



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DISEÑO MECÁNICO DE TRANSFORMADORES DE  
POTENCIA**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
ÁREA MECÁNICA

**P R E S E N T A :**  
**LUIS ENRIQUE HERNÁNDEZ CASTILLO**

ASESOR: M. I. LEOPOLDO A. GONZÁLEZ GONZÁLEZ



México, D. F.

1996

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

Todo el material contenido en esta tesis 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.

*A mi Abuelita por todo el cariño que me ha dado.*

*A mi Madre con amor, respeto y admiración,  
como un tributo a su empeño.*

*A Nanis con amor y con quien espero compartir  
muchas cosas más.*

*A la memoria de mi Abuelo y de mi Padre.*



**EL BIENESTAR DE LOS PUEBLOS  
DEPENDIENE DE SU DESARROLLO ECONOMICO**

**EL DESARROLLO ECONOMICO DEPENDE  
DE LA PRODUCTIVIDAD Y COMPETITIVIDAD**

**LA PRODUCTIVIDAD Y LA COMPETITIVIDAD  
DEPENDEN DEL DESARROLLO CIENTIFICO  
Y TECNOLOGICO.**

---

## ÍNDICE

	Página
<b>INTRODUCCIÓN</b>	6
<b>I.- CONCEPTOS BÁSICOS.</b>	8
1.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.	9
1.2. CONFIGURACIÓN FÍSICA.	14
1.3. PARÁMETROS IMPORTANTES DEL DISEÑO ELÉCTRICO.	24
<b>II.- TRANSFORMADORES DE POTENCIA EN EL ÁMBITO MUNDIAL.</b>	26
2.1. TENDENCIAS DE FABRICACIÓN.	27
2.2. FABRICACIÓN EN MÉXICO.	31
2.3. PROPUESTA DE FABRICACIÓN.	35
<b>III.- DISEÑO MECÁNICO.</b>	38
3.1. ELEMENTOS CRÍTICOS.	39
3.2. CONSIDERACIONES PRELIMINARES.	40
3.3. ANÁLISIS.	41
<b>IV.- DISEÑO TÉRMICO.</b>	57
4.1. ELEMENTOS CRÍTICOS.	58
4.2. CONSIDERACIONES PRELIMINARES.	59
4.3. ANÁLISIS.	59
<b>V.- CASO PRÁCTICO.</b>	66
<b>CONCLUSIONES.</b>	72
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	75

---

---

## INTRODUCCIÓN

Básicamente el diseño comprende la formulación de un plan para satisfacer una necesidad específica, en nuestro caso se pretende satisfacer la necesidad de realizar un cálculo racional de un equipo específico: los transformadores de potencia. Éstos, resultan ser equipos que se consideran puramente eléctricos, sin embargo como veremos a lo largo del trabajo existen diferentes sistemas dentro de ellos que requieren del cuidado especial de la ingeniería mecánica, reconociendo a ésta, por ejemplo, a la resistencia de materiales, transferencia de calor, sistemas de manufactura, etc.

La realización de un diseño no necesariamente implica la utilización de teorías originales, por el contrario muchos diseños se realizan en base a estudios antes realizados o, como es el caso, a la utilización de ecuaciones y gráficos experimentales desarrollados por alguna persona. Siendo este el caso, es importante mencionar que las ecuaciones utilizadas se acercan mucho al problema real que se plantea, incluso en sus condiciones de frontera.

El objetivo fundamental del trabajo es presentar una manera simple y rápida para calcular los parámetros básicos de un transformador de potencia, desde el punto de vista mecánico, esto

---

sin hacer a un lado la precisión razonable de los resultados y realizar un análisis mediante elemento finito para comparar los resultados; y por otra parte presentar los equipos que se fabrican a nivel nacional e internacional y confrontar éstos, para posteriormente realizar una serie de propuestas para la construcción de este tipo de equipos en nuestro país.

Los planteamientos utilizados trataron de acercarse lo más posible a la realidad, aún cuando se puede tratar con mayor rigor utilizando un planteamiento completo de los principios variacionales para su posterior solución mediante herramientas de computo, o bien mediante *software* disponible que resulte ser más "robusto", sin embargo esto implicaría un mayor costo de diseño y por tanto mayor costo del producto, además de necesitar conceptos más avanzados de ingeniería que, por tanto, quedan fuera del alcance del presente trabajo.

En la primera parte mostraremos los principios fundamentales bajo los cuales este tipo de equipos funcionan, así como una descripción física de los mismos. El segundo capítulo mostrará de forma general los equipos que se fabrican en el extranjero, particularmente en Estados Unidos de América, así como los equipos de fabricación nacional y por último las propuestas de fabricación para nuestro país. El tercero y cuarto capítulos se realizará un análisis mecánico y térmico, respectivamente, haciendo énfasis en el primero; se proporcionarán expresiones que permitan el cálculo del equipo desde estos puntos de vista. El último capítulo estará dedicado a realizar un análisis mediante elemento finito para confrontar los resultados de éste con los de las expresiones que se propongan en el capítulo tercero y con esto, en cierta forma, validarlas.

# CAPÍTULO I



## 1.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

Un transformador es un dispositivo eléctrico que permite cambiar la energía eléctrica, de corriente alterna, de un nivel de voltaje a otro, mediante la acción de un campo magnético; ya sea para incrementar o disminuir dicha tensión de una fuente de alimentación.

Los dos principios básicos que describen el cómo se utilizan los campos magnéticos en los transformadores son:

- Un alambre cargado de electricidad produce un campo magnético a su alrededor.
- Un campo magnético de tiempo variable induce un voltaje en una bobina de alambre, si pasa a través de dicha bobina.

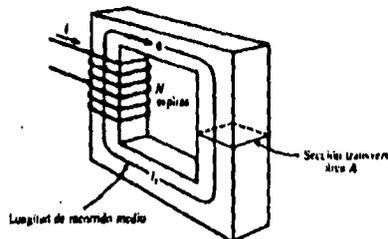


figura 1.1

La ley básica que rige la producción un campo magnético por medio de una corriente es la *ley de Ampere*:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{na} \quad (1-1)$$

donde  $\mathbf{H}$  es la intensidad del campo magnético producido por la corriente  $I_{na}$  a lo largo de la trayectoria cerrada  $l$ . Las unidades correspondientes, en SI, son:  $[\mathbf{H}]_u = [\text{A-vuelta/m}]$ ,  $[I_{na}]_u = [\text{A}]$  y  $[l]_u = [\text{m}]$ . Considerando la figura 1.1 la cual muestra un núcleo rectangular con un embobinado de alambre de  $N$  espiras (o vueltas), en torno a una columna del núcleo; si el núcleo esta hecho con un material ferromagnético, todo el campo magnético producido por la corriente permanecerá esencialmente dentro del núcleo, de tal modo que el recorrido de integración en la ley de Ampere es la longitud media del recorrido del núcleo  $l$ . La corriente que pasa dentro del recorrido de integración  $I_{na}$  es, entonces,  $Ni$ , ya que la bobina "abraza" el recorrido de integración  $N$  veces, mientras conduce la corriente  $i$ . La ley de Ampere queda entonces como:

$$Hl = Ni \quad (1-2)$$

en donde  $H$  es la magnitud de la intensidad del campo magnético  $\mathbf{H}$ . Por lo tanto, la magnitud de la intensidad del campo magnético en el núcleo, debido a la corriente aplicada, es:

$$H = \frac{Ni}{l} \quad (1-3)$$

La intensidad  $\mathbf{H}$  del campo magnético es, en cierto sentido, una medida del "esfuerzo" que una corriente realiza para establecer un campo magnético. La intensidad del flujo del campo magnético producido en el núcleo depende también del material de éste. La relación entre la intensidad  $\mathbf{H}$  del campo magnético y la densidad  $\mathbf{B}$  del flujo magnético resultante, producido dentro del material esta dada por:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1-4)$$

en donde  $\mathbf{H}$  es la intensidad del campo magnético y representa el esfuerzo que ejerce la corriente para establecer el campo magnético,  $\mu$  es la permeabilidad magnética del material y representa el esfuerzo que realiza la corriente para establecer un campo magnético en un material dado, y  $\mathbf{B}$  es la densidad resultante del flujo magnético producido. Las unidades que se tienen son:  $[\mu]_u = [\text{H/m}]$ ,  $[\mathbf{B}]_u = [\text{T}]$ .

El flujo total en un área dada se determina por:

$$\phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (1-5)$$

donde  $dA$ , es la unidad diferencial de área. Si el vector de la densidad de flujo es perpendicular a un plano de área  $A$  y si la densidad del flujo es constante en toda el área, entonces la ecuación anterior se reduce a:

$$\phi = BA \quad (1-6)$$

De esta forma tenemos que, en el núcleo de la figura 1.1, el flujo total debido a la corriente  $I$  en el embobinado es:

$$\phi = \frac{\mu N I A}{l_c} \quad (1-7)$$

La *ley de Faraday* establece que si un flujo pasa por una vuelta de una bobina de alambre, se inducirá un voltaje en la vuelta de alambre, proporcional a la razón de cambio en el flujo respecto al tiempo, esto es:

$$e_{\text{ind}} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1-8)$$

en donde  $e_{\text{ind}}$  es el voltaje (diferencia de potencial) inducido en la vuelta de la bobina y  $\phi$  es el flujo que pasa por la vuelta. Ahora, si una bobina tiene  $N$  número de vueltas y el mismo flujo pasa por todas ellas, entonces el voltaje inducido a través de toda la bobina es  $N$  veces el voltaje inducido en una espira.

$$e_{\text{ind}} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1-9)$$

El signo menos en la ecuación (1-8) se debe a que la dirección del voltaje inducido en la bobina es tal que si sus extremos se pusieran en corto circuito, produciría una corriente que causaría un flujo para oponerse al cambio de flujo original, lo cual se conoce como *ley de Lenz*. Dado que el voltaje inducido se opone al cambio que lo causa, se incluye un signo menos en la mencionada ecuación.

Si el flujo mostrado en la figura 1.2 esta aumentando su intensidad, entonces el voltaje inducido en la bobina tenderá a establecer un flujo que se opondrá al aumento. Una corriente que fluye, como se muestra en la parte (b) de dicha figura, produciría un flujo que se opone al aumento, de tal modo que el voltaje sobre la bobina debe producirse con la polaridad requerida para dirigir esa corriente a través del circuito externo. El voltaje debe, entonces, generarse con la

polaridad que se muestra. Puesto que la polaridad del voltaje resultante se puede determinar por consideraciones físicas, el signo menos en las ecuaciones (1-8) y (1-9) se desechan a menudo.

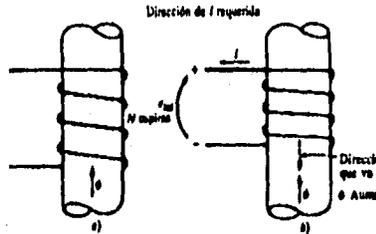


figura 1.2

Existe una dificultad al utilizar la ecuación (1-9) en problemas prácticos; la ecuación supone que exactamente el mismo flujo se encuentra presente en cada vuelta de la bobina. Desafortunadamente, la "fuga" de flujo desde el núcleo hacia su alrededor hace que esto no sea cierto. Si los embobinados están firmemente acoplados, de tal manera que la mayor parte del flujo que pasa por entre una vuelta de la bobina, pasa efectivamente por entre todas ellas, entonces la ecuación dará respuestas válidas. Pero si las fugas son muy altas o si se requiere una gran precisión, se necesitará una expresión diferente que no tenga en cuenta dicha suposición.

La magnitud del voltaje de la  $i$ -ésima vuelta de la bobina, esta dada por (el signo menos se desecho de la expresión):

$$e_{ind} = \frac{d(\phi_i)}{dt} \quad (1-10)$$

Si hay  $N$  número de espiras en la bobina, el voltaje total sobre ésta es:

$$e_{ind} = \sum_{i=1}^N e_i = \sum_{i=1}^N \frac{d(\phi_i)}{dt}$$

$$\Rightarrow e_{ind} = \frac{d}{dt} \left( \sum_{i=1}^N \phi_i \right) \quad (1-11)$$

El término entre paréntesis, en la última expresión, se denomina *flujo enlazado* de la bobina y la ley de Faraday puede enunciarse en términos de pérdidas de flujo:

$$e_{\text{ind}} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (1-12)$$

donde  $\lambda = \sum_{i=1}^N \phi_i$ , y sus unidades son [Wb/vuelta].

El efecto de la ley de Lenz en los transformadores es pronosticar la polaridad de los voltajes inducidos en los embobinados.

Para considerar que un transformador funciona de manera ideal, es necesario cumplir con dos condiciones:

- Los devanados primario y secundario tienen resistencias al flujo de corriente despreciables, es decir, que no hay pérdidas por efecto Joule y no existen caídas de tensiones, debidas a la resistencia, en el transformador. En un sistema real estas resistencias son de pequeño valor pero no nulas.
- No existen flujos de dispersión, lo que significa que todo el flujo magnético está confinado al núcleo y enlaza ambos devanados, primario y secundario. En el transformador real existen pequeñas partes del flujo que solamente atraviesan a cada uno de los devanados y que son los flujos de dispersión que completan su circuito a través del medio en que está inmerso el equipo.

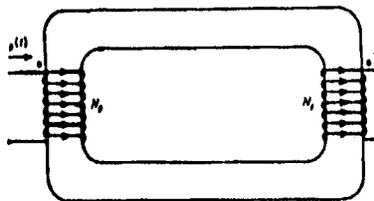


figura 1.3

La relación entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida, y entre la corriente de entrada y la de salida, se establece mediante dos ecuaciones sencillas. El transformador mostrado en la figura 1.3 tiene  $N_1$  espiras de alambre sobre su lado primario y  $N_2$  espiras de alambre en su lado secundario. La relación entre el voltaje  $v_1(t)$  aplicado al lado primario del transformador y el voltaje  $v_2(t)$  inducido sobre el lado secundario es

$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} \quad (1-13)$$

donde podemos definir la relación de espiras de transformador, o relación de transformación, como:

$$a = \frac{N_p}{N_s} \quad (1-14)$$

La relación entre la corriente  $i_p(t)$  que fluye en el lado primario del transformador y la corriente  $i_s(t)$  que fluye del lado secundario del transformador es:

$$N_p i_p(t) = N_s i_s(t) \quad (1-15)$$

o bien, en términos de la relación de espiras:

$$\frac{i_p(t)}{i_s(t)} = \frac{1}{a} \quad (1-16)$$

## 1.2. CONFIGURACIÓN FÍSICA.

Un transformador consiste de dos o más bobinas de alambre envueltas alrededor de un núcleo ferromagnético común. Estas bobinas no están conectadas directamente, la única conexión entre éstas es el flujo magnético común presente dentro del núcleo. El primario es el devanado que recibe la potencia eléctrica, y el secundario es el que puede entregarla a una red exterior. El devanado de mayor tensión, recibe el nombre de devanado de alta tensión (A. T.) y el de menor tensión se denomina devanado de baja tensión (B. T.).

Los transformadores de potencia, generalmente, tienen un rango de operación por encima de los 500 [kVA] o bien, por arriba de los 67 [kV]. El proceso de transformación tiene un gran rendimiento al no disponer la máquina de órganos móviles, pudiéndose llegar a valores del orden del 99.7%.

En el diseño de los transformadores para sistemas de potencia, las características eléctricas que interesan son el gran rendimiento, baja regulación de tensión y gran rigidez dieléctrica; con ellas, el calentamiento es un factor primordial para la determinación de las características físicas.

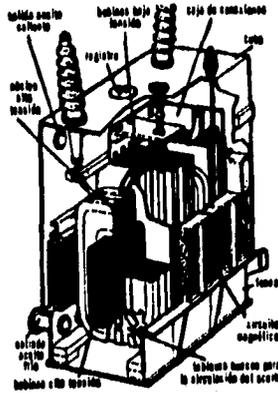


figura 1.4

**Núcleos.**

Se denomina núcleo del transformador al sistema que forma su circuito magnético, está constituido por láminas de acero al silicio, actualmente laminadas en frío (grano orientado), que han sido sometidas a un tratamiento químico especial denominado comercialmente carlite que las recubre de una capa aislante muy delgada (0.01 mm) lo que reduce considerablemente las pérdidas en el hierro.

El núcleo esta compuesto por columnas que son las partes donde se montan los devanados y las culatas, que son las partes que realizan la unión entre columnas. Los espacios entre columnas y las culatas, por las cuales pasan los devanados, se llaman ventanas del núcleo (ver figura 1.6).



figura 1.5

Los dos tipos fundamentales de estructura de transformador son el tipo de núcleo, en el cual dos grupos de devanados abrazan a un núcleo único, como se muestra en la figura 1.5a, y el

*tipo acorazado*, en el cual el flujo atraviesa a un único grupo de devanados que está constituido, al menos, por dos componentes existentes en circuitos magnéticos en paralelo, tal como se muestra en la parte (b) de la mencionada figura.

Si realizáramos cortes transversales en la figura 1.5, el interior de los transformadores tipo núcleo y tipo acorazado se verían como se muestra en la figura 1.6. Los circuitos magnéticos corresponden a transformadores monofásicos, las secciones de las columnas y culatas son iguales para hacer que la inducción sea la misma en todo el circuito magnético; en el caso de la figura 1.6b la columna central tiene el doble de superficie que las laterales ya que por ella circula doble flujo que en estas últimas. Cuando se trata de transformadores trifásicos, el circuito magnético consta de tres columnas idénticas (ver figura 1.8).

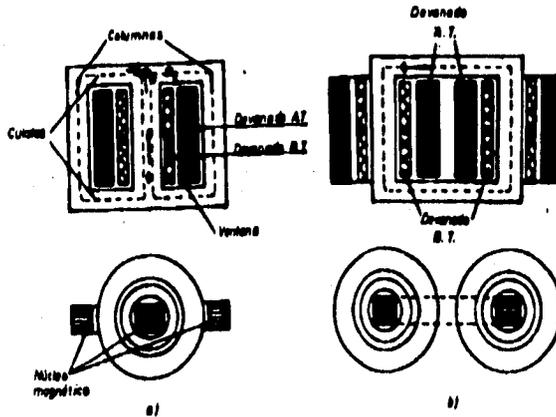


figura 1.6

Las uniones de las columnas con las culatas se denominan juntas, y deben tener un espesor, lo más pequeño posible, con objeto de reducir al máximo la reluctancia del circuito magnético. La culata superior se tiene que poder abrir para colocar las bobinas y los aislantes. Las uniones o juntas pueden realizarse a tope (o plana) o bien a solape (entrelazada). En la construcción a tope, como se muestra en la figura 1.7a, las columnas y las culatas se montan separadamente y luego se unen con ayuda de piezas de sujeción. En la construcción a solape todo el núcleo magnético se construye de una vez, de tal forma que, como se observa en la parte b de la misma figura, se van ensamblando las láminas con un desfase de posición entre láminas sucesivas (pares e impares) igual el ancho de las láminas de la culata, este montaje, aunque es más complicado que el anterior,

permite un aumento de la estabilidad mecánica del conjunto. En cualquiera de los dos casos, existe una zona al lado de la junta, en la que el flujo no sigue la dirección de laminación, esto origina en el caso de láminas de grano orientado, un calentamiento local debido al aumento de pérdidas en el hierro; para evitar esto, las uniones no se realizan a  $90^\circ$  como se indica en la figura 1.7, sino a  $45^\circ$ .

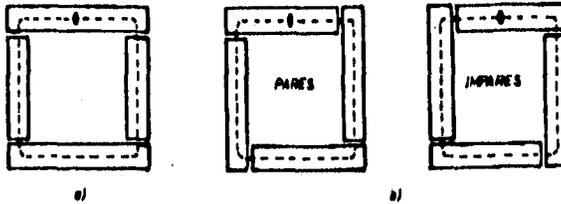


figura 1.7

En los transformadores de gran potencia, para mejorar la transferencia de calor, se intercalan entre los paquetes de láminas canales de ventilación. El conjunto de las láminas debe ser finalmente apretado por medio de bridas de madera o de perfiles de hierro con la ayuda de pernos aislados; de esta forma se consigue dar rigidez mecánica al conjunto y se evitan vibraciones (ver figura 1.8).

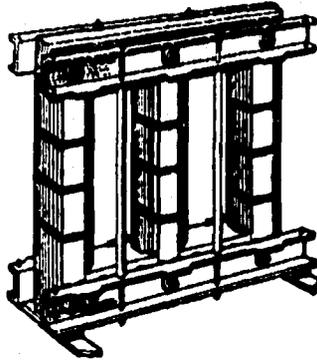
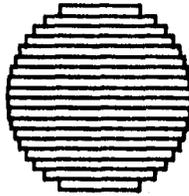


figura 1.8

La sección recta del núcleo suele ser cuadrada o rectangular en los transformadores pequeños, pero en los grandes se aprovecha más eficazmente la abertura circular de las bobinas

agrupando las láminas en capas de anchura variable de manera que constituyan un núcleo circular escalonado, el número de escalones es mayor cuanto mayor sea la potencia del transformador, y el espesor de cada escalón es también una función de la potencia del equipo; la figura 1.9 muestra la sección transversal de un núcleo con esta configuración.



*figura 1.9*

Además de la necesidad de obtener características eléctricas convenientes, la elección del tipo de construcción del núcleo se ve influida por un cierto número de consideraciones prácticas, tales como el costo de construcción y mantenimientos, exigencias de espacio, refrigeración, aislamiento y robustez mecánica, esto último se debe a que frecuentemente el núcleo sirve de estructura. Bajo carga normal los esfuerzos mecánicos a que se halla sometido el transformador son poco mayores que los debidos a los pesos de sus distintas partes. En cambio, en condiciones de cortocircuito los esfuerzos electromagnéticos pueden hacerse enormes, ya que son proporcionales a los cuadrados de las intensidades de corrientes que circulan por los devanados. Si la tensión de funcionamiento normal se mantiene aplicada al primario de un transformador ordinario de un sistema de potencia, estando en cortocircuito el secundario, las intensidades de corriente suelen ser de 10 a 25 veces mayores que las correspondientes a plena carga y los esfuerzos electromagnéticos de 100 a 625 veces mayores que los valores a plena carga. En los transformadores muy grandes, las fuerzas de cortocircuito que tienden a separar el primario del secundario pueden ser de hasta 7 MN.

Las construcciones tradicionales de núcleos, presentadas en la figura 1.5, tienen tres inconvenientes. Primero, en estas formas de núcleo deben haber dos o tres entrehierros independiente de las formas de troquelado que se empleen. Segundo, para ensamblar o apilar las láminas se requiere un gran trabajo manual, ya que las láminas deben solaparse en cada junta. Tercero, existen siempre ciertos lugares del núcleo en donde el flujo tiene dirección perpendicular

a la del laminado del metal, aumentándose así la pérdida en el núcleo y la corriente de excitación. A pesar de estas dificultades, estos diseños se emplean mucho en transformadores de potencia y de distribución de tamaños grandes.

#### Devanados.

Constituyen el circuito eléctrico del transformador, consisten, en general, de bobinas devanadas (enrolladas) sobre una horma (molde) y cubiertas de cinta aislante, generalmente fibra de algodón o cinta de papel. En los transformadores grandes se emplea cable conductor cuadrado. Si la sección recta de un conductor macizo es grande o la frecuencia es alta, la resistencia de un conductor a la corriente alterna puede ser apreciablemente mayor que su resistencia a la corriente continua. Para reducir la pérdida adicional debida a la distribución no uniforme de la corriente por el interior del conductor, los conductores grandes suelen subdividirse en hebras o cabos ligeramente aislados entre sí y traspuestos adecuadamente en el devanado. Si se traspone cabos de igual tamaño de manera que cada uno abrace el mismo flujo total, la corriente total se divide por igual entre los cabos y se reducen al mínimo las pérdidas en el devanado.

En el transformador del tipo núcleo, primario y secundario se dividen cada uno en dos partes iguales, colocando una en una rama vertical del núcleo y otra en la otra rama vertical. La finalidad de esta división en los devanados es reducir la fuga magnética entre primario y secundario.

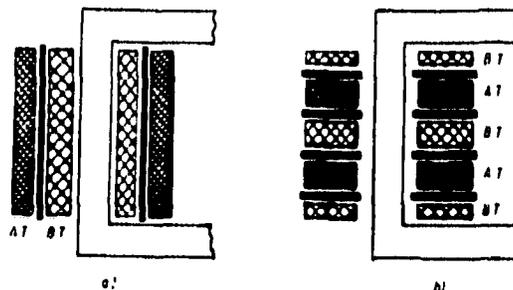


figura 1.10

Los devanados pueden ser concéntricos, en tal caso las bobinas tiene forma de cilindros coaxiales, como lo muestra la figura 1.10a; generalmente se coloca más cerca de la columna el

devanado de baja tensión ya que es más fácil de aislar que el de alta tensión, entre ambos bobinados se intercala un cilindro aislante de cartón o papel baquelizado. Pueden ser, también, alternados (figura 1.10b), en tal caso el devanado se subdivide en secciones, de tal forma que las partes de los devanados de alta tensión y baja tensión se colocan de manera alterna a lo largo de la columna.

Cada una de las bobinas de baja tensión puede devanarse en forma de hélice continua; pero si la tensión por bobina supera unos miles de volt, suele subdividirse el devanado. En tal caso suelen emplearse bobinas en forma de disco circular. Un devanado completo consiste de un cierto número de bobinas apiladas una sobre otra, tal como se muestra en la figura 1.11. Los discos suelen llevar entre ellos separadores de madera que faciliten la refrigeración.



figura 1.11

#### Aislamiento.

Los sistemas de aislamiento comprenden sistemas líquidos y de gas. En ambos casos algún aislamiento sólido es utilizado (productos químicos inhibidores). Los sistemas líquidos incluyen aceites minerales los cuales son los más utilizados, ya que, desde un punto de vista histórico, gracias a éstos se hizo posible el desarrollo de transformadores de gran potencia. El aceite mineral tiene, sin embargo, dos inconvenientes: es inflamable y sus vapores, en ciertas condiciones, forman con el aire mezclas explosivas. En la década de los treinta se logró desarrollar un aceite sintético conocido comúnmente como *Askarel*, el cual ofrece ventajas sobre los minerales, ya que no es inflamable ni explosivo. Puede encontrarse en transformadores que operan en la actualidad, pero ha sido desplazado por completo de la producción actual de transformadores debido a su impacto ambiental. En la actualidad se ha impulsado el uso de una vasta gama de fluidos de alto punto de inflamación denominados aceites de siliconas y que representan un avance tecnológico para intentar aunar, como se verá más adelante, las propiedades de aislante y refrigerante de los aceites.

Los sistemas de gas contemplan nitrógeno, aire y fluorogases. Estos últimos se utilizan para evitar la combustión y limitar los efectos secundarios de fallas internas.

Cuando se logra el máximo aislamiento, se separa el devanado de alto voltaje del de baja y tierra. Este aislamiento lleva consigo un alto voltaje y ocupa, también, un espacio muy limitado; sin embargo, normalmente opera bajo condiciones de gran esfuerzo. Dependiendo de la construcción, el aislamiento del núcleo debe proporcionarse entre las partes del devanado. El aislamiento, en su caso, debe aplicarse en cada parte del devanado dividido, o bien dos divisiones formar una sola vuelta de aislante.

El bajo costo, alta resistencia dieléctrica y la capacidad de recuperación después de un gran esfuerzo dieléctrico hacen del aceite mineral el aislante más utilizado. El aceite es reforzado con aislamientos sólidos de varias maneras. El máximo aislamiento normalmente incluye barreras de cartón prensado, estas barreras normalmente se alternan con espacios de aceite.

Las burbujas de gas en el aislamiento son particularmente destructivas para la resistencia de éste, debido a que el gas (normalmente aire) tiene una constante dieléctrica baja comparada con la del aislamiento provocando así una disminución en la resistencia del aislamiento.

Los fluorogases tiene una mejor resistencia dieléctrica y capacidad de transferencia de calor que el nitrógeno o el aire. Tanto la resistencia dieléctrica como la capacidad de transferencia de calor se incrementan con la densidad, y los transformadores a base de fluorogases operan por arriba de la presión atmosférica, en algunos casos por encima de las 3 atmósferas (manométricas), resultando de esta forma una buena alternativa de aislamiento bajo estas condiciones.

Los transformadores aislados con nitrógeno o aire están, generalmente, limitados a voltajes de operación bajos. Los transformadores aislados con aire, en lugares limpios, frecuentemente se ventilan con aire de la atmósfera. En atmósferas contaminadas es necesaria una construcción sellada, y el nitrógeno se utiliza a presiones cercanas a la atmosférica y bajo condiciones de temperaturas de operación elevadas.

#### Refrigeración.

En los transformadores muy pequeños, la superficie es relativamente grande frente al volumen. La refrigeración por radiación y por convección natural es suficiente para mantener la temperatura de funcionamiento por debajo que puede soportar el aislante sin reducir seriamente su vida útil, lo que se conoce como transformadores en seco. Sin embargo, al aumentar el tamaño de

un objeto, el volumen crece con el cubo de sus dimensiones lineales mientras que el área de su superficie lo hace con el cuadrado. Así para una pérdida dada por unidad de volumen de las partes en funcionamiento, el calor que hay que disipar por unidad de superficie crece proporcionalmente a las dimensiones lineales. Luego, al ir aumentando el tamaño, se debe aumentar el área de la superficie o bien, proveer medios artificiales para acelerar la disipación de calor.

El tipo de refrigeración de un transformador, y en general el del transformador mismo<sup>1</sup>, se designa según las Normas CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) por cuatro letras. Las dos primeras se refieren al tipo de refrigerante en contacto con los devanados y a la naturaleza de su circulación, las otras dos letras se refieren al refrigerante en contacto con el sistema de refrigeración exterior y a su modo de circulación. Los símbolos empleados son los que se indican en la tabla 1.1.

NATURALEZA DEL REFRIGERANTE	SÍMBOLO	NATURALEZA DE LA CIRCULACIÓN	SÍMBOLO
Aceite Mineral	O	Natural	N
Gas	G	Forzada	F
Agua	W		
Aire	A		
Aislante Sólido	S		

tabla 1.1

Por ejemplo, un transformador en baño de aceite, con circulación natural por convección, que a su vez es está refrigerado por aire con movimiento natural, se designara por las letras ONAN.

Los transformadores enfriados por medio de un ventilador, utilizan uno de éstos en su parte exterior para provocar disipación de calor en el enfriador, y en algunos casos utilizan bombas internas para hacer circular el aceite a través del radiador, y en ocasiones a través de ductos de enfriamiento que pasan entre el núcleo y devanado.

Los transformadores de enfriamiento forzado utilizan intercambiadores de calor, de aire-aceite, externos, los cuales requieren tanto ventiladores como bombas para cualquier condición de operación.

<sup>1</sup> Según NOM-J-284-1986 la clasificación de los transformadores de potencia se hace en función de los sistemas de disipación de calor.

En los transformadores enfriados por agua, normalmente el aceite se retira del transformador en la parte alta del tanque, para posteriormente ser bombeado a través de un enfriador externo, por último se reingresa al tanque por su parte baja.

#### Tanque.

Los transformadores que emplean refrigeración por líquido deben tener sus núcleos y devanados necesariamente encerrados en tanques que eviten las pérdidas del refrigerante, los cuales se construyen, normalmente, de placa de acero soldada, y pueden tener forma redonda, ovalada, elíptica o rectangular, siendo esta última geometría la más utilizada. Deben tener una cierta holgura para permitir la dilatación y contracción térmica del aislante. En general se utilizan tanques herméticos al aire, con una cámara de aire suficiente entre la tapa y el aislante para permitir que éste comprima o dilate el aire encerrado. En algunos transformadores grandes, la cámara sobre el aceite se llena de nitrógeno mantenido a una presión ligeramente superior a la atmosférica por medio de una válvula automática accionada por la presión, que admite nitrógeno seco de un cilindro que lo contiene comprimido, cuentan también con una válvula de seguridad. A los transformadores grandes se les permite más comúnmente "respirar", es decir, que carecen de tanques sellados. Un método corriente para ello consiste en montar sobre el tanque un tambor horizontal llamado «conservador de aceite» que se conecta al tanque mediante un tubo en "U". El aceite llena el tanque por completo, en la parte superior de éste existe una abertura de respiración a la atmósfera. Este respiradero, por lo general, está equipado con filtros químicos que eliminan la humedad y el oxígeno del aire que penetra en el conservador. En caso de cortocircuito, dentro del transformador podrían formarse burbujas rápidamente, entonces, la tapa deberá ir provista de una tubería protectora cerrada por un diafragma delgado de seguridad que se rompa ante la presión excesiva y evite así la explosión del tanque. El peligro de explosión resultante de burbujas gaseosas calientes, se elimina excluyendo el oxígeno de la parte superior del tanque.

Como ya se mencionó, una parte del calor que disipa el transformador lo hace mediante el mecanismo de radiación, en tal caso la configuración externa debe ser importante en el diseño de transformadores. La mayor parte de pinturas para tanques de transformadores, tienen emisividad de baja temperatura de aproximadamente 0.95. Las superficies metálicas, particularmente las superficies pulidas, tienen una emisividad de baja temperatura menor, lo cual puede causar, en consecuencia, una gran elevación en la temperatura del aislante. En transformadores grandes con

varios radiadores o intercambiadores de calor el efecto resulta pequeño. Para transformadores expuestos a la intensa luz del sol, el incremento adicional de temperatura debido al uso de pinturas en base aluminio es, en gran medida, compensado por el hecho de que la pintura de aluminio absorbe alrededor del 55% de la radiación solar que choca con el tanque, considerando este efecto se utiliza con más frecuencia pinturas que tengan la capacidad de absorber mas o menos el 95%.

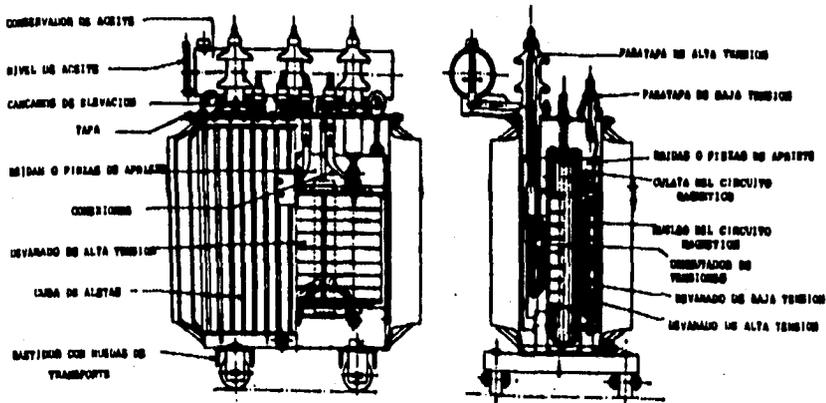


figura 1.12

### 1.3. PARÁMETROS IMPORTANTES DEL DISEÑO ELÉCTRICO.

Para generar la construcción de un transformador de potencia, en principio debe realizarse el diseño eléctrico del mismo, esto incluye devanados y núcleos; posteriormente, y en base a los resultados obtenidos, se elaboran el diseño mecánico y térmico del transformador.

Para poder llevar a cabo el diseño eléctrico es necesario contar con los siguientes datos:

- Potencia del transformador (kVA), que es precisamente la potencia de operación del equipo.
- Fases, las cuales se refieren al tipo de onda con que llega la corriente al transformador, usualmente los transformadores de potencia son trifásicos (3 fases).
- Volts sin carga en alta tensión, es el voltaje que se tiene entre las terminales del devanado de alta tensión, precisamente cuando el transformador no tiene ningún elemento conectado a estas terminales.

- Volts sin carga en baja tensión, el mismo caso que el anterior solo que en el devanado de baja tensión.
- Elevación (°C), en este rubro se especifica la temperatura de operación del equipo.
- MSNM (Metros sobre el nivel del mar), como su nombre lo indica son los metros sobre el nivel del mar a los cuales estará funcionando el transformador.
- Derivaciones, .
- Tipo de conexión, es la configuración que tendrá la conexión del transformador.

Adicionalmente se proporcionan algunos otros datos como son: el tipo de enfriamiento del transformador, la frecuencia de operación (que en México es de 60 Hz), el porcentaje de carga al que trabajará el equipo, las horas que operará diariamente, etcétera; sin embargo por ser estos últimos parámetros prácticamente obligados no se consideran como datos del diseño.

Ahora, una vez realizado el diseño eléctrico se tienen ciertos parámetros que serán de utilidad para la elaboración del resto del diseño, estos son:

- La corriente que circula por los conductores de baja y alta tensión.
- Las dimensiones de los conductores de baja y alta tensión, tanto desnudos como aislados.
- Las dimensiones de los devanados y del núcleo.
- El peso de los devanados y del núcleo.
- La cantidad de potencia que debe disiparse.

Es importante señalar que debe existir una estrecha comunicación entre el ingeniero responsable del diseño eléctrico con los que se encargan del diseño mecánico y térmico, pues una buena comunicación seguramente conducirá a un buen diseño general del equipo.

# CAPÍTULO II



El presente capítulo tratará de dar una visión de la fabricación de transformadores de potencia, tanto en el extranjero como en nuestro país. Únicamente se expondrán algunas marcas, pues es imposible cubrir toda la gama de éstas, para tener una idea general de lo que es la construcción de este tipo de equipos. Finalmente se hará una recomendación en las tendencia que debe seguir la fabricación de estos equipos en nuestro país.

## 2.1. TENDENCIAS DE FABRICACIÓN.

Como representación de transformadores a nivel mundial mencionaremos a la marca *SQUARE-D*, la cual posee una gran gama de tipos de transformadores además de vender sus equipos en muchos países.

Los transformadores de potencia que ofrece van desde los que contienen aceite y son enfriados por agua hasta los transformadores en seco. Los primeros, como el mostrado en la figura 2.1 son de gran flexibilidad, es decir, que pueden mandarse a construir de acuerdo a las especificaciones del cliente y utilizan como aislante aceites minerales los cuales son menos agresivos con el medio ambiente que los puramente sintéticos, como sistema de enfriamiento

tienen tubos y obleas; cabe señalar que el transformador mostrado en la figura arriba mencionada se ofrece para uso en subestaciones y posee una pintura color negro.



*fig. 2.1. Transformador de potencia OA, marca SQUARE D.*

Los transformadores de gran potencia, utilizados normalmente a la intemperie, como el que se muestra en la figura 2.2 generalmente utilizan sistemas de refrigeración más complejos, en la figura se observa un radiador y tolvas para dirigir el flujo de aire forzado. El color de la pintura es claro lo que significa que la transferencia de calor por radiación es mínima comparada con la de convección.



*fig. 2.2. Transformador de potencia estación abierta, marca SQUARE D.*

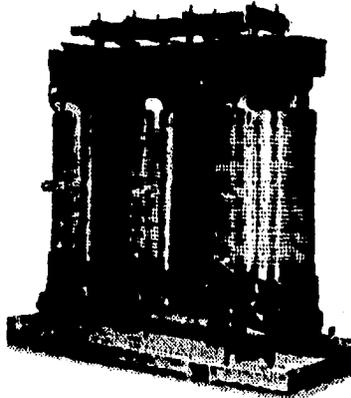
Esta marca ofrece transformadores de potencia en seco y enfriados por aire, la configuración no es común pues normalmente se presentan problemas relacionados con la temperatura en esta clase de equipos; sin embargo esta marca ha desarrollado un sistema nuevo en la configuración del núcleo, la cual permite que este tipo de transformador sea rentable, más aún, en condiciones normales de operación resultan ser más eficientes que los que contienen aceite como aislante. Eliminando el fluido aislante la configuración mecánica se simplifica notablemente, como se puede apreciar en la

figura 2.3 las paredes que guardan al núcleo son solamente tolvias y la base, por supuesto, debe ser de placa de acero para soportar el peso del conjunto núcleo - devanados, mostrado en la figura 2.4.



*fig. 2.3. Transformador de potencia Power-Dry™, marca SQUARE D.*

Este tipo de transformador presenta configuraciones ya especificadas, en otras palabras carecen de flexibilidad, esto se debe básicamente a la complejidad de la configuración del núcleo y devanados.



*fig. 2.4. Núcleo de un transformador Power-Dry™, marca SQUARE D.*

En la figura 2.5 se muestra el conjunto núcleo - devanado explotado, se puede observar que el núcleo es prácticamente el mismo que los transformadores convencionales, sin embargo los devanados se encuentran contenidos dentro de camisas de aluminio con orificios entre éstas con el fin de facilitar el enfriamiento del equipo. La figura 2.6 muestra con detalle la geometría de los

devanados, se puede notar que los devanados se encuentran entre la camisa de aluminio lo que hace pensar que su manufactura no es simple.



fig. 2.5. Núcleo de un transformador Uni-Cast™, marca SQUARE D.

Este tipo de equipos los recomiendan sobre todo en lugares donde la asepsia es un factor importante ya que el enfriamiento es por convección natural.



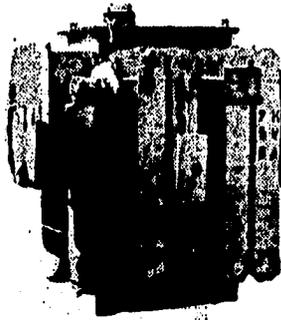
fig. 2.6. Detalle del circuito de alta y baja tensión de un transformador Power-Dry™, marca SQUARE D.

En el núcleo se utilizan materiales compuestos, como el NOMEX™ y la fibra de vidrio, para disminuir la vibración y el ruido en el equipo así como incrementar la resistencia al corto circuito en el equipo, disminuyendo de esta forma la cantidad de elementos de sujeción en el núcleo. Este último compuesto de laminas de grano orientado y recubiertas con resinas de poliéster. Los fabricantes también los recomiendan por su bajo costo de mantenimiento.

## 2.2. FABRICACIÓN EN MÉXICO.

La fabricación en nuestro país es básicamente del tipo húmedo, pues no se cuentan con equipos especializados, es decir que utilizan aceite como aislante y son enfriados por aire.

La figura 2.7 muestra un transformador de la marca *TRAGESA*, esta marca en particular no ofrece flexibilidad en su capacidad, incluso el color de su pintura es el mismo para los transformadores de interior y exterior. Podemos observar que tiene capacidad de 750 KVA y utiliza enfriamiento forzado de aire.



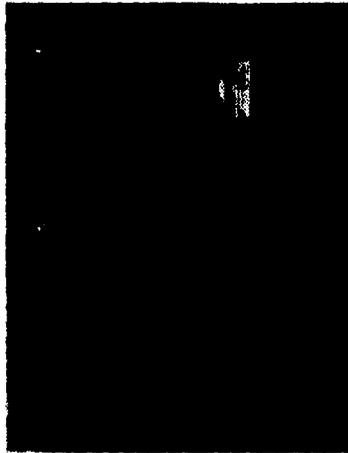
*fig. 2.7. Transformador de potencia OA, marca TRAGESA (General Electric).*

Otro fabricante importante en nuestro país es *DEEMSA*, esta marca cuenta con equipos flexibles y de especificación determinada. La figura 2.8 muestra un equipo de esta marca recomendado para interiores y presenta un color oscuro en el exterior.



*fig. 2.8. Transformador de potencia OA, marca DEEMSA.*

La figura 2.9 presenta un transformador recomendado también para interiores que presenta un color más claro que el anterior. Podemos observar que el enfriamiento se realiza por convección natural mediante tubos.



*fig. 2.9. Transformador de potencia estación abierta, marca DEEMSA.*

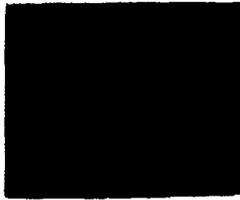
El núcleo, como el mostrado en la figura 2.10, es de láminas de acero de silicio de grano orientado el cual permite obtener bajas pérdidas eléctricas y un nivel de ruido bajo. Las bobinas se forran con cuatro capas de papel de forma circular para aumentar la resistencia mecánica a los esfuerzos por corto circuito.



*fig. 2.10. Núcleo de transformador, marca DEEMSA.*

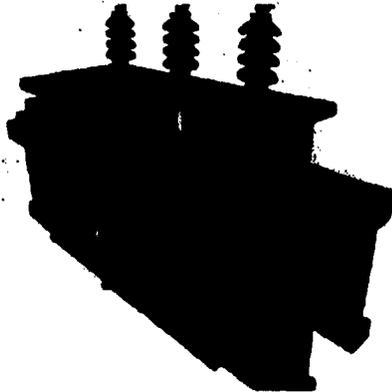
Transformadores de potencia en el ámbito mundial.

La figura 2.11 presenta un transformador de la marca *EMSA*, los cuales utilizan en la construcción de bobinas de baja tensión cinta de aluminio y alambre de cobre con esmalte en las de alta tensión. El aislante utilizado entre los conductores es papel con aplicaciones de resina epóxica lo que permite tener una alta resistencia mecánica al corto circuito.



*fig. 2.11. Transformador de potencia OA, marca EMSA.*

La figura 2.12 muestra el detalle del interior y de el sistema de enfriamiento. A diferencia de los anteriores la configuración del núcleo es de tipo acorazada (figura 1.5), el enfriamiento se realiza también mediante tubos y por convección natural.



*fig. 2.12. Detalle de interior transformador de potencia OA, marca EMSA.*

Por último, observemos la figura 2.13, la cual muestra un transformador de marca *VOLTRAN*, esta marca no hace distinción en la pintura utilizada para equipos de interior o exterior. Utilizan una gama más amplia de fluidos de enfriamiento que las marcas antes mencionadas, además de que los aceites que utilizan no son sintéticos así como ninguno de sus aislantes. el núcleo se construye, también, con láminas de acero al silicio de grano orientado y utilizan cortes

convencionales a 45° y agrupados en forma escalonada que, como se mencionó en el capítulo I, permite disminuir las pérdidas magnéticas en el núcleo.



fig. 2.13. Transformador de potencia OA, marca VOLTRAN.

La fabricación de estos equipos es flexible. El enfriamiento se lleva a cabo mediante tubos planos por convección natural o forzada dependiendo de la capacidad con que se requiera el equipo.

A continuación se presenta una tabla comparativa de algunas de las partes importantes en el equipo, ésta sólo incluye transformadores del mismo tipo.

	<i>Nacional</i>	<i>Extranjero</i>
Tanque	Placa de acero al carbono, refuerzos verticales y horizontales de ser necesario.	Placa de acero al carbono, refuerzos horizontales de ser necesarios.
Núcleo	Acero al silicio de granos orientado.	Acero al silicio de granos orientado.
Devanados	Cobre electrolítico, alambre magneto esmaltado, cinta de aluminio.	cinta de aluminio, cobre electrolítico.
Pintura externa	Esmalte o epóxica; cuidado relativo en la selección del color.	Epóxica, cuidado en la selección de color.
Aislamiento devanados	Papel, cartón, madera, fibra de vidrio, esmaltes epóxicos.	Esmaltes de poliéster, fibra de vidrio, <i>NONEX™</i> .
Aislamientos líquidos	Aceite mineral, siliconas, <i>RTEmp®</i>	Aceite mineral, <i>RTEmp®</i>
Enfriamiento	Natural y forzado, tubos planos.	Natural y forzado, tubos planos y obleas.
Especificaciones	Flexibles y por catálogo.	Flexibles y por catálogo.

Tabla 2.1. Comparación general de los equipos nacionales y extranjeros.

### 2.3. PROPUESTA DE FABRICACIÓN.

Hemos visto que la construcción actual tiende hacia transformadores de potencia en seco, esto no es de asombrarse pues, ante las políticas actuales de protección al medio ambiente resulta ser más conveniente utilizar transformadores de esta naturaleza, los cuales, por supuesto, carecen de aceite sintético el cual es un fluido alto en contaminantes; así es importante que el diseño y desarrollo de transformadores de potencia se dirija más hacia este tipo de equipos. Además de que la estructura propia del transformador será menos robusta y, por tanto, más económica. Resultan ser también más eficientes, aún cuando un transformador, en general, presenta buenas eficiencias. El mantenimiento se reduce a un mínimo, además los niveles de ruido y vibración disminuyen considerablemente.

Uno de los problemas que se presentan en los transformadores es la vibración y el ruido que provoca la frecuencia de operación del equipo. En la actualidad problemas de ésta índole se solucionan registrando las ondas que provocan estos fenómenos, a continuación esa señal es procesada y con un altavoz se induce una frecuencia similar pero de signos contrarios, logrando de esta manera una reducción considerable de la vibración y el ruido en el equipo. La siguiente figura muestra el principio básico de funcionamiento del método antes descrito para la supresión de ruidos o vibraciones.

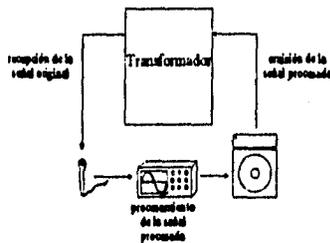


fig. 4.14. Principio básico de funcionamiento para la supresión de ruido o vibraciones.

Consideremos, por ejemplo, que la señal emitida por el transformador es de la forma que muestra la figura 4.15a, después de procesada se emitirá otra señal, que suponemos es lo bastante parecida a la original pero de sentido contrario, tal como lo muestra la figura 4.15b, por último si sumamos

ambas señales, como se muestra en la figura 4.16, se puede notar que el resultado es una señal de poca intensidad, con lo cual aseguramos que el ruido o vibración a sido disminuido considerablemente.

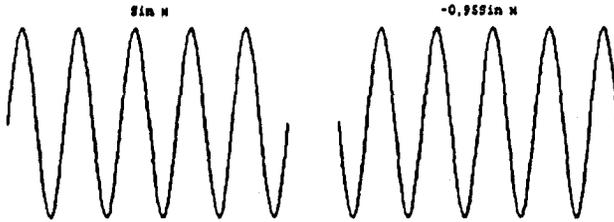


fig. 4.15 . Señal de a) entrada y b) salida.

Es importante este problema, pues como se observó en las secciones anteriores, un parámetro de preocupación importante es precisamente el ruido, sobre todo en equipos que se coloquen en interiores que, aún cuando se colocan en lugares especiales, es deseable tener niveles de ruido y vibración mínimos. Además que los costos de fabricación del núcleo y devanados se vera disminuido ya que se utilizan tipos especiales de papel y resinas para, entre otros factores, disminuir en cierta medida los niveles de ruido.

$$\sin n - 0.955 \sin n$$



fig. 4.16 . Señal resultante.

Otra consideración importante es la referente a la transferencia de calor que se presenta en el transformador, el término de radiación resulta ser importante y se controla relativamente fácil, ya que ésta depende en gran medida del material o el color del tanque (capítulo IV), por lo que sería recomendable prestar atención a éste último. Los colores oscuros promueven la transferencia de calor por lo que sería recomendable utilizarlos en transformadores que no se encuentren directamente bajo los efectos de la radiación solar, disminuyendo de esta forma la cantidad de calor que debe disiparse mediante convección. Los colores claros, por el contrario, inhiben en

cierta medida la transferencia de calor por radiación, por lo que sería recomendable utilizarlos en exteriores y de esta manera no permitir que la radiación solar actúe sobre el sistema, pues el control de enfriamiento que se tiene sobre el transformador en buena medida se perdería.

Hemos observado, en la sección anterior, que no se tiene un cuidado suficiente en este rubro aún cuando parece ser muy simple la aplicación de este tipo de cuestiones en los equipos.

Otra consideración interesante es el uso de aletas para promover la transferencia de calor, el uso apropiado de éstas puede ser, incluso, la diferencia entre tener un equipo que cuente con enfriamiento forzado o natural; esto, en cuanto a costo, parece interesante. Incluso, si las aletas son colocadas a todo lo largo o ancho del tanque puede pensarse en un mejor comportamiento de la estructura de éste.

# CAPÍTULO III



### 3.1. ELEMENTOS CRÍTICOS.

El presente capítulo pretende estudiar el comportamiento, desde el punto de vista mecánico, del transformador de potencia, como ya se mencionó una limitante es respetar la configuración eléctrica previamente diseñada. Una consecuencia importante de lo anterior es que el análisis de esfuerzos que se presentan durante un corto circuito en el núcleo y devanados queda excluido ya que se supondrá que durante el diseño eléctrico se contempló dicho fenómeno y por tanto se consideró dentro del diseño eléctrico [14].

El tanque resulta ser un elemento importante ya que éste contendrá al devanado y núcleo, por tanto debe tener la capacidad de poder soportar los esfuerzos que generen estos; más aún, las dimensiones de las placas que resulte del análisis es un parámetro importante cuando sea evaluada la transferencia de calor del transformador.

Excluyendo el diseño mecánico de los enfriadores, en caso de ser necesarios, el tanque resulta ser el único elemento que deba contemplarse para el diseño; no con esto se quiere decir que su diseño sea cosa simple, ya que no solo se deben contemplar las cargas estáticas que presentan los devanados y el núcleo, sino también el caso en que el transformador se mueva

mediante una grúa, lo que originará un análisis dinámico del mismo; además del caso antes mencionado en el siguiente apartado se contemplan algunos.

### 3.2. CONSIDERACIONES PRELIMINARES.

Únicamente consideraremos transformadores de potencia de tres fases, esto por ser los más comunes, sin embargo el diseño presentado podrá extenderse a otros tipos si se hacen las consideraciones pertinentes en cuanto a geometría y configuración eléctrica.

La figura 3.1 muestra el isométrico de la configuración que, para nuestro estudio, presenta el transformador de potencia. Se observa que el tanque presenta un ancho  $w_T$ , un largo  $l_T$  ( $l_T > w_T$ ) y una altura  $h_T$ , además de que la placa que forma éste tiene un espesor  $e_T$ . Así mismo se tiene en el interior del tanque el conjunto núcleo-devanado, el cual consideraremos como otro prisma rectangular de dimensiones  $w_{ND}$ ,  $l_{ND}$  y  $h_{ND}$ , esto con el fin de facilitar los cálculos que se realicen.

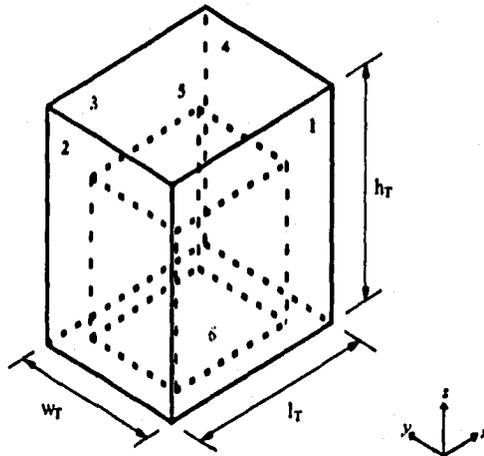


fig. 3.1 Vista idealizada del transformador.

Por otra parte sabemos que, regularmente, los transformadores de potencia contienen un elemento aislante en el interior del tanque que por lo general es aceite, pero éste no llena en su

totalidad el interior del tanque y por tal motivo tenemos un nivel de aceite  $h_A (< h_T)$ , con una densidad  $\rho_A$  expresada en  $[\text{kg/m}^3]$ .

La figura 3.1 muestra la numeración que será utilizada en las placas que forman el tanque del transformador, con esto se pretende visualizar durante los cálculos a que parte del tanque me estoy refiriendo; así, la placa 1 tiene un espesor de placa  $e_p$  y dimensiones  $h_{T1}$  por  $l_{T1}$ , la placa 2 tiene dimensiones  $h_{T1}$  por  $w_{T1}$  y un espesor  $e_p$ , etcétera.

### 3.3. ANÁLISIS.

En contrasta con los problemas matemáticos u otros de índole puramente científicos, los problemas de diseño no tienen una sola respuesta, es por esta razón que en la presente sección se tratará de visualizar el diseño del tanque desde puntos diferentes, esto es, observaremos los diferentes fenómenos que ocurren sobre dicho elemento y éstos serán tratados de manera aislada.

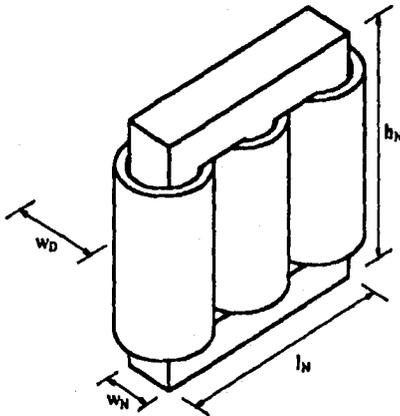


fig. 3.2 Conjunto núcleo devanados en un transformador tipo núcleo.

Como se mencionó en el capítulo I existen transformadores tipo núcleo y tipo acorazado, la diferencia radica en la geometría que presentan sus núcleos y es precisamente debido a esta diferencia que las cargas de los núcleos estarán distribuidas de manera diferente; sin embargo sólo

se consideran las cargas en transformadores tipo núcleo, como el mostrado en la figura 3.2, por ser esta la configuración que comúnmente se utiliza en transformadores de potencia. Las cargas de los diferentes elementos se pueden calcular de la siguiente manera:

↳ Carga debida al núcleo:

Considerando la configuración geométrica, representada en la figura 3.3, tenemos que el volumen estará dado por:

$$V_N = A_N w_N$$

donde:

$$A_N = l_N h_N - 2h_V l_V \quad [m^2]$$

$$\Rightarrow V_N = (h_N l_N - 2h_V l_V) w_N \quad [m^3]$$

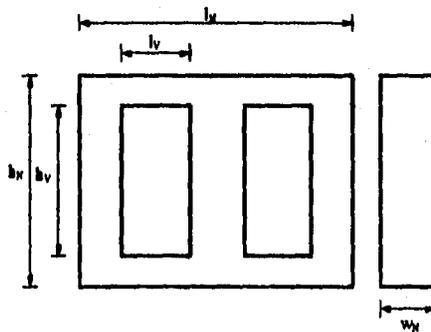


fig. 3.3 Dimensiones del núcleo.

ahora, la masa del núcleo es:

$$m_N = \rho_N V_N \quad [Kg]$$

donde  $\rho_N$  es la densidad del material de núcleo expresada en  $[Kg/m^3]$ .

La aceleración gravitacional es  $g$ , entonces la fuerza que actúa sobre la base del núcleo está dada por la siguiente expresión

$$F_N = g \rho_N w_N (h_N l_N - 2h_V l_V) \quad [N] \quad (3-1)$$

☞ Cargas debida a los devanados:

Sabemos que los devanados de un transformador trifásico tienen precisamente tres fases y que éstas se encuentran dispuestas tal como lo muestra la figura 3.4; así mismo cada una de las fases cuentan con su propio circuito de alta y baja tensión. Así es que, de manera rigurosa, se deben de considerar las cargas de cada una de las fases por separado; sin embargo el peso de éstas esta directamente apoyado sobre la estructura propia del núcleo, así entonces, consideraremos un sólo circuito de alta y otra de baja tensión, tomando de esta manera los pesos totales de cada uno de los circuitos.

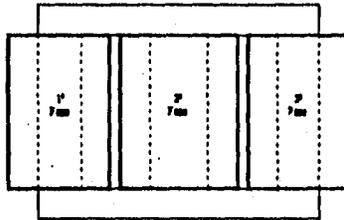


fig. 3.4 Disposición de los devanados.

Para el devanado del primario (o alta tensión) tenemos que el volumen esta dado por:

$$V_{DP} = \frac{\pi}{4} D_p^2 l_p \quad [m^3]$$

donde:

$D_p$ : Diámetro del cable en el circuito primario [ m ].

$l_p$ : Longitud del cable en el circuito primario [ m ].

la masa estará dada por:

$$m_p = \rho_D V_{DP} \quad [Kg]$$

donde:

$\rho_D$ : Densidad del cable de los devanados [Kg/m<sup>3</sup>]

de tal forma que la fuerza debida al devanado primario esta dada por:

$$F_{DP} = \frac{g\pi}{4} \rho_D D_p^2 l_p \quad [N] \quad (3-2)$$

De la misma forma se obtiene la fuerza debida al devanado secundario,

$$F_{Ds} = \frac{g\pi}{4} \rho_D D_s^2 l_s \quad [N] \quad (3-3)$$

donde:

$D_s$ : Diámetro del cable en el circuito secundario [m].

$l_s$ : Longitud del cable en el circuito secundario [m].

De tal forma que la carga debida al núcleo y devanado estará dada por la expresión:

$$F_{ND} = g \left( \rho_N w_N (h_N l_N - 2h_V l_V) + \frac{\pi}{4} \rho_D (D_p^2 l_p + D_s^2 l_s) \right) \quad [N] \quad (3-4)$$

la cual será considerada uniformemente distribuida sobre un área de  $l_N w_N$  [m<sup>2</sup>], por razones de simplicidad.

#### ↪ Cargas del tanque:

La figura 3.1 muestra la distribución de las placas del tanque y en las figuras 3.5 y 3.6 se muestran las vistas de planta y frontal del tanque, respectivamente; en éstas se pueden visualizar con mayor facilidad los cálculos realizados, de tal forma que tendremos

↪ para la placa 1:

$$V_{T1} = e_T l_T (h_T - 2e_T) \quad [m^3]$$

y

$$m_{T1} = \rho_T V_{T1} \quad [Kg]$$

donde:

$\rho_T$ : Densidad de la placa del tanque [Kg/m<sup>3</sup>]

$e_T$ : Espesor de la placa del tanque [m]

$$\Rightarrow \underline{F_{T1} = g \rho_T e_T l_T (h_T - 2e_T)} \quad [N] \quad (3-5)$$

↪ para la placa 2:

$$V_{T2} = e_T (w_T - 2e_T) (h_T - 2e_T) \quad [m^3]$$

$$\Rightarrow \underline{F_{T2} = g \rho_T e_T (w_T - 2e_T) (h_T - 2e_T)} \quad [N] \quad (3-6)$$

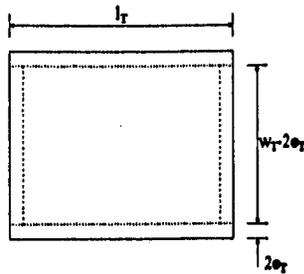


fig. 3.5 Vista en planta del tanque.

para la placa 3 :

$$F_{T3} = F_{T1} = g\rho_T e_T l_T (h_T - 2e_T) \quad [N] \quad (3-7)$$

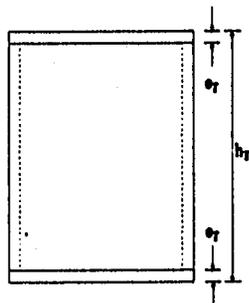


fig. 3.6 Vista frontal del tanque.

para la placa 4 :

$$F_{T4} = F_{T2} = g\rho_T e_T (w_T - 2e_T)(h_T - 2e_T) \quad [N] \quad (3-8)$$

para la placa 5 :

$$V_{T5} = e_T l_T w_T \quad [m^3]$$

$$\Rightarrow F_{T5} = g\rho_T e_T l_T w_T \quad [N] \quad (3-9)$$

para la placa 6 :

$$F_{T6} = F_{T3} = g\rho_T e_T l_T w_T \quad [N] \quad (3-10)$$

Entonces el peso total del tanque del transformador está dado por:

$$F_T = g\rho_T e_T (l_T (h_T - 2e_T) + 2(w_T - 2e_T)(h_T - 2e_T) + 2l_T w_T) \quad [N] \quad (3-11)$$

### 3.3.1. Esfuerzos debidos a cargas estáticas.

En esta primera aproximación se considera que el transformador se encuentra asentado y sólo se toman en cuenta los pesos de los devansados y del núcleo, así como el peso de las placas que forman el tanque.

La figura 3.7 muestra la carga uniformemente distribuida que se presenta en la base del transformador, cuya magnitud es  $F_{ND}$ .

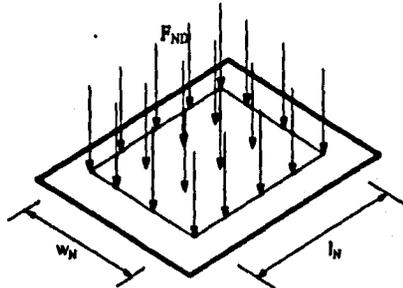


fig. 3.7 Distribución de la carga en la base del transformador.

Las tablas que presentaremos [6] se utilizan para resolver problemas en placas planas, tienen un error de no más del 7% que es suficiente para nuestros propósitos; en este caso estamos considerando una carga uniformemente distribuida en el centro de la placa, así el esfuerzo máximo que se presenta está dado por la expresión:

$$\sigma_{F_{ND}} = \frac{\beta F_{ND} l_N w_N}{e_T^2} \quad [Pa] \quad (3-12)$$

donde la constante beta se obtiene de la tabla 3.1 con:

$$\frac{b_1}{b} = \frac{w_N}{w_T} \quad \text{y} \quad \frac{a_1}{b} = \frac{l_N}{w_T}$$

para valores de  $l_T = w_T$ ,  $l_T = 1.4 w_T$ ,  $l_T = 2 w_T$ , estos valores pueden interpolarse de acuerdo a nuestras necesidades.

$l_T/w_T$	$a/b = 1$						$a/b = 1.4$						$a/b = 2$					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0		1.82	1.38	1.12	0.93	0.76	2.00	1.55	1.12	0.84	0.73	1.64	1.20	0.97	0.78	0.64		
0.02	1.82	1.28	1.08	0.90	0.76	0.63	1.78	1.43	1.23	0.95	0.74	0.64	1.73	1.31	1.03	0.84	0.68	0.57
0.4	1.39	1.07	0.84	0.72	0.62	0.52	1.39	1.19	1.00	0.80	0.62	0.55	1.32	1.08	0.88	0.74	0.60	0.50
0.6	1.12	0.90	0.72	0.60	0.5	0.43	1.10	0.91	0.82	0.68	0.53	0.47	1.04	0.90	0.76	0.64	0.54	0.44
0.8	0.92	0.76	0.62	0.51	0.42	0.36	0.90	0.76	0.68	0.57	0.43	0.40	0.87	0.76	0.63	0.54	0.44	0.38
1.0	0.76	0.63	0.52	0.42	0.35	0.30	0.75	0.62	0.57	0.47	0.38	0.33	0.71	0.61	0.53	0.45	0.38	0.30

Tabla 3.1. Esfuerzo flexionante máximo bajo la acción de una carga uniformemente distribuida sobre una sección de la placa.

La otra consideración pertinente en el caso estático es la de los apoyos en la base del transformador, los cuales, generalmente, presentan una configuración como la que muestra la figura 3.8; éstos se encuentran unidos a la base del transformador.

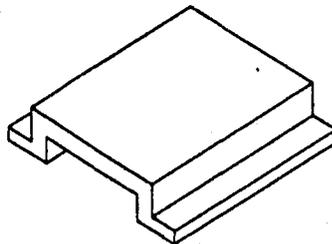


fig. 3.8 Isométrico de los apoyos en la base del transformador (incluyendo la base).

La figura 3.9 muestra el diagrama de cuerpo libre de dicho elemento, considerando las cargas concentradas.

Se observa fácilmente que  $R = \frac{F_{ND}}{2}$ ; ahora, si analizamos un punto cualquiera sobre la línea A, es decir que "trasladaremos" las fuerzas al punto en estudio, se tiene que en la figura 3.10:

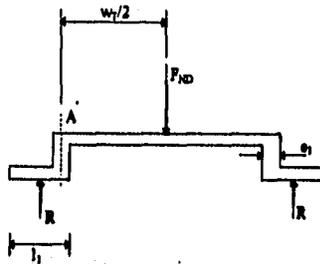


fig. 3.9 DCL de los apoyos en la base del transformador (cargas concentradas).

$$M_{A+} = R \left( W_T + l_1 - \frac{3}{2} e_1 \right) \quad [\text{Nm}]$$

$$M_{A-} = \frac{R}{2} (l_1 - e_1) + \frac{F_{ND}}{2} (W_T - e_1) \quad [\text{Nm}]$$

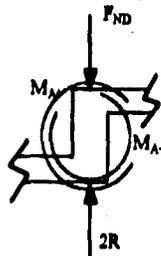


fig. 3.10 Traslado de fuerzas a un punto en A.

el momento neto es:

$$M_A = -\frac{F_{ND}}{2} (l_1 + e_1) \quad [\text{Nm}] \quad (3-13)$$

el cual origina un esfuerzo por flexión de:

$$\sigma_{AF} = \frac{M_A \frac{e_1}{2}}{I} = \frac{M_A \frac{e_1}{2}}{\frac{1}{12} I_T e_1^3}$$

$$\therefore \sigma_{AF} = \frac{6M_A}{I_T e_1^2} \quad [\text{Pa}] \quad (3-14)$$

También sobre dicho elemento se encuentra aplicada un esfuerzo por compresión con valor de:

$$\sigma_A = \frac{F_{ND}}{l_T e_1} \quad [Pa] \quad (3-15)$$

### 3.3.2. Esfuerzos debidos a cargas dinámicas.

Consideremos el siguiente diagrama de cuerpo libre:

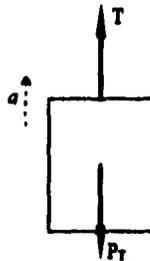


fig. 3.11. Diagrama de cuerpo libre del transformador durante una maniobra.

en donde  $P_T$  representa el peso total del transformador y  $T$  es la fuerza necesaria para levantarlo; es decir, que se considera el caso en que el transformador tiene que ser levantado para realizar cualquier tipo de maniobra. La aceleración  $a$  es la necesaria para levantar el transformador y poder desplazarlo, dicha aceleración es, por supuesto, mayor a  $g$  y la consideraremos también constante.

Sabemos que la aceleración y la velocidad se pueden expresar de la siguiente forma:

$$a = \frac{dv}{dt}$$

y

$$v = \frac{dy}{dt}$$

si consideramos que partimos de la posición cero, en un tiempo cero, con una velocidad inicial también cero y, como ya mencionamos,  $a$  igual a una constante, integrando en las expresiones anteriores tendremos que:

$$a \int_0^t dt = \int_0^v dv$$

$$\Rightarrow at = v$$

y

$$v \int_0^t dt = \int_0^y dy$$

$$\Rightarrow vt = y$$

si combinamos estos dos resultados:

$$at = \frac{y}{t}$$

$$\therefore a = \frac{y}{t^2} \quad \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \quad (3-16)$$

Ahora, si realizamos una suma de fuerzas en la dirección y, apoyándonos en el diagrama de cuerpo libre tendremos:

$$\Sigma Fy = ma$$

$$T - P_T = \frac{P_T}{g} a$$

$$T = P_T \left( \frac{a}{g} + 1 \right) \quad \left[ \text{N} \right] \quad (3-17)$$

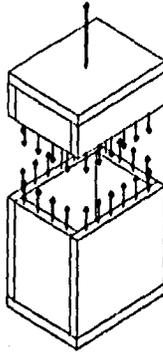
El equipo que levante el transformador debe estar en condiciones de poder ejercer una aceleración  $a_N$  ( $a_N = g + a$ ) tal que "venza" el efecto de la gravedad y, además pueda mover el transformador.

La figura 3.12 muestra la distribución uniforme de la tensión T sobre las paredes del transformador, la cual originará un esfuerzo, debido a cargas dinámicas, sobre el área transversal del espesor de la placa, con un valor de:

$$\sigma_{PD} = \frac{P_T \left( \frac{a}{g} + 1 \right)}{e_T (2l_T + w_T - 2e_T)} \quad \left[ \text{Pa} \right] \quad (3-18)$$

donde:

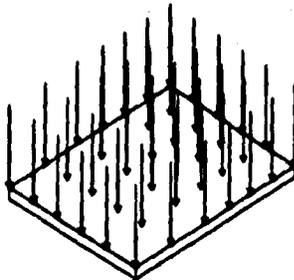
$$P_T = F_{ND} + F_T \quad \left[ \text{N} \right]$$



*fig. 3.12. Corte transversal del transformador durante una maniobra.*

### 3.3.3. Esfuerzos debidos a la presión en el tanque.

La presión que ejerce el fluido sobre las paredes y base del transformador, se pueden obtener si consideramos al fluido hidrostático. La figura 3.13 muestra la distribución de la presión sobre la superficie de la base y la figura 3.14 muestra la distribución sobre las paredes.



*fig. 3.13. Distribución de la presión sobre la base del núcleo.*

En la base del transformador tenemos que la presión es:

$$\underline{P_{FB} = \rho_A g h_A \quad [Pa]} \quad (3-19)$$

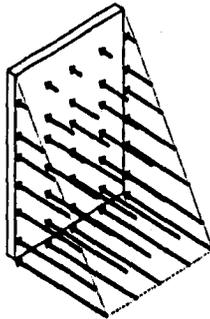


fig. 3.14. Distribución de la presión sobre las paredes del transformador.

Ahora, tenemos que el máximo esfuerzo (de flexión), en la base del transformador, actúa sobre el área transversal de la placa en dirección de  $w_T$ , y está dado por:

$$\sigma_{FB} = \frac{\beta P_{FB} w_T^2}{e_T^2} \quad [Pa] \quad (3-20)$$

donde  $\beta$  se obtiene de los valores tabulados, ver tabla 3.2 haciendo  $\frac{a}{b} = \frac{l_T}{w_T}$ .

$a/b$	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	3.0	4.0	5.0	$\infty$
$\beta$	0.2874	0.3762	0.4530	0.5172	0.5688	0.6102	0.7134	0.7410	0.7476	0.75

Tabla 3.2. Esfuerzo flexionante máximo bajo la acción de una carga uniformemente distribuida sobre toda la placa.

En el caso de las paredes del transformador tenemos una presión  $P_{FB}$  que se decrementa a lo largo de la altura  $h_T$ ; en este caso el esfuerzo máximo (flexionante) tiene un valor de: para las placas 1 y 3

$$\sigma_{FB,3} = \frac{\beta P_{FB} l_T^2}{e_T^2} \quad [Pa] \quad (3-21)$$

donde  $\beta$  se obtiene de los valores tabulados, ver tabla 3.3, haciendo  $\frac{a}{b} = \frac{h_T}{l_T}$ ,

para las placas 2 y 4

$$\sigma_{FB,4} = \frac{\beta P_{FB} w_T^2}{e_T^2} \quad [Pa] \quad (3-22)$$

donde  $\beta$  se obtiene de los valores tabulados haciendo  $\frac{a}{b} = \frac{h_T}{w_T}$ .

$a/b$	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$\beta$	0.16	0.26	0.34	0.38	0.43	0.47	0.49

Tabla 3.3. Esfuerzo flexionante máximo bajo la acción de una carga creciente sobre toda la placa.

Por otra parte este tipo de equipos utiliza presiones de vacío en el interior del tanque, ésta resultar ser mayor que la ejercida por el fluido, por tal motivo los esfuerzos de ésta última deben ser restados a los que se calculen con las expresiones que se presentan a continuación.

Siendo una presión de vacío  $P_v$ , ésta actuará uniformemente sobre todas las paredes internas del transformador; para cargas uniformes sobre toda la placa tenemos que el esfuerzo máximo, en las placas 5 y 6, está dado por:

$$\sigma_{VR,6} = -\frac{\beta P_v w_T^2}{e_T^2} \quad [Pa] \quad (3-23)$$

donde  $\beta$  se obtiene de los valores, ver tabla 3.2, tabulados haciendo  $\frac{a}{b} = \frac{l_T}{w_T}$ ,

Para las placas 1 y 3:

$$\sigma_{VR,3} = -\frac{\beta P_v l_T^2}{e_T^2} \quad [Pa] \quad (3-24)$$

donde  $\beta$  se obtiene de los valores tabulados haciendo  $\frac{a}{b} = \frac{h_T}{l_T}$ ,

Por último, para las placas 2 y 4:

$$\sigma_{VR,4} = -\frac{\beta P_v w_T^2}{e_T^2} \quad [Pa] \quad (3-25)$$

donde  $\beta_1$  y  $\beta_2$  se obtiene de los valores tabulados haciendo  $\frac{a}{b} = \frac{h_T}{w_T}$ ,

3.3.4. Esfuerzos debidos a incrementos de temperatura en las placas.

Quando el transformador se encuentra en operación la temperatura de las placas que lo forman se incrementa desde una temperatura ambiente  $T_0$  hasta una cierta temperatura  $T$ , este cambio de temperatura origina esfuerzos (compresión) sobre el área transversal de cada una de las placas con un valor de:

$$\sigma_{\Delta T} = E_T \alpha_T (T - T_0) \quad [\text{Pa}] \quad (3-26)$$

donde:

$\alpha$  : coeficiente de expansión térmica del material de las placas que forman el transformador.

$E$  : módulo de elasticidad del material de las placas que forman el transformador.

3.3.5. Esfuerzos en las uniones.

Esta clase de esfuerzos, en nuestro caso, se refieren a aquellos ocasionados por la soldadura. Puesto que se emplea calor para efectuar la operación de soldadura, existe una posibilidad de cambios metalúrgicos en el metal de las piezas que se van a soldar cerca de la junta de éstas. Existen, entonces, esfuerzos residuales que, en otras condiciones, se eliminan mediante tratamientos térmicos. Sabemos que las paredes del transformador se forman con placas gruesas y en estos casos es recomendable someter las partes a un precalentamiento para disminuir considerablemente los esfuerzos residuales en las uniones soldadas.

los esfuerzos en las uniones se pueden calcular utilizando las expresiones que se muestran en la figura 3.15. La dirección de la aplicación de la carga  $P$  se muestra con una flecha. Así el tamaño de la soldadura puede calcularse si la carga  $P$  es conocida o se tiene una aproximación de ésta.

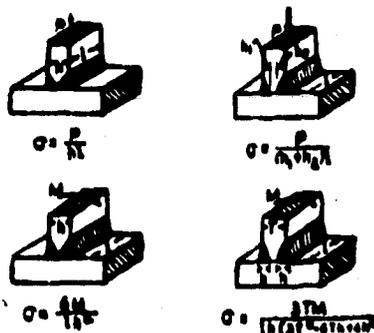


fig. 3.15. Diagrama y fórmulas de esfuerzos en las uniones.

Desde luego la carga  $P$  no la conocemos, pero podemos proporcionar una buena aproximación de ésta. De los apartados anteriores hemos obtenido valores de esfuerzos máximos en las placas para cada caso, ahora, si multiplicamos el valor de estos esfuerzos por el área transversal de la placa tendremos una buena aproximación de la carga  $P$  y de esta forma podemos calcular las dimensiones de la soldadura.

La resistencia del electrodo debe ser mayor a la de la placa pues en las juntas de éstas es fácil encontrar algún tipo de concentración de esfuerzos, debidos, como ya dijimos a los esfuerzos residuales debidos al calentamiento y en otros casos debidos a la geometría propia del arreglo.

### 3.3.5. Vibración.

Un tipo muy importante de carga dinámica, la vibración, ocurre cuando un cuerpo elástico vibra bajo la influencia de impulsos periódicos; en nuestro caso la frecuencia de operación del transformador es de 60 Hz; ésta no deba estar en sincronía, o cerca de ésta, de la frecuencia natural del sistema, pues podrían presentarse problemas de resonancia en las placas del transformador y fallar por esta causa. A continuación se presenta una expresión que proporciona un valor aproximado de la frecuencia natural de la placa considerando que sobre ésta actúa una presión  $P$ , la cual se calcula (ver apartados anteriores) fácilmente para cada placa; la frecuencia natural de cada placa es entonces:

$$f = \frac{k_1}{2\pi} \sqrt{\frac{Ee_1^3 g}{12(1-\nu^2)Pa^4}} \quad (3-27)$$

donde:

$E$  : Módulo elástico del material de la placa [Pa]

$g$  : gravedad [9.81 m/s<sup>2</sup>]

$\nu$  : módulo de Poisson del material de la placa [1]

$a$  : es la longitud más pequeña de la placa en estudio [m]

$k_1$ , se obtiene para valores tabulados de  $a$  y  $b$  de la tabla 3.4; donde  $a$  y  $b$  son las dimensiones de la placa en estudio y  $a < b$ .

a/b	1	0.9	0.8	0.6	0.4	0.2	0
k <sub>1</sub>	36	32.7	29.9	25.9	23.6	22.6	22.4

Tabla 3.4. Frecuencia natural del sistema.

Por último, hay que notar que varios de los casos anteriores se presentan simultáneamente sobre las placas del transformador. Si sumamos los efectos en cada una de las placas obtendremos un valor más aproximado al real bajo las condiciones de operación, así:

→ Para en las placas 1, 2, 3, 4, podemos decir que actúa la presión del fluido(+), la presión de vacío (-) y los esfuerzos debidos al incremento de temperatura (+), de tal forma que el esfuerzo máximo estará dado por:

$$\sigma_{TOT,max} = \frac{\beta P_{FB} l_T^2}{e_T^2} - \frac{\beta P_V l_T^2}{e_T^2} + E_T \alpha_T (T - T_0) \quad [Pa] \quad \text{para la placa 1 y 3} \quad (3-28)$$

$$\sigma_{TOT,max} = \frac{\beta P_{FB} w_T^2}{e_T^2} - \frac{\beta P_V w_T^2}{e_T^2} + E_T \alpha_T (T - T_0) \quad [Pa] \quad \text{para la placa 2 y 4} \quad (3-29)$$

por supuesto los valores de  $\beta$  de obtienen de la tabla apropiada.

→ Para en la placa 6, podemos decir que actúa la presión del fluido(+), la presión de vacío (-), los esfuerzos debidos al incremento de temperatura (+) y la carga del núcleo y devanados (+), de tal forma que el esfuerzo máximo estará dado por:

$$\sigma_{TOT,max} = \frac{\beta P_{FB} w_T^2}{e_T^2} - \frac{\beta P_V w_T^2}{e_T^2} + E_T \alpha_T (T - T_0) + \frac{\beta F_{ND} l_N w_N}{e_T^2} \quad [Pa] \quad (3-30)$$

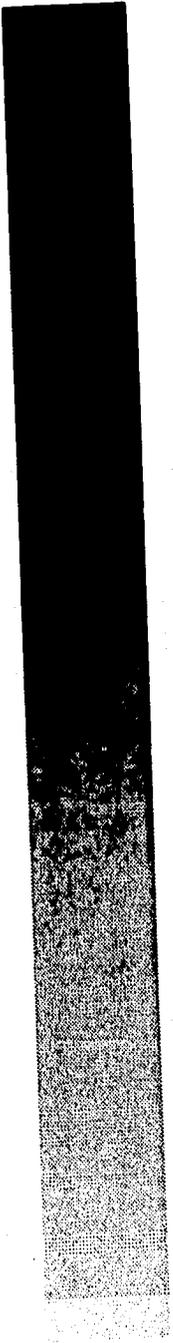
los valores de  $\beta$  se obtienen de las tablas apropiadas.

→ Para en la placa 5, podemos decir que actúa la presión de vacío (-) y los esfuerzos debidos al incremento de temperatura (+), de tal forma que el esfuerzo máximo estará dado por:

$$\sigma_{TOT,max} = E_T \alpha_T (T - T_0) - \frac{\beta P_V w_T^2}{e_T^2} \quad [Pa] \quad (3-31)$$

el valor de  $\beta$  se obtiene de la tabla apropiada.

# CAPÍTULO IV



#### 4.1. ELEMENTOS CRÍTICOS.

En este capítulo se pretende presentar una visión general de lo que constituye el análisis térmico de transformadores de potencia; ya que a diferencia del diseño mecánico el térmico es mucho más complejo y extenso, y el objetivo primordial del presente trabajo, como ya mencionamos, es el análisis mecánico del transformador. Sin embargo me parece importante dar una visión general del análisis térmico.

Realizar un análisis térmico en esta clase de equipos resulta ser de vital importancia, pues el aislante utilizado, normalmente aceite, no debe de subir su temperatura por arriba de una cierta temperatura crítica ( $T_c$ ) con el objeto de no disminuir la vida útil del aceite y por supuesto no dañar los devanados del transformador.

Los elementos a considerar son en los que intervienen fenómenos de convección y radiación, la conducción queda excluida pues suponemos que el transformador, después de algunas horas de operación, presenta una temperatura igual en las placas que en el aceite; de esta forma consideraremos la estructura externa para el fenómeno de radiación, y en su caso convección, y el aceite para el fenómeno de convección.

Si el transformador es de baja potencia la convección natural es suficiente para realizar un enfriamiento satisfactorio; sin embargo supondremos que no es el caso, de tal forma que analizaremos el caso en que sea necesario utilizar convección forzada, esto es, será necesario utilizar un enfriador para mantener la temperatura del equipo por debajo de la crítica.

Las expresiones utilizadas provienen de la referencia [8] a menos que se indique otra cosa.

## 4.2. CONSIDERACIONES PRELIMINARES.

El calor que se genera en el transformador proviene de los devanados, ya que al fluir una cierta corriente por éstos sufren un calentamiento debido al efecto Joule, de tal forma que en los devanados de baja y alta tensión se tiene, respectivamente, que:

$$E_{GP} = I_p^2 R \quad [W]$$

$$E_{GS} = I_s^2 R \quad [W]$$

entonces tendremos un calor generado total con valor de:

$$E_G = I_p^2 R + I_s^2 R \quad [W] \quad (4-1)$$

que consideraremos constante.

## 4.3. ANÁLISIS.

### 4.3.1. Radiación.

La radiación térmica es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. En nuestro caso utilizaremos la ecuación básica que modela este fenómeno y que proporciona el calor disipado mediante éste:

$$q_R = \epsilon A \sigma (T_s^4 - T_A^4) \quad [W] \quad (4-2)$$

donde:

$\epsilon$  : emisividad, propiedad de radiación de la superficie del transformador [1].

$A$  : área total de las placas del transformador [m<sup>2</sup>].

$\sigma$  : constante de Stefan - Boltzman ( = 5.67E-8 [W/m<sup>2</sup> · K<sup>4</sup>] )

$T_S$  : temperatura en la superficie del transformador [K].

$T_A$  : temperatura en los alrededores [K].

Este flujo de calor sale del transformador, sin embargo cuando el transformador se encuentra a la intemperie también se tiene un flujo de este tipo proveniente de la radiación solar, en tal caso el término de radiación estará fuera de nuestro control, ya que no podremos determinar con precisión aceptable el valor de este término en cualquier instante. Por este motivo es deseable reducir al máximo el valor de transferencia por radiación y enfocar la atención en la transferencia por convección que es más simple de controlar. Esto se puede hacer de manera sencilla si tenemos un valor de emisividad lo suficientemente pequeño para que este flujo de calor sea despreciable comparado con el de convección. A continuación se reproduce una tabla (tabla 4.1) [4] que presenta diferentes valores de emisividad para varios colores de pintura y materiales que pueden utilizarse en la superficie del transformador.

Aluminio pulido	0.08
Cobre pulido	0.13
Fundido	0.25
Pintura aluminio	0.55
Cobre oxidado	0.60
Acero oxidado	0.70
Pintura blanca	0.80
Pintura negra brillante	0.90
Pintura laca blanca	0.93
Pintura esmalte blanca	0.93
Pintura verde	0.93
Pintura gris	0.93
Pintura negro laca	0.93

Tabla 4.1 Emisividad para varios colores y materiales.

## 4.3.2. Convección.

La convección térmica se realiza mediante el movimiento de un fluido que se encuentra en contacto con superficies a diferente temperatura. Ya mencionamos que consideraremos el caso de convección forzada, sin embargo es importante señalar el caso en que la convección natural puede incrementarse mediante el uso de aletas, pues para transformadores de mediana potencia sería interesante comparar los dos modos y decidir cual es el apropiado de acuerdo a capacidad y costo.

El uso de aletas implicaría soldar pequeños trozos de placa o solera en las paredes externas del transformador para poder disipar una mayor cantidad de calor, consideraremos entonces aletas rectangulares como las mostradas en la figura 4.1, la ecuación que describe la cantidad de calor transferida por este medio es:

$$q_A = \sqrt{hPk} A_c \theta_b \quad [W] \quad (4-3)$$

donde:

$\bar{h}$  : coeficiente de transferencia de calor por convección promedio del aire [ $W/m^2 \cdot K$ ]

$P$  : parámetro geométrico, ver figura 4.1 [m]

$k$  : conductividad térmica del material de la aleta [ $W/m \cdot K$ ]

$A_c$  : área transversal de la aleta [ $m^2$ ]

$\theta_b$  : temperatura de exceso en la base del transformador [K], (en nuestro caso

$$\theta_b = T_c - T_{aire})$$

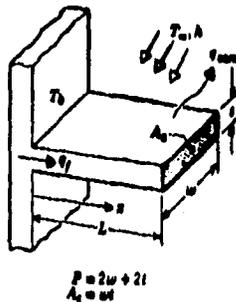


fig. 4.1 Transferencia de calor mediante aletas.

Es necesario evaluar la eficiencia de la aleta para poder optimar la transferencia de calor, la figura 4.2 muestra un gráfico que muestra la manera de evaluar ésta ( $\eta_f$ ) en aletas rectangulares.

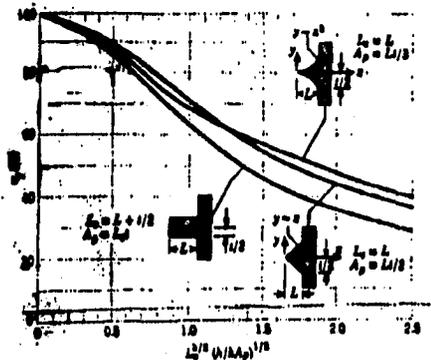


fig. 4.2 Eficiencia de la aleta.

Una vez evaluada la eficiencia de la aleta es necesario evaluar la de un arreglo de éstas, pues no tendría sentido utilizar solamente una, la siguiente expresión proporciona este parámetro:

$$\eta_o = 1 - \frac{A_f}{A_f + A_b} (1 - \eta_f) \quad (4-4)$$

donde:

$A_f$ : área total del arreglo de aletas [m<sup>2</sup>]

$A_b$ : área del transformador que no tiene aletas [m<sup>2</sup>]

entonces el calor total disipado por el arreglo de aletas es:

$$q_{T_A} = \eta_o \bar{h} \theta_b (A_f + A_b) \quad [W] \quad (4-5)$$

Por otra parte la convección forzada normalmente implica el uso tubos por los que circula el aceite y se hace pasar una corriente de aire para poder disipar el calor (ver figura 4.3); normalmente en la parte superior del tanque se tiene la salida del fluido a alta temperatura ( $T_{AT}$ ) y se hace circular por el arreglo de tubos para posteriormente reingresar el fluido al transformador por la parte inferior de éste a una temperatura  $T_c < T_c$ . Expondremos, entonces, una manera simple de calcular la cantidad de calor que puede disiparse mediante un arreglo de este tipo.

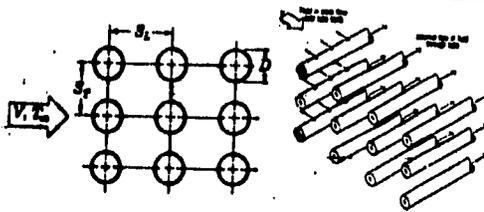


fig. 4.3 Arreglo de tubos con flujo cruzado.

Existen dos tipos de arreglos para bancos de tubo, alineados y en zigzag, normalmente se utilizan arreglos alineados, como el que se muestra en la figura 4.3, para los transformadores. A diferencia de la convección natural, la forzada implica un valor diferente del coeficiente promedio de transferencia de calor por convección ( $\bar{h}$ ), el cual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\bar{h} = \bar{N}_{U_D} \frac{k}{D} \quad [W/m^2 \cdot K] \quad (4-6)$$

donde:

$\bar{N}_{U_D}$  : número de Nusseht promedio [1]

representa una dimensión del gradiente de temperaturas en una superficie.

$k$  : conductividad térmica del material de los tubos [W/m·K]

$D$  : diámetro de los tubos [m]

Para el cálculo del número de Nusseht se utilizan expresiones experimentales, en nuestro caso:

$$\bar{N}_{U_D} = C_1 Re_{D,max}^m \quad [1] \quad (4-7)$$

donde  $C_1$  y  $m$  se muestran en la tabla 4.2

$S_1/D$	$S_2/D$							
	1.25		1.5		2.0		3.0	
	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$
1.25	0.348	0.592	0.275	0.608	0.100	0.704	0.0633	0.752
1.50	0.367	0.586	0.250	0.620	0.101	0.702	0.0678	0.744
2.00	0.418	0.570	0.299	0.602	0.229	0.632	0.1980	0.648
3.00	0.290	0.601	0.357	0.548	0.374	0.581	0.2860	0.608

Tabla 4.2 Constantes para arreglos de 10 o más tubos.

y

$$Re_{D,max} = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} \quad [1] \quad (4-8)$$

en donde:

$\rho$  : densidad del aire de enfriamiento [Kg/m<sup>3</sup>]

$V_{max}$  : velocidad máxima en el arreglo de tubos [m/s]

$$= \frac{S_T}{S_T - D} V$$

$\mu$  : viscosidad del aire de enfriamiento [N·s/m<sup>2</sup>]

Si se tiene un arreglo con menos de diez tubos la expresión del número de Nusselt deberá multiplicarse por un factor de corrección  $C_2$ , el cual se encuentra tabulado en la tabla 4.3.

$N_T$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$C_2$	0.64	0.80	0.87	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99

Tabla 4.3 Factor de corrección para menos de 10 tubos.

Una vez obtenido el coeficiente convección promedio podemos utilizar la expresión para la transferencia de calor por convección:

$$q_c = \bar{h}A(T_s - T_A) \quad [W] \quad (4-9)$$

donde:

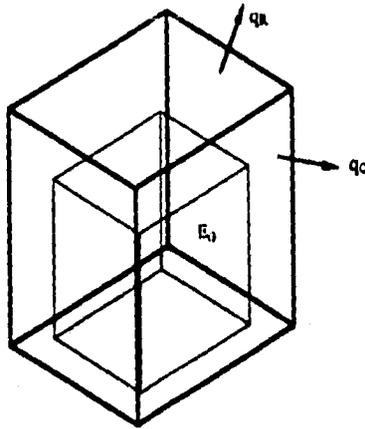
$A$  : área total de la superficie de los tubos [m<sup>2</sup>]

$T_s$  : temperatura en la superficie de los tubos [K]

$T_A$  : temperatura del aire de enfriamiento [K]

la cual nos proporciona una buena aproximación para el fenómeno.

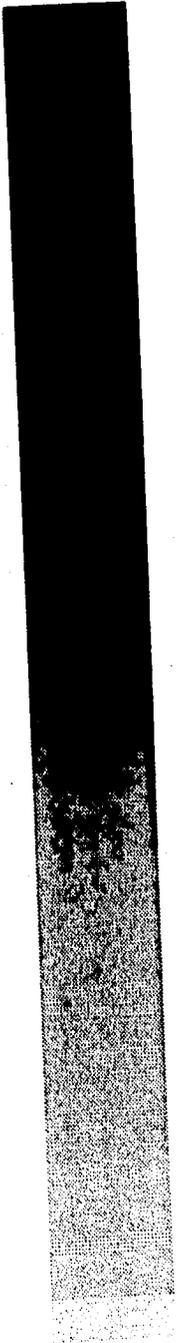
Por último, observemos figura 4.4, donde se muestran las diferentes formas de calor que se presentan en el transformador.



*fig. 4.4 Fenómeno de transferencia de calor en el transformador.*

El calor generado por los devanados deberá ser retirado mediante los mecanismos antes mencionados, de tal forma que se puede determinar las dimensiones de las aletas y la de los tubos de enfriamiento para poder cumplir con esta condición.

# CAPÍTULO V



En este último capítulo se calculará el espesor de placa de un transformador; ya hemos dicho que el objetivo básico es el cálculo mecánico, por tanto no se realizará cálculo alguno de la parte térmica del equipo.

Regularmente cuando se realiza un cálculo en ingeniería se requiere de una cierta validación de los resultados, generalmente ésta se hace de forma experimental, sin embargo ésta queda fuera de los alcances del presente trabajo; pero, una vez calculado el espesor de placa del transformador, introduciremos los resultados en un *software* de análisis por elemento finito. En estos últimos años la mecánica computacional ha tomado mucha popularidad, pues no sólo proporciona resultados fiables sino que además se puede tener una visualización tridimensional de los resultados, y del problema en sí mismo.

Partiremos de datos que se encuentran en catálogos de DEEMSA en donde se presentan algunas dimensiones de los equipos y otros parámetros útiles, la figura 5.1 presenta los valores que utilizaremos como datos.

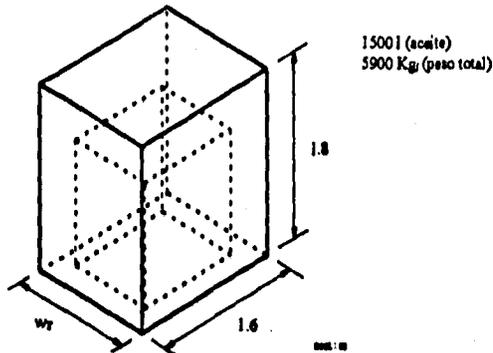


fig. 5.1. Valores conocidos del transformador.

Normalmente se tiene una distancia entre el conjunto núcleo - devanado y el tanque del transformador de aproximadamente 150 mm, esta consideración nos permitiría contar con las dimensiones del núcleo en primera instancia, sin embargo, de la figura 5.1, observamos que el valor de  $w_T$  no está dado, haremos, entonces, un cálculo aproximado del mismo así como de el resto de los parámetros que sean necesarios.

Supongamos una densidad del aceite [8] de  $895 \text{ Kg/m}^3$ :

$$\Rightarrow W_{\text{Aceite}} = 9.81V\rho = 9.81 \cdot 1.5 \cdot 895 \approx 13170 \text{ N}$$

y el peso total del transformador es 57 860 N, entonces tenemos un peso de placas y conjunto núcleo - devanados de:

$$W_{P,ND} = 44 690 \text{ N}$$

si consideramos que el conjunto núcleo devanados tiene dimensiones:

$$w_N = 0.5 \text{ m}$$

$$l_N = 1.3 \text{ m}$$

$$h_N = 1.5 \text{ m}$$

lo cual parece una buena aproximación, podemos suponer una  $w_T$  de 0.8 m. Lo cual nos permite el cálculo del peso del tanque, si las placas que forman el transformador son de acero al carbono sabemos que:

$$\left. \begin{aligned} \rho_{\text{acero}} &= 7700 \text{ Kg/m}^3 \\ \sigma_{y,\text{acero}} &= 290 \text{ MPa} \\ E_{\text{Acero}} &= 207 \text{ GPa} \\ \alpha_{\text{Acero}} &= 12 \text{E}-6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned} \right\}$$

supongamos que las placas tienen un espesor de 19.05 mm (3/4"), entonces el peso de éstas es de:

$$W_{Placas} = 9.81V\rho = 9.81 \cdot (18 \cdot 16 \cdot 0.8 - 1.781 \cdot 1.581 \cdot 0.781) \cdot 7700 \approx 7940 \text{ N}$$

con lo cual podemos decir que el peso del conjunto núcleo - devanados es de:

$$F_{ND} = 36750 \text{ N}$$

no es importante, en este caso, contar con los valores precisos pues lo que nos interesa es confrontar los resultados de las expresiones propuestas con el valor que se obtenga con el *software* de análisis.

Utilicemos la ecuación 3-30, eliminando el término de la presión de vacío por carecer de un valor aproximado para éste, la cual se refiere a la placa que forma la base del transformador (placa 6).

$$\sigma_{TOT,MAX} = \frac{\beta P_{FB} w_T^2}{e_T^2} + E_T \alpha_T (T - T_0) + \frac{\beta F_{ND} I_N w_N}{e_T^2} \quad [Pa]$$

calculemos, ahora, cada uno de sus términos:

de la ecuación 3.19

$$P_{FB} = \rho_A g h_A = 895 \cdot 9.81 \cdot 1.8 \approx 15800 \quad [Pa]$$

para la obtención de  $\beta$ , en el primer término

$$\frac{a}{b} = \frac{l_T}{w_T} = \frac{16}{0.8} = 2$$

y de la tabla 3.2  $\beta = 0.6102$ , entonces

$$\frac{\beta P_{FB} w_T^2}{e_T^2} = \frac{0.6102 \cdot 15800 \cdot 0.8^2}{e_T^2} \approx \frac{6170}{e_T^2} \quad [Pa]$$

consideremos, por otra parte, que la temperatura de operación del transformador es de 45 °C sobre la temperatura ambiente, la cual representa un valor usual en los transformadores de potencia, entonces:

$$E_T \alpha_T (T - T_0) = 207E9 \cdot 12E - 6 \cdot 45 \approx 1115E6 \quad [Pa]$$

para el último término

$$\frac{b_1}{b} = \frac{w_N}{w_T} = \frac{0.5}{0.8} = 0.625 \quad \text{y} \quad \frac{a_1}{b} = \frac{l_N}{w_T} = \frac{1.3}{0.8} = 1.625$$

además  $a = 2b$  ( $l_T = 2w_T$ ) y de la tabla 3.1  $\beta = 0.54$ , de tal forma que

$$\frac{\beta F_{ND} I_N w_N}{e_T^2} = \frac{0.54 \cdot 36750 \cdot 1.3 \cdot 0.5}{e_T^2} \approx \frac{12900}{e_T^2} \quad [Pa]$$

consideremos un factor de seguridad de 2, es decir:

$$\sigma_{TOT,max} = \frac{\sigma_{y,acero}}{2}$$

entonces:

$$\frac{6170}{e_T^2} + 1115E6 + \frac{12900}{e_T^2} = \frac{290E6}{2}$$

$$\frac{6170 + 12900}{e_T^2} = 145E6 - 1115E6$$

por lo tanto

$$e_T = \sqrt{\frac{19070}{33.5E6}} \approx 2.39E-2 \text{ [m]}$$

es decir que resulta un espesor de placa de 23.9 mm, por su puesto debemos utilizar un valor comercial de éste, como 25.4 mm (1"), ahora si calculamos el valor del esfuerzo total máximo con este valor tendremos:

$$\sigma_{TOT,max} = \frac{6170}{0.0254^2} + 1115E6 + \frac{12900}{0.0254^2} \approx 141.1E6 \text{ [Pa]}$$

Por otra parte, para el análisis mediante elemento finito necesitaremos como parámetros de entrada el esfuerzo de fluencia del material, el coeficiente de expansión térmica, las dimensiones de la placa en estudio y las cargas aplicadas sobre ésta.

El *software* que se utilizó (HPE Engineering Analysis Software) es una versión de demostración y está limitada a 50 nodos y 50 elementos, cabe mencionar que el costo del *software* es de 950 dólares. Básicamente consta de tres módulos: preproceso, proceso y postproceso; el primer módulo comprende la introducción de la geometría, el tipo de problema, en este caso esfuerzo estático en placas planas de espesor constante, y las condiciones de éste, durante el proceso se resuelven las ecuaciones del problema variacional y el postproceso presenta la solución del problema de manera numérica.

La figura 5.2 muestra el mallado que se realizó de la placa, como se puede notar éste no es muy denso y sabemos que la precisión del método de elemento finito depende en gran parte del tamaño de elemento utilizado.

En los nodos que comprenden la periferia se restringe el desplazamiento pues consideramos que el transformador se encuentra firmemente apoyado; la carga de presión del fluido se distribuye uniformemente sobre todos los nodos, es decir

$$T_{amb} = \frac{1000}{1000} = 1000 \text{ Pa}$$

El resultado es:

$$T_{amb} = \frac{1000}{1000} = 1000 \text{ Pa}$$

En los casos de los computadores - terminales sobre los cuales se tiene un control automático de la temperatura y humedad relativa.

$$T_{amb} = \frac{1000}{1000} = 1000 \text{ Pa}$$

El cual se le debe sumar el contenido anteriormente.

Las referencias tabular de cambios de temperatura se presentan en los anexos y se debe considerar la posibilidad de incrementos de temperatura en este caso 41°C.

La figura 2.2 se presenta en las dimensiones para que el programa analice mediante el método de los elementos finitos la geometría proporcional al tamaño de ellas.

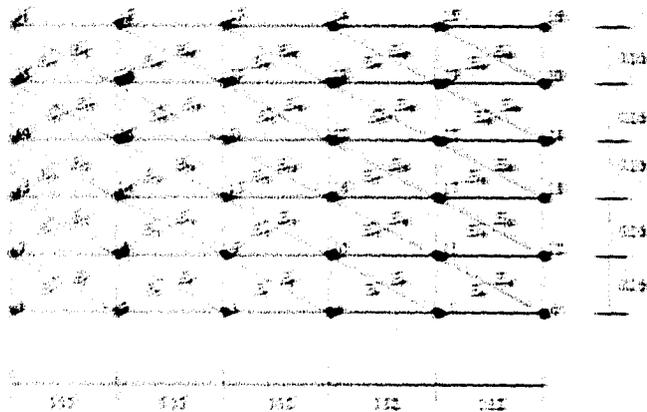


Fig. 2.2

Fig. 2.2 Malla de la placa

Los valores máximos obtenidos de la simulación se presentan sobre la periferia del núcleo, lo cual se debe, tienen un valor aproximado de 103.453 Pa, que comparado con el obtenido con las expresiones propuestas de 141.153 Pa parece muy distante, sin embargo hay que recordar que el malla no es muy preciso y debemos notar, también, que los valores resultaron ser del mismo orden aún cuando presentan una discrepancia de aproximadamente 30%.

$$F = \frac{P_{FB}}{l_T w_T} = \frac{15800}{1.6 \cdot 0.8} \approx 12344 \text{ [N]}$$

y en cada nodo

$$F_{\text{Nodo}} = \frac{12344}{36} \approx 343 \text{ [N]}$$

La carga del peso del conjunto núcleo - devanados sobre los nodos centrales, es decir excluyendo únicamente los de la periferia y tiene un valor de

$$F_{\text{Nodo}} = \frac{F_{ND}}{16} = \frac{36750}{16} \approx 2297 \text{ [N]}$$

al cual se le debe sumar el obtenido anteriormente.

Los esfuerzos debidos a cambios de temperaturas se presentan en todos los elementos y sólo es necesario proporcionar un incremento de temperatura, en este caso 45 °C.

La figura 5.2 se presenta en dos dimensiones, esto por que el programa incluye módulos para placas planas y sólo es necesario proporcionar el espesor de éstas.

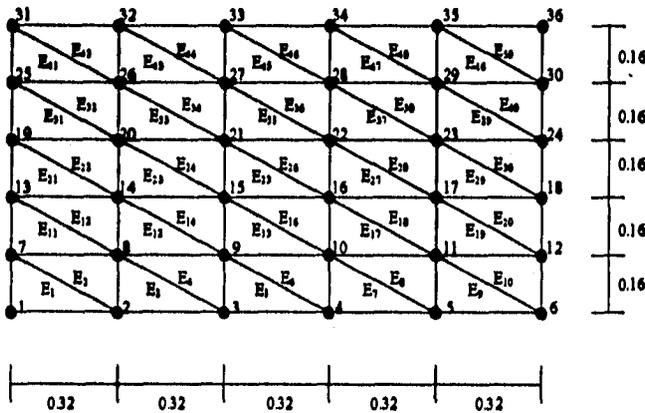


fig. 5.2. Mallado de la placa.

Los valores máximos obtenidos de la simulación se presentan sobre la periferia del núcleo, lo cual es lógico, y tienen un valor aproximado de 103.4E6 Pa, que comparado con el obtenido con las expresiones propuestas de 141.1E6 Pa parece muy distante, sin embargo hay que recordar que el mallado no es muy preciso y debemos notar, también, que los valores resultaron ser del mismo orden aún cuando presentan una discrepancia de aproximadamente 30%.

# CONCLUSIONES



En la segunda parte del trabajo pudimos apreciar las diferencias y similitudes entre equipos nacionales y extranjeros, siendo más éstas últimas; sin embargo hay que recordar el cuidado extremo que se tiene en la selección del color de la pintura externa del equipo, cuestión no tan cuidada en la fabricación nacional, siendo, como se menciona en las propuestas, un parámetro importante para tener buen control sobre la transferencia de calor en el equipo. Por otra parte el desarrollo en nuestro país de este tipo de equipos no va más allá del uso de nuevos materiales y como se pudo observar al desarrollo mundial, además, considera el uso de equipos en seco pues además de requerir menos mantenimiento, son menos ruidosos y carecen de aceites agresivos para el medio ambiente, cuestión que se cuida mucho en la actualidad.

La parte mecánica se limitó al análisis de los esfuerzos que se presentan en el tanque, las expresiones propuestas para el cálculo del espesor de placa, como se mostró, poseen una precisión aceptable y por tanto se recomiendan para realizar un cálculo rápido y aceptable de este parámetro. No se debe perder de vista que se trata de un problema tridimensional y su validación

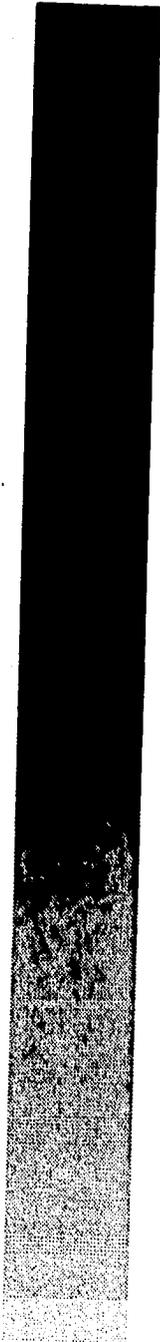
---

#### Conclusiones.

plena debe hacerse mediante métodos experimentales adecuados. Como pudo observarse las expresiones para la soldadura y la frecuencia natural del sistema no se validaron, sin embargo éstas son de uso común para ingenieros y por tanto se consideran de precisión aceptable.

El análisis térmico mostró una primera aproximación al problema, utilizando conceptos y ecuaciones básicas para tal efecto; como se mencionó la transferencia de calor es importante en esta clase de equipos por lo que es importante poner atención en la manera que se disipa éste de manera óptima y económica, una buena forma de promover la transferencia de calor es mediante el uso de aletas en la estructura misma del transformador, cosa que no se hace actualmente y que se sugiere en la segunda parte del trabajo.

# BIBLIOGRAFÍA



- [1] Fraile Mora, Jesús, *Máquinas Eléctricas*, 2ª Edición, Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1993.
- [2] Chapman, Stephen J, *Máquinas Eléctricas*, 2ª Edición, Bogotá, McGraw-Hill, 1993.
- [3] M. I. T. Staff, *Circuitos Magnéticos y Transformadores*, 2ª Edición, Barcelona, Reverte, 1985.
- [4] Fink, Donald G. / Beaty, H. Wayne, *Standard Handbook for Electrical Engineers*, 13ª Edition, McGraw-Hill, 1993.
- [5] Terrel Croft / Wilford f. Summers, *American Electricians' Handbook*, 12ª Edition, McGraw-Hill, 1992.
- [6] Warren C. Young, *Roark'S Formulas for Stress & Strain*, 6ª Edition, McGraw-Hill, 1989.
- [7] Joseph Edward Shigley, Charles R. Mischke, *Diseño en Ingeniería Mecánica*, 5ª Edición, McGraw-Hill, 1990.
- [8] Frank P. Incropera, David P. De Witt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 3ª Edition, John Wiley & Sons, 1990.
- [9] SQUARE D COMPANY, *Folleto: Power-Dry, Unit-Cast, Small power transformers*, 1993.
- [10] VOLTRAN, *Folleto: Transformadores*.

- [11] EMSA (Electromanufacturas, S. A. de C. V.), Folleto: Transformadores de potencia y distribución.
- [12] DEEMSA (Diseño y equipos eléctricos de México, S. A. de C. V.), Folleto.
- [13] TRAGESA (Transformadores General Electric, S. A. de C. V.), Folleto: Catálogo I-1/88, Transformadores de potencia.
- [14] Camarena M. Jesús, Transformadores Eléctricos Industriales: reparación, diseño y construcción, Continental, 1974.