular, se disponen horizontalmente. Los arrollamientos son alternados, es decir, que están subdivididos en elementos o grupos de bobinas de alta y de baja tensión que se dispone alternadamente sobre toda la longitud del núcleo (figura 2.1). Las bobinas, de forma rectangular, se arrollan separadamente sobre el núcleo y después se conectan eléctricamente, en el momento del montaje del aparato.

El número de bobinas elementales varía con la potencia del transformador: a tensión constante, cuanto más aumenta la potencia, mayor es el número de bobinas elementales, aunque este número es siempre par.



El interés de esta subdivisión está en que algunas características del transformador, especialmente los esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito, no dependen de la potencia global del transformador, sino de la de un transformador elemental: por lo tanto, subdividiendo un transformador en varios transformadores elementales (varios arrollamientos separados) los esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito pueden reducirse considerablemente.

2.2 Elemento constructivo del circuito magnético.

2.2.1 Material de laminación

El material empleado más comúnmente en la fabricación de núcleos de transformadores se conoce como "lámina de acero eléctrico". Esta lámina consiste fundamentalmente de una aleación de hierro-silicio de bajo contenido de carbón y es obtenida a través de un proceso de rolado en frío; actualmente se utilizan dos clases principales de acero para los transformadores: *el acero laminado en caliente y el acero laminado en frío*. El segundo, en comparación con el primero, tiene en la dirección del laminado mejores características magnéticas, pero requiere métodos especiales para el montaje del núcleo.

Adicionalmente, todas las laminas van aisladas en ambas caras de un aislante inorgánico llamado "carlite" que consiste de una capa especial aislante aplicada en el proceso de planchado-recocido final producida en el recocido.

En algunas otras ocasiones se utiliza también papel de 0.03 mm de espesor, esto con el hecho de reducir las pérdidas por corrientes parásitas. El aislamiento de papel es mucho más barato que el barniz pero tiene menor conductibilidad térmica y menores resistencia al calor y mecánica. Además el aislamiento de papel proporciona un mayor porcentaje de relleno del área de la sección transversal del núcleo con aislamiento. Basándose en eso, para los transformadores de gran potencia donde dichos inconvenientes tienen una importancia esencial, se prefiere el aislamiento de barniz.

El circuito magnético del transformador está pues, constituido por chapas magnéticas de 0,35 mm de grueso. Antes se utilizaban planchas aleadas, con gran contenido de silicio, cuya cifra de pérdidas era de 1 a 1,5 w/kg. En la actualidad se utilizan casi exclusivamente las chapas magnéticas de grano orientado, cuya cifra de pérdidas es solamente de 0,4 a 0,6 w/kg en el sentido más apropiado, que es el de la magnetización en el mismo sentido que la laminación, y cuya curva de magnetismo es casi rectangular.

Ha sido necesario un tremendo volumen de investigación para producir la lámina de acero eléctrico altamente desarrollada, que es el fundamento de la artesanía de los transformadores. Las cualidades magnéticas de la lámina de aleación de hierro-silicio depende de todos los pasos en la historia de su formulación y fabricación, desde los procesos de fundación y aleación hasta su montaje final en el transformador, a continuación se mencionan algunas características esenciales del proceso de laminación:

1. La mayor parte del material de laminación, es una aleación de aproximadamente el 3% de silice y 97% de hierro, el contenido de silice reduce la resistencia viscosa a la magnetización o histéresis, y evita que la pérdida aumente con el tiempo.
2. La mayor parte del material de laminación es laminado en frío y especialmente recocido para "orientar" los "granos" o cristales de hierro, a fin de que obtengan permeabilidad muy alta y baja histéresis al flujo, en el sentido del laminado.
3. La mayor parte del material de laminación es tratada en alguna de varias formas, para desarrollar una capa química, que aisle unas de otras laminaciones.

Se tienen básicamente cuatro tipos de lámina de grano orientado, cuyas características se encuentran mencionadas en la tabla N. 1

			60 Hz				50 Hz			
	ESPESOR		WATTS POR Lb		WATTS POR Kg.		WATTS POR Lb		WATTS POR Kg.	
	Pulsos	mm.	15 Kgauss	17 Kgauss	15 Kgauss	17 Kgauss	15 Kgauss	17 Kgauss	15 Kgauss	17 Kgauss
M-2	0.007	0.18	0.42		0.93		0.32		0.7	
M-3	0.009	0.23	0.46		1.01		0.35		0.77	
M-4	0.011	0.28	0.51	0.74	1.12	1.63	0.39	0.56	0.85	1.24
M-6	0.014	0.35	0.66	0.94	1.46	2.07	0.5	0.71	1.11	1.57

Tabla 2.2 pérdidas en acero al silicio a 50 y 60 Hz.

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

Pérdidas a 50 Hz. = 0.76 X pérdida a 60 Hz.

El tipo de lámina más usual en la fabricación de núcleos para transformadores es la **M-4** cuyas curvas características de Watts por libra, o watts por kilogramo contra la densidad de flujo o inducción a 50 y 60 Hz, se presenta también en la *tabla 1.1*

El tipo de lamina **M-4** posee unas propiedades magnéticas excelentes, que aunado a un diseño optimizado y apoyado por la más alta tecnología en el corte transversal de la lámina utilizando una máquina computarizada del tipo hidráulico-neumático, nos permite elaborar cortes casi perfectos sin forzar la constitución molecular de la lámina y lograr un *núcleo de tipo columna* con las pérdidas y las corrientes de excitación más bajas.

Dicha máquina realiza cortes con una precisión de ± 0.001 mm. A una velocidad de 250 m/min.

2.2.2 Troquelados y ensamble del núcleo.

La unión de los núcleos desde el punto de vista de ensamble en las laminaciones puede efectuarse por dos procedimientos las llamadas construcciones por *junta lisa* (fig 2.3) y por *junta ensamblada o entre-laminación* (fig. 2.4). En la construcción por *junta lisa* las columnas y las culatas se arman separadamente y luego se unen con ayuda de piezas de sujeción. Esta construcción del núcleo facilita el montaje del devanado en las columnas ya que para ello sólo hay que retirar la culata superior

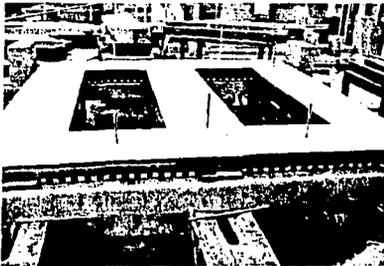


(Fig. 2.3) Junta lisa para unión de yugos y columnas.

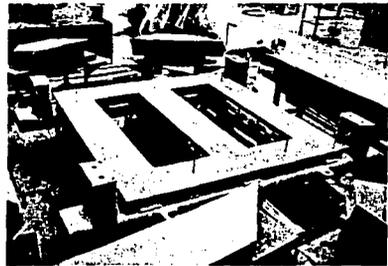


(Fig. 2.4) Junta por entre laminación para la unión de yugos y columnas.

Durante el montaje por *entre-laminación* todo el núcleo se arma de una tirada (fig. 2.5 y 2.6) por eso al colocar el devanado en la columna hay que deslaminar la culata superior, y después del alojamiento del devanado, laminarla de nuevo. Así pues, el segundo procedimiento es más complicado que el primero, pero en cambio tiene una serie de valiosas ventajas, a saber:

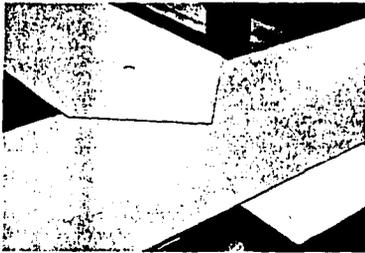


(Fig. 2.5) Ensamble del núcleo en Grupos de 2 corte George.

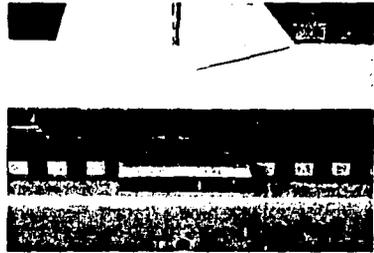


(Fig. 2.6) Ensamble de núcleo en grupos de 5 corte Czajla

- 1) Durante el montaje por entre-laminación el juego de dilatación en la junta de las chapas de las columnas y la culata se puede hacer lo mas mínimo, ya que el lugar de unión en una capa se recubre por la chapa de otra capa. Por el contrario, durante el montaje a tope hay que colocar entre la columna y la culata una junta aislante de 0,5-1 mm de espesor para evitar la formación de corrientes parasitas en lugar de empalme y el aumento de las pérdidas adicionales relacionadas con ellas e incluso "fuego en el acero" a causa de elevación excesiva de la temperatura del acero en el lugar de empalme. La falta de junta en la construcción laminar permite disminuir considerablemente la corriente de marcha en vacío.



(Fig. 2.7) Arreglo de laminación superpuesta generalmente usada para reducir la reluctancia en las juntas.

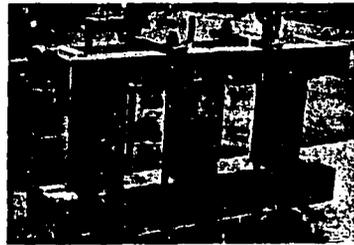


(Fig. 2.8) Núcleo con laminaciones en paquetes de 5 laminas en forma circular.

- 2) En el montaje por entre-laminación (fig.2.9) aumenta noblemente la estabilidad mecánica del núcleo mientras que la construcción por junta lisa o a tope (fig.2.10) se requiere relativamente de potentes piezas de sujeción para la conjugación adecuada de las columnas y las culatas. De hecho el peso de las piezas de sujeción en el montaje por entre-laminación es considerablemente menor que en el montaje por junta lisa o a tope.



(Fig. 2.9) Núcleo de sec. escalonada con sujeción de zinchos y trantes de placa.



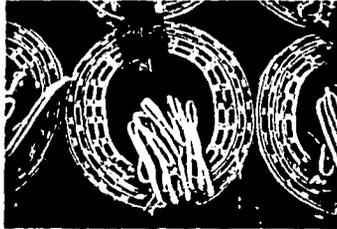
(Fig. 2.10) Núcleo con sujeción birlo pasante y trante de esparrago.

En lo que se refiere a la sección del núcleo, en la practica se emplean dos procedimientos:

- a) sección cuadrada (fig.2.11) o rectangular (fig.2.12) empleada, sobre todo para pequeños transformadores: en este caso, las bobinas tienen la misma forma que la sección de los núcleos, tal como puede apreciarse en ambas figuras donde se han representado también la forma del correspondiente arrollamiento



(Fig. 2.11) Núcleo de sección escalonada con forma helicoidal



(Fig. 2.12) Bobinas helicoidales de forma semicircular

- b) sección aproximadamente circular, ya que una sección circular perfecta no resulta económica por que habría que cortar gran cantidad de chapas de diferentes tamaños. Lo que hace, cortar las chapas en dos o más tamaños escalonados, de forma que la sección resultante quede inscrita en una circunferencia; de esta manera se aprovecha mejor la chapa magnética y, a la vez aumentan la superficie de ventilación de los núcleos.



(Fig. 2.13) Núcleo de sección escalonada con subdivisión en los paquetes de las chapas mediante aislamiento.

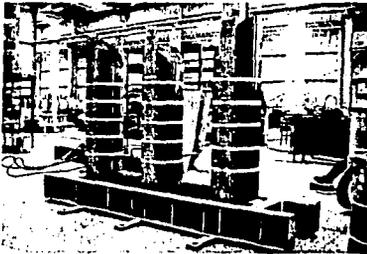


(Fig. 2.14) Núcleo de sección escalonada con forma circular.

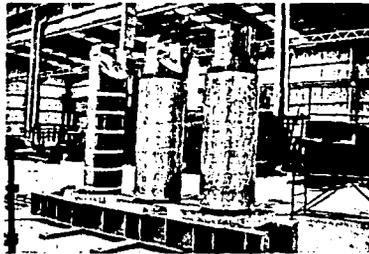
Este es el procedimiento más empleado en el caso de transformadores de mediana y gran potencia; véase en la (fig. 2.14) algunas secciones de núcleos utilizadas en la práctica. Las bobinas, en este caso, son también circulares, para adaptarse a la forma de los núcleos. En los transformadores de gran potencia se consigue una más enérgica ventilación, subdividiendo los paquetes de chapas mediante separadores de aislamiento constituyendo así canales de ventilación (fig. 2.13) otras veces se practican esos canales directamente, disponiendo de forma adecuada las chapas en sentido transversal, ya que el calor se transmite mejor a lo largo del hierro que a través de las planchas aisladas.

Las culatas cuya forma no afecta a los arrollamientos, se hacen casi siempre de sección cuadrada o rectangular y algunas veces de sección escalonada aunque casi siempre es más sencilla que la sección de los núcleos correspondientes. La formación del circuito magnético debe hacerse de tal manera, que permita la colocación de las bobinas que construyen los arrollamientos y después cerrarlo en la debida forma.

En transformadores de gran potencia, los núcleos están dispuestos por columnas y yugos que están ensamblados por medio de entre-laminaciones de modo que el yugo superior puede ser desmontado separando las chapas en grupos pequeños hasta quitar por completo el yugo principal o superior dando lugar así al ensamble de los arrollamientos sobre las columnas del núcleo; una vez introducidas las bobinas o arrollamientos se cierra nuevamente el circuito magnético montando el yugo superior laminando nuevamente en grupos pequeños ensamblando las columnas del núcleo.



(Fig. 2.16) Núcleo de sección escalonada con yugo desmontado

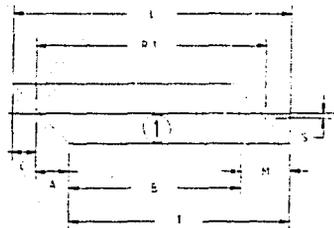
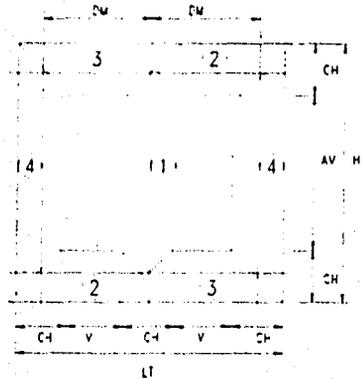
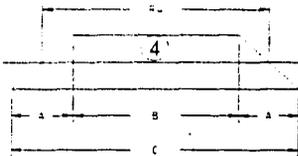
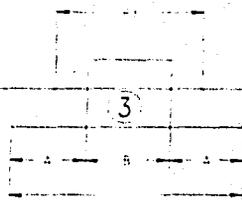
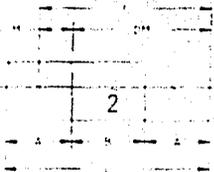


(Fig. 2.17) Núcleo de sección escalonada con bobinas ensambladas.

2.2.3. Construcción y forma típica del núcleo.

La construcción del núcleo esta representada básicamente por un conjunto de cortes de lamina a 45°, esto con el fin de realizar un ensamble por "entre-laminación" como ya se menciono anteriormente; donde la unión de dichas láminas son un ensamble casi exacto. La unión de los cortes de lámina a 45°, están hechos en base al efecto de reducir las perdidas por corrientes de Eddy, evitando así en lo más mínimo el cambio de dirección del flujo magnético, ayudando de alguna manera a suavizar el camino que deberá seguir el flujo en el contorno del núcleo.

Como podemos observar es la siguiente figura el núcleo en sí cuenta con 4 piezas de ensamble, todas ellas con cortes a 45°, cabe señalar que este tipo de ensamble se realiza en paquetes de 2 superpuesta alternadamente para reducir la reluctancia en las juntas o uniones de las láminas.



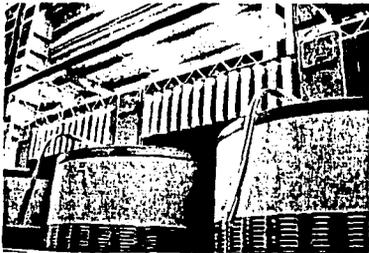
* Conjunto de cortes populares de disposición de núcleos contruïdos por laminaciones con cortes de 45° en las esquinas, adecuadas para hierro orientado al grano.

-Cortes 1 y 4 corresponden a las piernas laterales y central del núcleo.

-Cortes 2 y 3 corresponden a los yugos inferiores y superiores del núcleo.

La figura principal (esquina superior derecha) muestra el ensamble general del núcleo con la unión de las 4 piezas descritas alrededor de él. Las variables señaladas corresponden a los datos esenciales por diseño que posterior se analizarán a detalle.

La construcción del circuito magnético debe realizarse de tal forma que, después de la colocación de las bobinas y las terminaciones de las conexiones, todas las chapas, tanto de las columnas como de las culatas, constituyen un conjunto rígido. Esto es necesario por dos razones: en primer lugar, para resistir las fuerzas electrodinámicas provocadas por las corrientes de corto circuito y, en segundo lugar, para evitar las vibraciones mecánicas producidas por las pulsaciones del flujo magnético que, a la larga son perjudiciales para la construcción mecánica del transformador, además de que el ruido producido por dichas vibraciones pueden resultar molesto a las personas. Por consiguiente, deben preverse los adecuados dispositivos de fijación de las chapas que constituyen el circuito magnético y de los núcleos y culatas entre sí.



(Fig. 2.20) Vista frontal del ensamblaje núcleo bobinas.



(Fig. 2.21) Vista lateral del ensamblaje Núcleo bobinas

En los transformadores de pequeña y mediana potencia, el conjunto de chapas de cada columna se sujeta rigidamente mediante remaches (fig. 2.10), aislados por tubos de baquelita y arandelas de cartón pressphan de 1 a 3 mm de espesor, para evitar poner en cortocircuito a las chapas o que constituyan con ellas espiras cerradas atravesadas por el flujo alterno, en las cuales se inducirían corrientes parásitas que provocarían pérdidas importantes por calentamiento; los remaches o tornillos se colocan en barrenos practicados en las chapas, cuyo diámetro ha de ser algo mayor que el de los remaches o tornillos, para poder intercalar los tubos de baquelita y los aislamientos de cartón pressphan; a su vez también se colocan debajo de las arandelas de metal arandelas de pressphan, de forma que el órgano de fijación (tornillo o remache) quede totalmente aislado del núcleo magnético.

Las chapas que constituyen las culatas se sujetan entre sí por los mismos procedimientos y se fijan mediante perfiles o herrajes de madera mapple para pequeños transformadores y herrajes de metal convenientemente aislados de las chapas por aislamientos de cartón y madera en los transformadores de mayor tamaño; estos elementos, (perfiles o herrajes) sirven además como elemento estructural complementario para soportar y fijar mecánicamente los bobinados, utilizando como separadores tacones de madera impregnada.

Actualmente, se prefiere suprimir los remaches y tornillos pasantes como órganos de fijación en los transformadores de pequeña y mediana potencia y han sido reemplazados y sustituidos por zinchos de fibra de vidrio impregnados de araldita o de fibras sintéticas que sometidos al calor tienden a contraerse comprimiendo así a los grupos de laminaciones de las columnas y yugos del núcleo. (fig 2.23 y 2.24)



(Fig. 2.22) Circuito magnético totalmente ensamblado de 18 MVA



(Fig. 2.23) Detalle de los enchos y trantes que conforman la superior del núcleo

2.2.4 El factor de apilamiento

Como se mencionó en la sección anterior, la lámina de acero eléctrico se recubre con un material aislante denominado "carlite". Cuando el núcleo es ensamblado, las láminas que lo forman no se encuentran 100% juntas, sino que entre ellas existen espacios de aire pequeñísimos. Esta última situación causa que la sección transversal exterior del núcleo, no represente la sección transversal correspondiente exclusivamente al acero eléctrico. Por lo tanto la sección transversal dependerá básicamente de la cantidad de láminas que constituyan el área aparente del núcleo.

Entonces podemos decir que el factor de apilamiento está relacionado directamente por la relación del área aparente y el área efectiva del núcleo. El área efectiva corresponde básicamente al número total de láminas apiladas; considerando que idealmente no existe separación entre ellas; por lo tanto podemos definir el factor de apilamiento (factor de laminación o factor de espacio) como:

$$\text{Factor de apilamiento} = \frac{\text{área - efectiva}}{\text{área - aparente}} \quad \text{ec. (2.2.1)}$$

Regularmente este factor de apilamiento depende o va en proporción directa de la cantidad de láminas que contenga el núcleo y también básicamente del tamaño del mismo; pero podemos decir que este factor de apilamiento se encuentra entre el 94 y 98% para transformadores de mediana potencia y distribución.

2.2.5 El factor de destrucción.

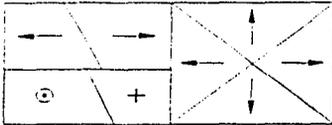
Durante la fabricación del núcleo, la lámina de acero eléctrico se ve sometida a diversos tipos de esfuerzos mecánicos como por ejemplo: cortes, golpes, tensionado, etc. Estos esfuerzos originan cambios en la orientación de los granos del acero eléctrico, disminuyen la permeabilidad magnética y consecuentemente incrementan las pérdidas en el material. Tal incremento puede alcanzar valores del 300% del valor de pérdidas correspondiente a la lámina virgen.

Con el fin de recuperar las características de magnetización originales, el núcleo puede someterse a un proceso de recocido a una temperatura aproximada de 780°C seguido de un periodo de enfriamiento natural. Bajo estas condiciones el núcleo puede recuperar prácticamente sus propiedades magnéticas originales. La relación de pérdidas medidas con respecto a las pérdidas calculadas para lámina virgen se denomina el factor de destrucción. En transformadores de distribución de núcleo enrollado es común obtener factores de destrucción del orden del 10%.

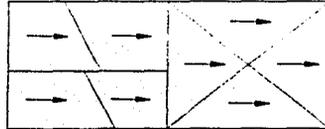
2.3 Características electromagnéticas del núcleo.

El concepto de la "magnetización" se define como la polarización de los átomos magnéticos de cualquier material ferromagnético; y se basa esencialmente por la teoría de los dominios magnéticos; se dice pues, que en materiales "no magnéticos", el campo magnético neto es cero, puesto que el campo magnético producido por los electrones en rotación y translación, en el interior del átomo, se cancela; sin embargo, en los materiales magnéticos, como el hierro y el acero, se alinean los campos magnéticos de cuerpos de átomos en orden de 10^{12} , constituyendo imanes muy pequeños en forma considerable. Este grupo de átomos alineados magnéticamente se denomina "dominio".

Cada *dominio* es una entidad separada, es decir, es independiente de los demás que lo circundan. En una muestra no imantada de material magnético, esos dominios se disponen de forma aleatoria, como se indica en la (fig. 2.24); aquí el campo magnético neto en cualquier dirección es cero. Cuando se aplica un campo magnético externo, los dominios se alinean, formando un campo magnético neto en una dirección, como se puede observar en la (fig. 2.25). Cuando todos los dominios están alineados, se alcanza una situación conocida como "saturación". Si se retira el campo magnético externo, muchos de esos dominios permanecerán alineados, lo que da como resultado una imantación remanente.



(Fig. 2.24) muestra no magnetizada

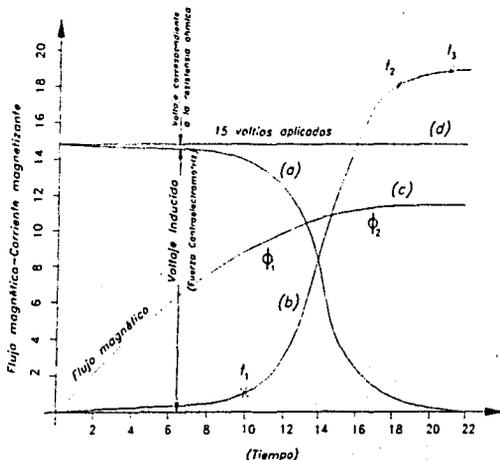


(Fig. 2.25) muestra imantada

Como es de esperarse, podemos observar que el campo magnético total en una sustancia depende tanto del campo magnético aplicado como de la magnetización de la sustancia. El efecto de magnetizar un núcleo es pues, inducir un voltaje en una bobina que circunda en él, mientras se efectúa el proceso de magnetización o mientras aumenta el flujo magnético. La magnetización es causada bien, por el flujo de corriente en el devanado. Es decir que cuando se aplica un voltaje a las terminales del primario del transformador, fluirá una corriente en el arrollamiento primario y se inducirá un voltaje en el secundario. La corriente que fluye en el devanado o arrollamiento primario está misteriosamente limitada por la presencia del núcleo de hierro.

2.3.1. Flujo y corriente.

Entre el flujo y la corriente existe la segunda parte de cuádruple equilibrio señalado en la (fig. 2.26). Esto no es fácil de expresar matemáticamente. El flujo magnético del núcleo es causado por la corriente que fluye en la bobina, pero no existe una relación sencilla entre flujo y corriente. La descripción de los medios de medición del flujo está más allá del propósito de este capítulo, pero con mediciones típicas de flujo como ordenada y la corriente como abscisa, se forman curvas como la mostrada en la figura siguiente. Estas curvas son típicas y su forma exacta depende del núcleo y del tipo de construcción del mismo.



(Fig 2.26) Equilibrio cuádruple.

Cuando se aplica e.d. a las terminales del primario. Se necesita una pequeña corriente para producir un flujo que inducen una fuerza contraelectromotriz igual al voltaje aplicado, cuando se comienza a aplicar la corriente a las terminales del primario. Después de transcurrido un t_1 , el flujo del núcleo se aproxima al punto de saturación y en el instante t_2 la corriente ha aumentado varias veces su valor. En el instante t_3 el núcleo casi esta saturado, el flujo deja de crecer y la corriente está limitada solamente por la resistencia óhmica del devanado primario. Hasta el instante t_1 , la corriente está limitada principalmente por el voltaje inducido. Después de t_2 la corriente esta limitada por la resistencia óhmica del devanado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.3.2. Flujo y voltaje.

La expresión cuantitativa de la primera parte del cuádruple equilibrio mencionado en la figura anterior viene dada por la fórmula:

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} \quad \text{ec. (2.3.1)}$$

donde e es el voltaje inducido en una bobina de N vueltas, en la cual está cambiando el flujo ϕ a una velocidad de $d\phi/dt$ líneas de flujo por segundo.

El voltaje $I \times R$, debido a la corriente excitante I , que fluye por la resistencia R del devanado, puede despreciarse en los cálculos de transformadores de potencia y de distribución.

2.3.3. Densidad de Flujo.

El número de líneas de flujo por unidad de área se denomina *densidad de flujo*, B ; siendo ésta perpendicular a la dirección de las líneas magnéticas; su magnitud se determina mediante la ecuación siguiente:

$$B = \frac{\phi}{A} \quad B = \text{webers/m}^2 \quad \text{ec. (2.3.2)}$$

$$\phi = \text{webers.}$$

$$A = \text{m}^2.$$

donde el ϕ es el número de líneas de flujo que pasan por el área A . La densidad de flujo, también se expresa comúnmente en líneas o Maxwells por pulgada cuadrada tal y como se indica en la siguiente tabla:

	RMKS	CGS	INGLES
ϕ	Webers	Maxwells	Líneas
B	Webers/m	Gauss	Líneas/pul

Tabla 2.3

Conversiones:

$$\Phi = 1 \text{ webers} = 10^8 \text{ maxwells} = 10^8 \text{ líneas}$$

$$B = 1 \text{ webers/m}^2 = 10^4 \text{ gauss} = 6.452 \times 10^4 \text{ líneas/pulg}^2$$

$$A = 1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2 = 1550 \text{ pulg}^2$$

2.3.4. Intensidad de Campo Magnético.

La intensidad de campo magnético H se define como la fuerza magnetomotriz por unidad de longitud de trayectoria del flujo magnético. Se conoce también como la fuerza magnetizante o el gradiente de potencial magnético. En forma de ecuación se define como:

$$H = \frac{\sum NI}{l} \quad \text{ec. (2.3.3)}$$

La ecuación para la intensidad de campo magnético y la unidad de medida correspondiente a cada sistema se dan en la tabla

	RMKS	CGS	INGLES
H	$\frac{\sum NI}{l}$	$\frac{0.4\pi \sum NI}{l}$	$\frac{\sum NI}{l}$
	(amper-vuelta/m)	(oersted)	(amper-vuelta/pulg)
		(gilbert/cm)	

Tabla 2-4

Conversiones:

$$1 \text{ ampr-vuelta/m} = 1.26 \times 10^{-2} \text{ oersted} = 2.54 \times 10^{-2} \text{ amper-vuelta/pulg.}$$

Esta intensidad de campo H tiene un efecto pronunciado sobre la permeabilidad de un material magnético. Al incrementar el campo H , la permeabilidad se eleva a un máximo y luego cae a un mínimo.

2.3.4. Permeabilidad.

Si se utilizan núcleos de diferentes materiales con las mismas dimensiones físicas; un electroimán o cualquier otro material magnético, la intensidad del campo magnético variará de acuerdo con el núcleo empleado. Esta variación de la intensidad se debe básicamente al número de líneas de flujo que pasan por el núcleo.

Se dice que los materiales en los que se pueden establecer líneas de flujo con facilidad son magnéticos y tiene una elevada "permeabilidad". Por ende, la permeabilidad μ de un material es una medida de la facilidad con que se pueden establecer en él líneas de flujo magnético. En muchos aspectos, es similar a la conductividad en los circuitos eléctricos, la permeabilidad de espacio libre (vacío) se indica en la (tabla 2.5) para cada sistema de unidades.

	RMKS	CGS	INGLES
permeabilidad de espacio libre μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	1	3.2
	(weber/ampXm)	(gauss/oersted)	(lines/ampXpulg.)

Tabla 2 5

En la práctica, la permeabilidad de todos los materiales no magnéticos, como el cobre, el aluminio, la lana, el vidrio y el aire, es la misma que la del espacio libre. Se dice que los materiales que tienen permeabilidad ligeramente menores que la del espacio libre son "diamagnéticos" y los que tienen permeabilidades ligeramente mayores que la del espacio libre son "paramagnéticos". Los materiales magnéticos, como el hierro, el níquel, el acero y cobalto, u otras diversas aleaciones de ellos, tienen permeabilidades de centenares o millares de veces la del espacio libre. Se dice que los materiales con esas elevadas permeabilidades son "ferromagnéticos".

La razón de la permeabilidad de un material a la del espacio libre se denomina permeabilidad relativa, y se define como:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \text{ec. (2.3.4)}$$

Por ende, en general, los materiales ferromagnéticos tienen un $\mu_r > 100$, y los no magnéticos, $\mu_r = 1$.

Puesto que μ_r es una variable, dependiente de otras cantidades del circuito magnético, los valores de μ_r no se tabulan. Por otro lado podemos decir que la permeabilidad relativa del material se puede determinar mediante la ecuación siguiente.

$$\mu_r = \frac{B(\text{material} - \text{ferromagnético})}{B(\text{espacio} - \text{libre})} \quad \text{o bien} \quad \mu_r = \frac{\phi(\text{material} - \text{ferromagnético})}{\phi(\text{espacio} - \text{libre})} \quad \text{ec. (2.3.5)}$$

puesto que el área es la misma en ambos casos; con palabras, la ecuación 2.3.5) indica que, para dos núcleos de la misma forma geométrica, la razón del flujo establecido en el núcleo ferromagnético al del núcleo de aire es μ_r ,

2.3.5. Reluctancia.

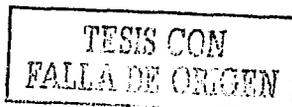
La resistencia de un conductor al flujo de una carga (corriente), en los circuitos eléctricos, se determina mediante la ecuación:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (\text{ohms}) \quad \text{ec. (2.3.6)}$$

La reluctancia de un material a la formación de líneas de flujo magnético en el material se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (\text{Rels}) \quad \left(\frac{1}{\text{henry}} \right) \quad \text{ec. (2.3.7)}$$

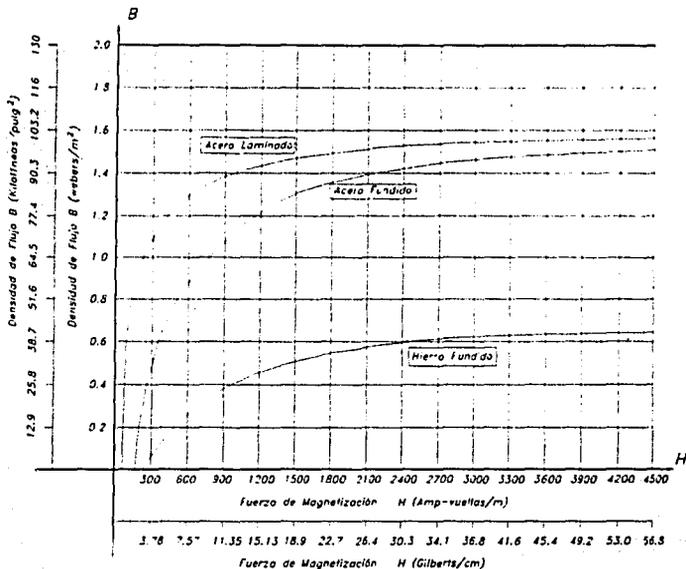
donde \mathfrak{R} es la reluctancia, l es la longitud de la trayectoria magnética y A el área del corte transversal. Obsérvese que la resistencia y la reluctancia son directamente proporcionales a la longitud e inversamente proporcionales al área. Sin embargo, la reluctancia es inversamente proporcional a la permeabilidad, mientras que la resistencia es directamente proporcional a la resistividad. Cuando mayor sea la μ o menor la ρ , tanto menores serán la reluctancia y la resistencia, respectivamente; por ende, es evidente que los materiales de alta permeabilidad, como los ferromagnéticos, tienen reluctancias muy pequeñas. No hay ninguna unidad ampliamente aceptada para la reluctancia, aunque se suele utilizar el (Rels).



2.4. Saturación del núcleo.

Las propiedades magnéticas del acero o el hierro están representadas por una curva de saturación o magnetización. Las intensidades del campo magnético en amperes-vuelta por metro o en amperes-vuelta por centímetro, por metro o por pulgada se grafican en abscisas, y las correspondientes densidades de flujo, en teslas (en weber por metro cuadrado) o en kilolíneas por centímetro cuadrado o por pulgada cuadrada como ordenadas.

La saturación efectiva o máxima densidad de flujo de las aleaciones de hierro silicio es de unas 20 000 líneas por centímetro cuadrado, 20 000 gauss, o 130 000 líneas por plg². Los núcleos del transformador, en general, deben ser trabajados a bastante menos de estos, para evitar un exceso de corriente excitante. Aproximadamente para transformadores de media potencia (20 y 30 MVA's) la densidad de flujo a las que se trabaja es a unas 13 000 hasta 16 000 líneas por centímetro cuadrado, esto en base al tipo de lámina que se este utilizando en este caso lámina tipo M-4.

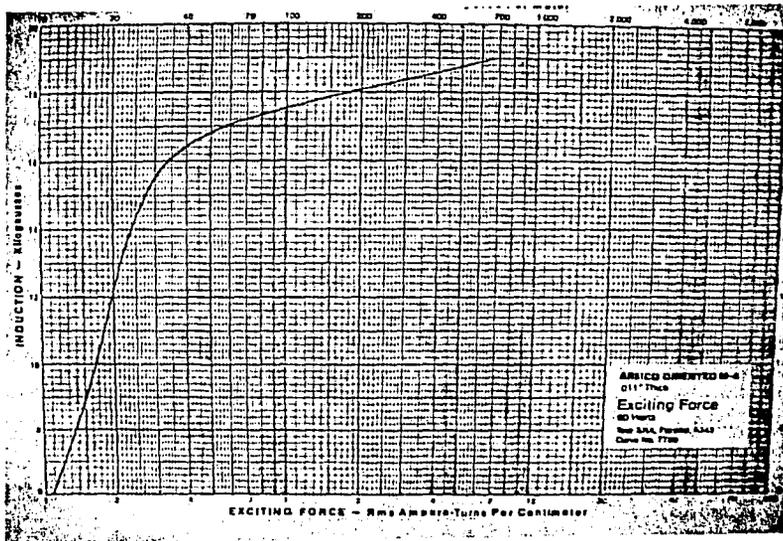


(Graf. 2.1) Curva Típica B-H

2.4.1. La curva de saturación.

Cuando el transformador ha sido construido y probado, generalmente no será sinusoidal la corriente que fluye en el devanado cuando se aplica voltaje sinusoidal a las terminales. Su valor medio cuadrático puede ser medido y si se traza una curva de voltaje (ordenada) y corriente (abscisa), resultará una "curva de saturación", similar a la mostrada en la (Gráfica 2.2). Esas mediciones y esa curva tienen solo un significado limitado a causa de la forma no sinusoidal de la corriente excitante. Se supone generalmente que la curva representa la magnetización característica del núcleo, pero a causa de que el flujo tiende a salir del núcleo si su densidad se acerca al punto de saturación durante parte del ciclo, la curva depende hasta cierto grado del arreglo de los devanados en el núcleo, así como de las propiedades del núcleo mismo.

La curva es así no mas que un registro de las mediciones particulares y debe usarse previamente en la predicción del comportamiento del transformador en situaciones reales en que la distribución del flujo pueden ser diferente de la situación de medición. Debe tenerse siempre presente que la corriente mostrada no es ni aproximadamente sinusoidal. Con todo, esta clase de curva ha encontrado tantos usos prácticos en la aplicación de transformadores que se reconoce como una característica útil de un transformador.



(Gráfica 2.2) Curva de magnetización y/o saturación

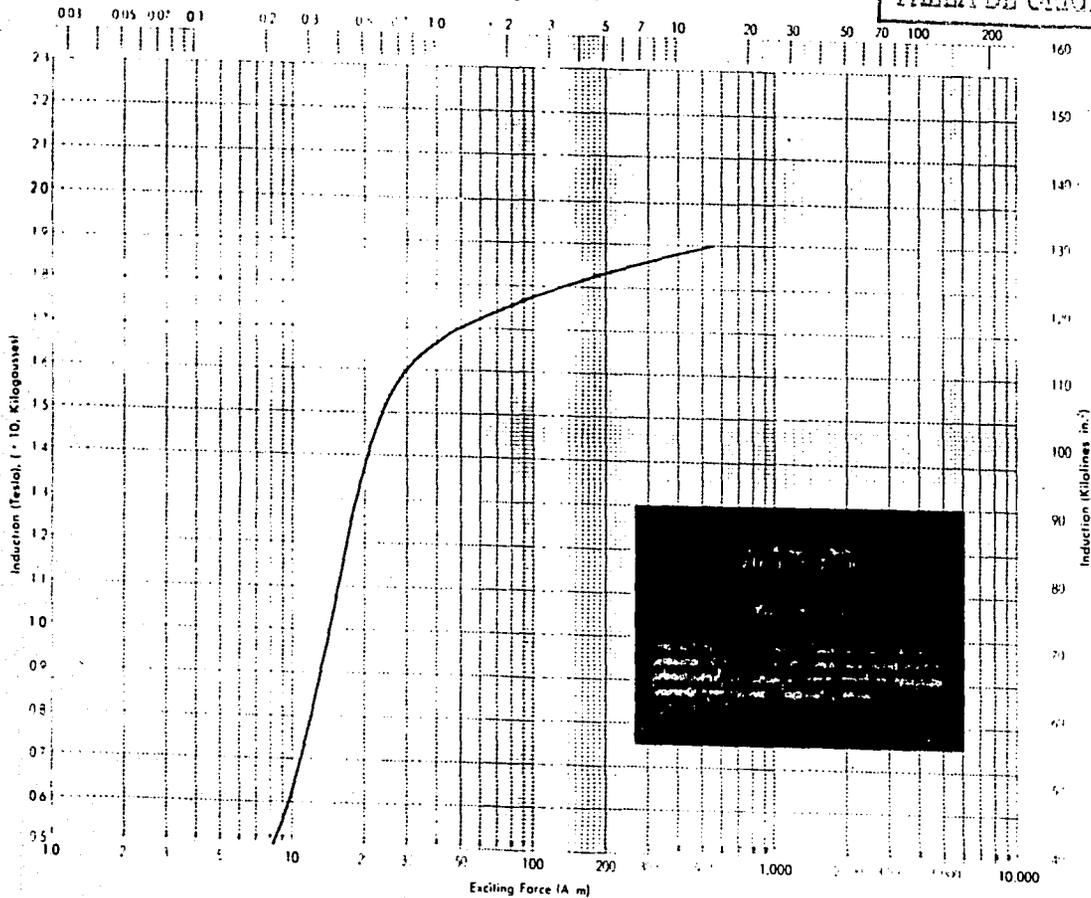
TRABAJO CON FALLA DE ORIGEN

0.27mm

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

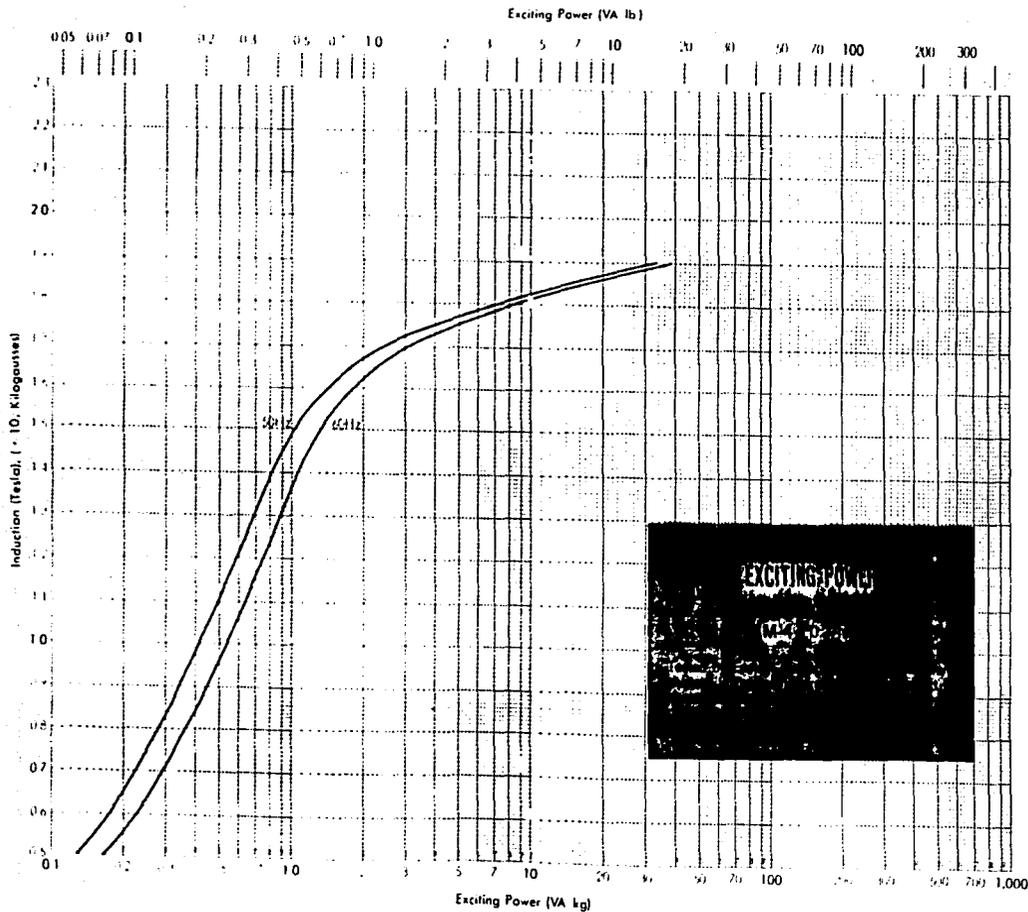
Manufactura y Diseño de Transformadores de Potencia

Exciting Force (A/in.)



Exciting Force (A/m)

53



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A si pues; la curva que resulta de graficar los valores medios cuadráticos de la corriente y el voltaje medidos; se conoce como curva de saturación del núcleo y representa la característica de magnetización. De esto podemos decir que a medida que nos acerquemos a la máxima densidad de flujo, la curva será menos confiable ya que dependerá más del arreglo de bobinas y de la construcción del núcleo.

2.5. Resonancia.

La vibración de un transformador puede amplificarse muchas veces, si cualquiera parte de su estructura puede vibrar en resonancia. La (fig 2.27) muestra una típica magnitud de vibración es sólo de 60×10^{-6} pulgadas por cm^2 , pero una pieza resonante puede amplificarse hasta 100 veces. Una sistema doblemente resonante, en que una pieza ligera resonante relativamente, es montada sobre una pieza grande también resonante, podría teóricamente amplificar la vibración original 100' o 10,000 veces. Estas ampliificaciones pueden crear magnitudes de vibración en estructuras ligeras que pueden resultar en la destrucción mecánica, además del ruido.

La resonancia debe, en consecuencia, evitarse a toda costa. Afortunadamente, no es muy costoso evitar la resonancia. Esto puede hacerse cambiando la constante del resorte o la masa del sistema vibratorio, para cambiar su frecuencia natural. Desafortunadamente, sin embargo, la estructura de un transformador tendrá por lo general varios modos de vibración, muchos de ellos afectados por tensiones desconocidas, introducidas en la estructura durante el montaje. El cálculo de todas las frecuencias resonantes es prácticamente imposible. Algunas de las posibles características de vibración del núcleo mismo sólo pueden ser estimadas.

2.5.1. Resonancia del núcleo del transformador.

La completa eliminación de la resonancia en todos los elementos estructurales de la cuba del transformador es casi imposible, pero puede evitarse la resonancia en el núcleo. Esto puede lograrse diseñándolo de manera que la frecuencia natural de vibración del mismo sea considerablemente diferente de la frecuencia de vibración de la fuerza magnetomotriz impresa. El análisis exacto de un núcleo, aunque sea éste sencillo, es complejo; sólo puede darse un esquema del método general.

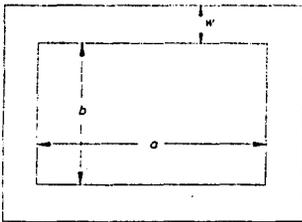
La parte inicial del problema consiste en establecer las ecuaciones diferenciales para el movimiento de la estructura del núcleo, a continuación se resuelven estas ecuaciones para determinar las proporciones del núcleo que producen resonancia. Resolver estas ecuaciones para cada diseño sería difícil y tomaría demasiado tiempo tomaría. Afortunadamente pueden usarse ecuaciones empíricas para determinar aproximadamente las dimensiones del núcleo que ocasionarían problemas.

A continuación se muestra una de esas ecuaciones, para ilustrar el procedimiento:

$$f_r = K \frac{H}{j^2} \quad \text{ec. (2.5.1)}$$

Donde f_r = frecuencia resonante de la estructura del núcleo
 K = constante, que es una función de las dimensiones del núcleo H y l_2 , en pulg. esta constante es usualmente determinada mediante curvas. Fig (f)
 W = anchura de los troquelados, en pulgadas

Con estos datos, para mayor comodidad, se construye algunas veces una curva. El procedimiento correcto de diseño es fijar las proporciones del núcleo para inantenerse las frecuencias resonantes a suficiente distancia de los múltiplos pares de la frecuencia excitante.



$$L = a + W$$

$$l_1 = b + W$$

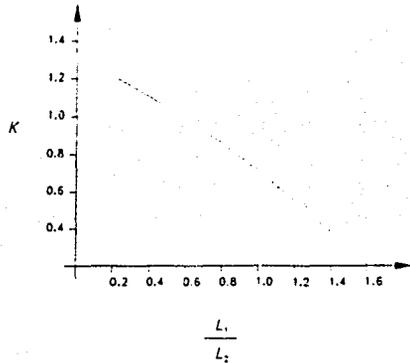


Fig 2.27 Núcleo sencillo de transformador, con dimensiones que determinan la frecuencia resonante. Cualquiera de las dimensiones puede ser cambiada para retirar las frecuencias naturales del intervalo que daría la condición de resonancia. La frecuencia natural es una función de la longitud y anchura de la ventana y de la anchura del troquelado.

2.6 Flujo en el núcleo y corrientes armónicas.

En cuanto a las variaciones del flujo en las tres fases están desplazadas 120° , pueden sumarse dos flujos cualesquiera, como muestra en la (fig. 2.28), para obtener un tercer flujo de la misma magnitud.

Esta fascinante posibilidad ha surgido varios medios de construir bobinas, de modo que una pierna o rama común pueda llevar dos flujos, permitiendo economía en la construcción del núcleo y pérdidas inferiores. Uno de estos esquemas se muestra en la (fig. 2.28).

Existe, por supuesto, el hecho aún más fascinante de que la suma de los tres 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 (fig. 2.29). Este tipo de núcleo tiene menos peso y, consecuentemente, menos costo y menos pérdidas.

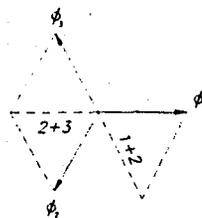
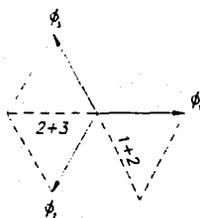
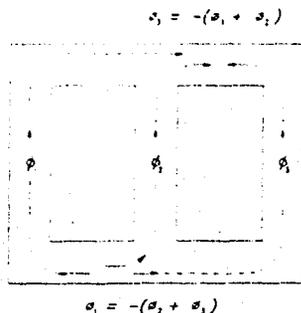
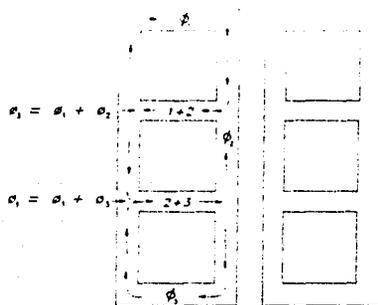


Fig. 2.28 Aplicación de la adición vectorial de flujos en el núcleo trifásico para economizar material de núcleo.

Fig. 2.29 Construcción de núcleo trifásico en que la suma vectorial de los flujos es igual a cero, eliminando así la necesidad de una trayectoria de retorno para el flujo

2.6.1 Corrientes armónicas.

Hemos visto que si los devanados están conectados de manera que no se suministre una trayectoria para la corriente desde el punto neutro (conexión en 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 (fig. 2.29), o cuando hay básicamente sólo tres piernas del núcleo para las tres fases, los flujos de tercera armónica en las tres piernas están todos en fase.

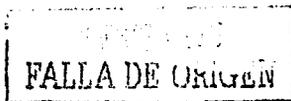
Consecuentemente, el flujo de una pierna, no puede combinarse con el de otra. A los flujos de tercera armónica no les queda otra alternativa que salir por la parte superior de la pierna del núcleo y regresar a la pierna por la parte inferior. El flujo de tercera armónica que regresa por el aire tiene el efecto sumamente indeseable de inducir corrientes en las partes metálicas cercanas. Naturalmente, cualesquiera bastidores de acero provocan serias dificultades. Por supuesto, los ampervueltas que fluyen en los bastidores u otra partes no pueden, posiblemente ser superiores a los amperio vueltas de mando que son la componente 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 los límites razonables.

En cualquier caso, no obstante, el flujo de tercera armónica resultará muy inferior al valor que tendría si dispusiera de una circuito de hierro para fluir y será mucho menor el voltaje de tercera armónica inducido en cada devanado. El cálculo exacto del flujo es difícil pero generalmente el voltaje de tercera armónica será inferior al 2% del normal.

2.6.2. División de corrientes de tercera armónica entre trayectorias alternas.

La anterior discusión ha sugerido tres distintas posibilidades que rigen el voltaje y la corriente de tercera armónica.

1. La corriente de tercera armónica puede fluir en un devanado en delta, limitada solamente por la impedancia del transformador que se discutirá detalladamente en la capítulo siguiente.
2. La corriente de tercera armónica puede también fluir del neutral del transformador al retorno a tierra, a través de cualquier impedancia que puede existir en esta trayectoria.
3. Además, hemos visto que el voltaje de tercera armónica que puede existir para producir este flujo de corriente de tercera armónica resultará muy reducido si el transformador se hace con un núcleo trifásico de tres piernas.



Estas tres condiciones pueden existir en combinaciones. Las variables que afectan la corriente y el voltaje serán:

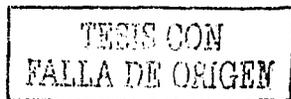
- a. La impedancia del transformador
- b. La impedancia del neutral.
- c. La impedancia de "secuencia cero" de un transformador con un núcleo de tres piernas.

El problema puede complicarse aun más por la adición de otro devanado. Obviamente, no es sencilla la determinación de las corrientes y el voltaje que existirán.

2.7 Pérdidas en el hierro y de los volts-amperios de excitación.

Las pérdidas en un núcleo está generalmente basado en una curva empirica (vatios o volts-amperios por libra de hierro como una ordenada y densidad de flujo como la otra), suministrada por los fabricantes de la lámina de hierro eléctrico en cuestión. El método de cálculo, sin embargo, incluye ciertos márgenes de tolerancia para los siguientes factores que afectan las pérdidas en el núcleo terminado.

- 1) Variaciones en el material que se apartan de la curva.
 - a. Variaciones normales del material. La pérdida generalmente no es superior a los límites de especificación del material, pero puede ser considerablemente inferior.
 - b. Variaciones debidas a esfuerzos introducidos en la fabricación. Este es un factor particularmente molesto en núcleos construidos con hierro de bajo silicio (suave) y grano orientado. El proceso usual de manufactura es someter a tensión y reconocido simultáneos las laminaciones, exactamente antes de montarlas para formar el núcleo, pero aún la operación de montar el embridar el montaje de laminaciones puede causar un apreciable aumento en la pérdida, debido a atenciones en el material. En todos los casos, prácticamente si el hierro es doblado más allá del límite de elasticidad, la pérdida será permanente aumentada. Si no es doblada más allá del límite de elasticidad, el hielo recobra sus propiedades, si se le permite regresar a su posición original. Si, en cambio, se le impide regresar y se mantiene flexionado, aumentará la pérdida.
 - c. Variaciones en espesor de la lámina. Si, en un núcleo construido como en la (fig. 2.10) los troqueles de la pierna (longitud) se hacen de lámina de espesor ligeramente diferente del usado en la culata (anchura), serán diferentes las secciones transversales totales de las dos partes del núcleo.



- 2) Rebabas que causan cortos circuitos entre las laminaciones por perforación de la capa aislante de las laminaciones.
- 3) Distribución no uniforme del flujo.
 - a. Esquinas del núcleo. Las líneas del flujo tiende a "cortar las líneas".
 - b. Brechas de aire en los núcleos montados en la (fig 2.7). El flujo magnético tiende a cruzar la brecha, no pasando por el espacio de aire de los extremos que se encuentran, sino por las laminaciones que forman puente.
 - c. Agujeros para tornillos en el núcleo

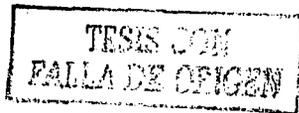
Cada uno de estos factores pueden ser analizado matemáticamente con ayuda de uno o más de las obra dadas en la bibliografía, al final de este capítulo. Debe advertirse que estos análisis son generalmente para especialistas en magnetismo, más que para ingeniero interesado en transformadores. El ingeniero de trasformadores debe considerar todos estos factores en un diseño, especialmente para reducir al mínimo las tensiones, rebabas, brechas de aire y agujeros para tornillos.

Debe escribir las especificaciones de modo que obtenga material que sea uniforme en calidad y espesor como sea posible producirlo económicamente. Sin embargo, sabe que todas estas imperfecciones estarán presentes en sus núcleos, hasta un grado desconocido; en consecuencia, debe servirse ampliamente de curvas empíricas y factores de corrección, para calcular pérdidas y corriente de excitación tan exactamente como sea posible.

Cuando calcula las pérdidas en el hierro, el diseñador generalmente trabaja con dos curvas.

1. Vatios por libra (una ordenada) y densidad del flujo (otra ordenada) .
2. Volts-amperios de excitación por libra (una ordenada) y densidad del flujo (otra ordenada).

Estas no son curvas suministradas por el fabricante del hierro, sino del fabricante de transformadores, que incluyen los márgenes necesarios de tolerancia determinados por la expresión y los experimentos con transformadores terminados. Así pues, la densidad del flujo se determina entonces dividiendo el flujo por el área del núcleo. Los vatios y volts-amperios totales se obtienen multiplicando los valores por libra, obtenidas en las curvas por el peso del núcleo.



2.8. Diseño de núcleos con hierro de grano orientado.

Una de las mayores contribuciones a la eficiencia de los transformadores y a su bajo costo fue la introducción, hacia 1940, del hierro del grano orientado porque es su más alta permeabilidad y pérdida inferior permitió una densidad de flujo de servicio aproximadamente un tercio superior a la que había sido posible anteriormente. Al mismo tiempo sus misteriosas propiedades direccionales apuraban el ingenio del diseñador.

Se han escrito volúmenes sobre el hierro de grano orientado de sus propiedades, pero la mayor parte de estos datos no son todavía útiles para el ingeniero práctico. El diseñador necesita saber solamente que la pérdida y la corriente de excitación aumenta grandemente si el flujo se envía "contra el grano" del hierro. La diferencia esta marcada, que la mayor parte de los diseñadores creen más económico usar uno de los más complejos esquemas de construcción del núcleo, como el mostrado en la (fig. 2.27) Para evitar el flujo contra el grano.

Para los núcleos trabajados a bajas densidades de flujo, como los de los trabajadores de corriente, la esquina cuadrada de la figura resultará muy satisfactoria, porque el flujo cruza las brecha existe entre las laminaciones, pasando por las laminaciones adyacentes que forman puente para pasar la brecha, y hace esto aparentemente, sin aumentar la pérdida o la corriente de excitación hasta un grado importante. Sin embargo, la densidad de flujo en el puente formado por las laminaciones puede ser el doble de la densidad media del resto del núcleo, y si esta doble densidad se aproxima al punto de saturación, tanto la pérdida como la corriente sobre el valor medio para el resto del núcleo.

CAPITULO 3

DEVANADOS DEL TRANSFORMADOR

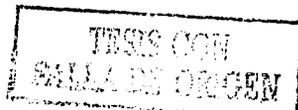
3.0 Introducción.

Los devanados prácticamente constituyen el circuito eléctrico del transformador, y comúnmente se les denomina como bobinas de baja y alta tensión, en ocasiones para transformadores especiales suele existir un devanado terciario o bobina de regulación que puede ser de baja o alta tensión (de B.T. o A.T.); dichos devanados o bobinas disponen de una serie de características y elementos que definen su forma y construcción.

Así pues, los devanados del transformador deben satisfacer una serie de exigencias entre las cuales las principales son:

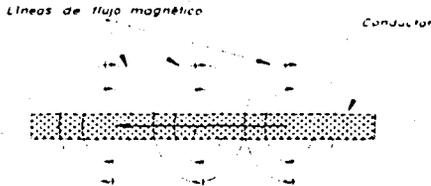
- a) El devanado debe ser económico tanto en lo que se refiere a los gastos iniciales, teniendo en cuenta el grado de déficit del cobre, como en lo pertinente al rendimiento del transformador durante su servicio.
- b) El régimen térmico del devanado ha de corresponder a los requisitos de las normas estatales ya que la divergencia de estas exigencias hacia la tolerancia de altas temperaturas reduce bruscamente el plazo de servicio del transformador.
- c) El devanado debe ser mecánicamente resistente a los esfuerzos que surgen durante los cortocircuitos instantáneos del transformador.
- d) El devanado debe poseer una resistencia eléctrica suficiente contra las sobretensiones.

Estas exigencias son, a menudo mutuamente contradictorias; así por ejemplo, cuando en el devanado la densidad de la corriente es mayor, los gastos de cobre son menores, pero se hacen mayores las pérdidas en el cobre y, por consiguiente, es más bajo el rendimiento del transformador. Tolerando mayores excesos de temperatura en el devanado, se disminuyen las dimensiones exteriores del transformador pero se reduce la duración de su servicio, etc. Por lo tanto, la construcción moderna de los devanados de un transformador, particularmente de un transformador de alta tensión, es el resultado de un largo trabajo, comprobado por la experiencia de la explotación de los transformadores.



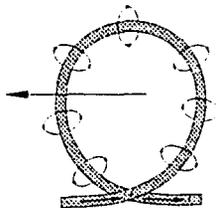
3.1. Teoría y principio de operación.

Como se indicó anteriormente en la capítulo anterior, un campo magnético se presenta en un efecto conocido como inducción electromagnética en materiales con propiedades magnéticas, representado por líneas concéntricas de flujo magnético, así mismo podemos decir que dichas líneas concéntricas se encuentra también presentes en torno a todos los alambres que conduzcan electricidad, (fig. 3.1).



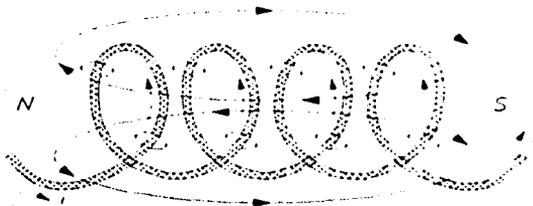
(Fig 3.1) Efecto electromagnético en un conductor

La dirección de las líneas de flujo magnético se puede determinar poniendo el pulgar de la mano derecha en la dirección del flujo de corriente convencional y tomando nota de la dirección de los dedos. Si el conductor está devanado en una bobina (fig 3.2), el flujo resultante seguirá una dirección común a través del centro de la bobina.



(Fig 3.2) Principio del efecto electromagnético en una espira.

Una bobina de más de una vuelta producirá un campo magnético que existirá en una trayectoria continua a través de la bobina y en torno a ella. (fig. 3.3). La distribución del flujo de la bobina es muy similar a la del imán permanente. Las líneas de flujo que salen de la bobina desde la izquierda y entran por la derecha simulan los polos norte y sur, respectivamente. La principal diferencia entre las dos distribuciones de flujos es que las líneas de flujo están más concentradas para el imán permanente que para la bobina.



(Fig 3.3) Efecto del electroimán en presencia de la inducción electromagnética

Asimismo, puesto que la intensidad de un campo magnético se ve determinada por la densidad de las líneas de flujo, la bobina tiene una menor intensidad de campo. La intensidad de campo de la bobina se puede incrementar eficientemente poniendo ciertos materiales, como hierro, acero o cobalto, en el interior de la bobina para permitir que el flujo pase por ellos con mayor facilidad que a través del aire. Al hacer esto, todas las líneas de flujo tenderán a pasar por el material, haciendo que se incremente en esa forma la densidad del flujo y la intensidad del campo.

Al incrementar la intensidad del campo con la adición del núcleo, se tendrá un "electroimán", que, además de poseer todas las propiedades del imán permanente, tiene también una intensidad de campo que se puede hacer variar modificando uno de los valores componentes (la corriente, las vueltas, etc).

Por supuesto, debe pasar corriente por la bobina del electroimán para que se desarrolle el flujo magnético, mientras que no se necesita ni bobina ni corriente en los imanes permanentes. Se puede determinar la dirección de las líneas de flujo del electroimán (o cualquier núcleo con un devanado encima) poniendo los dedos de la mano derecha en la dirección de la corriente en torno al núcleo. Entonces, el pulgar señalará la dirección del flujo magnético inducido



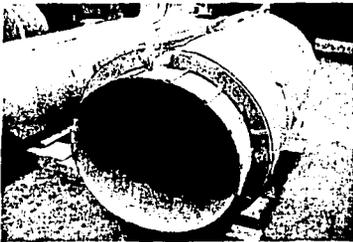
3.2. Definición de devanado.

Los devanados son la parte que componen los circuitos eléctricos del transformador y están constituidos esencialmente por devanados o arrollamientos primarios y secundarios. Dichos arrollamientos se realizan en forma de bobinas, utilizando el cobre como conductor de forma general, aunque en ocasiones muy poco frecuente suele utilizarse el aluminio.

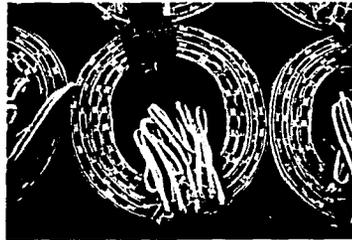
La función de los devanados primarios es crear un flujo magnético para inducir en los devanados secundarios una fuerza electromotriz, y transferir potencia eléctrica del primario al secundario mediante el principio de "inducción electromagnética"; este proceso se desarrolla con una pérdida de energía muy pequeña.

En los arrollamientos para pequeñas intensidades de corrientes, se emplean conductores de sección circular, y en los arrollamientos destinados a ser atravesados por corrientes de elevada intensidad, se utilizan conductores de sección rectangular con aristas redondeadas. Las bobinas se colocan sobre tubos aislantes de papel baquelizado o cartón pressphan, algunas veces directamente y otras veces separados de estos tubos por listones de madera, secados al calor e impregnados en aceite aislante, o por tiras de cartón pressphan, estas disposiciones favorecen la circulación del fluido refrigerante. En general se tienen dos tipos de construcción:

- a) *Bobina de sección circular:* su construcción es muy sólida y por lo tanto presenta un comportamiento satisfactorio ante esfuerzos dinámicos por corto circuito. La desventaja de este tipo de bobina, es que obliga a emplear un núcleo de sección cruciforme, el cual requiere un costo elevado en manufactura. (fig. 3.4)
- b) *Bobina de sección rectangular:* la resistencia al corto circuito de esta bobina es menor que en el caso de la bobina circular. Sin embargo, el control de la tensión del conductor al devanar, la aplicación de adhesivos en papeles aislantes o la sujeción de los conductores por medios diversos, han permitido obtener bobinas rectangulares de construcción robusta. (fig. 3.5)



(Fig. 3.4) Bobina circular para un transformador de potencia



(Fig. 3.5) Bobina de sección rectangular para transformadores de distribución.

3.2.1. Disposición constructiva de los arrollamientos.

A este respecto; caben hacer unas consideraciones previas, para justificar los conceptos posteriores sobre la forma y realización de los arrollamientos. La mayor parte de las averías que se producen en los transformadores, se deben a las siguientes causas:

- 1) Sobre-tensiones, de origen atmosférico o debidas a las maniobras del disyuntor en la red. Los arcos que pueden producirse, se sitúan entre dos tramos de un mismo arrollamiento o entre un arrollamiento y la masa del transformador.
- 2) Sobre-intensidades, que son consecuencia de cortocircuitos, más o menos accidentales en las redes. Provocan elevados esfuerzos electrodinámicos, que pueden comprometer seriamente la resistencia mecánica de los arrollamientos.
- 3) Lenta descomposición de un aislante localmente mal refrigerado.

Por lo tanto, los arrollamientos de un transformador han de preverse teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- a. Comportamiento ante las sobretensiones y especialmente ante las ondas sobretensión de frente escarpado.
- b. Resistencia ante los esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito.
- c. Envejecimiento de los aislantes.

El comportamiento ante las sobretensiones tiene especial importancia en los arrollamientos de alta tensión. Antes, se pretendía obtener la resistencia a las ondas de sobretensión, recargando el aislamiento en las bobinas del transformador más expuestas, es decir las situadas en el extremo de entrada de la línea; la tendencia actual consiste en repartir los esfuerzos lo más uniformemente posible a lo largo del arrollamiento.

Durante los primeros microsegundos, la onda de sobretensión tiene un carácter esencialmente capacitivo; solamente intervienen las capacidades entre los elementos próximos del devanado (espiras, bobinas o capas de bobinas sucesivas), denominadas capacidades serie, y las capacidades entre estos mismos elementos y la masa, denominadas *capacidades derivación*. Experimentalmente se ha caracterizado por el factor.

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_d}{C_s}}$$

C_d = capacidad derivación
 C_s = capacidad serie.

Cuando menor sea el factor α , mejor diseñado está el devanado. Como la capacidad Cd está determinada por las distancias de aislamiento necesarias debidas a la tensión de prueba (por lo tanto constituye un parámetro del transformador), para disminuir el valor de α , hay que aumentar el valor de la capacidad serie Cs , por los procedimientos que se explicarán mas adelante.

La segunda condición que debe tenerse en cuenta en el proyecto de un devanado para un transformador es su buen comportamiento ante los cortos circuitos; esta condición debe considerarse como la más importante para los devanados en baja tensión, por los que circulan corrientes elevadas. Aunque este problema ha existido siempre, actualmente debe estudiarse con más atención debido principalmente a las siguientes razones:

- a) El rápido y constante incremento de las potencias de cortocircuito de los sistemas eléctricos.
- b) El aumento de las potencias nominales de los transformadores.
- c) Algunas formas recientes de explotación de sistemas eléctricos, voluntariamente multiplican los cortocircuitos entre fase y tierra para facilitar la extinción de los defectos fugitivos en la línea, en estos casos, el cortocircuito ya no es un accidente sino que debe incluirse entre las condiciones normales de servicio.

Los devanados de un transformador están situados en un campo magnético, el campo de dispersión entre el devanado primario y el secundario: por consiguiente, están sometidos a esfuerzos electrodinámicos que son pequeños a la corriente nominal de servicio, pero que pueden resultar muy elevados, en caso de cortocircuito en la red secundaria. En el caso de transformadores con arrollamientos concéntricos, la componente principal del campo de dispersión es la componente axial que, por lo tanto, produce esfuerzos electrodinámicos radiales, los cuales son de tracción respecto al devanado exterior y de compresión respecto al devanado interior.

El cálculo de estos esfuerzos permite al diseñador asegurarse de que la tracción ejercida sobre los conductores del devanado exterior queda por debajo de los límites de deformación elástica del cobre, y que las caras radiales están suficientemente ajustadas para evitar cualquier aplastamiento del devanado interior.

Además sucede que el campo magnético de dispersión no es exclusivamente axial, en cada extremo se abre y esparce de forma que la componente radial, prácticamente nula en el plano mediano, va aumentando progresivamente de valor hacia los extremos, provocando un esfuerzo de compresión axial de cada devanado sobre sí mismo.

Si, por otra parte, existe desequilibrio entre las fuerzas magnetomotrices primaria y secundaria, por ejemplo a consecuencia de existir tomas de regulación, estos esfuerzos electrodinámicos complementarios pueden alcanzar valores considerables, algunas veces de decenas de toneladas, en las sujeciones y culatas de los arrollamientos.

El cálculo de los esfuerzos electrodinámicos se realiza actualmente por calculadoras electrónicas, ya que su complejidad hace muy difícil el cálculo directo. Y deben naturalmente, adoptarse las necesarias precauciones para disminuirlos en lo posible.

Finalmente, debe recordarse que los aislamientos de un transformador envejecen y aunque conserven unas buenas cualidades dieléctricas, se vuelven quebradizos con el tiempo, y su fragilidad puede originar cortocircuitos. Las principales causas que provocan el envejecimiento de los aislantes sólidos son:

- a) La temperatura.
- b) La humedad.
- c) El contenido de oxígeno disuelto en el aceite.

Deben, por consiguiente, reducirse estas causas por medios adecuados, que se estudiarán en momento oportuno.

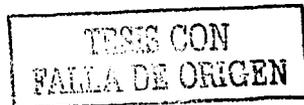
3.3. Tipos de devanados.

Durante los setenta años, más o menos, de historia de los transformadores, los involucrados en el desempeño de estos, han diseñado muchas disposiciones diferentes de los devanados. Aun cuando ya no se usan algunas de estas formas, todavía son necesarias muchas disposiciones diferentes. La variedad de formas se justifica porque cada tipo de devanado tiene ventajas particulares para un ámbito dado de capacidad y voltaje.

Es sumamente difícil, sin embargo, determinar qué arreglo es mejor, para una capacidad y voltajes dados. No hay dos fabricantes que usen la misma disposición. La meta es por supuesto, producir devanados de costo mínimo que, no obstante, tengan todas las características requeridas para hacerlos útiles y eficientes.

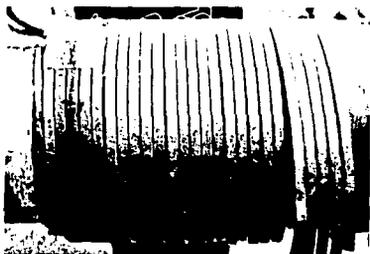
Actualmente existen unos veinte tipos de bobinado que pueden aplicarse a los arrollamientos de alta y de baja tensión de los transformadores; todos ellos pueden dividirse en los siguientes grupos.

- a) Devanado cilíndrico en capas.
- b) Devanados helicoidales.
- c) Devanados continuos.



3.3.1 Devanado cilíndrico en capas.

El devanado en capas es también conocido como arrollamientos con bobinas concéntricas y esta dividido en unas cuantas capas concéntricas, largas, cilíndricas y de pequeño espesor, conectadas en serie entre ellas, según como se puede ver en la (figura (3.6 y 3.7)).



(Fig. 3.6) Bobina devanada en capas, sección de la primera capa.



(Fig. 3.7) Bobina devanada en capas, sección de la segunda capa.

Se establece que si la sección transversal de una espira no supera 8 a 10 mm², entonces el devanado cilíndrico se hace como devanado en capas múltiples de cables de sección transversal redonda. Si la sección transversal de la espira es grande, entonces, generalmente se hace de dos capas de cables de sección transversal rectangular. La capa del devanado forma las espiras arrolladas helicoidalmente muy juntas una a otra a lo largo de la generatriz del cilindro. Así pues, la altura del devanado es la altura de la capa. El cable rectangular puede arrollarse de plano o de borde. El primer caso, la mayor parte del cable se coloca en dirección axial de arrollamiento y en el segundo caso, en dirección radial.

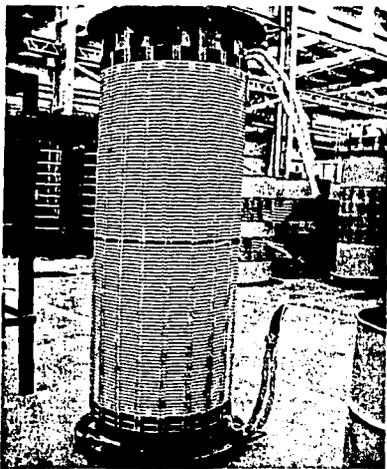
Si la sección transversal de la espira es mayor de 40 a 45 mm², entonces, la espira se hace de varios cables solitarios dispuestos uno junto a otro por la altura de la capa de tal modo que todos ocupen la misma posición con respecto al campo de dispersión. Para mejorar la refrigeración se deja entre las capas del devanado canales o ductos verticales de 5 y 6 mm. de espesor, por los que circula el aceite, asegurando de esta forma la disposición activa de calor. Este tipo de arrollamiento tiene excelente comportamiento a las sobretensiones, ya que las capacidades serie son las capacidades entre capas sucesivas y resultan muy superiores a las capacidades derivadas de cada capa respecto a las masas circundantes. Hacia el interior, cada capa esta aislada de la siguiente por un tubo de papel enrollado cuyos extremos quedan redoblados en forma de collarines y, hacia el exterior, por un canal de refrigeración, relleno de aceite que sirve a la vez, como aislante y como dispositivo refrigerador.

Finalmente, una pantalla electrostática, puesta al potencial de la línea, recubre la capa exterior y permite obtener un reparto prácticamente lineal de las tensiones. Una cuestión importante que debe tener en cuenta, sobre todo para arrollamientos destinados a corriente de elevada intensidad, es el desequilibrio en las fuerzas magnetomotrices producido por las tomas de regulación incorporadas al arrollamiento principal.

3.3.2. Devanado helicoidal.

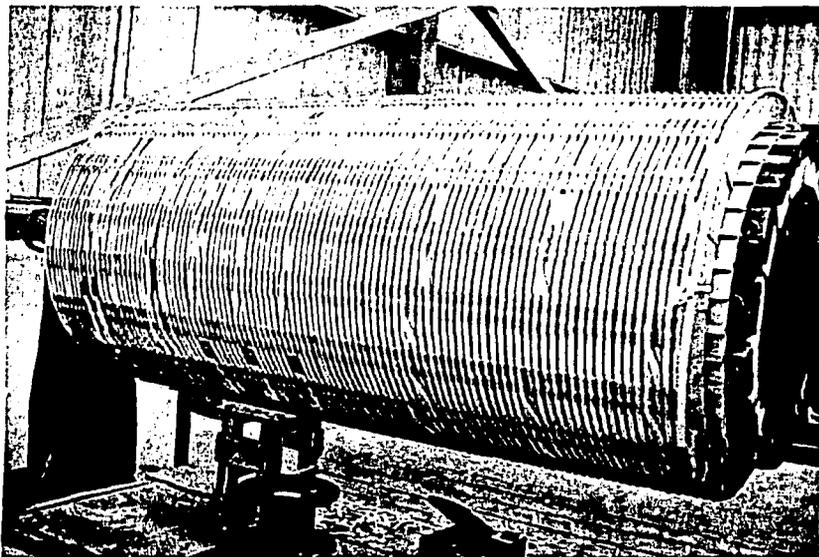
Este tipo de devanado se emplea, sobre todo, para fuertes intensidades de corriente, es decir en los arrollamientos de baja tensión, existen principalmente dos tipos de devanado helicoidal:

- a) *Devanado helicoidal simple*: en el cual, así como en el cilíndrico, las espiras están arrolladas en la línea helicoidal, pero en este se deja entre dos espiras contiguas por altura un canal de 4,5 y 6 mm. de anchura (fig 3.8)
- b) *Devanado semi-helicoidal*: en el cada dos espiras, excepto las de los extremos, se unen en una sola bobina sin canal (fig.3.9).



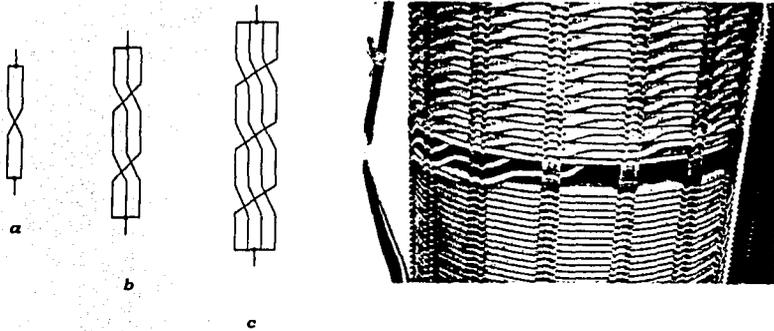
(Fig 3.8) Bobina de potencia de baja tensión devanada helicoidalmente en su forma simple, en ella se pueden observar los principios y faenas del devanado

En la (fig. 3.8) se muestra como está constituido un arrollamiento de este tipo; como puede apreciarse, una espira del devanado helicoidal o semi-helicoidal consta de varios hilos conductores paralelos de sección transversal rectangular dispuestos en dirección radial del devanado de plano y juntos uno a otro, arrollados sobre un cilindro aislante de gran resistencia mecánica de sección relativamente pequeño y conectados en paralelo ya que de esta forma se reducen las pérdidas suplementarias por circulación de corrientes parásitas.



(Fig 3.9) Bobina de potencia devanada semi-helicoidalmente en grupos de varos conductores radialmente

Los conductores elementales deben transponerse durante el curso del bobinado de forma que cada uno ocupe todas las posiciones posibles en el conjunto de ellos para conseguir un reparto equilibrado de las corrientes, que reduce al mínimo las pérdidas por corrientes parásitas. Con dos conductores se efectuará, por lo menos, una transposición, (fig 3.10a), con tres conductores, dos transposiciones (fig 310b), con cuatro conductores, tres transposiciones (fig 3.10c) y a sí sucesivamente.

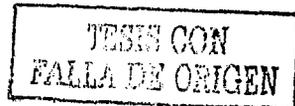


- (Fig.3.10a) Una transposición en un arrollamiento helicoidal con dos conductores en paralelo.
- (Fig.3.11b) Dos transposiciones en un arrollamiento helicoidal con tres conductores en paralelo
- (fig. 3.12c) Tres transposiciones en un arrollamiento helicoidal con cuatro conductores en paralelo.

3.3.3. Devanado continuo o superpuesto

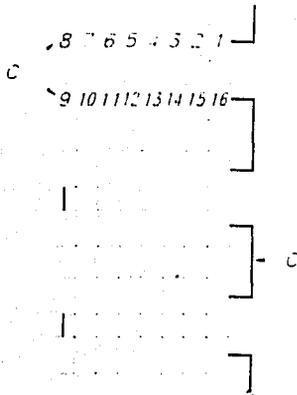
Para medias y altas tensiones se utiliza el devanado continuo, que a diferencia del devanado helicoidal, consiste en una serie de bobinas elementales de pocas espiras, que se montan separadamente; y el acople de estas bobinas se realiza conectándose después de cada entrada de una bobina con la salida de la anterior. Si la espira del devanado consiste de varios hilos conductores paralelos, entonces, lo mismo en el devanado helicoidal se recurre al cruzamiento o transposición de éstos.

Cuando el devanado continuo sirve de arrollamiento de alta tensión en él se practican derivaciones para regular la relación de transformación en los límites de $\pm 10\%$ ó 4 por $\pm 2.5\%$ cada uno. Este tipo de devanado se clasifican a su vez en dos grandes grupos denominados respectivamente *arrollamientos en galletas* y *arrollamientos en bloques*.

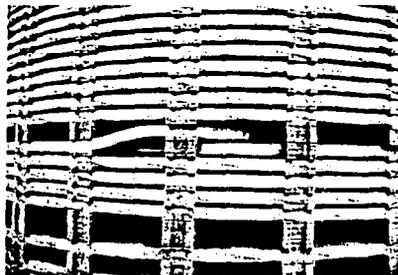


1) Arrollamientos en galletas:

Están formados por bobinas de dos ó más capas de espiras, denominadas dobletes, devanadas en sentido contrario, sin necesidad de soldadura, tal como se muestra en la (fig. 313); en la (fig 314) se muestra un arrollamiento ya construido. Los separadores, mantenidos interiormente por medio de regletas longitudinales, separadas las galletas; este tipo de arrollamiento, a base de conductores de sección rectangular, aisladas con papel impregnado, se emplea para tensiones de 110 Kv.

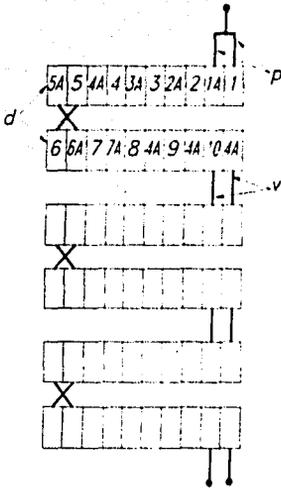


(Fig. 3.13) Representación esquemática de un arrollamiento de galletas c-dobletes; c-conexiones exteriores.

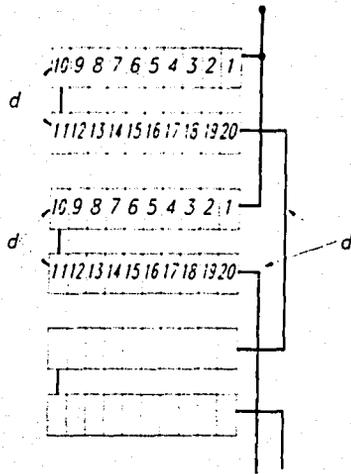


(Fig. 3.14) Arrollamiento de galletas de una espira por capa.

Quando la corriente de servicio es elevada, los conductores resultarían de sección demasiado grande y las pérdidas por corrientes parásitas serían también grandes; para evitar este inconveniente, se bobinan varios conductores en paralelo, como se muestra en la (fig 310). Cuando no existen dificultades para que las conexiones exteriores formen salientes, se pueden conectar los conductores exteriormente en paralelo, como se muestra la (fig 311); para los devanados interiores y con objeto de evitar pérdidas de espacio en sentido radial, se utiliza el bobinado continuo, sin soldadura.



(fig. 3.15) Representación esquemática de un arrollamiento de galletas con conexión interior de los conductores en paralelo d -dobles, p -conductores en paralelo y v -conexiones interiores.



(fig. 3.16) Representación esquemática de un arrollamiento de galletas con conexión exterior de los conductores en paralelo d -dobles, v -conexiones exteriores soldadas.

Para tensiones superiores a 130 KV el reparto inicial de la tensión de choque a lo largo del arrollamiento, es un factor determinante del dimensionado y aislamiento de este arrollamiento; se han buscado las soluciones adecuadas para aumentar los valores de las capacidades serie de los arrollamientos ya que, como se ha dicho en un párrafo anterior, un arrollamiento se comporta tanto mejor respecto a las sobretensiones, cuanto mayor sea su capacidad serie.

Para ello, se disponen las bobinas entrelazadas (fig 3.15), es decir que cada galleta, en lugar de estar constituida por una sucesión de espiras en serie, está bobinada intercalando otras espiras, situadas más lejos a lo largo del arrollamiento, de forma que se realice la sucesión de conductores representada en la (fig 3.16), es decir, bobinando dos conductores en paralelo, cruzándolos sobre el diámetro interior de cada galleta (enlaces 1-2 y 3-4 de la fig 3.17) y soldándolos a continuación sobre el diámetro exterior para formar el enlace 2-3.

IN-FLETE

8 22 7 716 20 5 13 4 18 3 11 2 16
 X
 23 9 24 10 25 11 26 12 27 13 28 14 29 15 3

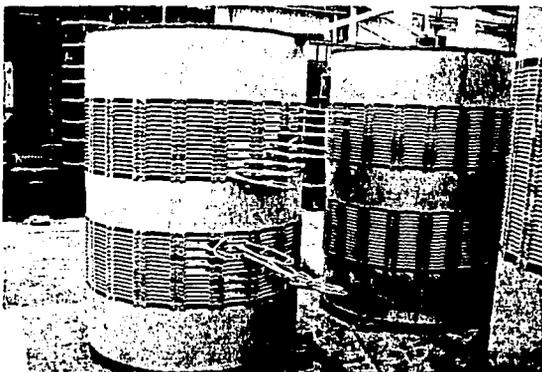
EX-FLETE

38 52 37 31 36 50 35 49 34 43 33 41 32 46 31
 X
 53 39 54 40 55 41 56 42 57 43 58 44 1 2 3 4 5



(Fig. 3.17) Representación esquemática de un arrollamiento de galletas con conductores entrelazados

Para aumentar los valores de las capacidades serie, se emplean también pantallas electrostáticas metálicas y aisladas, que se ponen al potencial de las espiras vecinas, para mejorar el reparto del campo electrostático, estas pantallas se disponen con arrollamientos de galleta normales o entrelazados y, este último caso, al capacidad serie puede resultar hasta 100 veces mayor que la de un arrollamiento de galleta normal, sin pantalla electrostática.



(Fig.3.18) Bobinas de regulación de alta tensión devanadas en bloques

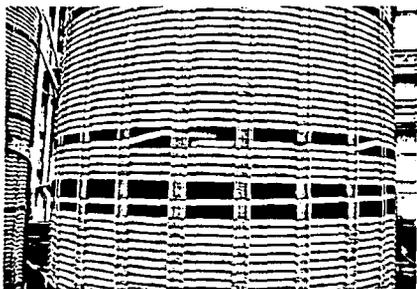
TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

De esta forma la distribución de las sobretensiones a lo largo del devanado, es prácticamente lineal y desaparece la necesidad de recargar el aislamiento de las galletas de entrada que muchas veces ocasionaba un aumento local de la diferencia existente entre la temperatura del punto más caliente y la temperatura media del cobre.

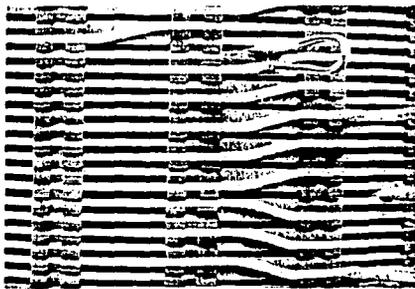
2) Arrollamientos en bloques.

Se utilizan, sobre todo para tensiones de hasta 115 KV, estos arrollamientos están constituidos por un número limitado de capas de espiras de conductor de sección circular o rectangular, según los casos. Generalmente, se subdivide cada bobina en dos medias bobinas o dobletes (fig. 3.18), realizando los empalmes por la parte exterior y separando las dos semi-bobinas por un tabique aislante radial; a partir del centro α se bobina el conductor en dos sentidos axiales opuestos.

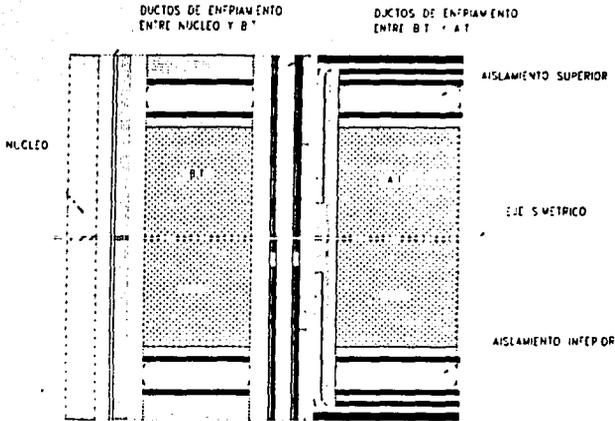
En la (fig 3.19) se muestra la sección de un arrollamiento de alta tensión con bobinas de bloques en dobletes, asociado a un arrollamiento helicoidal de baja tensión, véase además la (fig 3.20), un arrollamiento de bloques ya construido con conductores elementalmente de sección rectangular conectados y transpuestos por permutación circular.



(Fig. 3.19) Detalle de un devanado helicoidal con transposición al centro.



(Fig. 3.20) Detalle de los taps de las derivaciones En un devanado de alta tensión...



(Fig. 3 21) Representación esquemática de un ensamble completo de una bobina de b t y una de a t con su respectivo núcleo

3.4. Polaridad propia de un devanado.

La polaridad de un devanado, expresa las relaciones de signo entre el flujo magnético y las magnitudes eléctricas.

Sabemos que la corriente que circula por los arrollamientos de un transformador es esencialmente variable de sentido. Si se considera un solo arrollamiento, se puede tomar arbitrariamente como positivo cualquiera de los dos sentidos posibles.

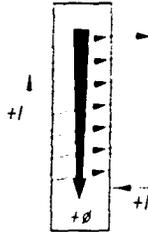
Con esta convención, la corriente será positiva cuando circule por el arrollamiento en el sentido considerado positivo y la fuerza electromotriz será positiva si tiende a producir una corriente positiva.

La polaridad del flujo magnético ya no es arbitraria sino que depende del sentido de la corriente, de acuerdo con la regla de Maxwell o del sacacorchos: *el flujo será positivo cuando avance por el núcleo como se desplazaría un sacacorchos, cuya cabeza gire en el sentido positivo de la corriente.*

Es decir que en la (fig. 3.22), fijado previamente el sentido positivo de la corriente, el sentido positivo del flujo es el indicado por la flecha y está dirigido hacia arriba; en la (fig. 3.23), donde el devanado está arrollado de forma distinta, la flecha indicativa del flujo positivo de la corriente es el mismo. Es decir que, para un mismo sentido positivo de la corriente, la polaridad axial del núcleo depende de cómo está arrollado el correspondiente devanado.

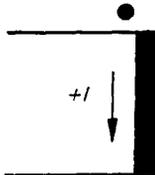


(Fig. 3.22) Bobina arrollada de forma que el sentido positivo del flujo magnético es opuesto al sentido positivo de la corriente.



(Fig. 3.23) Bobina arrollada de forma que el sentido positivo del flujo magnético coincide con el sentido positivo de la corriente.

Cuando no se dibuja el devanado completo en el esquema, es esta polaridad axial la que se indica y basta con esta, porque define la polaridad de los terminales del devanado que es, a fin de cuentas, lo que más interesa para realizar las conexiones correctamente. Si se quiere expresar el sentido positivo de la corriente, se hace mediante un punto (fig. 3.24); por ejemplo, en esta figura el punto indica que el sentido positivo de la corriente atraviesa las espiras de la bobina de arriba abajo.



(Fig. 3.24) Indicación simbólica del sentido positivo de la corriente en un arrollamiento

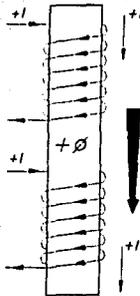
3.4.1. Polaridad relativa de dos arrollamientos de una misma fase.

En un transformador trifásico, dos arrollamientos de una misma fase abrazan al mismo flujo magnético y, cada uno de ellos tiene su propia polaridad, o sea, su propio sentido positivo respecto al flujo común, pero establecida la polaridad de uno de los arrollamientos, queda automáticamente determinada la polaridad del otro arrollamiento.

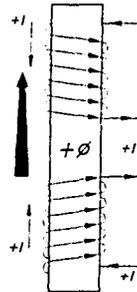
Cuando ambas bobinas se arrollan en el mismo sentido (fig. 3.25), el sentido positivo de una y otra tienen la misma polaridad axial y cuando se arrollan en sentido contrario (fig. 3.26), los sentidos positivos de ambas bobinas tienen polaridad axial contraria.

Se dice que dos terminales de una fase "uno del arrollamiento primario, el otro del arrollamiento secundario" son homólogos, cuando tienen la misma polaridad, es decir, cuando están igualmente situados respecto al sentido positivo en uno y otro arrollamiento.

Por ejemplo, si los sentidos positivos de la flecha electromotriz primaria +E1 y secundaria +E2, son los indicados por las flechas correspondientes, los terminales A y a, son homólogos o de la misma polaridad, y también lo son, los terminales A' y a'.



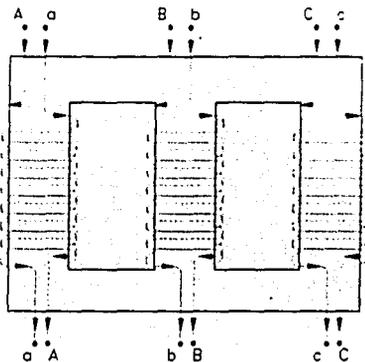
(Fig. 3.25) Bobina enrolladas de forma que tengan la misma polaridad axial.



(Fig. 3.26) Bobinas enrolladas de forma que tengan polaridad axial contraria.

RESERVA
 FALTA DE ORIGEN

Por la tanto, el concepto de polaridad puede extenderse al sistema completo de terminales de los arrollamientos correspondientes a un transformador trifásico. Para definir este concepto, se da por supuesto que la disposición y sentido de arrollamiento de cada par de devanados correspondientes a una fase, se repite idénticamente en los devanados de las otras dos fases. De esta forma, en el transformador trifásico representado esquemáticamente en la (fig.3.27) son homólogos, respectivamente, los bornes A-a, A'-a', B-b, B'-b', C-c, C'-c'.



(fig. 3.27) Bornes Homólogos de un transformador trifásico

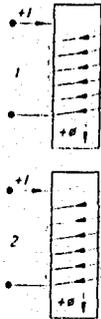
3.4.2. Desfase entre las tensiones de una transformación trifásica.

Para entender aún mejor el tema de la polaridad de un devanado, consideremos de interés precisar previamente el concepto de desfase.

Comenzaremos por considerar dos bobinas (fig 3.28), por las que circulan corrientes de la misma frecuencia pero desfasadas en un tiempo equivalente a una fracción de período. Si establecemos el sentido positivo (+) de la corriente en una de ellas, en la número 1, por ejemplo, con ello queda determinado solamente el signo del flujo para su propio circuito magnético. En la bobina número 2, tomar uno u otro sentido como positivo, equivale a variar 180° el desfase que debe establecerse a la corriente que circula por esta bobina, con respecto a la bobina número 1.

Si este desfase está expresado previamente, eligiendo uno de los dos valores posibles citados anteriormente, queda determinado también el sentido positivo que será precisamente, aquel en el cual circule la corriente cuando su fase sea la prevista respecto a la corriente positiva de la bobina número 1.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



(Fig 3.28) Relación entre los sentidos positivos y desfase en dos arrollamientos independientes

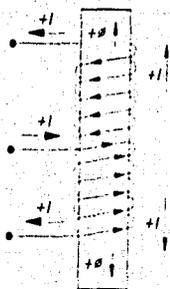


(Fig 3.29) Relación entre los sentidos positivos y el desfase en dos arrollamientos conectados en serie, cuando coinciden los sentidos positivos en ambos arrollamientos

Si, por ejemplo, tenemos dos bobinas conectadas en serie, evidentemente por ambas circulará la misma corriente. Si se elige el sentido positivo de forma que el sentido de la corriente coincida en todo el circuito eléctrico, ambas corrientes estarán en fase (fig 3.29); si se invierte el sentido positivo elegido para la segunda bobina (fig.3.30), las corrientes estarán en oposición, es decir, desfasadas 180° , ya que solamente cuando ha transcurrido medio periodo, la corriente pasa por esta segunda bobina en el sentido tomado previamente como positivo.

Por lo tanto, una bobina en la que se induce una fuerza electromotriz alterna monofásica puede considerarse como constituida por dos fases en oposición; basta para ello (fig 3.31), tomar el centro de la bobina y definir como positivo el sentido a partir de este centro hacia uno y otra mitad del arrollamiento.

Si las dos bobinas representadas en la (fig.3.28) estuvieran conectadas a dos fases R y S de un sistema trifásico, se podría decir que la corriente de la bobina 2 estaría retrasada en 120° en relación con la corriente que atraviesa la bobina 1; o, en otro caso, que la corriente es la bobina 2 iría adelantada en 60° respecto a la corriente en la bobina 1 (Véase fig 3.32).

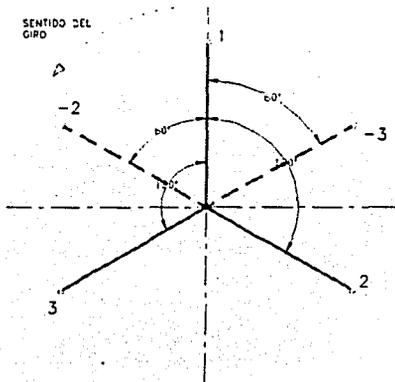


(Fig 3.30) Relación entre los sentidos positivos y el desfase en dos arrollamientos conectados en serie, cuando los sentidos positivos son opuestos en ambos arrollamientos



(Fig 3.31) Obtención de dos fases opuestas en un arrollamiento monofásico

Uno u otro enunciado depende, solamente, del sentido que tomaremos como positivo en la bobina 2. Pero, por otra parte, a este desfase, por convención se le asigna el valor de $1/3$ de periodo, es decir, 120° en retraso; por lo tanto, solamente uno de dos sentidos posibles corresponden a esta condición que será, precisamente, aquel en el cual la corriente por la bobina 2, circulará $1/3$ de periodo después de que la corriente haya recorrido la bobina 1, en el sentido considerado como positivo.



(fig. 3.32) Esquema de un Desfase en un sistema trifásico

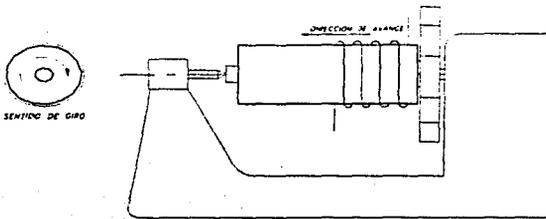
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Por consiguiente, cuando se trata de determinar el retraso o el adelanto entre las magnitudes eléctricas de dos bobinas recorridas por corriente alterna de la misma frecuencia, deben tenerse en cuenta los conceptos de polaridad y desfase que, además, están relacionadas entre sí de tal forma que no puede definirse uno de ellos sino es con respecto al otro concepto. Si, por general, no se menciona la polaridad en los sistemas trifásicos es porque se supone que queda suficientemente aclarada con la representación esquemática adoptada y se sobreentiende que dicha polaridad está elegida de acuerdo con el desfase de 120° que se atribuye a las magnitudes eléctricas que intervienen. Las convenciones sobre la polaridad no tienen demasiada importancia en las máquinas y dispositivos eléctricos con un solo sistema de arrollamientos trifásicos (alternadores, motores asíncronos, etc). Por ejemplo, las fuerzas electromotrices inducidas en los tres arrollamientos de un alternador trifásico en estrella, se dice que van desfasadas entre sí de 120° en retraso, y en el orden U-V-W.

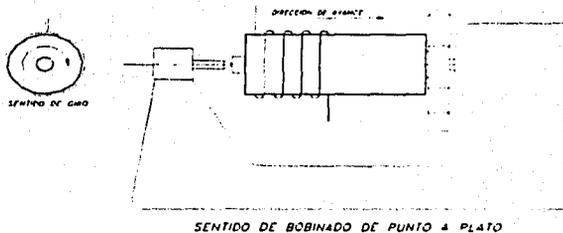
Los transformadores constan de dos juegos de arrollamientos trifásicos, uno el primario y otro el secundario y la polaridad relativa de ambos queda definida de acuerdo con la convención anterior y, teniendo en cuenta la relación de fases del arrollamiento secundario. Pero como el sentido positivo en ambos arrollamientos debe referirse a los flujos magnéticos comunes, puede estar conforme respecto a estos flujos pero resultar distinto respecto a la conexión. Por ejemplo, un transformador trifásico estrella-estrella, cuyos sentidos positivos de las polaridades primarias, de acuerdo con la convención anterior "divergen" desde el neutro al exterior, puede tener conectados sus secundarios de forma que los sentidos positivos de sus polaridades "converjan" desde el exterior hacia el neutro.

3.5. Sentidos de bobinado de un devanado.

En el estudio de los transformadores resulta muy interesante conocer el sentido de arrollamiento de las bobinas, el cual depende la manera como hayan sido arrolladas las espiras al ser ejecutadas en el torno al bobinar. El sentido de bobinado, se caracteriza esencialmente por la dirección en que están arrolladas las bobinas; se toman como referencias, al "plato" y al "punto"; esto es que puede estar devanado de derecha a izquierda o de izquierda a derecha; es decir, de "plato a punto" o de "punto a plato", esto es básicamente una referencia física de las máquinas bobinadoras (Fig. 3.34); donde, el sentido del giro del torno es siempre el de las manecillas del reloj mirando del punto al plato, y el mandril sobre el cual se arrollan las espiras, quedan sujetas entre el punto y las mordazas del plato.



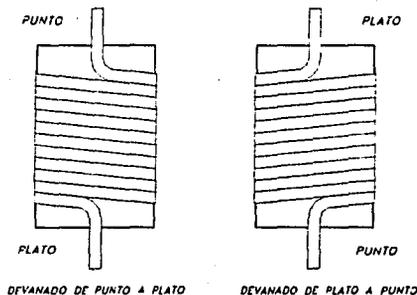
SENTIDO DE BOBINADO DE PLATO A PUNTO
(Fig. 3.34) Máquina devanadora en sentido Plato a Punto



(Fig 3.35) Máquina devanadora en sentido Punto a Plato

- a) **Plato a punto:** Se dice que una bobina resulta estar devanada de Plato a Punto si, al construirla, la primera espira que se arrolla sobre el mandril de la máquina bobinadora, es la más próxima al plato. Avanzando luego el arrollamiento hacia el punto, girando siempre en sentido de las manecillas del reloj. (de derecha a izquierda). (fig. 3.34)
- b) **Punto a plato:** Se dice que una bobina resulta estar devanada de Punto a Plato si, al construirla, la primera espira que se arrolla sobre el mandril de la máquina bobinadora, es la más cercana al punto y luego avanza el arrollamiento hacia el plato; girando siempre en sentido de las manecillas del reloj. (de izquierda a derecha). (fig. 3.35).

PRINCIPIOS DE BOBINADOS



FINALES DE BOBINADOS

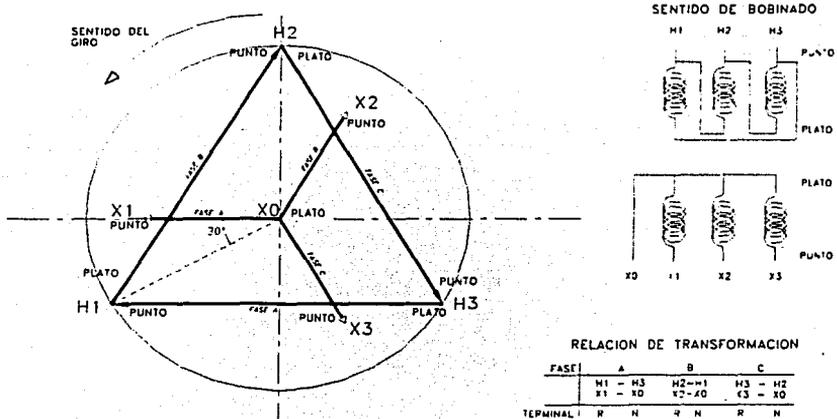
(Fig 3.36) Esquema de los sentidos de bobinados.

Los sentidos de bobinados establecen de alguna manera el desplazamiento angular que deberá existir entre la conexión primaria y la conexión secundaria; como se mencionó anteriormente, para sistemas trifásicos, los arrollamientos primarios y secundarios pueden ir conectados en un arreglo que dependerá básicamente de las condiciones propias del sistema en el que se vaya a trabajar. Puede ser que el primario debe estar conectado en delta y el secundario en estrella, esto solo para el caso cuando se trate de un transformador reductor, que es un grupo de conexión más comúnmente utilizado en sistemas de altas tensiones.

Por lo tanto para cumplir con el desplazamiento angular que debe de existir entre ambos arrollamientos se debe considerar el "sentido de bobinado" que deberá utilizarse tanto el primario como para el secundario.

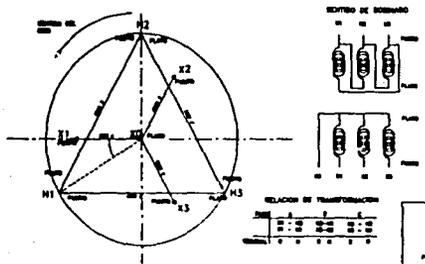
Para transformadores de potencia, regularmente el sentido de bobinado es siempre el mismo aplicado tanto para arrollamientos primarios como para los arrollamientos secundarios, esto debido a que para sistemas de alta potencia, existen pocas familias de conexión como pueden ser *delta-estrella* (para el caso de transformadores reductores utilizados regularmente en subestaciones eléctricas) y el *estrella-delta* (para el caso de transformadores elevadores, utilizados generalmente en plantas de generación o en sistemas de distribución de energía eléctrica).

Dentro de estas dos principales conexiones se establecen de manera vectorial el análisis y funcionamiento de sus respectivos sentidos de bobinados y conexiones que deben establecerse para cumplir un desplazamiento angular determinado.



(fig. 3.37) Esquema de la representación vectorial en una conexión delta-estrella, en un desplazamiento de 30° con conexiones y sentidos de devanados correspondientes

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

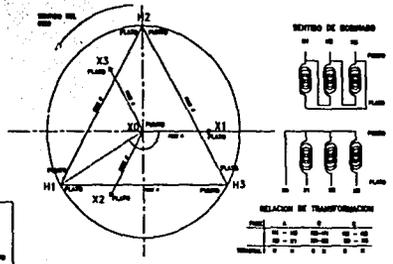


INDICACIONES GENERALES DE LOS TRANSFORMADORES CON BOBINADOS EN SERIE
 DE LA ALTA TENSION DE FASES A FASE Y LA BAJA TENSION DE FASES
 A FASES CONECTADOS EN ESTRELLA DE 120° LA ALTA TENSION DE FASES
 EN CUADRO DE 120° DE LA BAJA TENSION DE A.C.

GRUPO DE CONEXION Dy1

RELACION DE TRANSFORMACION

Grupos	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	1	1	1	1

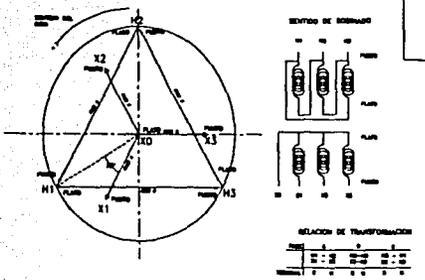
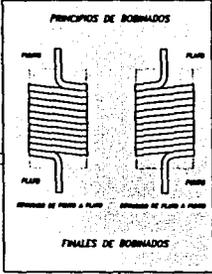


INDICACIONES GENERALES DE LOS TRANSFORMADORES CON BOBINADOS EN SERIE
 DE LA ALTA TENSION DE FASES A FASE Y LA BAJA TENSION DE FASES
 A FASES CONECTADOS EN ESTRELLA DE 120° LA ALTA TENSION DE FASES
 EN CUADRO DE 120° DE LA BAJA TENSION DE A.C.

GRUPO DE CONEXION Dy7

RELACION DE TRANSFORMACION

Grupos	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	1	1	1	1

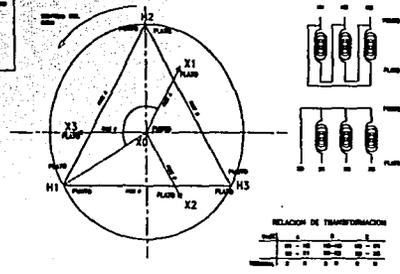


INDICACIONES GENERALES DE LOS TRANSFORMADORES CON BOBINADOS EN SERIE
 DE LA ALTA TENSION DE FASES A FASE Y LA BAJA TENSION DE FASES
 A FASES CONECTADOS EN ESTRELLA DE 120° LA ALTA TENSION DE FASES
 EN CUADRO DE 120° DE LA BAJA TENSION DE A.C.

GRUPO DE CONEXION Dy11

RELACION DE TRANSFORMACION

Grupos	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	1	1	1	1



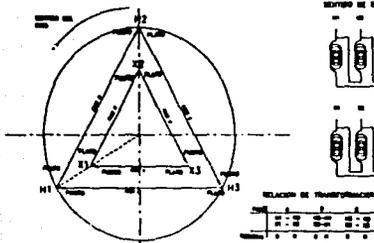
INDICACIONES GENERALES DE LOS TRANSFORMADORES CON BOBINADOS EN SERIE
 DE LA ALTA TENSION DE FASES A FASE Y LA BAJA TENSION DE FASES
 A FASES CONECTADOS EN ESTRELLA DE 120° LA ALTA TENSION DE FASES
 EN CUADRO DE 120° DE LA BAJA TENSION DE A.C.

GRUPO DE CONEXION Dy5

RELACION DE TRANSFORMACION

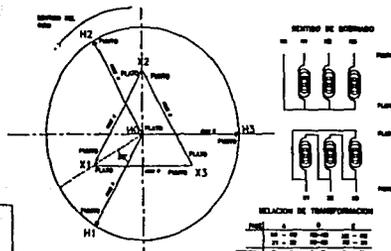
Grupos	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	1	1	1	1

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



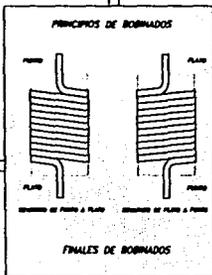
ESQUEMA VECTORIAL DE UN TRANSFORMADOR CON BORNADO DE BORNADO DE LA ALTA TENSIÓN DE PUNTO A PLANO Y LA BAJA TENSIÓN DE PUNTO A PLANO, PUNTO BORNADO DE PUNTO.

GRUPO DE CONEXION Dd0

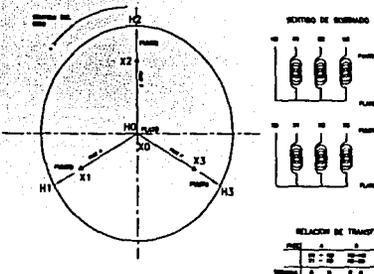


ESQUEMA VECTORIAL DE UN TRANSFORMADOR CON BORNADO DE BORNADO DE LA ALTA TENSIÓN DE PUNTO A PLANO Y LA BAJA TENSIÓN DE PUNTO A PLANO, PUNTO BORNADO DE PUNTO A PLANO Y LA BAJA TENSIÓN DE PUNTO.

GRUPO DE CONEXION Yd1

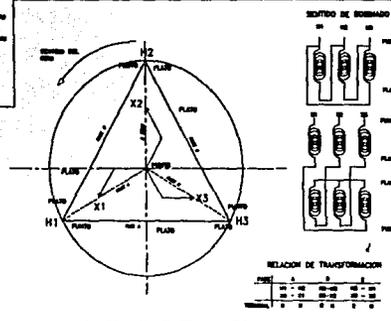


FINALES DE BORNADOS



ESQUEMA VECTORIAL DE UN TRANSFORMADOR CON BORNADO DE BORNADO DE LA ALTA TENSIÓN DE PUNTO A PLANO Y LA BAJA TENSIÓN DE PUNTO A PLANO, PUNTO BORNADO DE PUNTO A PLANO.

GRUPO DE CONEXION Yy0



ESQUEMA VECTORIAL DE UN TRANSFORMADOR CON BORNADO DE BORNADO DE LA ALTA TENSIÓN DE PUNTO A PLANO Y LA BAJA TENSIÓN DE PUNTO A PLANO, PUNTO BORNADO DE PUNTO A PLANO Y LA BAJA TENSIÓN DE PUNTO.

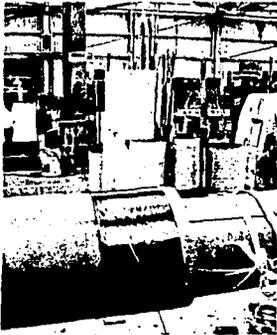
GRUPO DE CONEXION Dz0

En este esquema vectorial esta representado de manera específica, la conexión necesaria que debe realizarse para un transformador conectado en "delta", por el lado primario desfasada en 30° con respecto al secundario conectado en "estrella" con neutro accesible; este tipo de conexión esta definida en el grupo de conexiones señaladas en el capítulo I como un tipo Dy1.

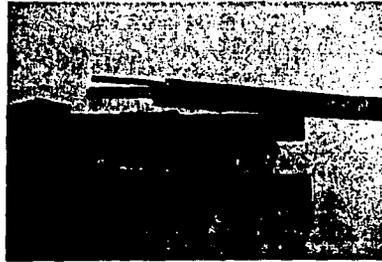
3.6. Conductores de las Bobinas.

Los conductores comúnmente utilizados en las bobinas son de cobre (Cu) o aluminio (Al). En función de su sección transversal, los conductores pueden ser como sigue:

- 1) **Alambre de sección circular:** en general esta forrado por una o varias capas de barniz aislante. Su aplicación más usual es en las bobinas de A.T. (para transformadores de distribución esencialmente), donde las corrientes son bajas. (fig. 3.38).
- 2) **Alambre de sección rectangular:** su descripción es básicamente cinta o solera. Existen dos presentaciones en cuanto a la solera: con forro de papel y con recubrimiento de barniz. Cualquiera de ellas se utiliza normalmente en las bobinas de baja de tensión. Con frecuencia es necesario devanar más de una solera en paralelo, con el fin de proporcionar la capacidad de conducción de corriente requerida. (fig. 3.38A)



(Fig. 3.38) Presentación de un conductor de sección circular (alambre magneto) cubierto en una serie de capas de barniz especial

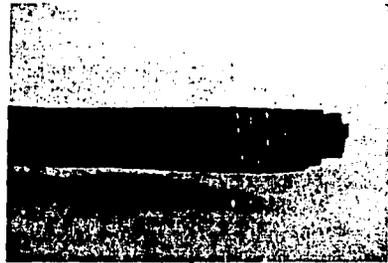


(Fig. 3.38A) Presentación de un conductor de sección rectangular forrado de 3 a 4 capas de papel Keraf en adición de aislamiento de 0.5 mm.

- 3) **Lamina:** también conocida como hoja, que puede ser de cobre a aluminio y se aplica principalmente en las bobinas de baja tensión. Posee grandes ventajas de manufactura con respecto a la solera de cobre. Adicionalmente, el empleo de la lámina elimina los esfuerzos axiales de corto circuito.
- 4) **Conductores subdivididos y transpuestos:** si un conductor de la (fig 3.39) es dividido en dos como en la (fig 3.40), la corriente circulante quedará prácticamente sin cambio, si los conductores se conectan juntos por los extremos, porque la corriente circulante, no cruza la línea central del conductor en ningún punto, excepto cerca de las extremos. Si el conductor se divide primero y luego se transpone al centro de la longitud, manteniendo ambos conductores aislados uno del otro, excepto por la conexión de los extremos se equilibrarán los voltajes que hacen circular corriente en la malla y no circulara corriente en esta. La pérdida es entonces la pérdida por la corriente circulante en cada mitad del conductor, proporcional a $(W/2)^2 = \frac{1}{4}W^2$, de manera que la pérdida ha sido reducido a $\frac{1}{4}$, subdividido y transponiendo el conductor.



(Fig. 3.39) Presentación de un conductor transpuesto en grupos de 27 soleras en paralelo visto en forma radial.



(Fig. 3.40) Presentación de un conductor transpuesto en un grupo de 27 soleras en paralelo visto en forma axial.

Aún cuando el cobre tiene baja resistencia específica su mayor costo comparado con el aluminio dio lugar al incremento del uso del aluminio (usado por primera vez en 1952), especialmente en transformadores de distribución y pequeña potencia, ya sea sumergidos en líquido aislante o del tipo seco.

Las ventajas de las bobinas de cobre son:

- ✓ Resistencia mecánica.
- ✓ Conductividad eléctrica buena (bobina con dimensiones reducidas)

Las desventajas de la bobina de aluminio son:

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

	ALUMINIO	COBRE
Conductividad eléctrica a 20 °C recocido	62%	100%
Peso específico en gramos por centímetro cúbico a 20 °C	2.7	8.89
Calor específico	0.21	0.094
Punto de fusión °C	660	1083
Conductividad térmica, a 20 °C (calorías/°C/cm ² /cm	0.53	0.941
Esfuerzo mecánico a la tensión en Kg / mm ²	16	25

Tabla 3.1 Conductores aluminio y de cobre

Los devanados de aluminio son construidos solamente en banda; en cambio los devanados de cobre pueden ser construidos con solera o conductor redondo, forrados con papel o esmaltados, o la combinación de ambos aislamientos dependiendo del tipo (seco o sumergido en líquido aislante), tensión y potencia del transformador.

3.7 Sistemas de aislamiento.

El problema del aislamiento en los transformadores presenta tantas dificultades cuanto mayor es la tensión a la que van a trabajar las unidades. El aislamiento de un transformador tiene por objeto evitar un contacto directo ó una descarga a través del aire o del aceite, en el cual esta sumergido el transformador. Por lo tanto, el material aislante he de tener suficiente rigidez dieléctrica y sus dimensiones y forma de colocación tienen que responder a las condiciones de servicios previstas.

Existe una gran diversidad en orígenes y propiedades, muchos son de origen natural, otros naturales pero de origen inorgánico, y existen también otros de tipo sintético; las principales propiedades que determinan la factibilidad de uso de un material aislante son: la resistividad o la resistencia específica, la tensión disruptiva, la permitividad y la histéresis dieléctrica en adición a las propiedades dieléctricas y mecánicas, la capacidad para soportar la acción de agentes químicos, el calor y otros elementos que se presentan durante la operación. Uno de los factores que más afecta la vida de los aislamientos, es la temperatura de operación, y esta temperatura esta producida principalmente por las pérdidas y en el caso específico de los transformadores durante su operación.

Los transformadores poseen una serie de materiales aislantes, los cuales juntos forman el sistema de aislamiento. El sistema de aislamiento, protege a los devanados del transformador entre ellos y a tierra, así como de las partes cercanas al núcleo y las partes de acero que forman la estructura.

Por lo tanto, el aislamiento es mucho más que "solamente un medio mecánico para conservar las condiciones dieléctricas entre partes vivas". Concepto que así fue visualizado en el desarrollo de los primeros equipos.

Hasta ahora poco se ha dicho sobre las propiedades de los materiales aislantes; la principal razón es que las propiedades efectivas de los materiales dependen en gran parte de la estructura en que se usan. Las resistencias dieléctricas que deben soportar y propiedades físicas y químicas a las que pueden estar sujetas.

Este sistema de aislamiento incluye materiales como:

- ✓ Cartón prensado (pressboard de entre 1.0 a 8.0 mm. de espesor)
- ✓ Papel Kraft de 0.127 a 0.508 mm. de espesor.
- ✓ Papel manila y corrugado.
- ✓ Cartón prensado de alta densidad.
- ✓ Collares de cartón prensado y aislamiento finales.
- ✓ Partes de cartón prensado laminados.
- ✓ Esmaltes y barnices
- ✓ Recubrimientos orgánicos e inorgánicos para la laminación del núcleo.
- ✓ Madera maple o machiche para armados.
- ✓ Algodón (hilos y cintas).
- ✓ Fibras de vidrio.
- ✓ Fluido líquido dieléctrico (excepto equipos aislados en aire o gas) que puede ser aceite mineral, o siliconas.

Muchos de los materiales anteriormente señalados están relacionados en tipo de material, aunque la forma y la aplicación son diferentes, las propiedades físicas y dieléctricas son idénticamente iguales, entre los más principales materiales utilizados como sistemas de aislamiento podemos clasificar los siguientes:

- a) Papel y cartón.
- b) Barnices y resinas.
- c) Aceite aislante.

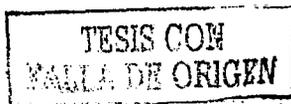
Entre los dos primeros grupos de sistemas de aislamiento anteriormente señalados deben cumplir con cuatro importantes funciones.

1. Cualidad para soportar las tensiones relativamente altas encontradas en servicio normal (esfuerzos dieléctricos). Esto incluye ondas de impulso y transitorios.
2. Cualidad para soportar esfuerzos mecánicos y térmicos (calor) los acompañan a un corto circuito.
3. Cualidad para prevenir excesivas acumulaciones de calor (transmisión de calor).
4. Cualidad para mantener las características deseadas para un periodo de vida de servicio aceptable dando un adecuado mantenimiento.

Para el último grupo esta considerado como *sistema aislante líquido* que baña a las bobinas, el núcleo y a los materiales pertenecientes a los dos grupos anteriores, considerados como *sistema de aislamiento sólido*. Este fluido sirve para tres propósitos primordiales.

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

Las características eléctricas que definen un aislamiento se ven afectadas principalmente por: Humedad, temperatura, oxígeno, gases, e impurezas. Estos factores también determinan la velocidad de envejecimiento de los aislamientos. Una vez iniciada la degradación de estos, los productos de descomposición actúan como aceleradores en su envejecimiento. Todos los materiales que se usan para el aislamiento en las bobinas deben ser secos y resistentes para poder contrarrestar los esfuerzos mecánicos que se desarrollan en el transformador en casos de corto circuito.



3.7.1 Papel y cartón.

El papel es un elemento importante en el aislamiento de los transformadores modernos que merece alguna mención especial. El papel puede ser clasificado como un producto natural. En la naturaleza se encuentran muchas clases de fibras, de las cuales se pueden hacer buen papel dieléctrico.

- Papel Kraft fibra de madera
- Papel manila cuerda de manila.
- Cartón Kraft fibra de madera.
- Pressboard madera y algodón.

El papel tiene una excelente resistencia dieléctrica y baja pérdida eléctrica cuando esta seco, pero debe ser secado y tratado (impregnado en algún líquido) (aceite, barniz, resinas), para excluir la humedad y conservar la resistencia dieléctrica.

Aun cuando el papel esta tratado o impregnado, pueden absorber humedad si el aire o el aceite circundante lo contienen, en aparatos del tipo seco se ha encontrado que un impregnado aunque no evitara totalmente la absorción de la misma.

En transformadores en baño de aceite, el papel absorberá rápidamente humedad del aceite. La humedad aumenta la pérdida en el dieléctrico y disminuye la resistencia dieléctrica eficaz del cartón.

Composición y propiedades físicas:

Papel: 100% de pulpa de madera al sulfato, pudiendo utilizarse en recubrimiento que resista la acción de líquidos aislantes.

Cartón: 100% de pulpa al sulfato de madera al sulfato o bien de 50% del algodón y el resto de pulpa de madera al sulfato o cualquier otra combinación, constituido por una o varias capas adheridas entre sí pudiendo utilizarse en pegamento que resista la acción de líquidos aislantes.

CARTÓN PRENSADO		
Espesor en mm.	Tolerancia prom.	Tolerancia máx.
1 - 1.6	7%	11%
1.6 - 3.0	5%	10%
3.0 - 4.0	4%	9%
4.0 - 6.0	3%	8%
6.0 - 8.0	3%	7%
8.0 - 10.0	3%	5%
10.0 - 40.0	3%	5%

TESIS COM
 FALLA DE ORIGEN

Tabla 3.2 Espesores del cartón prensado.

El papel y el cartón prensado tienen una textura, densidad y un acabado completamente uniforme, y están libres de roturas, grietas, burbujas o imperfecciones de cualquier naturaleza. Entre sus principales características físicas están las siguientes:

Humedad:

El papel y el cartón prensado contienen entre el 4.5% a 7.0% de humedad.

Doblez:

El papel y el cartón prensado utilizados para transformadores de potencia son capaces de soportar un doblez de 120°, en dirección transversal y longitudinal sin tener que agrietarse.

Potencial de hidrógeno:

El papel y el cartón prensado deben contener un PH mínimo de 6.5 y un PH. Máximo de 7.5.

Contracción por secado:

Los cartones y papeles presentan una contracción por secado menor al 2%.

	Espesor mm.	Rigidez dieléctrica en seco V/mm.	Rigidez dieléctrica en aceite V/mm.	Resistencia a la tensión mínima (T)	Kg/cm de ancho (T)	Resistencia al rasgado (T)	Mínimo (G) T	peso específico g/cm ³
P A P E L E S	0.50			4.1	1.5	53	47	
	0.10	10000	25000	6.5	3.5	79	65	0.9 - 1.1
	0.13			10.5	4.5	152	127	
	0.18			12	5.5	167	146	
	0.20	9000	18000	15	8.5	206	181	0.9 - 1.1
	0.25			15.5	8.8	221	203	
C A R T O N E S	0.30			23	11.0	315	291	
	0.40			26	15.0	358	329	
	0.50	8000	15000	34	18.0	416	357	0.95 - 1.3
	0.60			42	23.0	525	400	
	0.80			43	26.0	602	520	
	0.80			55	42.0			
C A R T O N E S	1.00	9500	11000	69	54.0			0.97 - 1.17
	1.60			135	99.0			
	2.00			147	105.0			
	2.50			180	160.0			
	2.80	9500	11000	1889	174.0			0.97 - 1.12
	3.00			210	190.0			
S	3.20			310	230.0			

Tabla 3.3 Características físicas y mecánicas del papel y cartón prensado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Aparentemente todo lo que puede ser cierto es que un transformador seco será dieléctricamente más resistente que un transformador que contenga humedad. No se puede decir que un transformador en que el factor de potencia del aislamiento es bajo será más resistente que uno en que es alto, a menos que los diseños sean idénticos en todos los sentidos, excepto que uno es seco y el otro contiene humedad.

3.7.2 El aceite.

Naturaleza.

Los aceites para transformadores son de naturaleza mineral. Proceden de la destilación fraccionada de petróleos, a la sigue un proceso de refinó. La composición química depende de la procedencia. Básicamente se trata de una mezcla compleja de hidrocarburos. Por lo expuesto, se comprende que resulte difícil, y que carezca de valor práctico, su análisis químico. Ciertamente, y según proporciones de unas u otras moléculas, se habla de *aceites con base parafínica o aromática*

El aceite es una parte igualmente importante del moderno aislamiento de los conductores. El aceite, como el papel, es un producto de la naturaleza que contiene una variedad de impurezas de naturaleza y en cantidades indeterminadas. Se usa universal y principalmente por su costo en extremo bajo, comprobado con cualquier otro líquido aislante sintético.

Tienen una ventaja, no del todo explicada, en cuanto al impregnar al papel. Esto es probablemente porque la venas de ruptura eléctrica tiene el efecto, en el aceite, de crear cargas especiales que reducen el esfuerzo eficaz y aumenta la resistencia mientras que, en otros fluidos aislantes una vez iniciadas las venas, conducen a la ruptura.

Aunque el aceite para el transformador es un producto altamente refinado, no es químicamente puro. Es principalmente una mezcla de hidrocarburos con otros compuestos naturales que no son perjudiciales. Aunque el aceite no es una sustancia "pura", algunas impurezas en particularmente son sumamente destructivas para sus propiedades y su resistencia dieléctrica, los factores más dañinos son el agua, el oxígeno y las muchas combinaciones de compuesto que se forman por la acción combinada de estos a temperaturas elevadas.

Envejecimiento.

El aceite experimenta un proceso de *envejecimiento*. Significa que, con el tiempo, se altera, se oxida, forma productos ácidos y puede llegar a crear lodos. Contribuyen factores varios, siendo los principales; el aire (oxígeno), temperaturas (sobrecargas, calentamientos locales, etc), la luz y las radiaciones ultravioletas (las muestras de aceite se guardarán en botellas opacas de plástico, totalmente llenas)

Con el envejecimiento, el aceite empeora en cuanto a características aislantes y refrigerantes, llegando a resultar inservible.

Para alargar el proceso, modernamente se emplean, en ocasiones, productos químicos inhibidores (nombres comerciales: "topanol", "paranol", "parabar", etc.). La buena conservación del aceite implica evitar sobrecargas fuertes o prolongadas, desecadores inutilizados (saturados), refrigeraciones inadecuadas (temperaturas ambientes excesivas, cantidades de refrigerante insuficientes).

Características principales.

El aceite disuelve una muy pequeña cantidad de agua, unas 70 p.p.m. a 25°C y 360 p.p.m. a 75°C. Esta agua en solución real tiene un efecto relativamente pequeño sobre la resistencia dieléctrica del aceite. Entre sus principales características se tienen:

Densidad relativa:	a 15°C, valor máximo 0.890. a 20°C, valor máximo 0.887.
Viscosidad cinemática:	a 20°C, valor máximo 30 c St. a -30°C, valor máximo 1800 c St.
Azufre corrosivo:	exento.
Punto de inflamación:	valor mínimo 140°C.
Índice de saponificación:	valor máximo 0.10 mg KOH/g de aceite.
Tensión de perforación:	valor medio mínimo 60 Kv (rigidez dieléctrica = 240 Kv/cm).
Apariencia visual:	

La apariencia del aceite debe ser brillante y transparente, sin sólidos en suspensión, cuando se determine por inspección visual con visión normal de 20/20 y sin ayuda de ningún instrumento óptico.

3.7.3 Aceite de silicona.

El fabricante de transformadores sumergidos en aceite esta interesado ha estado interesado en el diseño de un transformador que sea adecuado para áreas peligrosas al fuego, pero que no incremente grandemente su inversión. La forma más fácil y económica de hacer esto, es substituir el viejo aceite mineral con algún otro líquido con mayor punto de inflamación.

Recientemente fue introducido al mercado un aceite de silicona, este tiene un punto de inflamación de 265°C comparado con el aceite mineral con 150°C, pero en vista de que un gran incendio se puede alcanzar una temperatura de hasta 1000°C o más, el aceite de silicona no es la solución para un transformador resistente al fuego. Además, un tanque con aceite de silicona podría romperse y ser la causa de un incendio, o en el caso de un fuego de otra fuente, el líquido de silicona, podría propagar más el fuego, una ves iniciado. Las fabricantes de silicona manifiestan que este es auto-extinguible, pero esta afirmación únicamente puede ser demostrada en condiciones de laboratorio.

Por ejemplo, si el aceite de silicona es colocado en un pequeño vaso precipitados con un área de superficie limitada e incendiada, el producto de la combustión, polvo de silicona, flotará sobre la superficie del aceite hasta que una delgada capa es formada, sofocando el oxígeno y extinguiendo la flama. Sin embargo en un incendio real, donde la capa de silicona es extendida ligeramente, los residuos de polvo pueden ser soplados lejos por la corrientes generadas por las flamas, este efecto es cierto especialmente en grandes incendios.

3.7.4 Barnices y Resinas

Estos materiales serán mencionados aquí solo para ser notar sus particulares y algunos de los problemas que crean. Las primeras teorías afirmaban que los barnices impedirían la entrada de humedad al aislamiento. Ahora se comprende perfectamente que ninguna cubierta superficial pueden ser una barrera contra la humedad. Una capa de barniz retardará la entrada de humedad pero no impedirá la penetración con el tiempo.

La impregnación al vacío de las bobinas con barniz es algo mejor que una capa superficial para retardar la entrada de humedad principalmente porque cubre mayor cantidad del material y llena mayor volumen del espacio situado dentro de la bobina.

La impregnación con barniz generalmente aumenta bastante la resistencia mecánica de las bobinas devanadas con varias capas de alambre fino, al aglutinar entre si las capas y las vueltas (aunque es difícil predecir o medir este aumento). Sin embargo, cualquier barniz que contenga un solvente evaporable, parece que al secarse forma finas burbujas o vacíos dentro de la bobina.

La situación exacta dentro de la bobina es incierta, pero una bobina que ha sido barnizada generalmente no puede ser impregnada con aceite para que desarrolle una resistencia dieléctrica tan alta como una que no ha sido barnizada.

Las resinas sin solventes impregnarán, cuando menos teóricamente, las bobinas sin dejar vacíos. Esas bobinas son mucho más resistentes a la humedad que las impregnadas con barniz, porque están llenos los espacios para la humedad. Prácticamente, sin embargo, es difícil eliminar los vacíos (quizás pequeñas grietas) y no siempre se concreta la resistencia dieléctrica de la resina.

CAPITULO 4

FUNDAMENTOS DE CALCULO DE TRANSFORMADORES

4.0 Introducción.

El objetivo fundamental del diseño eléctrico de transformadores es dar a conocer la metodología que se sigue para realizar dichos diseños, donde se involucran los parámetros fundamentales de un transformador como son: voltaje, corriente, potencia, frecuencia y otros elementos que influyen esencialmente en su funcionamiento. Así como también todos aquellos documentos necesarios para el buen entendimiento entre el que necesita el satisfactor y el que va a diseñar.

Por principio se dice que el diseño de un transformador se inicia desde el momento que existe la necesidad de él, porque en ese momento esa necesidad va a fijar pcr principio los parámetros eléctricos propios de un transformador, como son:

- VOLTAJE
- POTENCIA
- NUMEROS DE DEVANADOS
- NUMERO DE FASES
- NIVELES DE AISLMIENTOS DEL TRANSFORMADOR
- ALTITUD DE OPERACIÓN

Existen otros parámetros secundarios, que no dejan de ser fundamentales para el buen diseño.

Para diseñar, el punto de enlace entre el que tiene la necesidad y el que va a diseñar, es una "ESPECIFICACION" la cual se define como el documento que describe en forma clara y objetiva todos los requisitos particulares para el diseño del transformador, desde las características externas de fabricación, hasta la forma de cómo va a ser operado, incluyendo los accesorios y la disposición de los mismos, en conclusión se puede decir que la especificación es una radiografía escrita del transformador.

Por otro lado se tiene un documento que valida un diseño y sirve como respaldo y al cual se debe sujetar el diseño en general, a la cual se le denomina "**NORMA**".

Este documento es el determinado por una autoridad legalmente constituida y que se genera por medio de un consejo en el que participan: usuarios de transformadores, fabricantes de transformadores, fabricantes de equipos relacionados y organizaciones interesadas en general, la cual contiene los requisitos mínimos necesarios que deben reunir un transformador tanto para adquirir el mínimo de calidad como para satisfacer la necesidad elemental.

En general, estos dos documentos la "**ESPECIFICACION Y LA NORMA**", son las que definen completamente el diseño y la manufactura de los transformadores.

Básicamente, existen dos formas de construcción de transformadores, que si analizamos desde el punto de vista electromagnético, no encontraremos ninguna diferencia ya que ambos trabajan bajo el principio de inducción, en el que un devanado con una excitación induce sobre otro devanado que se encuentran en el mismo núcleo. Pero el punto de cuestión es la forma de construcción que aunque funciona bajo los mismos principios electromagnéticos, físicamente se comportan de diferente manera ya que como sabemos, en el transformador tipo columnas, los devanados envuelven al núcleo y en el transformador tipo acorazado, los devanados son envueltos por el núcleo y con esto le dan una característica óptima en el corto circuito, por esto, estos transformadores son seleccionados donde las posibilidades de corto circuito son elevadas en los transformadores para horno. El transformador por su parte es generalmente usado donde la probabilidad de corto circuito no es muy usual, además tiene la ventaja de su bajo peso comparado con el acorazado.

Las bases dimensionales para el desarrollo del modelo matemático son definidas bajo principios fundamentales pero tomando en consideración cada construcción y cada arreglo, estas consideraciones se desarrollan en función de la experiencia del diseñador, de la geometría el arreglo núcleo - bobinas, lo cual es un aspecto fundamental para todo el análisis ya que cualquier cambio que se considere en un transformador, digamos su altura, afectara dimensiones sino también pérdidas, tanto en el núcleo, en los devanados así como pesos del transformador.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.1 Diseño eléctrico.

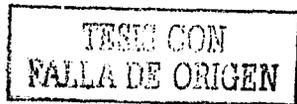
El cálculo o diseño de transformadores, se puede decir que es un aspecto suficientemente tratado, en el que intervienen algunas variantes dependiendo del tipo de transformador y de los materiales empleados. En la actualidad los fabricantes de transformadores a gran escala, disponen por lo general de programas de computadora para diseño, y laboratorios de prueba y desarrollo.

No obstante, los conceptos básicos del cálculo, de transformadores se deben conocer por las personas relacionadas con las máquinas eléctricas, ya que esto no solo permite una mejor comprensión de su funcionamiento, sino también se está en posibilidad de entender mejor las posibles fallas que tienen o podrían tener.

4.1.1 Datos generales de diseño

El cálculo para el diseño de un transformador da principio en cuanto se conocen los datos generales del mismo, los cuales son proporcionados por el cliente en cuestión por medio de un documento llamado "especificación"; donde se expresa de manera detallada y concisa algunas características y elementos con que debe contar dicho transformador. Esta especificación es editada por el mismo cliente de acuerdo a sus necesidades y requerimientos, y generalmente van de acuerdo a la capacidad del transformador. En dicha especificación también se describen todas las características eléctricas y mecánicas, con que deben contar un transformador, las cuales están basadas en normas como son la NMX-J (mexicanas) y algunas veces en normas internacionales como las ANSI. Los datos corresponden en sí, a las características eléctricas del transformador como son:

POTENCIA:	Expresada en (KVA).
TENSION PRIMARIO:	Expresada en (Volts)
TENSION SECUNDARIO:	Expresada en (Volts)
CONEXIÓN PRIMARIO Y SECUNDARIO:	Mencionar alguna establecida por norma
IMPEDANCIA:	Expresarla en un tanto por %.
DERIVACIONES:	Indicar el % de cada derivación y el número de ellas hacia arriba o hacia abajo.
FASES/FRECUENCIA:	Indicar número de fases y la frecuencia a la que va operar el transformador.
TIPO DE ENFRIAMIENTO:	Indicar algún tipo según las necesidades que se requieran.
ELEVACION DE TEMPERATURA:	Señalar el tipo de elevación necesaria.
ALTURA DE OPERACIÓN:	Mencionar la altura de operación expresada en m.s.n.m.
DEVANADOS B.T. Y A.T.	Material a utilizar (Cobre o Aluminio).



4.2. Dimensionamiento de las partes activas del transformador.

Como se sabe, los transformadores están constituidos principalmente por el núcleo y los devanados (bobinas), en principio el tratamiento para el cálculo de las características del núcleo corresponde al que se da para el cálculo de un circuito magnético; los conceptos básicos de cálculo están dados por la "la densidad de flujo magnético" (B_m) expresada en Webers/m² y "el flujo magnético" (ϕ_m) de manera que la sección del núcleo magnético se puede calcular como:

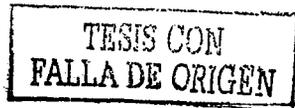
$$S = \frac{\phi_m}{B_m} \quad \text{ec. (4.2.1)}$$

Partiendo del hecho que se ha fijado la densidad de flujo B_m con cierto criterio de conveniencia que toma en consideración la potencia del transformador, las pérdidas en los materiales y el sistema de enfriamiento empleado como medida de orientación, se da la tabla siguiente en donde se da el valor medio de la inducción en función de la potencia.

POTENCIA DEL TRANSFORMADOR WEBERS / M ²	DENSIDAD DE FLUJO B _m
5 A 10	1.10 A 1.20
10 A 20	1.15 A 1.25
20 A 50	1.20 A 1.30
50 A 200	1.25 A 1.35
200 A 500	1.30 A 1.40
500 A 5000	1.35 A 1.60
MAS DE 5000	1.60 A 1.70

Tabla 4.1 Densidad de flujo medio en función de la Potencia del transformador

Para diseños muy especiales suele utilizarse lamina de acero al silicio de grano orientado del tipo 27 ZDKH o más bien conocida como Hi-Bi, este tipo de laminación contiene un margen de perdidas muy bajas que permite trabajar a una inducción de hasta 1.8 Webers/m². Este tipo de lámina se utiliza principalmente en transformadores de potencia en donde uno de los principales problemas que se presentan es que se generan mayores pérdidas en el núcleo.



4.3. Cálculo de los volts/espira (v/e)

Para el desarrollo de este cálculo se parte de la ecuación fundamental para el diseño del transformador, que es la ecuación de la "inducción de voltaje" generado por "V" en un conductor que esta enrollado en "N" vueltas y que se encuentra sometida a un flujo variable con el tiempo:

$$V = -N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{ec.(4.3.1)}$$

Donde el flujo tiene la característica $\phi = \phi_m \cos \omega t$; si sustituimos en V

$$V = -N \phi_m \frac{d \cos \omega t}{dt} \quad V = -N \phi_m (-\text{sen } \omega t) \omega \quad \text{ec.(4.3.2)}$$

Sabiendo que:

$$\omega = 2\pi f \quad \text{y} \quad \phi_m = Bm$$

para el valor promedio de $Bm = B/2$ y el voltaje eficaz en volts, por lo tanto:

$$V_m = \frac{\sqrt{2} \cdot 2\pi \cdot f}{2} N Bm A \cdot 10^{-8} \quad (\text{volts}) \quad \text{ec.(4.3.3)}$$

$$V_m = 4.44 f N Bm A \cdot 10^{-8} \quad (\text{volts}) \quad \text{ec.(4.3.4)}$$

Obteniendo el voltaje por vuelta se tiene:

$$\frac{V_m}{N} = 4.44 f Bm A \cdot 10^{-8} \quad (\text{volts/vuelta}) \quad \text{ec.(4.3.5)}$$

Esta es la ecuación fundamental para iniciar el diseño de los transformadores. A su vez, dicha ecuación puede verse afectada por factores que dependerán entre otras cosas por la técnica aplicada, tipo de construcción, cuestiones empíricas que en función de la experiencia se van modificando para tomar en cuenta las imperfecciones que se introducen por manufactura, y los materiales utilizados; también cabe señalar las condiciones ambientales y procesos realizados durante la fabricación del equipo.

Existe otro método más práctico basado esencialmente en la experiencia del diseñador y de una gran base de datos obtenidos de los resultados de algunos diseños. Podemos entonces decir que:

Para calcular los volts por vuelta es necesario tener el conocimiento basado sobre todo en el comportamiento del transformador y de la forma en que va diseñar así como también de las condiciones de operación y los materiales a utilizar.



A partir de esto podemos establecer algunos factores que estarán directamente relacionados con la potencia y la impedancia del transformador, y a su vez determinar un densidad de flujo promedio que estará entre un valor de 13500 y 17000 gauss de líneas de flujo en el núcleo.

Este rango es ideal para que el núcleo del transformador no este saturado con respecto al flujo que pasa por él, y pueda haber problemas de saturación, calentamiento y por consecuencia provoque un incremento de pérdidas en el hierro (watts).

NOTA:

Para una impedancia mayor del 5 % se debe utilizar un factor entre 10-16.

Para una impedancia menor del 5 % se debe utilizar un factor entre 16-20.

$$V/E = \frac{1}{4.44} M \cdot A \cdot X \text{ factor (volts/ espira)} \quad \text{ec.(4.3.6)}$$

Si despejamos a las espiras tendremos:

$$E = \frac{\text{Volts}}{.444} \cdot X \text{ factor (espiras)} \quad \text{ec.(4.3.7)}$$

Este valor se toma aparente, debido a que el valor real resulta cuando se calculan las vueltas de los devanados reales, esto a consecuencia de que las vueltas de los devanados se deben redondear quedando en numero par y hace que los volts por espira varíen.

4.3.1. Cálculo de espiras en devanado primario y secundario.

Para el devanado primario se considera el voltaje inducido o fuerza electromotriz a la tensión aplicada, despreciando así la caída tensión, en los transformadores trifásicos la tensión a considerar es la de fase. En la fórmula anteriormente señalada conviene señalar que "N" representa el número total de espiras por fase. Por lo tanto cuando hay espiras formadas por conductores en paralelo, se considera una sola vuelta. Para el primario o secundario se tiene:

$$V_p = 4.44 f N_p \phi_m \quad \text{ó} \quad V_s = 4.44 f N_s \phi_m \quad \text{ec.(4.3.8)}$$

Para el cálculo de las vueltas en los devanados primario y secundario se utilizan como datos principales los voltajes (dependiendo que devanado se calcule, se toma su voltaje correspondiente) y los volts por vuelta, ya antes calculados.

a). *Devanado Primario.*

$$\text{Espiras primario } (N_p) = \frac{V_p}{4.44 \cdot f \cdot \phi_m} \quad \text{ó también} \quad (N_p) = \frac{\text{Volts(primario)}}{\text{Volts/espira}} \quad \text{ec.(4.3.9)}$$

a). *Devanado Secundario,*

$$\text{Espiras secundario (Np)} = \frac{I_n}{4.44 \cdot f \cdot \phi_m} \quad \text{ó también} \quad (Np) = \frac{\text{Volts(secundario)}}{\text{Volts/espira}} \quad \text{ec.(4.3.10)}$$

Nota: Para no tener problemas en los devanados es conveniente trabajar con vueltas enteras o pares, por lo tanto este resultado debe ser un número entero u múltiplo de 2. Entonces de este resultado se calculan los volts/espira reales.

$$\text{Volts/espira} = \frac{\text{Volts(secundario)}}{\text{Espiras(reales)}} = (V/E) \quad \text{ec.(4.3.11)}$$

Para el cálculo del devanado primario hay que hacer ciertas consideraciones con respecto a las especificaciones particulares del cliente, en la cual en ocasiones se nos pide una regulación de cinco posiciones en el devanado tomando en cuenta la posición nominal. Esta regulación puede estar designada de la siguiente manera:

- a) Derivaciones: (+1.3 de 2.5 % cada posición).
- b) Derivaciones: (+2.2 de 2.5 % cada posición).
- c) Derivaciones: (+1.3 de 2.5 % cada posición).

Entonces para el cálculo de este devanado se toma la posición más alta, es decir la posición número 1, y que es el 2.5 % por cada posición arriba de la posición nominal.

Posición Máxima = (posición nominal) x (el 2.5% de cada posición arriba de la nominal)

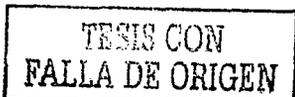
$$\text{Espiras (Pm)} = \frac{\text{Volts (posición - máxima)}}{\text{Volts/espira}} \quad \text{ec.(4.3.12)}$$

4.4. Cálculo de la densidad de flujo magnético (Bc)

Para el cálculo de la densidad de flujo magnético, primeramente se tiene que calcular el flujo máximo total (ϕ_m) que como formula principal tiene la llamada ecuación general del transformador y se aplica por igual a los voltajes inducidos en el primario.

Devanado primario: $E_p = 4.44 \cdot N_p \cdot \phi_m f \cdot 10^{-8}$ (volts) ec.(4.4.1)

Devanado secundario: $E_s = 4.44 \cdot N_s \cdot \phi_m f \cdot 10^{-8}$ (volts) ec.(4.4.2)



Donde:

- E_p = Tensión Primaria. (Volts)
- E_s = Tensión Secundaria. (Volts)
- N_p = Numero de vueltas en el primario.
- N_s = Numero de vueltas en el secundario.
- F = Frecuencia. (Hertz)
- ϕ_m = Flujo máximo total. (Maxwell)

Ahora bien despejando ϕ_m de ecuación (1); obtenemos lo siguiente:

$$\phi_m = \frac{E_p \cdot 10^8}{4.44 \cdot f \cdot N_p} = (\text{maxwell}) \quad \text{ec.(4.4.3)}$$

Nota: Esta formula se aplica solo para el devanado primario o secundario, aplicándose principalmente en el circuito de mayor tensión para obtener así el flujo máximo.

Entonces procedemos a calcular la densidad de flujo máximo, lo cual se calcula tomando en cuenta el flujo máximo total con respecto a un área determinada, que no es más que el área de la sección transversal del núcleo.

$$\beta_c = \frac{\phi_m}{A} \quad (\text{maxwell} / \text{cm}^2) \quad \text{ó} \quad (\text{lineas} / \text{cm}^2) \quad \text{ec.(4.4.4)}$$

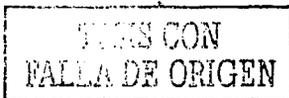
y en función del volts/espira tendríamos lo siguiente:

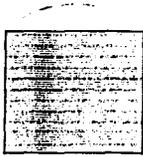
$$\beta_c = \frac{375375 \cdot v / e (\text{maxwell})}{\text{área} - \text{núcleo} (\text{cm}^2)} = (\text{maxwell} / \text{cm}^2) \quad \text{ec.(4.4.5)}$$

Nota: La β_c debe estar en un rango de 13000 a 17500 gauss de líneas de flujo y deberá ajustarse según criterio del diseñador, para evitar una saturación en el núcleo y evitar generar valores altos de pérdidas magnéticas.

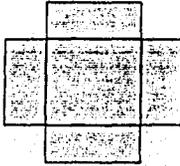
4.4.1. Selección y cálculo del área del núcleo.

Para determinar el área del núcleo (A_n), se selecciona el diámetro del mismo según el criterio y la experiencia del diseñador; así como también la forma del mismo. Existen tres formas básicas de núcleo que están basadas de acuerdo al tipo de construcción y al uso del mismo; pueden ser cuadrado, cruciforme o de escalones. Esta última es la más usual en transformadores de mediana y alta potencia debido a que su construcción se acerca más a la forma de un círculo, aprovechando al máximo la circulación del flujo magnético y evitando en forma considerable las corrientes de Eddy aunque no en su totalidad.





a) Núcleo cuadrado



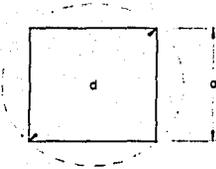
b) Núcleo cruciforme



c) Núcleo escalonado

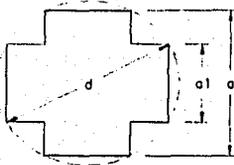
Fig.(4.1) Formas de núcleos, núcleo cuadrado, cruciforme y escalonado

De acuerdo a lo anterior se pueden deducir las siguientes expresiones para poder obtener las dimensiones del arreglo del núcleo de acuerdo a cada una de las formas anteriormente mencionadas.



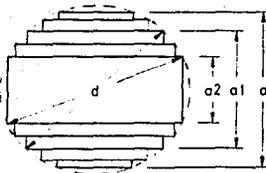
$$\frac{\text{área de la sección}}{\text{área del círculo circunscrito}} = \frac{S}{S_c} = 0.637$$

$$S_c = \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{y} \quad S = a^2$$



$$\frac{S}{S_c} = 0.785$$

$$\frac{a}{d} = 0.85 \frac{a1}{a2} = 0.526$$



$$\frac{S}{S_c} = 0.850$$

$$\frac{a}{d} = 0.907 \frac{a1}{a2} = 0.707$$

$$\frac{a2}{d} = 0.423$$

Fig.(4.2) Esquema para calcular el diámetro y los espesores de un núcleo escalonado.

Después de haber determinado el valor de la sección y establecida la forma (según sea el caso, cruciforme, de cruz o de escalones) se obtiene el radio de la circunferencia circunscrita, tomando en consideración el factor de empaquetamiento (al ensamblar el núcleo con los herrajes o culatas), cuyos valores pueden ser:

0.86 - 0.90	para laminaciones aisladas con papel.
0.90 - 0.92	para laminaciones aisladas en barniz.
0.85 - 0.90	para núcleos con escalones.

Para transformadores de núcleo acorazado, la sección del núcleo es normalmente rectangular.

4.5. Densidad de corriente.

La densidad de corriente (expresada en amperes/mm²) en los conductores usados en la fabricación de transformadores depende desde luego de la sección o área de los conductores, pero para un cierto conductor dado, esencialmente depende del tipo de enfriamiento usado.

La densidad en bobinados de alta y baja tensión en cobre deberá estar entre 2.5 y 3.5 para transformadores enfriados en aceite, para el caso de transformadores secos debe estar entre 1.5 y 2.0.

Para los bobinados en aluminio la densidad debe trabajar a densidades más bajas que en el cobre, aproximadamente entre el 1.5 y 2.0 para transformadores en aceite. Estas densidades son solo recomendadas de acuerdo a las necesidades de trabajo. Esta densidad esta determinada por la siguiente ecuación.

$$\rho = \frac{\text{corriente}(I)}{\text{área - conductor}(A)} \Rightarrow \frac{\text{amp}}{\text{mm}^2} \quad \text{ec.(4.5.1)}$$

Para el desarrollo del cálculo de las densidades en el primario y secundario solo hay que sustituir valores de acuerdo a las características del circuito que se vaya analizar.

4.6. Los amperes-vuelta por unidad de longitud en la columna.

Para determinar la altura de las columnas o bien para verificar el valor obtenido en base al diámetro de la circunferencia circunscrita a la sección de éste, sirve el parámetro de los amperes-espira, donde:

$$\text{ampere - espira/cm} = \frac{N_1 \cdot I_1}{h} = \frac{N_2 \cdot I_2}{h} \quad \text{ec. (4.6.1)}$$

de donde:

$$h(\text{cm}) = \frac{\text{amp - espira}}{\text{amp - espira/cm}} \quad \text{ec. (4.6.2)}$$

N_1 y N_2 son las espiras en serie por fase del primario y secundario respectivamente, y las corrientes primaria y secundaria son I_1 y I_2 respectivamente. Para que el dimensionamiento del núcleo sea bien realizado, es necesario que el valor de tal parámetro se encuentre dentro de los límites de la práctica constructiva que indica las conveniencias para los distintos tipos de transformadores en función de la potencia. Tales límites de valores medios se dan en la tabla siguiente:

POTENCIA KVA	AMPERE-ESPIRA/CENTIMETRO			
	TRIFASICO		MONOFASICO	
	TIPO COLUMNA	TIPO ACORAZADO	TIPO COLUMNA	TIPO ACORAZADO
1	50 - 66	65 - 83	60 - 80	100 - 130
5	85 - 100	110 - 130	100 - 120	170 - 200
10	95 - 120	124 - 156	115 - 140	190 - 240
50	150 - 200	196 - 260	180 - 240	300 - 400
100	170 - 250	220 - 320	200 - 240	340 - 500
500	230 - 300	300 - 390	270 - 360	460 - 600
1000	280 - 300	360 - 480	430 - 570	560 - 740
5000	420 - 500	550 - 650	500 - 600	840 - 1000
10000	550 - 650	720 - 850	660 - 780	1100 - 1300

Tabla 4.2. Valores medios de amper-espira/cm en función de la potencia y tipo de transformadores.

4.7. Aislamiento entre devanados y entre devanados y núcleo.

El aislamiento entre los devanados y entre estos y el hierro del núcleo sobre el cual se encuentran devanados, se puede hacer de distintas formas, según sea el tipo de transformador. Salvo los casos de transformadores de potencia muy pequeña y del tipo núcleo acorazado, el aislamiento se logra siempre por medio de tubos aislantes (de papel baquelizado, celonita y similares por otra parte, la limitada rigidez dieléctrica del aire, la presencia de polvos y la humedad, hacen que sea preferente el uso de transformadores en aceite cuando la tensión sobrepasa de los 4 a 6 Kv.

Naturalmente con el aumento de la tensión, el espesor de los aislamientos aumenta, por lo tanto, considerando que el uso de espesores notables para los tubos aislantes, encuentra ciertas limitaciones ya sea para fabricación como para el comportamiento del material a las sollicitaciones dieléctricas, para tensiones de 30 a 40 Kv., en lugar de un tubo se tienen dos o más concéntricos, entre los cuales se deja una tolerancia de al menos 10 y 15 mm. para permitir la circulación del aceite interpuesto y por lo tanto el enfriamiento. En este caso el espesor de los tubos puede ser de 3 a 5 mm.

Para tensiones de operación de hasta 40 Kv., los espesores de los tubos se adoptan como los antes indicados. En la tabla siguiente se da como una medida de orientación la relación entre el espesor del tubo (en mm.) y la tensión de operación (en Kv).

ESPESOR DEL TUBO (mm)	TENSIÓN DE OPERACIÓN (Kv)
4	10
5	15
6	20
7	25
8	30
10	40

Tabla 4.3 Espesor de tubos aislantes contra tensión de operación en transformadores.

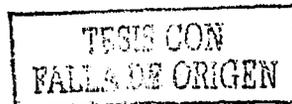
Cuando los tubos se subdividen, el espesor del conjunto aislante (tubo-aceite) se puede calcular prácticamente con la expresión:

$$d = 0.06 \cdot V \text{ (cm)}$$

ec. (4.7.1)

donde:

V = máxima tensión de los tubos, expresada en Kv.



4.8. Distancias entre devanados y el yugo y entre los devanados y el tanque.

Estas distancias mínimas no sólo están relacionadas a las tensiones de operación, también lo están a la distribución del campo eléctrico en los puntos considerados. Con tal propósito, cualquier reducción para mejorar las distribuciones del campo eléctrico, debe ser un propósito del diseño. En la siguiente figura se indican cuales son las distancias consideradas.

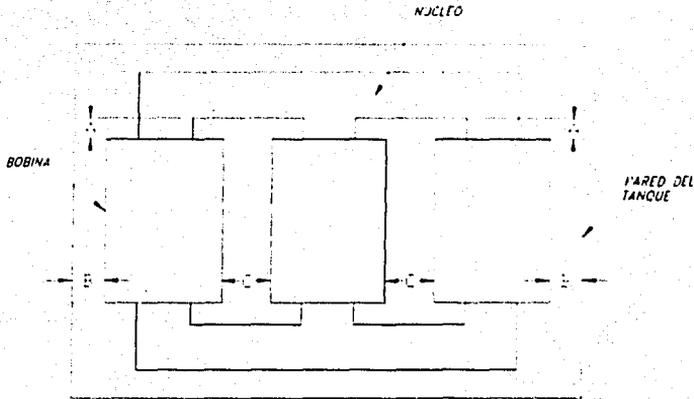
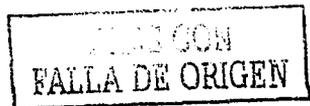


Fig.(4.3) Representación esquemática de distancias entre partes vivas y partes metálicas o puestas a tierra.

Con la relación a la figura anterior y a título de orientación, se dan los siguientes valores de distancias mínimas en la tabla siguiente:

Por razones prácticas, se recomienda no usar valores inferiores a los siguientes:

Para A:	en aire	35 mm.
	En aceite	20 mm.
Para B:	en aceite	40 mm.



TENSIÓN DE OPERACIÓN	3	5	10	20	30	40	50	60	70	100
EN AIRE "A" MIN (mm)	35	50
EN ACEITE "A" MIN (mm)		25	35	55	80	90	100	120	130	180
"B" MIN (mm)		50	60	75	85	100	120	140	150	180

Tabla 4.4. Distancias mínimas de operación en aceite

Entre los devanados de columnas adyacentes se deben respetar también (ciertos valores mínimos, indicados por la distancia C en la figura anterior, esta distancia se puede obtener de la relación:

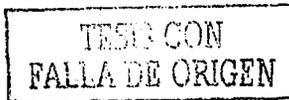
$$C = 0.8 \text{ Kv} \quad Y \quad C = 0.9 \text{ Kv} \quad \text{Ec. (4.8.1)}$$

Cuando se usa un diafragma aislante, (pantalla entre bobinas) esta distancia puede descender hasta 10 o 50 mm. dependiendo de la tensión máxima del circuito.

4.9. Dimensionamiento de los transformadores trifásicos de potencia enfriados por aceite.

Dentro de esta categoría se puede ubicar a los transformadores que comprenden potencias que van desde los 3500 KVA en adelante; con tensiones primarias de 115000 Kv o valores alrededor de éste. Las tensiones secundarias normalizadas dependen en cierta medida de la aplicación específica y pueden ser por ejemplo 13200 volts, 2300 volts y 34500 Kv entre fases, con una frecuencia normalizada que el caso de México es de 60 Hz. Por éste y algunos otros problemas como son las pérdidas, el calentamiento que es común a todas las máquinas, adquiere importancia el problema del aislamiento.

Por lo general en los procedimientos de cálculo de los transformadores se hace uso de fórmulas y expresiones que algunas veces no tienen deducción matemática alguna, más bien son resultado del producto de la experiencia, del tipo de materiales usados y su calidad, etc., y que además no son aplicables a todos los casos, por lo que no existe un procedimiento de cálculo único y general.



4.10. Diseño de un transformador de potencia tipo subestación.

El cálculo para el diseño de un transformador de potencia da principio en cuanto se conocen los datos generales del mismo, los cuales son proporcionados por el cliente (C.F.E.) por medio de un documento llamado "especificación" (C.F.E. K0000-13). En la cual se describen todas las características que el cliente necesita en un transformador y están basadas en normas nacionales y algunas veces también internacionales.

DATOS:

Potencia:	18000/24000/30000 KVA
Tensión primaria:	115000 Volts.
Tensión Secundaria:	13800 / 7967 Volts.
Conexión:	DELTA-ESTRELLA.
Derivaciones:	+1-3 DE 2.5% c / posición.
Fases/Frecuencia:	3 fases / 60 hertz.
Tipo de Enfriamiento:	OA/FA1/FA2.
Elevación de temperatura:	55 / 65 °C.
Elevación de Operación (m.s.n.m.)	2300 m.
Devanados a.t./b.t.	Cobre/Cobre.
Impedancia:	9 %.
Normas aplicables:	K0000-13

a) Cálculo de los volts/espira (v/e).

Este valor debe ser el adecuado para encontrar una densidad que este los 13000 y 16000 gauss de líneas de flujo en el núcleo.

Este rango es ideal para que el núcleo del transformador no este saturado con respecto al flujo que pasa en él, y además evitar problemas de saturación, calentamiento y por lo consecuente provoque un incremento en de perdidas en el fierro (Wfe).

NOTA:

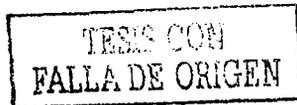
Para una impedancia mayor del 5 % se debe utilizar un factor entre 17-20.

Para una impedancia menor del 5 % se debe utilizar un factor entre 12-16.

$$V/E = \sqrt{MVA} \times \text{factor}$$

$$V/E = \sqrt{18} \times 18 = 76.3675 \text{ volts/espira.}$$

Este valor se toma aparente, debido a que el valor real resulta cuando se calculan las vueltas de los devanados reales debido a que las vueltas de los devanados se deben redondear quedando en número par y por lo consecuente hace que los volts por espira varien.



b) Cálculo de espiras en devanado primario y secundario.

Para el cálculo de las vueltas en los devanados primario y secundario se utilizan como datos principales los voltajes (dependiendo que devanado se calcule, se toma su voltaje correspondiente) y los volts/espira, ya antes calculados.

✓ Para el devanado secundario se tiene que:

$$\text{Espiras (s)} = \frac{\text{Volts(Secundario)}}{\text{Volts/espira}} = \frac{7967}{76\ 6812} = 104.3244 - (\text{espiras})$$

Para comodidad y por cuestiones prácticas es recomendable manejar vueltas pares o enteras en los devanados; por lo tanto, el valor anteriormente calculado debe redondearse a una cantidad de vueltas par, y tendríamos entonces:

$$E = 104 \text{ espiras.}$$

Ahora bien con las espiras obtenidas podemos calcular los volts/espira reales.

$$\text{Volts/espira} = \frac{\text{Volts(Secundario)}}{\text{espiras - reales}} = \frac{7967}{104} = 76.6058 \text{ v/e}$$

✓ Para el devanado primario se tiene:

Para el cálculo de este devanado hay que hacer ciertas consideraciones y observaciones con respecto al número de derivaciones que debe de haber y a la desviación entre ellas; en este caso se considerarán cinco posiciones con una desviación de (+1-3 de 2.5 % cada posición), tomando como referencia la posición 2 será la posición nominal.

Entonces para el cálculo de este devanado se parte de la posición más alta (posición N. 1), y que esta 2.5 % arriba de la posición nominal.

$$\text{Posición 1} = \text{posición nominal} \times 1.025 = 115000 \times 1.025$$

$$\text{Posición 1} = 117875 \text{ volts.}$$

$$\text{Espiras (e)} = \frac{\text{Volts(posición - N1)}}{\text{volts/espira}} = \frac{17875}{76.6058} = 1538.72 \text{ espiras.}$$

Tomando el mismo criterio para el cálculo de las espiras tendremos que redondear a un número par por lo tanto las espiras reales en devanado de a.t. sería de 1538 espiras reales.



c) Selección y cálculo del área del núcleo.

Para determinar el área del núcleo (A_n), podemos apoyarnos de la ecuación (4.4.5) donde de alguna manera podemos calcular empíricamente el área del núcleo; como esta ecuación esta relacionada con la densidad de flujo, y es un valor que aun no conocemos, tenemos que apoyarnos de la (tabla 4.5) y poder seleccionar una densidad de acuerdo a la capacidad del transformador.

Potencia KVA	volts/espira v/e	densidad de flujo maxwell/cm ²
5000	36	16000-16500
7500	44	15000-15500
10000	52	14500-15500
12000	68	15500-16500
18000	75	13000-14000
24000	94	13000-13500

Tabla 4.5 Relación de los v/e y densidad de flujo de acuerdo a la capacidad del transformador

De esta tabla podemos tomar un valor aleatorio en la densidad de acuerdo a la potencia del transformador y obtener un valor empírico para el área del transformador. Ahora bien si consideramos una densidad de 13000 con la ecuación siguiente.

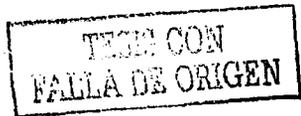
$$\mu_c = \frac{375375 * v/e \text{ (maxwell)}}{\text{área - núcleo (cm}^2\text{)}} = (\text{maxwell / cm}^2)$$

y despejando al área tendremos que:

$$A_c = \frac{375375 * 76.6058}{13000} = 2211.99 \text{ cm}^2$$

ésta sería el área efectiva; para poder dimensionar el núcleo se necesita la sección geométrica, por lo que hay que considerar un factor de apilamiento que depende básicamente del espesor de la lámina; en este caso este factor es de **0.985**, entonces podemos decir que el área geométrica sería igual a:

$$A_g = A_c * 0.985 = 2211.99 * 0.985 = 2178.81 \text{ cm}^2$$



Ahora bien una vez obtenida el área aproximada, podemos apoyarnos de la ecuación:

$$a = \frac{\pi}{4} d^2$$

despejando al diámetro y afectando al área por un factor de 1.5 considerado como un factor de relleno tendríamos que:

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi} a * 1.15} = \sqrt{\frac{4}{\pi} 2178.81 * 1.15} = 56.48 \text{ mm}$$

Seleccionando un diámetro de acuerdo a una dimensión standar en los cortes admitidos por la máquina troqueladora y considerando normalmente que el diámetro del núcleo sea múltiplo de 10; entonces $d = 560 \text{ mm}$, esto con la finalidad de poder dimensionar los escalones y poder obtener tener un arreglo la mas cruciforme posible. El número de escalones esta de acuerdo al criterio de diseño y normalmente el ancho del primer escalón es 20 mm menor al diámetro del núcleo.

Diámetro del núcleo = 560 mm.
Número de escalones = 14 escalones.
Ancho de los escalones.

Escalón 1 = 540 mm.
Escalón 2 = 520 mm.
Escalón 3 = 500 mm.
Escalón 4 = 480 mm.
Escalón 5 = 460 mm.
Escalón 6 = 440 mm.
Escalón 7 = 420 mm.

Escalón 8 = 400 mm.
Escalón 9 = 380 mm.
Escalón 10 = 360 mm.
Escalón 11 = 340 mm.
Escalón 12 = 320 mm.
Escalón 13 = 300 mm.
Escalón 14 = 280 mm.

1) Espesores.

Lo siguiente es calcular los espesores de cada escalón con la siguiente fórmula siguiendo el orden del escalón 1 al escalón 14.

$$\text{Espesor} = \sqrt{(\phi_{\text{nucleo}})^2 - (\text{ancho})^2}$$

$$\text{Escalón 1} = \sqrt{(560)^2 - (540)^2} = 148.32 \text{ mm}$$

$$\text{Escalón 2} = \sqrt{(560)^2 - (520)^2} = 207.85 \text{ mm}$$

$$\text{Escalón 3} = \sqrt{(560)^2 - (500)^2} = 252.19 \text{ mm}$$

$$\text{Escalón 4} = \sqrt{(560)^2 - (480)^2} = 288.44 \text{ mm}$$

$$\text{Escalón 5} = \sqrt{(560)^2 - (460)^2} = 319.37 \text{ mm}$$

Escalón 6 =	$(560)^2 - (440)^2 = 346.41 \text{ mm}$
Escalón 7 =	$(560)^2 - (420)^2 = 370.41 \text{ mm}$
Escalón 8 =	$(560)^2 - (400)^2 = 391.92 \text{ mm}$
Escalón 9 =	$(560)^2 - (380)^2 = 411.34 \text{ mm}$
Escalón 10 =	$(560)^2 - (360)^2 = 428.95 \text{ mm}$
Escalón 11 =	$(560)^2 - (340)^2 = 444.97 \text{ mm}$
Escalón 12 =	$(560)^2 - (320)^2 = 459.057 \text{ mm}$
Escalón 13 =	$(560)^2 - (300)^2 = 472.86 \text{ mm}$
Escalón 14 =	$(560)^2 - (280)^2 = 484.97 \text{ mm}$

ii) *Diferencia de espesores.*

Esta dimensión es de gran utilidad para dimensionar el corazón del núcleo lo más cercano a una circunferencia y conocer realmente cuanto mide nuestro escalón y consecuentemente calcular el área del mismo.

ESC. 1 = Esc. 1 =	148.32 mm.
ESC. 2 = Esc. 2 - Esc. 1 =	207.85 - 148.32 = 59.53 mm.
ESC. 3 = Esc. 3 - Esc. 2 =	252.19 - 207.85 = 44.34 mm.
ESC. 4 = Esc. 4 - Esc. 3 =	288.44 - 252.19 = 36.25 mm.
ESC. 5 = Esc. 5 - Esc. 4 =	319.37 - 288.44 = 30.93 mm.
ESC. 6 = Esc. 6 - Esc. 5 =	346.41 - 319.37 = 27.04 mm.
ESC. 7 = Esc. 7 - Esc. 6 =	370.41 - 346.41 = 24.00 mm.
ESC. 8 = Esc. 8 - Esc. 7 =	391.92 - 370.41 = 21.51 mm.
ESC. 9 = Esc. 9 - Esc. 8 =	411.34 - 391.92 = 19.42 mm.
ESC 10 = Esc. 10 - Esc. 9 =	428.95 - 411.34 = 17.61 mm.
ESC 11 = Esc. 11 - Esc. 10 =	444.97 - 428.95 = 16.02 mm.
ESC 12 = Esc. 12 - Esc. 11 =	459.57 - 444.97 = 14.60 mm.
ESC 13 = Esc. 13 - Esc. 12 =	472.86 - 459.57 = 13.29 mm.
ESC 13 = Esc. 14 - Esc. 13 =	484.97 - 472.86 = 12.11 mm.

iii) *Cálculo del área del escalón.*

área del escalón = ancho x espesor

ESC. 1 =	540 x 148.32 = 80092.8 mm ² .
ESC. 2 =	520 x 53.53 = 27835.6 mm ² .
ESC. 3 =	500 x 44.34 = 22170 mm ² .
ESC. 4 =	480 x 36.25 = 17400 mm ² .

d) Cálculo de la densidad de flujo magnético (densidad de flujo B_c).

Para el cálculo de la densidad de flujo magnético, primeramente se tiene que calcular el flujo máximo total (ϕ_m) que como fórmula principal tiene la llamada ecuación general del transformador y se aplica por igual a los voltajes inducidos en el secundario. Por cuestiones prácticas se considera el cálculo referido a el voltaje inducido en el secundario por tener menos vueltas, lo que resulta un valor más cercano a lo real; por lo tanto tenemos que:

Devanado secundario:

$$E_s = 4.44 \cdot N_s \cdot f \cdot \phi_m \cdot 10^{-8} \text{ volts}$$

Donde:

E_s = voltaje inducido en el secundario.

N_s = número de vueltas en el secundario.

f = frecuencia. (60 hz.)

ϕ_m = flujo máximo total (Maxwell)

Despejando ϕ_m de la ecuación anterior. Obtenemos lo siguiente:

$$\phi_m = \frac{E_s \cdot 10^8}{4.44 \cdot f \cdot N_s} = (\text{maxwell})$$

$$\phi_m = \frac{7967 \cdot 10^8}{4.44 \cdot 60 \cdot 104} = 28755919.38 \text{ maxwell}$$

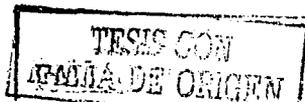
Ahora procedemos a calcular la densidad de flujo máximo, lo cual se calcula tomando en cuenta el flujo máximo total con respecto a un área, que es la sección transversal del núcleo ya antes calculado, por lo tanto:

$$\beta_c = \frac{\phi_m}{A} \text{ (maxwell/cm}^2\text{) ó (lineas/cm}^2\text{)}$$

sustituyendo:

$$\beta_c = \frac{28755919.38 \text{ maxwell}}{2109.11 \text{ cm}^2} = 13634.15 \text{ (maxwell/cm}^2\text{)}$$

la lámina utilizada es del tipo 27ZDKH95 y a esta densidad tendremos un core loses de 0.82 w/kg, aproximadamente. (dato obtenido de gráfica del proveedor).



e) **Determinación de los voltajes de A.T. y B.T.**

i) **voltajes a.t.**

Para la determinación de los voltajes de A.T. se calculan dependiendo de las derivaciones que la especificación indique. Es este caso contamos con 5 derivaciones o taps con una desviación de (+1-3 de 2.5 % c/u). Esto quiere decir que tenemos 1 posición arriba y 3 abajo de la posición nominal. Para cálculo de esto se tiene que:

$$\text{Posición} = (\text{posición nominal} \times (\pm/2.5 \%)) + \text{posición nominal.}$$

Desarrollando tenemos:

$$\begin{aligned} \text{Posición (+1)} &= (115000 \times (.025)) + 115000 = 117875 \text{ Volts.} \\ \text{Posición nominal} &= 115000 \text{ Volts.} \\ \text{Posición (-1)} &= (115000 \times (-.025)) + 115000 = 112125 \text{ Volts.} \\ \text{Posición (-2)} &= (115000 \times (-.050)) + 115000 = 109250 \text{ Volts.} \\ \text{Posición (-3)} &= (115000 \times (-.075)) + 115000 = 106375 \text{ Volts.} \end{aligned}$$

ii) **voltajes b.t.**

En algunos casos se requieren tener derivaciones en b.t. este caso como la especificación no establece que tenga que haber derivaciones en b.t. sus voltajes tendrían que ser los mismos calculados anteriormente de manera que tendríamos:

$$\begin{aligned} \text{Voltaje de línea} &= 13800 \text{ Volts.} \\ \text{Voltaje de fase} &= \text{voltaje de línea} \times \sqrt{3} \\ \text{Voltaje de fase} &= 13800 \times \sqrt{3} = 7967 \text{ Volts.} \end{aligned}$$

$$\text{Por lo tanto: Voltaje B.T.} = 13800/7967 \text{ Volts.}$$

f) **Determinación de las vueltas de bobina de a.t. con respecto a cada posición.**

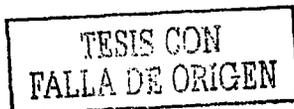
Este cálculo se realiza con el fin de determinar el número de vueltas que hay entre cada posición y dimensionar así la bobina y encontrar el punto de unión entre cada derivación y poder sacar las puntas de los taps de conexión. Ahora bien:

$$\text{Se tiene que: } \text{Número de espiras} = \frac{\text{volts}(\text{posición})}{\text{volts / espiras}}$$

Sustituyendo tenemos que:

Para la posición (+1)

$$\text{Número de espiras} = \frac{117875 \text{ volts}}{76.6058 (v/e)} = 1538.72 \approx 1540$$



Para la posición (nominal)

$$\text{Número de espiras} = \frac{115000 \text{ volts}}{76.6058 \text{ (v/e)}} = 1501.19 \approx 1502$$

Para la posición (-1)

$$\text{Número de espiras} = \frac{112125 \text{ volts}}{76.6058 \text{ (v/e)}} = 1463.66 \approx 1464$$

Para la posición (-2)

$$\text{Número de espiras} = \frac{109250 \text{ volts}}{76.6058 \text{ (v/e)}} = 1426.13 \approx 1426$$

Para la posición (-3)

$$\text{Número de espiras} = \frac{106375 \text{ volts}}{76.6058 \text{ (v/e)}} = 1388.60 \approx 1388$$

Para conocer el número de espiras que existe entre una derivación y otra habría que realizar la diferencia entre cada posición es decir.

(Posición +1)	= 1540 vueltas.
(Posición nominal)	= 1540 - 1502 = 38 vueltas.
(Posición -1)	= 1502 - 1464 = 38 vueltas.
(Posición -2)	= 1464 - 1426 = 38 vueltas.
(Posición -3)	= 1426 - 1388 = 38 vueltas.

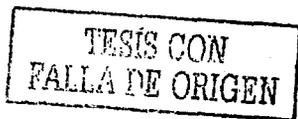
Se pretende que por cuestiones prácticas las espiras que hay entre cada una de las posiciones sea múltiplo de 2 y que a su vez el rango entre cada paso de las derivaciones sea el mismo o por lo menos existe una relación coherente entre una y otra.

En este tipo de cálculo hay que tener cuidado en el redondeo de las espiras pares; ya que por norma se establece un máximo error de relación de transformación del 5%. Con lo establecido anteriormente podemos observar que el máximo error se obtiene en la posición máxima, es decir en la posición número +1, ahora bien para calcular el % de error permitible tenemos la siguiente ecuación:

$$\%e = \frac{\text{espiras redondeadas} - \text{espiras calculadas}}{\text{espiras calculadas}} \times 1000$$

$$\%e = \frac{1540 - 1538.72}{1538.72} \times 1000 = 0.83\%$$

NOTA: Por el redondeo que se le aplica a las espiras, se tiene por norma considerar una tolerancia de +/- 0.5 % para la medición real del voltaje de A.T.



g) Regulación del voltaje.

El voltaje de regulación en transformadores, es la diferencia en terminales del primario en vacío y el voltaje en las mismas a plena carga. Expresado normalmente en términos de porcentaje. Como se ha indicado los transformadores por norma se construyen con cuatro derivaciones y una posición nominal (+/- 2, +1-3 y +3-1 de 2.5 c/u), que también el rango de porcentaje de regulación por norma no debe pasar del 10 %.

La fórmula de la regulación de voltaje que debe aplicarse al transformador, para que la carga opere convenientemente a voltaje nominal, puede calcularse empleando una de las siguientes relaciones, dependiendo de la información con que se cuente y de los valores más reales posibles.

$$(a) \% \text{ Regulación} = \frac{E_2 - V_2}{V_2} * 100$$

$$(b) \% \text{ Regulación} = \frac{E_1 - V_1}{V_1} * 100$$

$$(c) \% \text{ Regulación} = \frac{E_1 (N_2 / N_1) - V_2}{E_2} * 100$$

Donde:

- E_2 = Tensión en el secundario en vacío.
- V_2 = Tensión en el secundario bajo carga.
- E_1 = Tensión en el primario en vacío.
- V_1 = Tensión en primario bajo carga.
- N_2 = Número de vueltas en el secundario.
- N_1 = Número de vueltas en el primario.

Para corregir el (%) de la regulación en campo, es preciso hacer una serie de pasos bajo la siguiente secuencia.

- ✓ Desconectar la carga del transformador.
- ✓ Desconectar el primario del transformador.
- ✓ Aterrizar el transformador.
- ✓ Mover el cambiador de derivaciones hasta la posición del tap correcto.

h) Cálculo de la corriente en los devanados

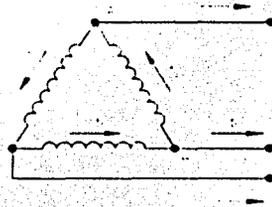
i) Devanado primario.

Para el cálculo del devanado primario, como se trata de una conexión delta se toman las siguientes formulas:

$$I_{línea} = \sqrt{3} I_f \quad I_f = \frac{I_{línea}}{\sqrt{3}}$$

$$I_{3\phi} = \frac{KVA}{\sqrt{3} KV} \Rightarrow I_{línea} = \frac{KVA}{\sqrt{3} KV}$$

$$I_{3\phi} = \frac{KVA}{3KV} \Rightarrow I_f = \frac{KVA}{3V}$$



Se toma en consideración que en conexión delta el voltaje de fase es igual al voltaje de línea, es decir que: $V_f = V_l$ por lo tanto:

$$I_f = \frac{18000}{3 \times 115} = 52.17 \text{ amperios.}$$

$$I_{línea} = \frac{18000}{\sqrt{3} \times 115} = 90.37 \text{ amperios.}$$

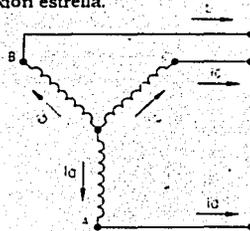
ii) Devanado secundario.

Este devanado se encuentra conectado en Conexión estrella.

$$I_l = \sqrt{3} I_f \quad I_f = \frac{I_l}{\sqrt{3}}$$

$$I_{3\phi} = \frac{KVA}{\sqrt{3} KV} \Rightarrow I_{línea} = \frac{KVA}{\sqrt{3} KV}$$

$$I_{3\phi} = \frac{KVA}{\sqrt{3} KV} \Rightarrow I_f = \frac{KVA}{3V}$$



Se toma en consideración que en conexión estrella la corriente de fase es igual a la corriente de línea, es de cir que $I_f = I_l$ por lo tanto:

$$I_f = \frac{18000}{3 \times 7.967} = 753.11 \text{ amperios.}$$

$$I_{línea} = \frac{18000}{\sqrt{3} \times 13.8}$$

i) Selección de los conductores para los devanados.

La selección del conductor dependerá básicamente de la corriente que fluirá en cada uno de los devanados, lógicamente entre más alta sea la corriente mayor va hacer el área transversal del conductor. Para esta selección se utiliza una tabla de conductores de cobre estándar, la cual se muestra enseguida.

	SOLERA DESNUDA (mm)		SOLERA FORRADA (mm)		ÁREA mm ²
	ESPESOR	ANCHO	ESPESOR	ANCHO	
AISLADA	1.4	7.0	2.5	8.1	9.3
	1.70	8.5	2.2	7.0	10.9
	2.3	6.8	2.8	7.3	15.14
CON	2.3	8.0	2.8	8.5	18.0
	2.3	10.5	2.8	11.0	23.6
PAPEL	2.8	10.5	3.3	11.0	28.9
	3.8	10.16	4.31	10.66	35.5
NEMA	6.0	12.0		6.5	53.5
AISLADA	2.8	10.5	3.0	10.7	28.9
	3.81	10.16	4.01	10.4	36.3
SINADEL	6.0	12.0	6.1	12.1	71.0
DACRON					

Tabla 4.6 Características y descripción de soleras standar

j) Cálculo de la densidad de corriente en los devanados.

i) Devanado primario.

La densidad de corriente se calcula dependiendo de la corriente que toma cada devanado sobre una sección transversal de un conductor. Para transformadores de potencia que trabajan con OA/FA/FA, se considera una densidad en un rango de 1.0 a 1.5 en OA. Si tomamos en consideración que esta densidad se eleva en proporción directa al incremento de la capacidad del transformador, hay que seleccionar una densidad adecuada y óptima de tal forma que al llegar a la última capacidad del transformador, esta densidad no sea lo suficientemente elevada y que sea capaz de soportar un flujo de corriente sin presentar un calentamiento elevado en el conductor.

La corriente necesaria para seleccionar una densidad adecuada será la corriente de fase, ya que esta corriente es la que circulará por el devanado. Es recomendable que la densidad de corriente en su posición nominal sea un valor no mayor a 1.5. Si seleccionamos un conductor de la (tabla 4.6) que sea de un uso común y utilizado regularmente en este tipo de transformadores, sería entonces un conductor de (2.1x11.5).

$$\rho = \frac{I}{(A-1)} \Rightarrow \frac{\text{amp}}{\text{mm}^2}$$

$$\rho = \frac{52.17}{(2.1 * 11.5) - 1} = 2.25 \frac{\text{amp}}{\text{mm}^2}$$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Se puede observar que esta densidad es mucho mayor a lo recomendable, en este caso se pueden emplear conductores en paralelo tantos como sean necesarios y así disminuir la densidad de corriente. En este caso se pueden utilizar dos conductores y dividimos esta densidad de corriente entre dos tendríamos una densidad de 1.08 amp/mm^2 .

ii) *Devanado secundario.*

En el devanado secundario, normalmente se tiene un flujo mayor de corriente; por lo tanto tendremos una área transversal en el conductor mucho mayor que en el devanado primario; en estos casos es recomendable utilizar una serie de conductores en paralelo; ya que por cuestiones mecánicas y eléctricas resultaría impráctico devanar una bobina con un conductor demasiado robusto, además se sabe que la resistencia de un conductor esta relacionada directamente proporcional al área del mismo, por lo tanto si empleamos un conductor con una área considerable tendríamos una resistencia demasiado elevada, y si empleamos varios conductores en paralelo con un área pequeña, tendríamos una resistencia muy pequeña por estar en paralelo y además resultaría mucho más sencillo realizar el devanado.

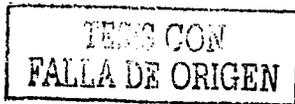
Ahora seleccionando un conductor de la (tabla 4.6), en este caso sería un conductor de (1.8x9) entonces tendríamos lo siguiente:

$$\rho = \frac{I}{A} \Rightarrow \frac{\text{amp}}{\text{mm}^2} \qquad \rho = \frac{753.11}{(1.8 * 9) - 1} = 49.55 \frac{\text{amp}}{\text{mm}^2}$$

Aplicando el mismo criterio en el caso anterior, podemos usar una serie de conductores en paralelo para distribuir la densidad. Si proponemos que sean 44 conductores en paralelo tendríamos una densidad de 1.12 amp/mm^2 lo cual resulta ser una densidad adecuada. Estas densidades son optimas para que el transformador pueda trabajar en sus diferentes capacidades sin presentar problemas de algún punto caliente en las conexiones y consecuentemente tener un incremento en pérdidas indeterminadas.

k) *Selección del tipo de bobina.*

El devanado recomendado para transformadores de potencia es el tipo galleta. Estos devanados difieren básicamente de los concéntricos en que tanto el primario con el secundario se devanan en forma de galletas, las cuales se colocan alternadamente. Estas bobinas también se devanan con cinta rectangular de cobre aislado con papel, para la última capa lleva un adhesivo termoplástico, el cual, después de proceso de secado y horneado se derrite y sujeta firmemente las vueltas para formar una bobina mecánicamente fuerte.



Estas bobinas se utilizan en la construcción de transformadores tipo shell o acorazados. Entre las principales ventajas de estos devanados tenemos:

1. Una alta capacitancia serie a través del devanado.
2. Relativa facilidad para hacer arreglos especiales de devanado y conexiones.
3. Facilidad para controlar y variar reactancia según arreglo de bobinas.
4. Adaptabilidad natural para la circulación del aceite y su relativo enfriamiento.

II Cálculo de vueltas por capa de los devanados.

i) Devanado primario

Para determinar el número de vueltas por capa, es necesario tomar el número de vueltas calculado en la posición máxima (posición N°1) que corresponde al voltaje de mayor tensión. Esta posición corresponde a una tensión de 117875 Volts y 1540 vueltas, con el experiencia del diseñador y tomando en cuenta algunas consideraciones se puede determinar lo siguiente:

A.V. = 2030

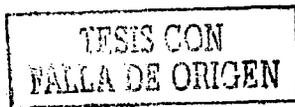
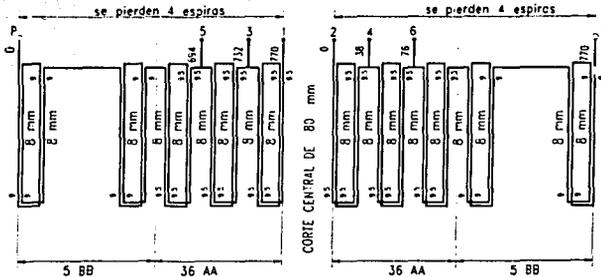
Yugos = 2 x 170 Axial aprox. = 2030 - (2*170) = 1690 mm.

$$galletas = \frac{(Axial\ Bob. - esp. central) + esp / galleta}{espesor\ conduc + esp / galleta} \quad \dots \quad galletas = \frac{(1690 - 80) + 7}{12.6 + 7} = 82.5$$

$$\frac{1540}{82} = 18.78\ esp / galletas \quad \text{realizando un arreglo tenemos lo siguiente:}$$

Galletas	capas	espiras	total espiras
72	2	9 ½	1368
10	2	9	180
		total	= 1548
		se pierden	= -8

En la siguiente figura se muestra el esquema de bobinado de A.T. de acuerdo al número de vueltas de cada posición.



ii) *Devanado secundario.*

Para este devanado tenemos un devanado fijo debido a que no existen derivaciones, por lo tanto tenemos un número de vueltas definido, el cual permanece constante cuando existe un cambio en algún tap de regulación de tensión.

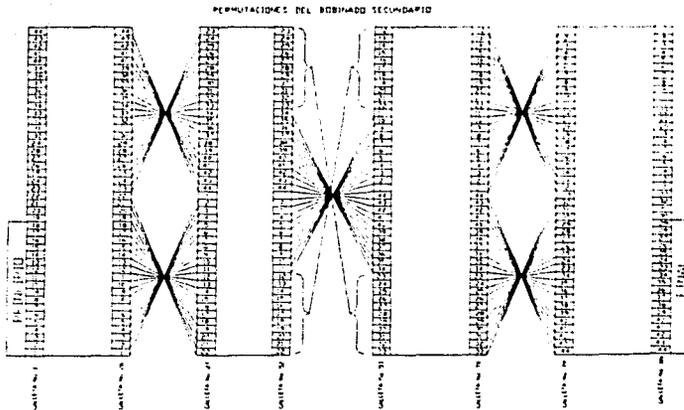
Para este caso como la cantidad de espiras es mucho menor que en el primario se utiliza el devanado helicoidal que básicamente consiste de un devanado continuo en un número determinado de galletas, es decir que tendríamos 104 galletas que corresponden básicamente a las 104 espiras que hay en el devanado secundario.

A pesar de ser un devanado un tanto sencillo por el número de espiras; se tiene una capacidad de corriente considerable, de modo que para poder hacer fluir toda esta corriente se están empleando 44 conductores en paralelo, por lo tanto para cumplir con la resistencia que debe de existir entre el principio y final del devanado entre cada conductor, deben existir cruzamientos o trasposiciones para compensar la longitud que hay entre la sección interior y exterior del devanado por lo tanto podemos decir que:

104 *espiras efectivas.*
 +5 *espiras por trasposiciones.*
+1 *espira por principio y final.*

110 *espiras totales*

A continuación se muestra un esquema de las posibles trasposiciones que deben realizarse en el transcurso de bobinar el devanado.



m) Cálculo de distancia radial y axial de los devanados.

i) Bobinado secundario.

Radial = (esp. de la solera de Cu aislada) x (núm. de vueltas en cada galleta) x (número de conductores en paralelo) + (2 mm de tolerancia).

$$\text{Radial} = (2.3 \cdot 1 \cdot 44) + 2 = 102.2 \text{ mm.} \quad \cong \quad 103 \text{ mm.}$$

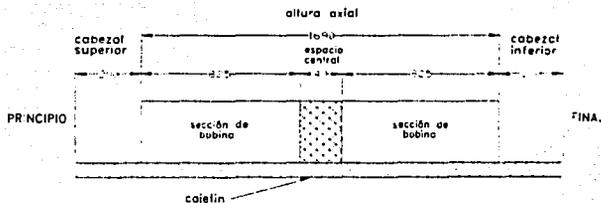
Axial = (ancho de la solera de Cu aislada) x (número de galletas) + (número de ductos de enfriamiento) x (espacio entre galletas) + (espacio central).

$$\text{Axial} = (9.5 \cdot 110) + (108 \cdot 6.0) + 40 = 1045 + 648 + 40 = 1733 \text{ mm.}$$

	Axial	Radial
Cobre	9.5(104+5+1) = 1045	2.3 x 11+1 = 12.2 \cong 103 mm.
Secciones	6*0.95*0.8 = 615.6	
Espacio central	1 x 40 = 40	

	1700.6
menos apriete	<u>10.6</u>
	1690 mm.
yugos (2 x 170)	<u>340 mm.</u>

2030 A.V.



Esta figura muestra la dimensión de la bobina.

Este apriete resulta en ocasiones ideal porque durante el proceso de secado y de deshidratación del material aislante sufre un cambio y al momento del apriete, la distancia axial de este bobinado se puede reducir en 8 mm.

ii) Bobinado primario.

Radial = 2 (esp. de la solera de Cu aislada) x (número de vueltas en cada galleta) x (número de conductores en paralelo) + (2 mm de tolerancia).

$$\text{Radial} = (2 (3.2 \cdot 9.5 \cdot 2)) + 2.0 = 123.6 \text{ mm.}$$

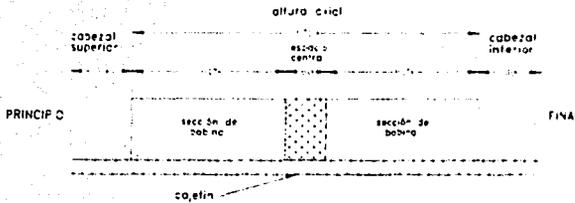
$Axial = (\text{ancho de la solera de Cu aislada}) \times (\text{número de galletas}) + (\text{número de ductos de enfriamiento}) \times (\text{espacio entre galletas}) + (\text{espacio central}).$

$$Axial = (12.6 \cdot 84) + (82 \cdot 6.5) + 80 = 1671.4 \text{ mm.}$$

Axial		
Cobre	12.6(82)	= 1033.2
Secciones	80*8*0.95	= 608.0
Espacio central	1 x 80	= 80.0
		<hr/>
		1721.2
menos apriete		<u>11.2</u>
		1710 mm.
yugos (2 x 160)		<u>320 mm.</u>
		2030 A.V.

Radial

$$19 \times 2 \times 3.2 = 121.6 \approx 123 \text{ mm.}$$



Esta figura muestra la dimensión de la bobina.

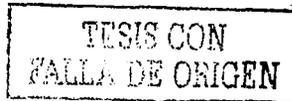
Este apriete resulta en ocasiones ideal porque durante el proceso de secado y de deshidratación del material aislante sufre un cambio y al momento del apriete, la distancia axial de este bobinado se puede reducir en 4 mm. aproximadamente.

n) Selección de ductos y cabezales en cada clase de aislamiento.

Los cabezales de los bobinados se tendrán, uno en la parte superior y otro en la parte inferior los cuales se dan en la siguiente tabla.

CLASE (Kv)	CABAZAL (mm)
1.2	2 x 10 = 20
5	2 x 10 = 20
15	2 x 15 = 30
34.5	2 x 45 = 90
69	2 x 100 = 200
115	2 x 160 = 320
25	2 x 30 = 60

4.7 Distancias mínimas en el cabezal.



Para este diseño tomaremos un cabezal de 160 mm. uno para la parte superior y el otro restante para la parte inferior. Cada parte estará dividida en:

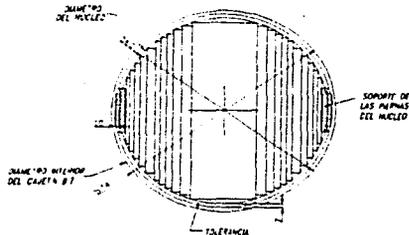
Ductos entre altura de ventana y el cabezal de la bobina. Este será de 10 mm. en la parte inferior y superior (o sea $2 \text{ de } 10 = 20$) en transformadores en aceite. Y los 40 mm en tacones y arandelas (o sea $40 \times 2 = 80$).

o) Cálculo de los diámetros de los devanados.

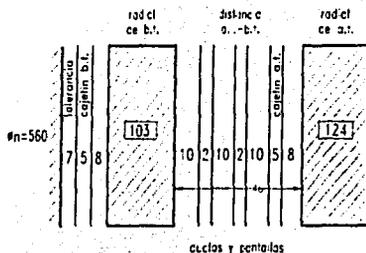
La importancia de este cálculo es poder dimensionar en forma directa al núcleo, calculando así la distancia entre ejes, la altura de ventana necesaria, el ancho o la longitud total y la altura real del núcleo. Otro punto importante en esta parte del diseño es adaptar vías de enfriamiento en un espacio que hay haber entre la bobina de baja tensión (B.B.T) y la bobina de alta tensión (B.A.T).

Estas vías de enfriamiento dependen básicamente de la clase de aislamiento a la que estén sometidos los devanados, y de la distancia que puede haber entre ambas bobinas. Dichas vías de enfriamiento no son más que ensambles de aislamientos que cubren y protegen a una distancia mínima de arqueo que pueda existir entre el devanado de baja tensión y el devanado de alta tensión; estos ensambles pueden ser por ejemplo, pantallas (cilindros de cartón que cubren el diámetro externo de la bobina) y ductos de enfriamiento (tiras de milano que cubren el axial de la bobina).

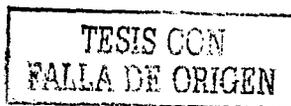
Ahora bien para conocer el diámetro exterior de la bobina de a.t. que sería el dato de mayor importancia por ser el punto de mayor dimensión, es necesario tener un esquema de dimensiones del núcleo y las bobinas, en el cual se puedan observar las dimensiones de estos componentes. (como se muestra en la siguiente figura)



Representación esquemática del núcleo y las tolerancias existentes entre aislamientos.



Corte transversal de las dimensiones del conjunto de bobinas y aislamientos entre ambas.



Con esto podemos decir que el:

$$\begin{aligned} \text{Diámetro interior b.t.} &= \phi \text{ núcleo} + 2 \cdot (\text{tol. de } 7 \text{ mm} + \text{ductos y aislamiento bt.}) \\ &= 560 + 2(7+13) = 600 \text{ mm.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Diámetro medio b.t.} &= \phi \text{ int bt.} + \text{radial bt.} \\ &= 600 + 103 = 703 \text{ mm.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Diámetro exterior b.t.} &= \phi \text{ med bt.} + \text{radial bt.} \\ &= 703 + 103 = 806 \text{ mm.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Diámetro interior a.t.} &= \phi \text{ ext bt.} + 2(\text{distancia at-bt.}) \\ &= 806 + (2 \cdot 46) = 898 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Diámetro medio a.t.} &= \phi \text{ int at} + \text{radial de at.} \\ &= 898 + 123 = 1021 \text{ mm.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Diámetro exterior a.t.} &= \phi \text{ med at} + \text{radial at.} \\ &= 1021 + 123 = 1144 \text{ mm.} \end{aligned}$$

p) Cálculo de las dimensiones del núcleo.

Una vez calculadas las dimensiones de los devanados primario y secundario, y establecida también el área y el diámetro del núcleo, el siguiente paso es definir las dimensiones del mismo, es decir la altura, el ancho y la distancia entre ejes, dimensiones que definen el tamaño real del núcleo. Estas dimensiones son también necesarias para poder determinar las pérdidas que habrá en el hierro utilizando como factor esencial el peso total de lamina utilizada.

i) Cálculo de la distancia entre ejes.

Para el cálculo de la distancia entre ejes, tomaremos como parámetro principal al diámetro exterior de la bobina de a.t. más una distancia que existirá entre columnas (separación entre bobina de fases diferentes). Esta distancia dependerá esencialmente de la clase de aislamiento a la que este sometido el transformador. Ahora bien apoyándose de la (tabla 4.4), podemos asignar una distancia entre bobinas de 66 mm. Esta distancia no necesariamente debe ser igual a la propuesta en la tabla, si no que puede ser un valor mayor, pero no menor; de tal forma que la distancia entre ejes calculada sea múltiplo de 5.

Nota: La distancia entre ejes y la altura de ventana debe ser ajustada a una dimensión de tal manera que ésta sea múltiplo de 5, esto debido a los cortes aceptados por la "Máquina George". Por lo tanto podemos decir entonces que:

Distancia entre ejes (DM) = ϕ exterior de bobina de a.t. + distancia entre bobinas.

Por lo tanto:

$$DM = 1144 + 66 = 1210 \text{ mm.}$$



ii) Cálculo de la altura de ventana.

La altura de ventana esta relacionada directamente con el axial de baja tensión (b.t.) y de los yugos inferiores y superiores de la bobina, es decir que para poder dimensionar la altura de ventana hay tomar en cuenta los siguientes factores:

- ✓ Distancia de los cabezales superiores e inferiores.
- ✓ Longitud axial de la bobina de b.t.

Entonces podemos decir que:

Cabezales = $2 \times 170 = 340$ mm.
 Longitud axial de b.t. = 1690 mm
 Altura de ventana = 2030 mm.

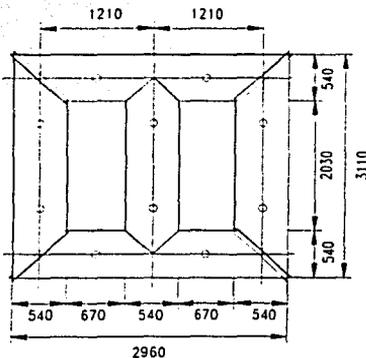
Nota: Este dato ha sido calculado anteriormente en el momento de dimensionar la bobina de b.t. ya que por cuestiones prácticas y de criterio, el axial de b.t. es el parámetro base para calcular la altura de ventana. Se pretende que el axial de b.t. sea mayor o menor que el axial de a.t. en una desviación no mayor de 30 mm. Ahora bien; podemos observar que el la (tabla 4.7) nos pide como mínimo un yugo de 160 mm. y dejando una tolerancia de 10 mm. en caso de que al axial de a.t. se desvíe hacia arriba. podemos entonces considerar que el yugo sería de 170 mm.

iii) Altura y largo del núcleo.

Una vez realizado el calculado de la distancia entre ejes y la altura de ventana, solo resta dimensionar el largo y la altura total del núcleo. Para esto, nos podemos apoyar del diámetro del núcleo, y del ancho de lámina de mayor dimensión. Es decir que:

Diámetro del núcleo = 560 mm.
 Ancho de lámina máx. = 540 mm.

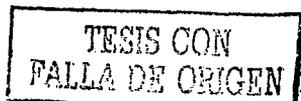
Ahora bien basándose en el esquema del núcleo podemos definir las dimensiones del núcleo de la siguiente manera:



Características del núcleo

- Φ_n = 560 mm.
- Q_o = 2109 cm²
- A.V. = 2030 mm.
- D.M. = 1210 mm.
- Bc = 13634 Gauss.

Tipo de chapa = 27 ZDKH
 Core loss = 0.72 w/kg.



q) Cálculo del peso y de las pérdidas en el núcleo (fe).

Cálculo del peso total de la lámina de acero al silicio (fe).

$$P_{fe} = \frac{15.3(2 \cdot DM + \phi_n) \cdot Q_0 + 23 \cdot AV \cdot Q_0}{\text{YUGOS} \quad \text{COLUMNAS}}$$

Donde:

- ϕ_n = Diámetro del núcleo.
- 15.3 = $2 \cdot 7.65$ (7.65 densidad de la chapa magnética).
- DM = Distancia entre ejes.
- Q_0 = Área del núcleo.
- 23 = $3 \cdot 7.65$ (7.65 densidad de la chapa magnética).
- AV = Altura de ventana.

Nota: Estas dimensiones deben estar expresadas en decímetros.

Ahora bien sustituyendo valores tenemos lo siguiente:

$$P_{fe} = 15.3(2 \cdot 12.1 + 5.6) \cdot 21.09 + 23 \cdot 20.3 \cdot 12.09$$

$$P_{fe} = 9615.7746 + 9846.921 = 19693.84 \text{ Kg.}$$

Observando la tabla de pérdidas para una chapa magnética del tipo 27ZDKH/0.9 w/kg. Encontramos que para:

$$\beta = 13634 \text{ gauss} \quad @ \quad 0.72 \text{ w/kg.}$$

De modo que:

$$W_{fe} = 19693.84 \cdot 0.72 = 14180 \text{ watts.}$$

r) Cálculo del peso y las pérdidas en el cobre de los devanados (Cu).

Calculando el peso total del cobre utilizado en cada uno de los devanados se tiene que:

i) Para el devanado de b.t.

$$P_{Cu} = 84 \cdot D_m \cdot q \cdot n \cdot 10^{-6} = \text{kg}$$

siendo:

- 84 = $3\pi \cdot 8.91$ (densidad del cobre)
- D_m = diámetro medio del devanado.
- q = sección en mm^2 del devanado.
- N = número de espiras.

$$P_{Cu} = 84 \cdot 703 \cdot 672.42 \cdot 104 \cdot 10^{-6} = 4129.61 \text{ kg}$$

ii) Para el devanado de a.t.:

Aplicando el mismo criterio que en el caso anterior, vamos a calcular el peso del cobre en el devanado; primero en la posición máxima para obtener el peso máximo y calcular las pérdidas indeterminadas y después en la posición nominal para calcular las pérdidas en el cobre en condiciones normales. (posición nominal).

Para la posición máxima:

$$P_{Cu} = 84 \cdot 1021 \cdot 48.31 \cdot 1540 \cdot 10^{-6} = 6380.62 \text{ kg}$$

Para la posición nominal:

$$P_{Cu} = 84 \cdot 1021 \cdot 48.31 \cdot 1502 \cdot 10^{-6} = 6223.18 \text{ kg}$$

Calculando las pérdidas en el cobre emplearemos la siguiente fórmula:

$$W_{Cu} = \frac{\delta^2 \cdot p}{k} = \text{watts.}$$

Donde:

- δ = densidad de corriente en (amp/mm²)
- p = peso del cobre
- k = constante para transformadores de potencia (0.403)

$$W_{bt} = \frac{1.12^2 \cdot 4130}{0.403} = 12855.27 \text{ watts.}$$

$$W_{at} = \frac{1.08^2 \cdot 6381}{0.403} = 18468.48 \text{ watts.} \quad (\text{posición máxima})$$

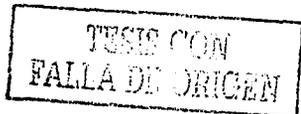
$$W_{at} = \frac{1.08^2 \cdot 6223}{0.403} = 18011.18 \text{ watts.} \quad (\text{posición nominal})$$

iii) para calcular las pérdidas indeterminadas

$$W_{ind} = (W_{bt} + W_{at} - p) \cdot 0.35 = \text{watts.}$$

$$W_{ind} = (12855 + 18468) \cdot 0.35 = 10963.75 \text{ watts.}$$

Los watts indeterminados involucran las pérdidas por calentamientos, longitudes de saleras y cables utilizados en los armados de a.t. y b.t. y por efectos corona generados por densidades de corriente muy altas. Dichas pérdidas por tanto no pueden ser calculadas exactamente sino que solamente se estima un valor en base a criterios y experiencia que se ha tenido. Estas pérdidas pues, solo pueden ser apreciadas en el momento de prueba en piso.

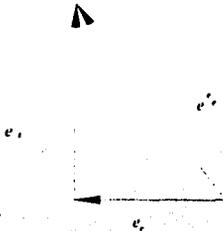


iv) Para calcular las pérdidas totales tendríamos lo siguiente:

$$W_{tot} = W_{bt} + W_{at} + W_{ind}$$

$$W_{tot} = 12855 + 18011 + 10964 = 41830 \text{ watts}$$

a) Cálculo de la impedancia.



e_r = Resistencia %

e_x = Reactancia %

e_z = Impedancia %

$$e_z = e_r \left(1 + \frac{r}{100}\right)$$

$$e_z^2 = e_r^2 + e_x^2$$

la reactancia se puede obtener de la siguiente fórmula:

$$e_x = \frac{1.26 \cdot r \cdot NI \cdot ds \cdot \left(A + \frac{B}{3}\right) \cdot 60}{1000 \cdot C \cdot v / e \cdot 50}$$

donde:

r = factor de Rojoski (para transformadores de potencia $r=0.95$)

NI = Amperios/Vuelta (primario o secundario).

$$ds = \frac{\phi_{int} at + \phi_{ext} bt}{2}$$

A = distancia at-bt.

B = radial at + radial bt.

$$C = \frac{\text{axial real at} + bt}{2}$$

60 y 50 es debido a la frecuencia (Europa 50 Hz y América 60 Hz)

De esta forma calculamos la reactancia directa, que en realidad debido a dispersiones la reactancia directa será.

$$e_r = e_r \left(1 + \frac{r}{100}\right)$$

Para transformadores de potencia el r varía de 3-10, esto debido a factores que involucran manufactura del transformador. Ahora bien sustituyendo valores tenemos lo siguiente:

$$e_r = \frac{1.26 \cdot 0.95 \cdot 57692.59 \cdot 85.2 \cdot \left(46 + \frac{226}{3}\right) \cdot 60}{1000 \cdot 17 \cdot 7.6058 \cdot 50} = 7.78 \%$$

$$e_r = 7.78 \left(1 + \frac{8}{100}\right) = 8.40 \%$$

$$e_r = \frac{W_{\text{totales cu}}}{KVA \cdot 10} \quad \therefore \quad e_r = \frac{41830}{18000 \cdot 10} = 0.232 \%$$

$$e_r' = \sqrt{8.4^2 + 0.232^2} = 8.41 \%$$

t) Cálculo de la corriente de excitación.

$$\%i_{\text{excit}} = \frac{VA_1 + VA_2}{KVA \cdot 10}$$

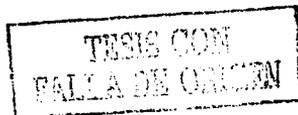
donde

$$VA_1 = Kg \cdot fe \cdot VA / kg \quad \therefore \quad VA_1 = 19694 \cdot 0.8 = 15755.2$$

$$VA_2 = 0.08 \cdot Q_0 \cdot f \cdot By^2 \quad \therefore \quad VA_2 = 0.08 \cdot 2109 \cdot 60 \cdot 0.72^2 = 5247.87$$

$$\%i_{\text{excit}} = \frac{15755 + 5248}{18000 \cdot 10} = 0.12 \%$$

La corriente de excitación (i_{exc}) esta en proporción inversamente proporcional a la cantidad de kg de fe , esto es, que cuando tenemos núcleos grandes la corriente de excitación es mucho muy pequeña y en núcleos pequeños (*monofásicos*) la corriente de excitación es demasiado alta (aproximadamente entre el 8% y 12%).



u) **Cálculo de la resistencia ohmica a 20 °C.**

Basándonos en la fórmula de la resistencia tenemos que:

$$R_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = \rho \frac{l}{A} \quad \therefore \quad \text{para un devanado se tiene lo siguiente:}$$

$$R_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = \rho \frac{\phi_{med} \cdot \pi \cdot \text{espiras}}{A(\text{mm}^2)} \quad \text{con una} \quad \rho = 0.017241 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{mts}}$$

Ahora bien: si quisiéramos corregir esta resistencia a una temperatura de 75 °C tendríamos que:

$$\frac{T + t_1}{R_1} = \frac{T + t_2}{R_2} \quad \text{despejando a } R_2 \text{ tenemos:} \quad R_2 = \frac{(T + t_2)R_1}{T + t_1}$$

donde:

$$T = 234.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_1 = \text{temperatura ambiente} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

$$t_2 = \text{temperatura a corregir} = 75 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

$$R_1 = \text{resistencia a } 20 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

$$R_2 = \text{resistencia a } 75 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

i) *Para el devanado de b.t. tenemos que:*

$$R_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = 0.017241 \left(\frac{0.703 \cdot \pi \cdot 104}{672} \right) = 0.005892936 \text{ } \Omega$$

$$R_{75\text{ }^{\circ}\text{C}} = \frac{(234.5 + 75)0.005892936}{234.5 + 20} = 0.007166458 \text{ } \Omega$$

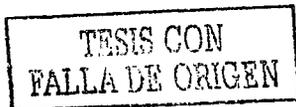
ii) *Calculando ahora las pérdidas por efecto joule por fase tenemos:*

$$P_{\text{joule}} = R_{75\text{ }^{\circ}\text{C}} \cdot I^2 \quad P_{\text{joule}} = 0.007166458 \cdot 753.11^2 = 4064.63 \text{ watts}$$

iii) *Para el devanado de a.t. tenemos que:*

$$\text{Posición máxima} \Rightarrow R_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = 0.017241 \left(\frac{1.021 \cdot \pi \cdot 1540}{48.31} \right) = 1.762876 \text{ } \Omega$$

$$\text{Posición nominal} \Rightarrow R_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = 0.017241 \left(\frac{1.021 \cdot \pi \cdot 1502}{48.31} \right) = 1.719376 \text{ } \Omega$$



$$\text{Posición mínima} \Rightarrow R_{\text{cc}} = 0.01724 \left(\frac{1.021 \cdot \pi \cdot 1464}{48.31} \right) = 1.675876 \, \Omega$$

Para una corrección a 75°C tenemos lo siguiente:

$$\text{Posición máxima} \Rightarrow R_{\text{cc}} = \frac{(234.5 + 75) \cdot 1.762876}{234.5 + 20} = 2.143851 \, \Omega$$

$$\text{Posición nominal} \Rightarrow R_{\text{cc}} = \frac{(234.5 + 75) \cdot 1.719376}{234.5 + 20} = 2.090951 \, \Omega$$

$$\text{Posición mínima} \Rightarrow R_{\text{cc}} = \frac{(234.5 + 75) \cdot 1.675876}{234.5 + 20} = 2.038049 \, \Omega$$

iv) Calculando, ahora las pérdidas por efecto joule por fase tenemos:

$$P_{\text{joule}} = R_{\text{cc}} \cdot I^2 \quad P_{\text{joule}} = 1.762876 \cdot 52.17^2 = 4798.04 \text{ watts}$$

$$P_{\text{joule}} = R_{\text{cc}} \cdot I^2 \quad P_{\text{joule}} = 2.143851 \cdot 52.17^2 = 5834.94 \text{ watts}$$

v) Cálculo del %Regulación.

Para el cálculo del %Regulación hay que considerar los valores obtenidos anteriormente del %Resistencia (%R) y el %Reactancia (%X).

$$\%R = 0.232 \%$$

$$\%X = 8.4 \% \quad \text{para un factor de potencia unitario se tiene que:} \quad \%R = \%R + \frac{\%X^2}{200}$$

$$\text{por lo tanto} \quad : \%R = 0.232 + \frac{8.4^2}{200} = 0.5848 \%$$

para un factor de potencia diferente de 1

$$\%Reg = \%R \cos \phi + \%X \operatorname{sen} \phi + \left[\frac{1}{200} (\%X \cos \phi - \%R \operatorname{sen} \phi) \right]$$

w) Cálculo de la eficiencia del transformador.

La eficiencia del transformador esta determinada de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\eta_s = \frac{KVA * \%}{\% * KVA + [(\%^2 * Kw_m) + (Kw_e)]} * 100$$

Siendo:

P_1 = potencia absorbida por el primario (VA).

P_2 = potencia cedida por el secundario (VA).

Pérdidas en el hierro.

Pérdidas por efecto joule.

$$f.p._s = Wd_s \left(\frac{1}{100 - \eta_s} - \frac{1}{100} \right) \leq 1$$

$$Wd_s = \frac{(\%^2 * Kw_m) + Kw_e}{KVA * \%} * 100$$

Ahora bien calculando la eficiencia al 100% tenemos:

$$\eta_{100\%} = \frac{18000}{18000 + [(41.83) + (14.18)]} * 100 = 99.6899$$

$$Wd_{100\%} = \frac{41.83 + 14.18}{18000} * 100 = 0.311166$$

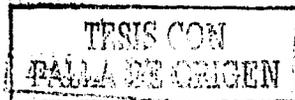
$$f.p._{100\%} = 0.311166 \left(\frac{1}{100 - 99.6899} - \frac{1}{100} \right) = 1$$

calculando la eficiencia ahora al 50% tenemos:

$$\eta_{50\%} = \frac{18000 * 0.5}{18000 * 0.5 + [(41.83 * 0.5^2) + (14.18)]} * 100 = 99.726997$$

$$Wd_{50\%} = \frac{(41.83 * 0.5^2) + 14.18}{18000 * 0.5} * 100 = 0.27375$$

$$f.p._{50\%} = 0.27375 \left(\frac{1}{100 - 99.7269} - \frac{1}{100} \right) = 0.9996$$



x) Relación de pérdidas en el transformador.

Los límites máximos permisibles de pérdidas a la máxima capacidad y posición nominal y 55 °C de sobre-elevación de temperatura, están de acuerdo a los valores de la tabla siguiente:

CAPACIDAD (MVA)	PERDIDAS EN VACIO (KW)	PERDIDAS DEBIDAS A LA CARGA (KW)	PERDIDAS EN ENFRIAMIENTO (KW)
7 5/9 375	7.5	40	1
12/16/20	13.5	75	2
18/24/30	18.5	105	2
24/32/40	22.5	125	2

Tabla 4.8 Límites máximos permisibles de pérdidas

Valores obtenidos por cálculo en la primera capacidad.

CAPACIDAD (MVA)	PERDIDAS EN VACIO (KW)	PERDIDAS DEBIDAS A LA CARGA (KW)	PERDIDAS EN ENFRIAMIENTO (KW)
18/24/30	14.18	41.83	2

Tabla 4.9 Pérdidas obtenidas en cálculo

La relación de pérdidas obtenidas en cada paso de la capacidad sería:

CAPACIDAD (MVA)	PERDIDAS EN VACIO (KW)	PERDIDAS DEBIDAS A LA CARGA (KW)
18	14.18	41.83
24	14.18	74.36
30	14.18	116.2

Tabla 4.10 Pérdidas por cada paso de la capacidad.

CONCLUSIONES

Como hemos visto durante el desarrollo de este trabajo el transformador es una máquina, que tiene por objeto cambiar algunas de las características de la energía eléctrica. Consta como toda máquina eléctrica de dos circuitos eléctricos concatenados o unidos entre sí por un circuito magnético. Los circuitos eléctricos y el magnético pueden ser simples o estar compuestos de varias partes elementales.

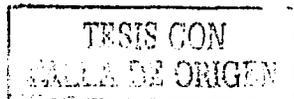
En el transformador normalmente siempre existe un receptor y un generador de energía eléctrica, el circuito que se conecta a la red alimentadora de energía y que por tanto actúa como receptor, recibe el nombre de "primario", mientras que, el segundo circuito eléctrico que actúa como generador, alimentando a otra red eléctrica recibe el nombre de "secundario". Estas definiciones de los circuitos eléctricos del transformador son siempre válidas, sean cuales sean las características de las redes a las que se conecta la máquina.

El algunos casos, para efectuar la transformación de características de una red eléctrica a otra el transformador puede tener algún órgano en movimiento, normalmente de rotación (moto-ventiladores, bombas para circulamiento forzado, y cambiadores de derivaciones automáticos); o puede ser totalmente estático. En ambos casos puede recibir nombres concretos, como por ejemplo: transformador rectificador, transformador de frecuencia, transformador de tensión, transformador de corriente, etc. Cuando sólo se dice transformador, se esta refiriendo a una máquina capaz de cambiar la tensión, en consecuencia la corriente, de la energía eléctrica que recibe de una red de corriente alterna para suministrarla en las condiciones deseadas en otra red, igualmente de corriente alterna.

El transformador esta considerado como una de las máquinas de mayor rendimiento debido a la ausencia de partes movibles, además es una máquina que se conecta a la red al comenzar su servicio y generalmente no se desconectan nunca de ella, a no ser por avería, maniobra u otra necesidad concreta. Esto ocurre pocas veces en la vida de la mayor parte de los transformadores industriales. Algunos pueden no cumplir esto y tener abundantes salidas de servicio, pero no es lo normal.

Lámina de acero al silicio (para fabricación del núcleo)

La lamina de acero al Silicio de grano orientado con que se fabrica en su mayoría el núcleo de los transformadores es del tipo M-4, la cual posee unas propiedades magnéticas excelentes, que aunado a un diseño optimizado por el diseñados y apoyado por la alta tecnología que realiza el corte transversal de la lámina utilizando una máquina computarizada del tipo hidráulico-neomático, nos permite elaborar cortes casi perfectos sin forzar la construcción molecular de la lámina y lograr un núcleo del tipo "columna" con las pérdidas y las corrientes de excitación altamente bajas.



En su mayoría los núcleos fabricados son del tipo columna, debido a que tiene la ventaja de poder repararse fácilmente en caso de una falla, cosa en el caso de los núcleos acorazados resulta ser muy complicado.

Bobinas de Alta y Baja Tensión.

En cuanto a las bobinas de alta y baja tensión estas son fabricadas con cobre electrolítico de 99.90% de pureza y una resistividad de 0.017241 ohms x mm²/metro.

El diseño de estas bobinas depende básicamente del voltaje, de la capacidad y del tipo del transformador de que se trate. En base a esto las bobinas se diseñan teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- a) Comportamiento ante los sobrevoltajes.
- b) Resistencia ante los esfuerzos electrodinámicos de corto circuito.
- c) Envejecimiento de los aislamiento (por temperatura, humedad y el contenido de oxígeno disuelto en el aceite).

Tratamiento de secado por horneado y vacío.

Cuando se tienen listos, tanto las bobinas como el núcleo del transformador, se procede a ensamblar el conjunto núcleo-bobinas donde se realiza el armado de la conexión pedida tanto en baja como en alta tensión, soldando todas las terminales de salida sin excepción y colocando el cambiador de derivaciones del lado de alta tensión normalmente.

Terminando el conjunto núcleo-bobinas, todos los transformadores deben de pasas por un proceso de secado preliminar en una circulación de aire caliente por resistencia que tiene un volumen aproximadamente de 60m³ a una temperatura de 125°C y dependiendo de la capacidad y de la clase de aislamiento del transformador será el tiempo que este en el horno.

Completado el ciclo de "secado preliminar", el conjunto núcleo-bobinas es introducido en el tanque o cuba y se prepara para su tratamiento final (secado bajo vacío). El tanque y el conjunto núcleo-bobinas es introducido en el autoclave de vacío, cuyo volumen es de 250m³ y sometido a una temperatura de 95°C. Con este tratamiento se elimina la humedad que el proceso de horneado no disipó completamente, además en el proceso de llenado bajo vacío se eliminan las burbujas de aire que pudieran estar atorados entre las bobinas, posibles orígenes de fallas dieléctricas en los aislamientos.

El proceso de horneado y secado bajo vacío aseguran una máquina con características de primera calidad en su aislamiento, el buen comportamiento ante las pruebas en el laboratorio y durante su servicio.

Las pérdidas y el transformador.

En todas las máquinas es necesario reducir las pérdidas, pero en el transformador se hace más patente, y son debidas a dos causas: pérdidas en el hierro y pérdidas en el cobre.

Las pérdidas en el hierro son constantes para una tensión del primario determinada, y además son proporcionales a la inducción y a la frecuencia, esto quiere decir que, son constantes e independientes de la carga que pueda tener la máquina. Se acostumbre cuantificar esta pérdida como una fracción de la potencia nominal del transformador expresada en vatios o kilovatios.

En vacío existe otra pérdida debida al efecto Joule de la corriente I_p , al circular por el devanado primario, pero este valor es despreciable realmente y en la práctica, como se usa el circuito equivalente aproximado, esta pérdida no se evalúa. Por tanto no se tendrá en cuenta en lo sucesivo, mientras que no se indique lo contrario.

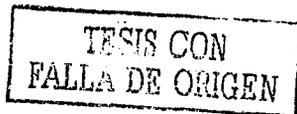
El tema de las pérdidas resulta un tanto complejo en el sentido de que a pesar que se cuenta con fórmulas netamente establecidas, los valores calculados en forma teórica, suelen ser bastante diferentes a los calculados por pruebas en piso; esto se deba básicamente a procesos de manufactura donde se presentan anomalías del tipo ambiente-proceso, es decir que existen durante el proceso de fabricación contaminantes en el material empleado o simplemente por un mal proceso realizado.

Por esta razón en casos muy particulares cuando existe alguna restricción en cuanto a pérdidas garantizadas, se han elaborado algunos factores que involucran esos parámetros para así acercarse un poco más a lo obtenido por cálculo y lo obtenido por pruebas.

Características del transformador.

Las normas establecen que un transformador de distribución es aquel que tiene una capacidad hasta de 500 KVA, en una tensión de 67 Kv en alta tensión y 15 Kv en baja tensión. Entonces para aquellos transformadores que sobrepasa estas características esta considerados como transformadores de pequeña potencia, mediana potencia y extra alta potencia.

Los transformadores pueden distinguirse en base a algunas características de servicio tales como:



Para uso interior:

Son los transformadores tipo seco y se usan en lugares que se encuentran debidamente protegidos de las inclemencias del tiempo, también pueden existir sumergidos en aceite.

Para uso exterior:

Son las unidades que se encuentran perfectamente selladas (normalmente sumergidos en aceite) y por lo tanto soportan las inclemencias del tiempo.

Para condiciones especiales:

Estos son pedidos por el cliente y para condiciones de operación fuera de las normas como:

Vapores o atmósferas dañinas, exceso de polvo, polvo abrasivo, mezclas explosivas en polvo ó gases, vapor de agua, ambiente salino, humedad excesiva, etc..

En función de los lugares de instalación:

- ✓ Tipo poste.
- ✓ Tipo subestación.
- ✓ Tipo pedestal.
- ✓ Tipo bóveda ó sumergible.

Tipo poste:

Estos se fabrican para colocarse en postes, para redes de distribución aéreas, pueden ser trifásicos o monofásicos y sumergibles en aceite. Poseen una serie de accesorios que les permite ser colocados en plataformas construidas arriba de los postes.

Tipo subestación:

Los transformadores de este tipo son de dimensiones y pesos mayores que los tipo poste, y como su nombre lo indica, se fabrican para utilizarse en subestaciones eléctricas.

Tipo pedestal:

Estas unidades son diseñadas para distribución subterránea comercial ó residencial de energía, que por aspecto armonizan planamente con la arquitectura moderna en fraccionamientos residenciales, centros comerciales, condominios, industrias, etc.

Tipo bodega o sumergible:

Estos se construyen para trabajar en redes de distribución subterránea y son totalmente herméticos para impedir que entre algún agente extraño a estos.

Pruebas finales de laboratorio a transformadores.

El objetivo de probar los transformadores, es para verificar sus características de operación y detectar posibles fallas de construcción y de proceso. En cierta forma las pruebas forman parte de un procedimiento para comprobar que el transformador ha sido fabricado satisfactoriamente, cumpliendo así con las normas establecidas y algunas especificaciones particulares del cliente.

Tipos de prueba:

Los tipos de prueba a los que pueden ser sometidos los transformadores dependen de condiciones como: si es un diseño nuevo, fabricación en serie, o si es un pedido especial para un cliente, o si se trata de algún diseño prototipo. Estos tipos de prueba son:

- ✓ Pruebas prototipo.
- ✓ Pruebas de rutina.
- ✓ Pruebas opcionales.

Pruebas prototipo.

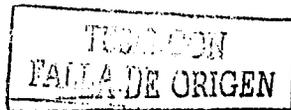
Son aplicables a los nuevos diseños o modificaciones de diseños anteriores, con el propósito de verificar si el producto cumple con lo especificado. Los tipos de pruebas que se realizan en esta categoría son:

- Medición de resistencias óhmicas en los devanados.
- Elevación de temperaturas en los devanados.
- Impulso.

Pruebas de rutina.

Son las pruebas que deben efectuarse en todos los transformadores, de acuerdo con los métodos que se indiquen en cada norma, para verificar su calidad o si se encuentra dentro de las tolerancias permitidas. Los tipos de pruebas que se realizan son:

- Resistencia de los aislamientos.
- Tensión de ruptura dieléctrica del aceite aislante.
- Relación de transformación.
- Polaridad o secuencia de fases.
- Pérdidas en vacío y corriente de excitación.
- Impedancia y pérdidas debidas a la carga.
- Potencial aplicado.



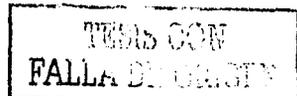
Pruebas opcionales:

Estas pruebas son establecidas entre el fabricante y el usuario, con el objeto de verificar características especiales del producto. Algunas de estas se consideran como destructivas y solo realizan para poder validar algún diseño o comprobar que éste podrá soportar algún esfuerzo dieléctrico, mecánico o similar. Estas pruebas pueden ser por ejemplo:

- Prueba de corto circuito.

En la actualidad los transformadores son imprescindibles en nuestra vida. Sin ellos no habría evolucionado la industria eléctrica como hasta ahora lo ha hecho. Los transformadores han permitido, que la energía eléctrica se genere a la tensión más adecuada para los generadores, se transporte en las mejores condiciones desde el punto de vista de rendimiento y por último se distribuya a los usuarios con ua tensión apropiada para uso directo.

Se llama por tanto "transformador" a una máquina eléctrica, que es a la vez receptor y generador de energía eléctrica y que si no se le añade ningún objetivo es estática en su funcionamiento y tiene como misión cambiar la tensión y por consiguiente la intensidad, que recibe de una fuente de alimentación de energía eléctrica alterna cederla a otra red eléctrica. En la industria se acostumbra darle el nombre abreviado de TRAFU o TANQUE.



**TRANSFORMADORES Y AUTOTRANSFORMADORES
DE DISTRIBUCIÓN Y POTENCIA - MÉTODOS DE PRUEBA**

**DISTRIBUTION AND POWER TRANSFORMERS AND
AUTOTRANSFORMERS - TEST METHODS**

1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta Norma Mexicana tiene por objeto establecer las pruebas y métodos de prueba para transformadores y autotransformadores de distribución y potencia

2 REFERENCIAS

Para la correcta utilización de esta norma es necesario consultar y aplicar las siguientes Normas Mexicanas vigentes

NMX-J-116-ANCE	Productos eléctricos - Transformadores - Transformadores de distribución tipo poste y tipo subestación - Especificaciones
NMX-J-123	Acete aislante no inhibido para transformadores.
NMX-J-234	Productos eléctricos - Boquillas de porcelana de alta y baja tensión para transformadores de distribución, servicio exterior
NMX-J-271	Técnicas de prueba en alta tensión.
NMX-J-281	Términos empleados en la industria eléctrica.
NMX-J-282	Medición de tensión por medio de voltmetro de esferas (una esfera a tierra)
NMX-J-284	Productos eléctricos - transformadores de potencia.
NMX-J-295-ANCE	Productos eléctricos - Transformadores - Transformadores de distribución tipo pedestal, monofásicos y trifásicos para distribución subterránea - Especificaciones
NMX-J-287	Transformadores trifásicos sumergibles para distribución subterránea
NMX-J-310	Transformadores monofásicos sumergibles para distribución subterránea
NMX-J-351	Transformadores tipo seco de distribución y potencia

NOTA - Los requisitos de los transformadores y criterios específicos de prueba no son parte de esta norma, estos están contenidos en las normas de producto correspondiente

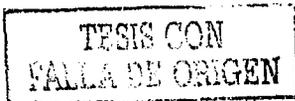
3 TIPOS DE PRUEBA

3.1 Definiciones

3.1.1 pruebas de prototipo: son las aplicables a nuevos diseños, con el propósito de verificar si el producto cumple con lo especificado en las normas o por el usuario

3.1.2 pruebas de rutina: son pruebas que debe efectuar el fabricante en todos los transformadores de acuerdo con los métodos indicados en esta norma, para verificar si la calidad del producto se mantiene dentro de lo especificado por norma o por el usuario

3.1.3 pruebas opcionales: son las establecidas entre fabricante y usuario, con el objeto de verificar características especiales del producto



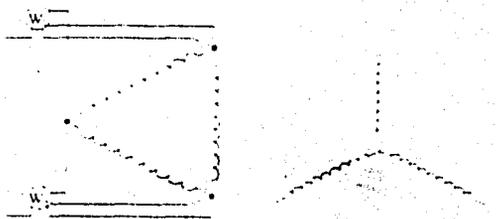


FIGURA 15.- Método de los dos wáttmetros

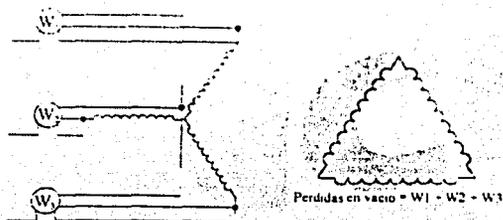


FIGURA 16.- Método de los tres wáttmetros con el neutro del transformador accesible

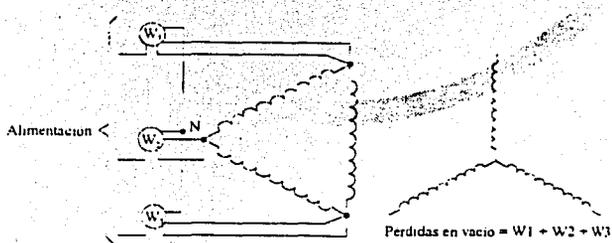


FIGURA 17.- Método de los tres wáttmetros

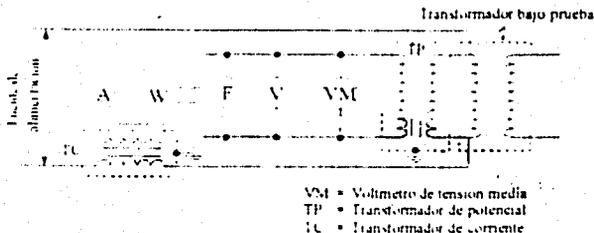


FIGURA 14.- Diagrama para determinar las pérdidas en vacío por el método de tensión media, empleando transformadores de medición

En este método se utiliza un voltmetro de valor medio, que consta de un voltmetro de corriente directa conectado en serie con un rectificador de onda completa. Estos instrumentos están generalmente graduados para dar la misma indicación numérica que un voltmetro de valor eficaz para una misma tensión de onda senoidal, esto es, que su escala está marcada en valores medios multiplicados por 1,11.

Para obtener resultados precisos deben usarse wattímetros para bajo factor de potencia.

Para esta prueba se puede usar cualquier devanado del transformador, aunque en general es más conveniente usar el devanado de más baja tensión.

En cualquier caso debe usarse, si es posible, el devanado completo. Si por alguna razón se hace necesario excitar solo una porción del devanado, esta no debe ser menor del 25 %.

La secuencia de la prueba debe ser como sigue:

- a) Ajustar y mantener la frecuencia al valor nominal.
- b) Por medio del voltmetro de tensión media, ajustar la tensión nominal al valor de la tensión eficaz de prueba.
- c) Registrar simultáneamente las lecturas del frecuencímetro, voltímetro de tensión media, voltímetro de tensión eficaz, amperímetro y wattímetro.
- d) Determinar las pérdidas del circuito de prueba (tara), las cuales deben restarse de las pérdidas (watts) registrados en el punto anterior, para obtener las pérdidas en vacío del transformador bajo prueba.

NOTA.- Cuando se usen medidores analógicos y con objeto de disminuir los errores de observación a un mínimo, los instrumentos de medición deben ser de escala tal que las lecturas se obtengan en el segundo tercio de la misma.

Las pérdidas en vacío están constituidas por pérdidas de histéresis y pérdidas por corrientes circulantes.

Las pérdidas de histéresis son una función de la densidad máxima del flujo del núcleo e independientes de la forma de onda de dicho flujo y a su vez, la densidad máxima del flujo es una función del valor medio de la tensión (no del valor eficaz); por lo que al ajustar la tensión media correspondiente a una onda senoidal en la prueba de pérdidas en vacío se obtienen las pérdidas de histéresis reales correspondientes a una onda senoidal, aunque la forma real de la onda de tensión aplicada no sea así.

Las pérdidas por corrientes circulantes en el núcleo varían con el cuadrado de la tensión eficaz y son independientes de la forma de onda de la tensión aplicada.

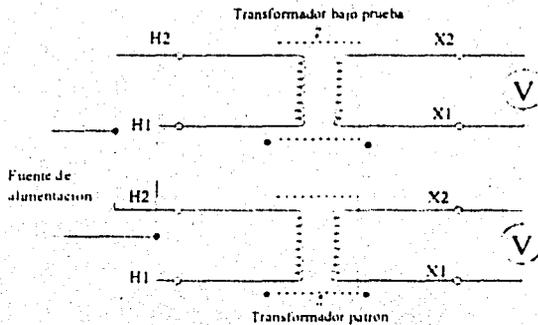
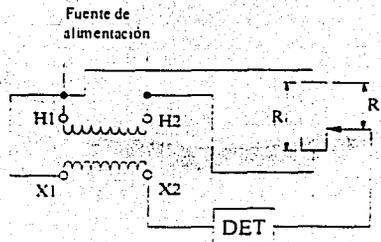


FIGURA 11.- Conexiones para la medición de la relación de transformación, variante del método del transformador patrón

6.2.3 Relación de transformación por el método del puente de relación

Para determinar la relación del transformador, se puede utilizar un potenciómetro apropiado preferentemente graduado para dar la lectura de relación de transformación, como se muestra en la figura 12

Para efectuar la prueba, se varía la resistencia del potenciómetro hasta que el detector indique cero. Entonces la relación de las resistencias del potenciómetro R/R_1 es igual a la relación del transformador



Cuando el detector DET está balanceado, la relación de transformación es R/R_1

FIGURA 12.- Circuito con potenciómetro de resistencia para la prueba de relación de transformación por el método del puente de relación

- a) Debe conectarse el indicador de secuencia de fases a las terminales de alta tensión del transformador el cual debe excitarse en las tres fases a una tensión trifásica apropiada para el indicador y anotándose la dirección de rotación o la indicación del instrumento
- b) Se transfiere el indicador al lado de baja tensión del transformador conectando a X1, X2 y X3 los conductores que estaban conectados a H1, H2 y H3 respectivamente
- c) El transformador se excita de nuevo con una tensión adecuada (sin cambiar las conexiones de excitación) anotando otra vez la dirección de rotación o la indicación del instrumento
- d) Si la indicación del instrumento es la misma en ambos casos la secuencia de fases del transformador es la adecuada

Para la prueba de secuencia de fases en transformadores con secundarios hexafásicos que no tengan conexión al neutro, estos deben conectarse temporalmente en delta o en estrella y probarse como transformadores trifásicos.

Si el neutro de la conexión hexafásica está accesible debe transferirse el indicador de secuencia de fases de las terminales H1, H2 y H3 a las terminales X1, X3 y X5 respectivamente anotando la dirección de rotación de la indicación del instrumento. Después debe repetirse la prueba transfiriendo el indicador de secuencia de fases de las terminales X1, X3 y X5 a las terminales X2, X4 y X6 respectivamente anotando nuevamente la dirección de rotación o la indicación del instrumento. Si la dirección de rotación o la indicación del instrumento es la misma la secuencia de fases del transformador es la adecuada.

El método anterior (prueba de secuencia de fases) no indica el desplazamiento angular del transformador.

NOTA - La polaridad por fase, el desplazamiento angular y la secuencia de fases de un transformador trifásico pueden obtenerse simultáneamente al determinar la relación de transformación por el método del transformador patrón.

6 RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

6.1 Generalidades

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

La prueba de relación de transformación debe hacerse a tensión nominal o menor y a frecuencia nominal o mayor y sin carga.

En caso de transformadores trifásicos, en los cuales cada fase sea independiente y accesible se recomienda usar de preferencia alimentación monofásica, sin embargo cuando así convenga se puede usar alimentación trifásica.

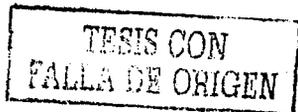
Si se da el caso en el cual los devanados de alta tensión están conectados en estrella y el neutro inaccesible se recomienda usar de preferencia alimentación trifásica, sin embargo cuando así convenga se puede usar alimentación monofásica.

Los transformadores con conexión estrella y diametral hexafásica, que no tienen el neutro accesible, se pueden probar con alimentación trifásica. Cualquier diferencia en las características magnéticas de las tres fases origina un desplazamiento del neutro lo cual causa un desequilibrio en las tensiones diametrales. Cuando dicho desequilibrio ocurre la conexión diametral debe cambiarse, ya sea a una conexión delta o a una estrella. Si se encuentra que las tensiones de líneas son iguales y del valor adecuado (1,73 veces la tensión diametral si está conectada en estrella), la relación es correcta.

6.2 Métodos de prueba de relación de transformación

Se usan tres métodos para la prueba de relación:

- a) método de los dos voltímetros.
- b) método del transformador patrón, y
- c) método del puente de relación.



Los transformadores herafásicos que no tengan conexión de neutro accesible, tienen que ser conectados temporalmente en delta o en estrella para verificar su diagrama fasorial

Este metodo se limita a transformadores en los cuales la relación de transformación permite apreciar la diferencia entre las lecturas

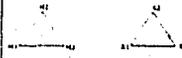
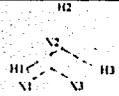
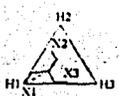
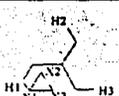
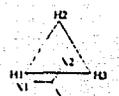
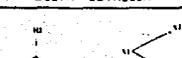
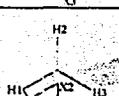
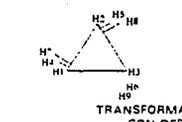
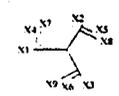
GRUPO	DESPLAZAMIENTO ANGULAR	DIAGRAMA DE MEDICIONES PARA PRUEBAS	MEDICIONES PARA PRUEBA
GRUPO 1 DESPLAZAMIENTO ANGULAR DE 0 GRADOS	 <p>CONEXIÓN DELTA</p>		<p>CONECTAR H1 A X1</p> <p>MEDIR H2 - X2, H3 - X2, H1 - H2 H2 - X3, H3 - X3</p> <p>RELACIONES DE TENSION (1) H2 - X3 = H3 - X2 (2) H2 - X2 < H1 - H2 (3) H2 - X2 < H2 - X3 (4) H2 - X2 = H3 - X3</p>
	 <p>CONEXIÓN ESTRELLA - ESTRELLA</p>		
	 <p>CONEXIÓN DELTA - ZZ</p>		
	 <p>CONEXIÓN ZZ - DELTA</p>		
GRUPO 2 DESPLAZAMIENTO ANGULAR DE 30 GRADOS	 <p>CONEXIÓN DELTA - ESTRELLA</p>		<p>CONECTAR H1 A X1</p> <p>MEDIR H3 - X2, H3 - X3, H1 - H3 H2 - X2, H2 - X3</p> <p>RELACIONES DE TENSION (1) H3 - X2 = H3 - X3 (2) H3 - X2 < H1 - H3 (3) H2 - X2 < H2 - X3 (4) H2 - X2 = H1 - X3</p>
	 <p>CONEXIÓN ESTRELLA - DELTA</p>		
	 <p>TRANSFORMADOR TRIFÁSICO CON DERIVACIONES</p>		

FIGURA 8.- Marcado de terminales y diagrama de secuencia de fases para conexión trifásica de transformadores

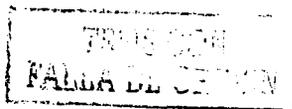




FIGURA 2 - Devados con polaridad subtractiva



FIGURA 3 - Devados con polaridad aditiva

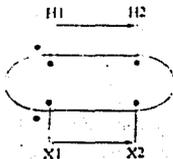


FIGURA 4 - Terminales con polaridad subtractiva

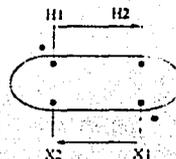


FIGURA 5 - Terminales con polaridad aditiva

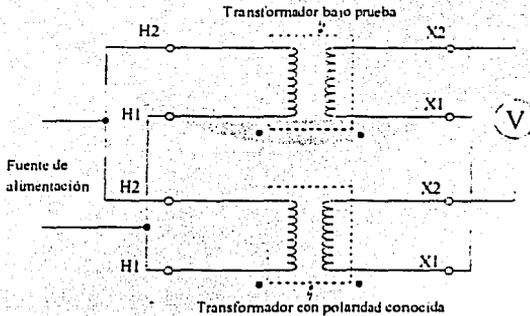


FIGURA 6.- Diagrama de conexiones para la prueba de polaridad por el método de comparación con un transformador patrón

4.3 Métodos

4.3.1 Método de caída de tensión

El método de caída de tensión debe emplearse solamente si la corriente nominal del devanado del transformador es de por lo menos un amperio.

Las mediciones se efectúan con corriente continua y se toman lecturas simultáneas de corriente y tensión usando las conexiones mostradas en la figura 1. La resistencia se calcula con las lecturas obtenidas de acuerdo con la Ley de Ohm.

Si la corriente continua es suministrada por una máquina de conmutación, la aguja del voltmetro puede oscilar debido a las variaciones de la tensión producidas por el conmutador. En tales casos alguno de los devanados del transformador que no sea el devanado bajo prueba debe ponerse en corto circuito para amortiguar las variaciones de la tensión.

La corriente en el devanado que está bajo prueba debe ser prácticamente constante antes de poner otro devanado en corto, ya que de otra manera se pueden obtener valores erróneos de resistencia. Por experiencia se sabe que la estabilidad de una corriente continua se logra más rápidamente bajo condiciones de circuito abierto que bajo condiciones de cortocircuito.

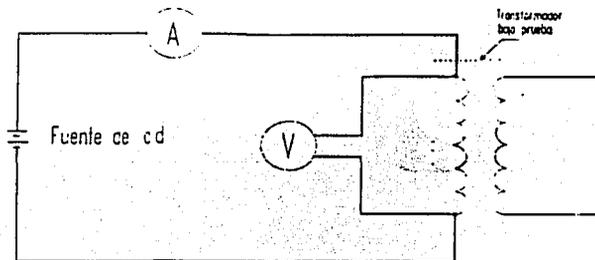


FIGURA 1.- Conexiones para la medición de resistencia por el método de caída de tensión

4.3.1.1 Recomendaciones para la prueba

Cuando se usen medidores analógicos y con objeto de disminuir los errores de observación a un mínimo, los instrumentos de medición deben ser de escala tal que las lecturas se obtengan en el segundo tercio de la misma. Debe mantenerse la polaridad en el instrumento durante la medición de resistencias, ya que una inversión en la polaridad puede cambiar la constante de tiempo y provocar lecturas erróneas.

El voltímetro debe conectarse directamente a las terminales del devanado por medir, con el propósito de no incluir en la lectura la resistencia de los conductores de alimentación y su resistencia de contacto.

Para proteger al voltímetro de sobretensiones, éste debe desconectarse de la fuente de alimentación del circuito antes de aplicar o interrumpir la corriente de prueba. Debe usarse un interruptor con aislamiento apropiado para protección de personal de prueba.

Si la caída de tensión es menor de un volt, debe usarse un potenciómetro o un milivoltímetro. Las lecturas deben registrarse hasta que la corriente y la tensión alcancen valores estables.

Deben registrarse cuando menos cuatro mediciones de corriente y tensión si se utiliza equipo analógico. El promedio de las resistencias calculadas con estas mediciones debe considerarse como la resistencia del circuito.

A P E N D I C E (GLOSARIO)

Impedancia (Z): Es la resistencia aparente de un circuito eléctrico o elemento de un circuito de corriente alterna. Matemáticamente es la suma vectorial de la resistencia del circuito considerado. La unidad práctica es el ohm.

Flujo magnético (Φ): Es la magnitud que representa el efecto magnético total en un circuito; por analogía con un circuito eléctrico, el flujo puede ser considerado como si se tratara de una circulación de corriente. La unidad cgs es el Maxwell.

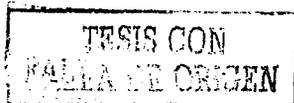
Densidad de flujo o inducción magnética (B): Es la relación entre el flujo magnético, en cualquier sección transversal de un elemento del circuito magnético y el área de esta sección. La unidad del sistema cgs electromagnético es el gauss, que equivale a un Maxwell por centímetro cuadrado.

Intensidad de campo magnético (H): la intensidad de campo magnético se define como la f.m.m. por unidad de longitud de trayectoria del flujo magnético. Se conoce también como la fuerza magnetizante o el gradiente de potencial magnético.

Fuerza magnetomotriz (F ó f): Es la causa que produce un flujo magnético. Es análoga, en el circuito magnético, a la fuerza electromotriz de un circuito eléctrico. Para la unidad cgs del sistema electromagnético se ha adoptado universalmente la denominación Gilbert. Una unidad práctica muy conveniente es el ampere-vuelta, que equivale $(4\pi \times 10^{-7}) / (10^{-1} \times 2.57)$ Gilberts.

Permeabilidad: Es un término general utilizado para expresar diversas relaciones entre la densidad de flujo magnético y la intensidad del campo magnético. Estas relaciones son la permeabilidad absoluta, que en general es el cociente de un cambio correspondiente de la intensidad de campo magnético. La permeabilidad relativa, que es la razón de la permeabilidad absoluta a la constante magnética.

Permeancia (Pm): La permeancia es el recíproco de la reluctancia.



Potencia: es la rapidez con respecto al tiempo de la energía de transferencia o transformación.

Aislamiento: es un material que tiene la propiedad de no permitir el flujo de corriente, la cual se expresa en función de su resistencia y cuando se somete a una diferencia de potencial se establece un campo eléctrico.

Dieléctrico: es un material en el cual es posible producir y mantener un campo eléctrico con o sin el suministro de energía externa. El término dieléctrico es más amplio que el del aislamiento, ya que todos los aislamientos pertenecen a los dieléctricos, pero no todos los dieléctricos pertenecen a los aislamientos.

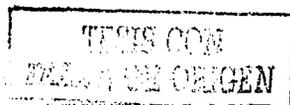
Aislante eléctrico y dieléctrico: el aislante eléctrico es un medio o un material que, cuando está colocado entre conductores a diferentes potenciales, permite que fluya por él sólo una pequeña o despreciable corriente en fase con el voltaje aplicado. El término dieléctrico es casi sinónimo de aislante eléctrico, el cual puede considerarse como dieléctrico aplicado. Un dieléctrico perfecto no permite el paso de corriente de conducción sino corriente de carga capacitiva entre conductores. Solo un vacío a bajos esfuerzos entre superficies metálicas no contaminadas satisface esta condición.

Resistencia o rigidez dieléctrica: esta resistencia es definida por el ASA como el gradiente de potencial máximo que el material puede resistir sin ruptura. Prácticamente la resistencia se suele reportar como el voltaje de ruptura dividido entre el espesor entre electrodos, independientemente de la concentración de esfuerzos en los electrodos. La ruptura no sólo requiere un suficiente esfuerzo eléctrico sino también una cierta cantidad de energía.

Ampere-vueltas: unidad de fuerza magnetomotiva en el sistema mksa racionalizado. Un ampere-vueltas es igual a $4\pi/10$, ó 1.252 Gilberts.

Ciclo o curva de histéresis: es una curva cerrada obtenida con un material ferromagnético graficado (usualmente en coordenadas rectangulares) valores correspondientes de inducción magnética B como ordenadas y fuerza magnetizante H como abscisas cuando el material pasa por un ciclo completo entre límites iguales definidos de fuerza magnetizante $\pm H_m$ o de inducción magnética $\pm B_m$.

Circuito magnético: una región en cuya superficie la inducción magnética es tangencial. Un magnético práctico es la región que contiene el flujo de interés práctico, como el núcleo de un transformador. Puede consistir de un material ferromagnético con o sin entrehierros u otros materiales magnéticos débiles como porcelana o latón.



Curva de desimantación: es la porción de un lazo de histéresis (cd) normal que se encuentra en el segundo o cuarto cuadrante, es decir, entre punto b, de inducción residual y el punto hc de fuerza coercitiva. Los puntos sobre esta curva se designan con las coordenadas B_d y H_d .

Dominios ferromagnéticos: regiones magnetizadas, macroscópicas o microscópicas en tamaño, dentro de materiales ferromagnéticos. Cada dominio es en sí esta magnetizado en todo momento a una saturación intrínseca y esta inducción de saturación es unidireccional dentro del dominio.

Excitación, ca.: es la razón de ampere-vueltas rms de la corriente de excitación en el devanado principal de un inductor a la longitud efectiva de la trayectoria magnética.

Fuerza coercitiva, H_c : es la fuerza (cd) magnetizante para lo cuál la inducción magnética es cero cuando el material esta una condición ciclicamente y simétricamente magnetizada.

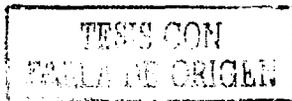
Gauss: es la unidad de inducción magnética en el sistema cgs electromagnético. El gauss es igual a 1 maxwell/cm² ó 10^{-4} Tesla.

Gilbert: unidad de fuerza magnetomotriz en el sistema cgs electromagnético. El gilbert es una fuerza magnetomotriz de $10/4\pi$ ampere-vueltas.

Histéresis magnética: es la propiedad de un material ferromagnético caracterizada por la falta de correspondencia entre los cambios en inducción resulte de una fuerza magnetizante creciente y una decreciente.

Inducción magnética (densidad de flujo); B: Es la cantidad vectorial magnética que en cualquier punto en un campo magnético está medida por la fuerza mecánica experimentada por un elemento de corriente eléctrica en el punto o por la fuerza electromotiva inducida en un lazo elemental durante cualquier cambio en los enlaces del flujo con el lazo en un punto.

Inducción remanente, B_d : Es la inducción magnética que permanece en circuito magnético después de quitar la fuerza magnetomotiva aplicada. **Nota** Si no hay entre hierros u otras homogeneidades en el circuito magnético, la inducción remanente B_d será igual ala inducción residual B_r ; si no es así B_d será menor que B_r .



Inducción residual Br: Es la inducción magnética correspondiente a una fuerza magnetizante cero en un material magnético en condición simétrica y cíclicamente magnetizada

Material diamagnético: Es un material cuya permeabilidad es menor que la unidad
nota: La inducción intrínseca B_i ésta dirigida en forma opuesta a la fuerza magnetizante H aplicada.

Material ferrimagnético: Material en el que momentos magnéticos desiguales están alineados antiparalelamente entre si. Las permeabilidades son del mismo orden de magnitud que la de los materiales ferromagnéticos, pero son menores de los que serian si todos los momentos atómicos fuesen paralelos y tuviesen la misma dirección. Bajo condiciones ordinarias, las características magnéticas de los materiales ferrimagnéticos son bastantes similares a las de los materiales ferromagnéticos.

Material ferromagnético: Material que en la general, exhibe los fenómenos de histéresis y saturación y cuya permeabilidad depende de la fuerza magnetizante.

Maxwell; Unidad de flujo magnético en el sistema electromagnético cgs. Un maxwell es igual a 10^{-8} weber.

Oersted: Unidad de fuerza magnetizante (intensidad del campo magnético) en el sistema electromagnético cgs. Un oersted es igual a una fuerza magnetomotiva de 1 gilbert /cm de trayectoria de flujo. Un oersted es igual a $100/4\pi$ o 79.58 ampere-vueltas.

Permeabilidad, ca. Término genérico usado para expresar varias relaciones dinámicas entre la inducción magnética B y la fuerza magnetizante H en material magnético sometido a excitación cíclica por una corriente alterna o pulsante. Los valores de las permeabilidades c.a. obtenidos para un material dado, dependen fundamentalmente de los límites de excursión de la excitación dinámica y de la inducción, del método y condiciones de medición, y también de factores como la resistividad, el espesor de las laminaciones, la frecuencia de la excitación, etc.

BIBLIOGRAFIA.

BEAN L. RICHARD, CHACKAN NICHOLAS. "Transformadores para la Industria Eléctrica." Editorial CEC, S.A. México 1963.

MANUAL DEL TÉCNICO ELECTRICISTA TOMO 7 "Teoría, cálculo y construcción del Transformador". Editorial Labor, S.A. Barcelona, 1969.

ING. PEDRO AVELINO PÉREZ. "Transformadores de Distribución" Reverté Ediciones S.A de C.V.

DR. ENRIQUE RAS OLIVA. "Transformadores de Potencia de Medida y Protección". Editorial alfaomega. 1991.

DR. PEDRO DAGÁ GELABERT "Transformadores convertidores" Enciclopedia CEAC de electricidad. Barcelona España.

BARRY W. KENNEDY. "Energy Efficient Transformers" Mc. Graw Hill.

EDITED BY R. FEIN. "Modern Power Transformer Practice"

Normas Mexicanas ANCE-J-284-1998. "TRANSFORMADORES DE POTENCIA."

Normas Mexicanas ANCE -J-169-1998. "PRUEBAS A TRANSFORMADORES DE POTENCIA."

