

# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO



FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

## DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR TRIFASICO DE DISTRIBUCION DE 50 KVA Y RELACION DE TRANSFORMACION 10,000+2,5+5% / 230 V

TESIS

Presentada por :

**JOSE HILARIO OBANDO ANGELES**

Para Optar el Título Profesional de

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Callao – Perú

2007

## Índice

### Introducción

#### Capítulo I

- 1.1.-El Transformador Trifásico
- 1.2.- El Circuito Magnético
- 1.3.-El Circuito Eléctrico
- 1.4.-El Sistema de Refrigeración
- 1.5.-Ensayos de Laboratorio del Transformador de Distribución

#### Capítulo II

- 2.1.-Procedimiento de Diseño y Cálculo de Transformador de Distribución de Energía Eléctrica de 50KVA,  $10 \pm 2,5\% \pm 5\%/0.23$  KV, Yd11, ONAN 1000msnm.
- 2.2.-Diseño del Núcleo
  - 2.2.1.-Cálculo de la Tensión por Espira ( E )
  - 2.2.2.-Cálculo de la Sección Transversal de la Columna del Núcleo (  $A_{fe}$  )
  - 2.2.3.-Cálculo del Diámetro de la Columna (  $\phi$  )
  - 2.2.4.-Cálculo de las Dimensiones de los Escalones
  - 2.2.5.-Cálculo del Número de Planchas por Escalón en la Columna
  - 2.2.6.-Cálculo de la Sección Transversal de la Columna (  $A_{fe}$  )
  - 2.2.7.-Recálculo de la Densidad de Flujo Magnético
  - 2.2.8.-Cálculo de la Altura de Ventana del Núcleo (  $H_w$  )
  - 2.2.9.-Cálculo de la Altura del Yugo (  $h_y$  )
  - 2.2.10.-Cálculo de la Distancia entre Columnas ( M )
  - 2.2.11.-Cálculo de las Dimensiones de las Planchas del Núcleo
  - 2.2.12.-Cálculo de la Longitud del Circuito Magnético (  $L_{fe}$  ) del Núcleo
  - 2.2.13.- Cálculo de Pérdidas de Potencia Reactiva (  $Q_{fe}$  )
  - 2.2.14.- Cálculo del Peso del Núcleo
  - 2.2.15.-Cálculo de las Pérdidas en el Núcleo
  - 2.2.16.-Cálculo de Pérdidas de Potencia Aparente en Vacío (  $S_o$  )
  - 2.2.17.-Cálculo del Angulo de Conducción de la Corriente de Vacío (  $\phi_o$  )
  - 2.2.18.-Cálculo de la Corriente de Vacío ó de Excitación (  $I_o$  )
  - 2.2.19.-Cálculo del Costo de Fabricación del Núcleo ( C )
  - 2.2.20.-Resumen del Diseño del Núcleo

#### Capítulo III

- 3.1.-Diseño de las Bobinas, Devanados ó Arrollamientos
- 3.2.-Devanado ó Bobina de Baja Tensión
  - 3.2.1.-Cálculo del Número de Espiras
  - 3.2.2.-Cálculo de la Corriente por el Conductor
  - 3.2.3.-Cálculo de la Sección Transversal del Conductor (  $a_{cu/BT}$  )
  - 3.2.4.-Cálculo de la Altura de la Bobina (  $H_{BT}$  )
  - 3.2.5.-Cálculo del Número de Espiras por Capa (  $N_{E/C}$  )
  - 3.2.6.-Cálculo del Número de Capas por Bobina (  $N_{C/B}$  )
  - 3.2.7.-Cálculo del Aislamiento entre Capas (  $\delta_{BT}$  )
  - 3.2.8.-Cálculo del Espesor Radial de la Bobina (  $e_{R/BT}$  )
  - 3.2.9.-Cálculo de la Reactancia de Dispersión de la Bobina (  $X_{L/BT}$  )

- 3.2.10.-Cálculo de la Resistencia de la Bobina a la Corriente Continua
- 3.2.11.-Cálculo del Volumen del Cobre de la Bobina
- 3.2.12.-Cálculo del Peso del Cobre por Bobina
- 3.2.13.-Cálculo de las Pérdidas en la Bobina de Baja Tensión
- 3.2.14.-Cálculo del Costo  $C_{T/cu/BT}$  del Cobre de la Bobina de Baja Tensión
- 3.3.-Devanado ó Bobina de Alta Tensión
  - 3.3.1.-Cálculo del Número de Espiras
  - 3.3.2.-Cálculo del Menor Taps de Regulación de la Bobina Primaria
  - 3.3.3.-Cálculo de la Corriente por el Conductor
  - 3.3.4.-Cálculo de la Sección Transversal del Conductor (  $a_{cu/AT}$  )
  - 3.3.5.-Cálculo de la Altura de la Bobina (  $H_{AT}$  )
  - 3.3.6.-Cálculo del Número de Espiras por Capa (  $n_{E/C}$  )
  - 3.3.7.-Cálculo del Número de Capas por Bobina (  $n_{C/B}$  )
  - 3.3.8.-Cálculo del Aislamiento entre Capas (  $\delta_{AT}$  )
  - 3.3.9.-Cálculo del Espesor Radial de la Bobina (  $e_{R/AT}$  )
  - 3.3.10.-Cálculo de la Reactancia de Dispersión de la Bobina (  $X_{L/AT}$  )
  - 3.3.11.-Cálculo de la Resistencia de la Bobina a la Corriente Continua
  - 3.3.12.-Cálculo del Volumen del Cobre de la Bobina
  - 3.3.13.-Cálculo del Peso del Cobre por Bobina
  - 3.3.14.-Cálculo de las Pérdidas en la Bobina de Baja Tensión
  - 3.3.15.-Cálculo del Costo  $C_{T/cu/AT}$  del Cobre de la Bobina de Alta Tensión
  - 3.3.16.-Cálculo de las Pérdidas Totales en las Bobinas del Transformador
  - 3.3.17.-Resumen del Diseño de las Bobinas del Transformador

## Capitulo IV

- 4.1.-Diseño de la Cuba ó Tanque del Transformador
- 4.2.-Cálculo del Incremento de Temperatura en la Bobina de Baja Tensión
- 4.3.-Cálculo del Incremento de Temperatura en la Bobina de Baja Tensión
- 4.4.-Cálculo de las Dimensiones de la Cuba ó Tanque
  - 4.4.1.-Las Dimensiones Finales de las Bobinas
  - 4.4.2.-Las Dimensiones Finales del Núcleo
  - 4.4.3.-Cálculo de la Superficie de Refrigeración o Aletas Radiadoras
  - 4.4.4.-Cálculo de las Dimensiones del Tanque Expansor

## Capitulo V

- 5.1.-Ensayos de Laboratorio en el Transformador Diseñado
- 5.2.-Ensayos de Rutina ó Individuales
  - 5.2.1.-Medición de la Resistencia de los Arrollamientos
  - 5.2.2.-Medición de la Relación de Transformación y Grupo de Conexión
  - 5.2.3.-Medición debida a la Carga y la Tensión de Cortocircuito ( Pérdidas )
  - 5.2.4.-Medición de las Pérdidas en Vacío y la Corriente de Vacío
  - 5.2.5.-Ensayo de Tensión Inducida
  - 5.2.6.-Ensayo de Tensión Aplicada

## Anexos

## Conclusiones y Recomendaciones

## Bibliografía

## **Título : Diseño de un Transformador Trifásico de Distribución de 50KVA y Relación de Transformación $10,000 \pm 2.5 \pm 5\%$ / 230 V.**

### **Prólogo**

En el transcurso de mi preparación Universitaria, cuando estudiaba el curso de "Diseño de Maquinas", me surgió la idea; de que todo elemento constructivo cualquier característica técnica del Transformador Trifásico podía establecerse como una función matemática de una cualquiera de sus otras características, vale decir que:

Para establecer el Cálculo de las Dimensiones del Núcleo, Devanado y/o Tanque ( tales como su Peso, Volumen, Costo, etc. ) como una función directa de la Potencia Nominal  $f(S_n)$ . Hoy, después de que han pasado cerca de dieciocho años de haberme alejado de las aulas en donde me formé académicamente, y después de haber puesto en práctica de la Teoría de los Circuitos Magnéticos, y de sintetizar estas experiencias profesionales en el Estudio de Proyecto Titulado:

**"Diseño Generalizado de Transformadores de Distribución Trifásica  $S_n \leq 630$  KVA ;  $10 \pm 2.5 \pm 5\%$  ; 1000 msnm ; Yd11 ; ONAN"**

Presentado en Mayo de 1983, ante los Ejecutivos de la Empresa Elko Peruana S.A. siendo que a partir de este trabajo se orientara la producción habitual de Reactores para Balastos y Transformadores y AutoTransformadores de Uso Doméstico, a una **nueva Línea de Producción como fue la de Transformadores de Distribución de Energía Eléctrica**, responsabilidad total que me confió la Empresa en mención por el lapso de cinco años, esto es hasta Mayo de 1987, fecha en que por motivos personales opté por retirarme de la misma. La Planificación total de la Fabricación y Producción de estos Transformadores de Distribución, me permitió manejar directamente el diseño y cálculo, y experimentar continuamente con este producto y aplicar las Fórmulas que día a día se irían mejorando y obteniéndose progresivamente la optimización del mismo. Decidí entonces proponer a los propietarios de la Empresa que había acogido mis ideas, la creación del **Departamento de Transformadores de Distribución y Potencia**, idea que fue aceptada rápidamente, y con lo cuál se me permitía no solo el Diseño y Cálculo de tales Transformadores, sino también el de Organizar la Producción de los mismos y su correspondiente Control de Calidad, esta tarea no fue nada fácil pues se trataba de poder colocar en el Mercado Nacional de Equipos Electromecánicos los Transformadores Diseñados, Calculados, Fabricados, Producidos y sometidos a Ensayos de Control de Calidad; que salieran de este Departamento de Transformadores y para competir con Equipos cuya permanencia en el Mercado Nacional era de muchos años y que gozaban de la preferencia técnica de muchos ingenieros. A pesar de esa circunstancia me lancé con el apoyo de la Empresa en donde laboraba y colocamos nuestro Transformador a competir con las otras marcas conocidas ( BBC y DELCROSA) ; así nos iniciamos y cumplimos con todas las exigencias que ordenaban las Normas Técnicas tanto Nacionales como Internacionales y a regañadientes de las Empresas de la competencia se colocó nuestros

Transformadores, como un producto que por su Calidad fue aceptado, siendo así; que Empresas como ElectroPerú, Hidrandina y otras comenzaron a consumir nuestros Equipos, extremo de que valga la anécdota, Brown Boveri nos colocó Ordenes de Compra por diversos Transformadores Especiales en Seco y cuyos diseños desarrollé y aún están en mi poder como una muestra de Calidad alcanzada por ese entonces. A la fecha, y luego de la experiencia acumulada; quiero expresar mi deseo de que estas breves líneas sirvan para incentivar a aquellos que deseen desarrollar algún Producto que nos desmayen en su afán de realizar sus ideas pues sobre la base de una buena comprensión matemática del producto imaginado, se podrán sentar las bases materiales para fabricarlo. Algunas fórmulas, que he utilizado para los Cálculos del Transformador materia de este Proyecto, han sido deducidas no solo como consecuencia de una lógica secuencia matemática sino de la confrontación de la Teoría del Núcleo Magnético con la realidad del Producto Fabricado de manera que puedo afirmar que en todo Transformador :

- 1.-**La Tensión por Espira es una función directa de la Raíz Cuadrada de la Potencia Nominal**
- 2.-**La Sección Transversal de la Columna es una función directa de la Raíz Cuadrada de la Potencia Nominal**
- 3.-**El Ancho de los Escalones de la Columna es una función directa de la Raíz Cuarta de la Potencia Nominal**
- 4.-**El Peso del Núcleo es una función directa de la Raíz Cuarta del Cubo de la Potencia Nominal**
- 5.-**Las Pérdidas por Efecto Foucault son una función directa de la Raíz Cuarta del Cubo de la Potencia Nominal .**

Y así, podemos continuar indefinidamente enunciando condiciones, que he encontrado durante mis años de Experiencia en la Fabricación de Transformadores de Distribución tanto Monofásicos como Trifásicos, y estableciendo sus respectivas Fórmulas Matemáticas; todas las expresiones como una Función Matemática de la Potencia Nominal, que en su conjunto formarían el Modelo Matemático de este Producto. Debido a que el objeto del presente proyecto es el Diseño de un Transformador de Distribución, no me permite extenderme sobre lo antes mencionado, sin embargo queda mi compromiso ante ustedes que a la brevedad posible, trataré de mostrarles toda esta Teoría perfectamente establecida. Con el ánimo de poder haber sido útil y contribuir al desarrollo de una Tecnología propia en beneficio del Desarrollo de nuestra sociedad me despido de ustedes, agradeciéndoles infinitamente la paciencia y la atención prestada a este modesto trabajo .

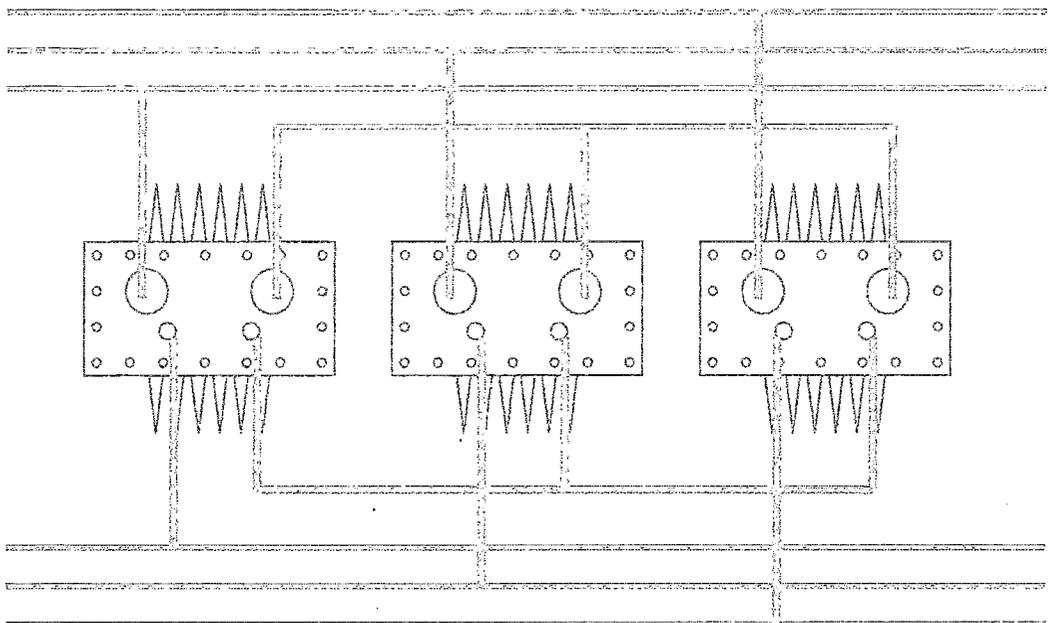
José Hilario Obando Ángeles

## Capítulo I

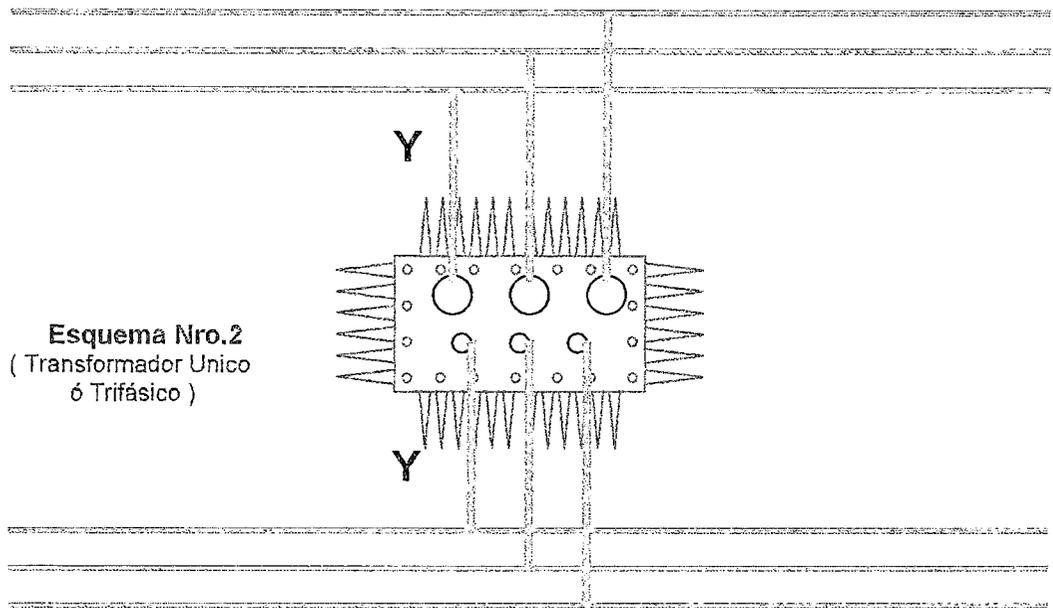
### **1.1.-El Transformador Trifásico.-**

La Teoría del Transformador Trifásico , es una extensión de la Teoría para Transformadores Monofásicos , pues a su vez en el estudio de los Transformadores Polifásicos se reduce este , al estudio de una sola fase aplicándose el mismo criterio en una Transformación simple . Como es sabido una Transformación Trifásica se puede obtener de la combinación de tres sistemas monofásicos ; usando tres Transformadores monofásicos independientes ó un solo Transformador que de alguna forma este contenido en los tres . Cuando se tiene un solo Transformador que contiene a los tres , se tendrán diversas formas de conformación de los Núcleos y distintos modos de conectar sus devanados tanto primarios como secundarios . Para seleccionar la conexión eléctrica mas apropiada y la disposición magnética del Núcleo habrá de conocerse ciertas propiedades particulares del servicio y la instalación a obtenerse de la misma. El Transformador Trifásico es el que da la Transformación Trifásica de un Sistema Eléctrico Trifásico equilibrado de Tensiones en otro Sistema Trifásico también equilibrado . Esta Transformación se puede realizar también con Transformadores Monofásicos , pero los Transformadores Trifásicos han sido diseñados especialmente para esta función . Así por ejemplo en la figura adjunta se constituye un Banco de Transformación Trifásica a base de Transformadores Monofásicos .

Esquema Nro.1  
( Banco de Transformadores Monofásicos )

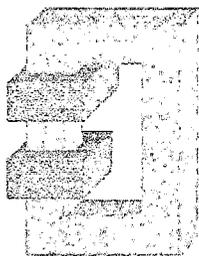


Para reemplazar estos bancos monofásicos , se ha fabricado el Transformador de Tres Columnas llamado también Transformador Único o Transformador Trifásico , el mismo que reemplaza a los otros tres Monofásicos para el cuál tendremos la representación esquemática siguiente :



Como se puede apreciar en ambas figuras las conexiones tanto en el Banco de Transformadores Monofásicos como en el Transformador Unico o Trifásico , en los lados correspondientes al Primario y Secundario están conectados como Estrella – Estrella . Tambien se puede observar que en el Banco de Transformadores Monofásicos las conexiones Estrella – Estrella se ejecutan externamente a los tres Transformadores mas no así en el Transformador Trifásico cuyas conexiones estan realizadas en el interior del mismo , siendo esta una característica importante del Transformador Trifásico, marcando esto una notable ventaja sobre el Banco de Transformadores Monofásicos. Mediante los esquemas que a continuación mostraremos , trataremos de mostrar la fusion de los tres Transformadores Monofásicos con Núcleo Magnético del Tipo Columnas en uno solo Trifásico con Núcleo Magnético del tipo Columnas .

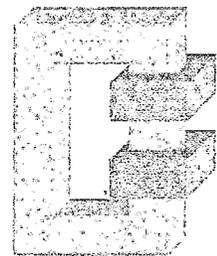
Transformador "A"



Transformador "B"

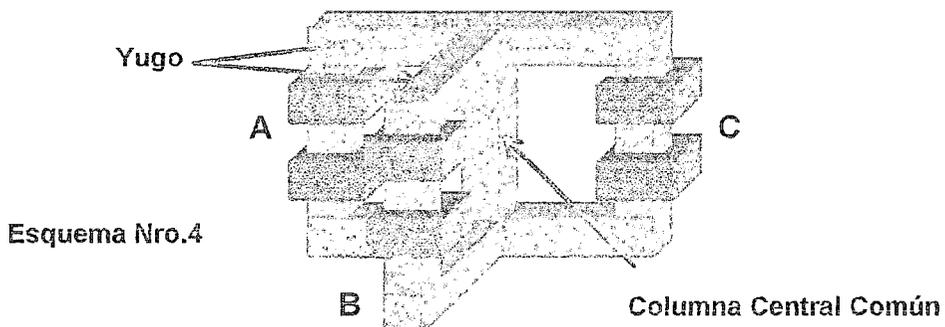


Transformador "C"

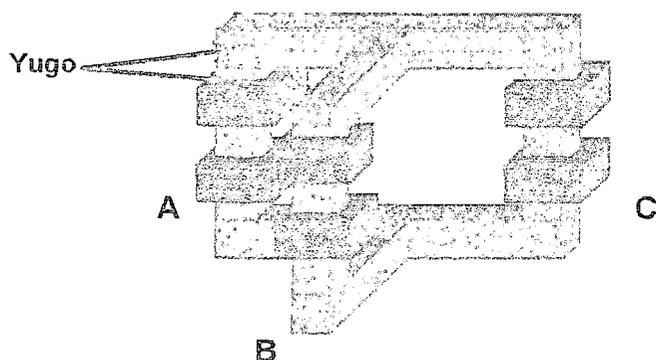


Esquema Nro.3

Transformador Unico ó Trifásico

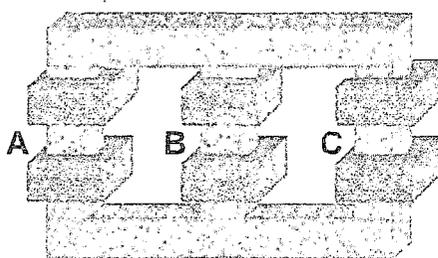


En la figura anterior se puede observar , que la columna central común del Núcleo que se ha formado , puede ser eliminada ; quedando un Núcleo como el que a continuación se puede mostrar ;



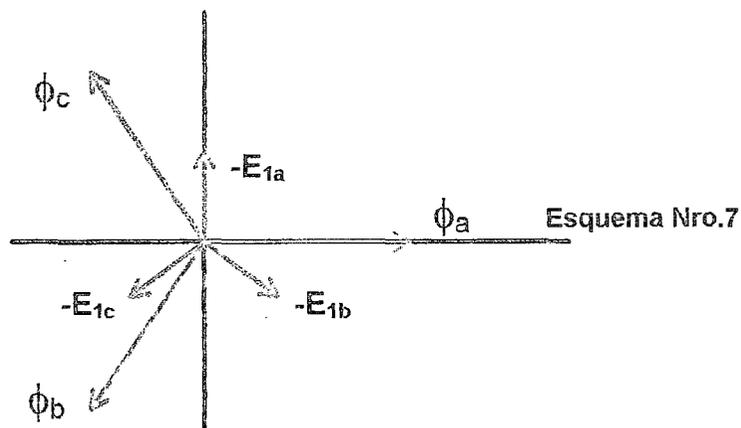
Esquema Nro.5

Eliminando los yugos del **Transformador Monofásico "B"** y colocando como columna central , lo que queda del Transformador "B" de la figura anterior tendremos el siguiente Núcleo ,



Esquema Nro.6

Obtenemos un Núcleo llamado tipo Columnas y que corresponde al Núcleo de un Transformador Único ó Trifásico , y es el que se utiliza en la actualidad para la Fabricación de Transformadores Trifásicos de Distribución de Energía Eléctrica y otras aplicaciones . La explicación fasorial de la equivalencia entre los tres Transformadores Monofásicos y el Transformador Trifásico obtenido y por lo tanto sus respectivos Núcleos queda establecida en el diagrama fasorial siguiente.



Esquema Nro.7

Donde las cargas en los secundarios se encuentran equilibradas . Los fasores  $-E_1$  , representan las tensiones de cada uno de los Transformadores A , B y C los cuales son aproximadamente iguales a los fasores  $U_1$  . Los relación de los flujos  $\phi_a$  ,  $\phi_b$  ,  $\phi_c$  , se calculará por :

$$\phi_a + \phi_b + \phi_c = 0$$

De acuerdo a la relación anterior , se puede establecer que al fusionarse en una sola las tres columnas centrales mostrada en los diagramas mostrados anteriormente , por la resultante de esta no circulará Flujo Magnético alguno por lo que suprimiendo esta columna no alterará en nada el funcionamiento del nuevo núcleo obtenido , siendo que como consecuencia de esto se tendrá menores valores de Pérdidas en el Hierro así como una disminución considerable de su Peso. El tipo de Núcleo obtenido para la Fabricación de Transformadores Trifásicos ,facilita notablemente la construcción y el armado del mismo, conociéndose este procedimiento de armado de las Láminas de Fierro Silicoso como Armado al Solape. Es de notar que con el tipo de Núcleo Trifásico Unico , se tiene un circuito magnético asimétrico , pues la Columna central del mismo es de menor longitud que las dos laterales y por lo tanto se requiere de menor Corriente de Excitación ó también llamada Corriente de Vacío (  $i_0$  ) . Con un Núcleo de Fierro Silicoso de Grano Orientado , esta asimetría es imperceptible pues este tipo de Láminas usadas en la construcción del mismo requieren de bajas Corrientes de Excitación . En ocasiones los Transformadores Trifásicos presentan ventajas sobre los Monofásicos , tales como : tienen menor Peso , menores Pérdidas por efecto Joule y Foucault , menor Volumen de Aceite , menor Precio de Venta, etc., ventaja que se pierde cuando se trata de Potencias elevadas , en cuyo caso es mas recomendable utilizar Banco de Transformadores Monofásicos . Todo Transformador esta construido sobre la base fundamental de su Circuito Magnético y su Circuito Eléctrico.

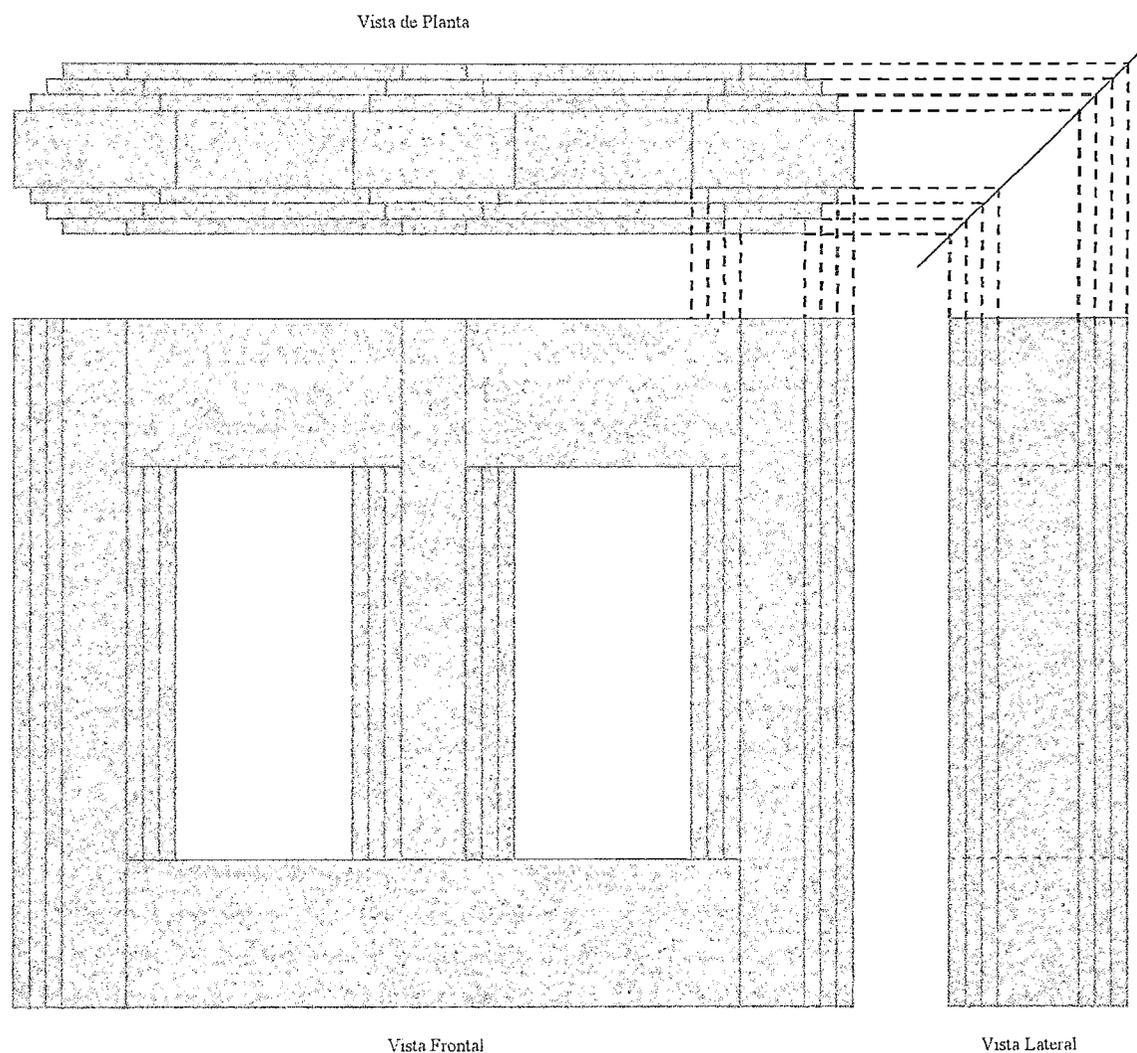
### **1.2.-El Circuito Magnético.-**

Para la Construcción de los Núcleos de los Transformadores de Distribución de Energía Eléctrica , se utiliza actualmente Fierro Silicoso de Grano Orientado con una aleación que oscila entre 3 y 5% de Silicio, el cual cuando es agregado al acero nos permite :

- Reducir las Pérdidas por Histéresis
- Aumentar la Resistencia Mecánica del Acero
- Disminuir las Corrientes de Remolino , Parásitas o de Foucault
- Evitar el envejecimiento de las Láminas de Fierro Silicoso

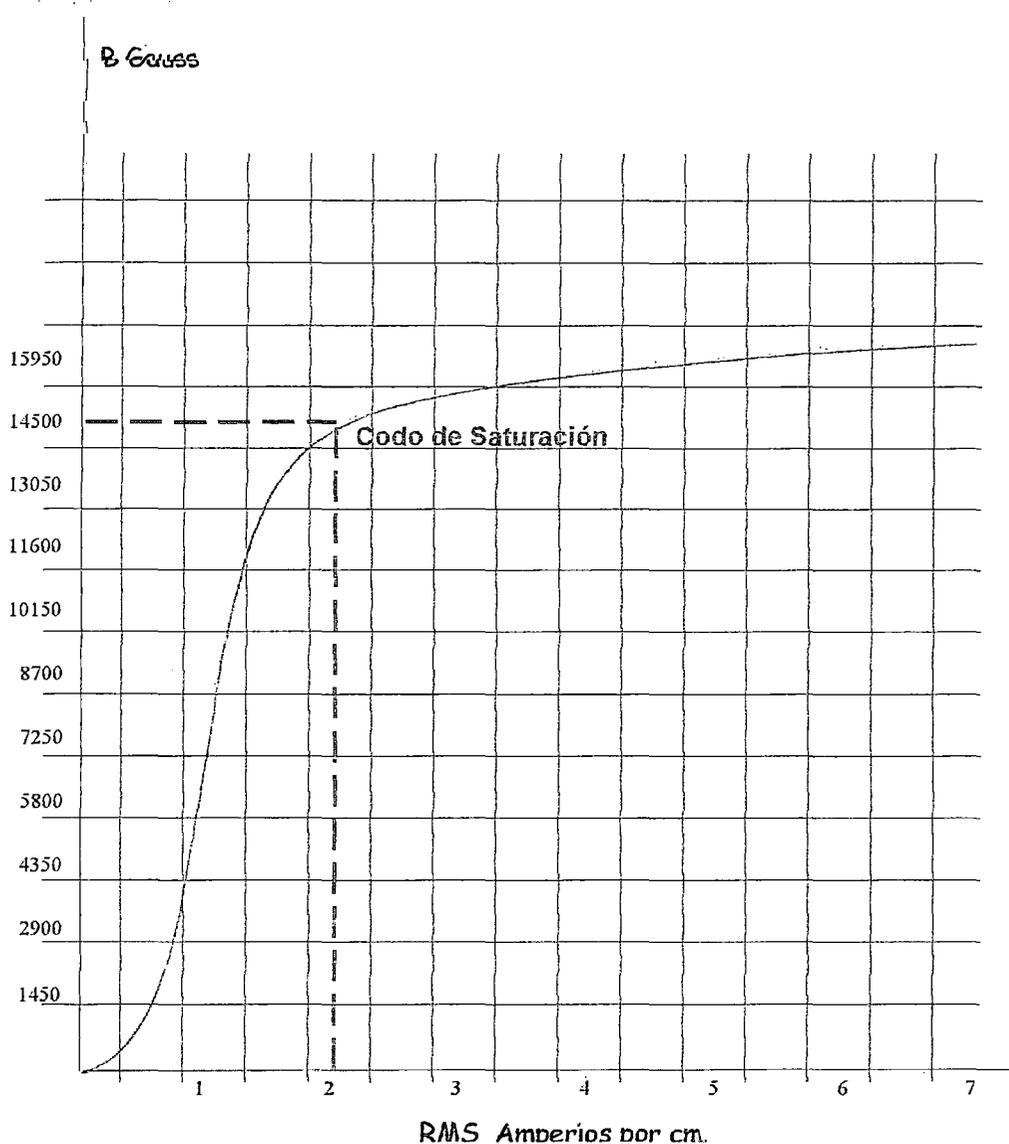
Actualmente , se utiliza el Fierro Silicio de Grano Orientado Laminado en Frío habiéndose logrado que los Modernos Transformadores sean de un tamaño mas reducido que aquellos que fueron construidos con Fierro Silicio Laminado en Caliente . Los Fabricantes de Fierro Silicio proporcionan las Curvas de Magnetización de su Producto , información mediante la cual es posible seleccionar los valores de Diseño adecuado para la Construcción del Núcleo de determinado Transformador allí podemos encontrar los Parámetros que nos

permiten Construir adecuadamente este Núcleo . A continuación mostramos la Forma que tendrá el Núcleo de un Transformador Trifásico del Tipo Columnas.



**Esquema Nro.8**  
**( Núcleo Trifásico Escalonado Tipo Columnas )**

Para la Construcción del Núcleo del Transformador , recurrimos a las Curvas de Magnetización proporcionadas por los Fabricantes de las Láminas de Fierro Silicio , mediante las cuales podemos determinar los límites permisibles de la Densidad de Flujo Magnético de las mismas y por lo tanto este será el límite de Flujo Magnético Magnético para la operación del Transformador. A continuación se muestran las Curvas de Magnetización características de las Láminas de Fierro Silicio .



Curva de Magnetización Típica de los Fabricantes de Fierro Silicio , utilizada para determinar el Punto llamado " Codo de Saturación " y para elegir el Máximo Valor Recomendable de Flujo Magnético para la Operación del Núcleo del Transformador con Láminas de Fierro Silicoso de Grano Orientado.

Se hace necesario , conocer el Valor de las Pérdidas de Potencia Activa ( W ) por cada kilogramo de Peso de Fierro Silicoso Láminado , utilizado en la Fabricación del Núcleo del Transformador para lo cuál necesitaremos de la Tabla mostrada a continuación .

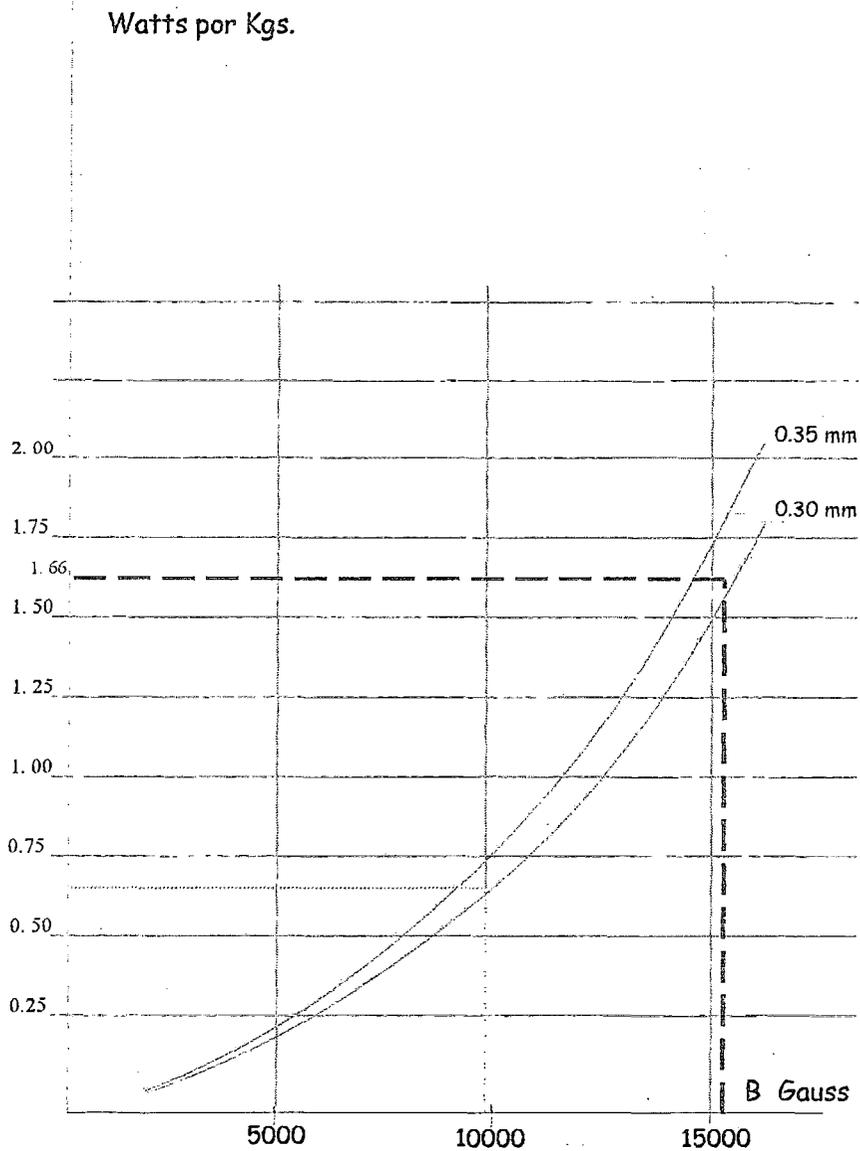
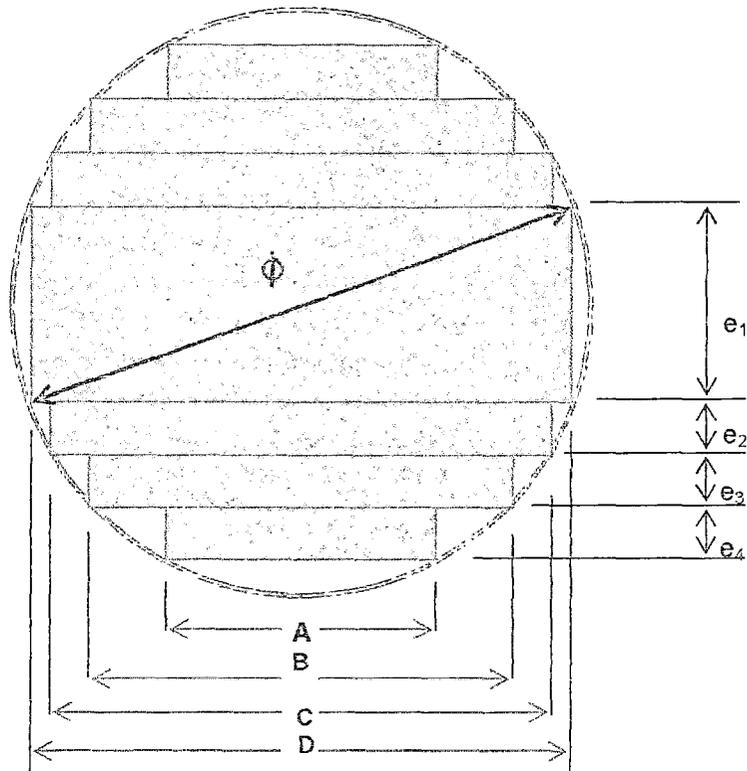


Tabla de Pérdidas de Potencia Activa versus Densidad de Flujo Magnético , mostrando esta relación para dos espesores de Lámina de Fierro Silicoso de Grano Orientado comúnmente utilizadas en la Fabricación de Núcleos de Transformadores de Distribución de Energía Eléctrica

El tipo de Núcleo Escalonado , permite reducir considerablemente su Peso total y por lo tanto , otros valores tales como : Las Pérdidas en el Fierro , El volumen El Precio de las Láminas etc., este Núcleo Escalonado se encuentra inscrito en un Círculo que es el límite natural de la figura Poligonal Simétrica que se forma en su interior . La figura muestra la Sección Transversal de la Columna del Núcleo de un Transformador Trifásico de Distribución de Energía Eléctrica .



Las dimensiones de los Escalones ( A , B , C , D ) del Núcleo es una función constante y directa de la Raíz Cuarta de la Potencia Nominal , así como también lo es el Diámetro (  $\phi$  ) de la Sección Transversal de la Columna, siendo por lo tanto que la Sección Transversal (  $A_{fe}$  ) de esta columna escalonada es una función directa de la Raíz Cuadrada de la Potencia Nominal del Transformador. En tal sentido se puede establecer que :

$$A = k_1 \sqrt[4]{S_n}$$

$$e_1 = k_{e1} \sqrt[4]{S_n}$$

$$\phi = k_\phi \sqrt[4]{S_n}$$

$$B = k_2 \sqrt[4]{S_n}$$

$$e_2 = k_{e2} \sqrt[4]{S_n}$$

$$A_{fe} = k_{fe} \sqrt{S_n}$$

$$C = k_3 \sqrt[4]{S_n}$$

$$e_3 = k_{e3} \sqrt[4]{S_n}$$

$$D = k_4 \sqrt[4]{S_n}$$

$$e_4 = k_{e4} \sqrt[4]{S_n}$$

Donde , los valores de  $k_1 \dots$  ,  $k_{e1} \dots$  ,  $k_\phi$  ,  $k_{fe}$  son constantes Numéricas que se obtienen de acuerdo al tipo de Núcleo , al número de Fases y al tipo de servicio del Transformador ; si se conserva la secuencia matemática que se obtiene de esta forma Geométrica Escalonada se puede establecer que el Peso , las Pérdidas de Potencia Activa y Reactiva y el Costo del Núcleo se pueden formular como sigue :

$$P_{fe} = k_p \sqrt[4]{S_n^3} \quad (\text{Peso del Núcleo})$$

$$W_{fe} = k_w \sqrt[4]{S_n^3} \quad (\text{Pérdidas Activas en el Núcleo})$$

$$\text{VAR}_{fe} = k_{var} \sqrt[4]{S_n^3} \quad (\text{Pérdidas Reactivas en el Núcleo})$$

$$C_{fe} = k_c \sqrt[4]{S_n^3} \quad (\text{Costo del Núcleo})$$

### 1.3.-El Circuito Eléctrico.-

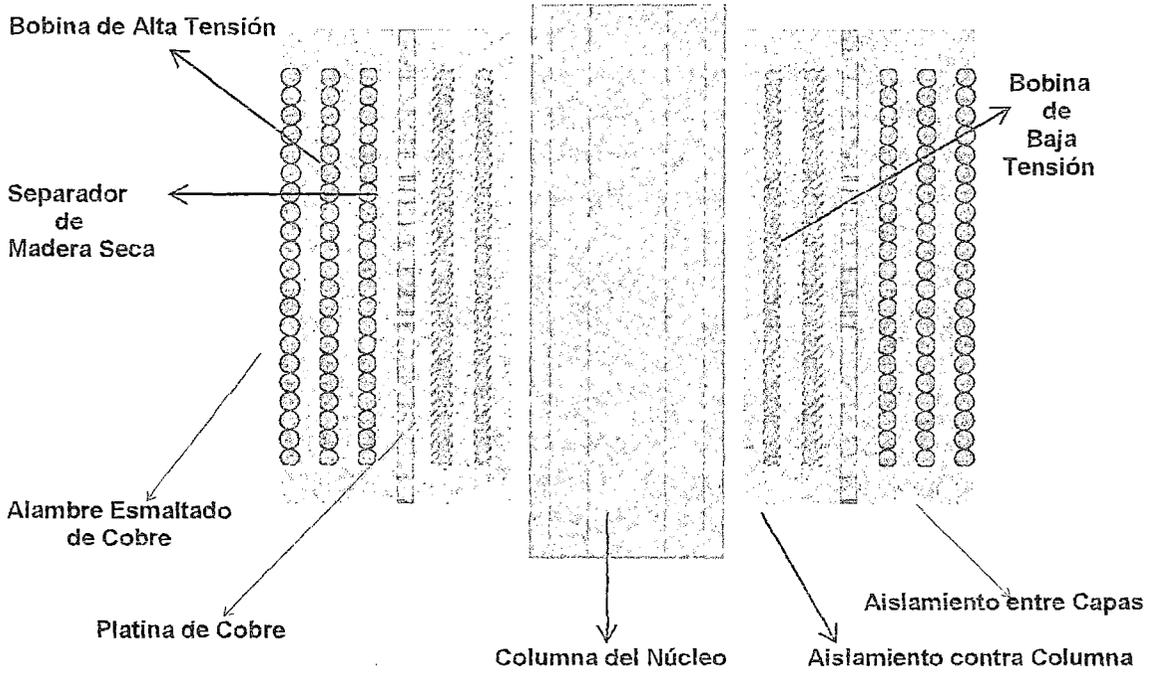
Este Circuito esta conformado por lo que conocemos como las Bobinas, Arrollamientos ó Devanados , Primario y Secundario del Transformador, siendo la función de este circuito la de Conducir la Corriente Eléctrica a través de los Conductores de Cobre ( en algunos casos se utiliza Aluminio ), la que a su vez por las Leyes del Electromagnetismo generan en las columnas del Núcleo , el Flujo Magnético que permitirá la Transformación de la Energía Eléctrica con determinados parámetros de entrada ( Bobinado Primario) en otros parámetros de salida ( Bobinado Secundario ) . Las Bobinas , Devanados ó Arrollamientos que son construidos contienen determinado Número de Espiras , determinada forma y una posición respecto al Núcleo , así pues se tiene que :

-Las Bobinas pueden ser Construidas básicamente en forma concéntrica o por capas , ó en forma alternada ( galletas ) .

-Las Bobinas de mas Baja Tensión van hacia el interior , mas cerca del Núcleo y la de mas Alta Tensión hacia el exterior , mas alejada del Núcleo

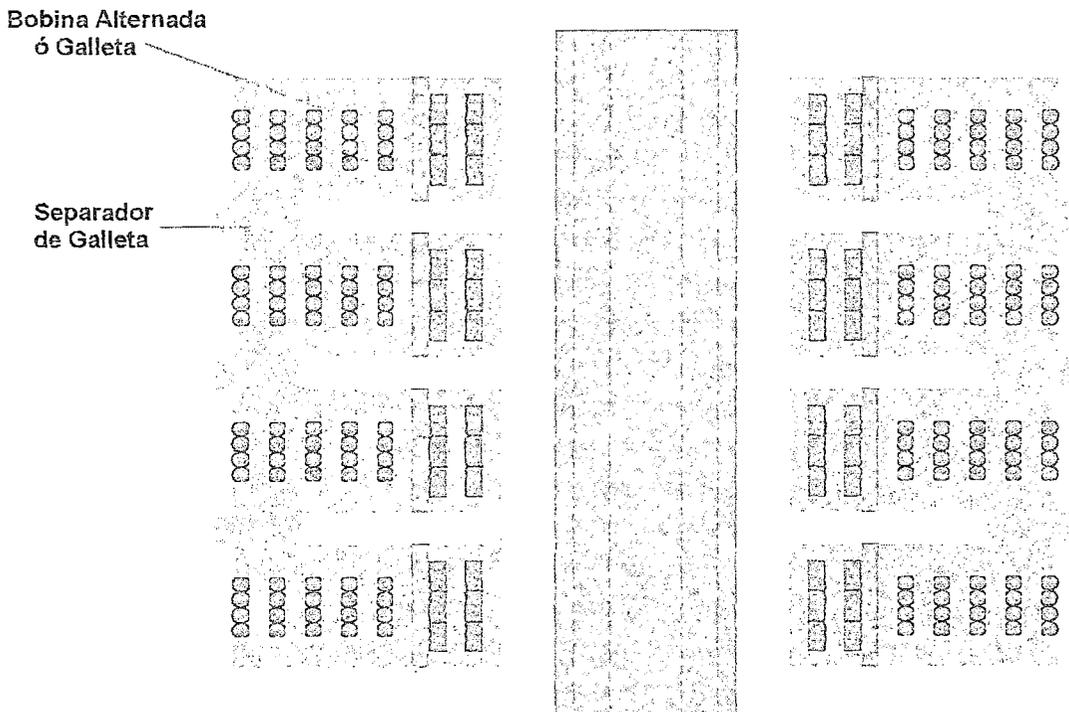
Por lo general en los transformadores de Distribución de Energía Eléctrica las bobinas se fabrican en moldes de madera de sección circular , de manera que la bobina resulta circular ; guiados por la experiencia podemos asegurar que de esta manera se evitan las deformaciones que se puedan originar en esta , por efectos de los esfuerzos electrodinámicos , tal como sucede cuando hay un posible fallo de Cortocircuito. El esquema Nro.9 , nos muestra la Sección Transversal de una Bobina del Tipo Capas y la disposición de la Baja y Alta Tensión respectivamente.

Esquema Nro.9  
( Bobinado Tipo Capas )

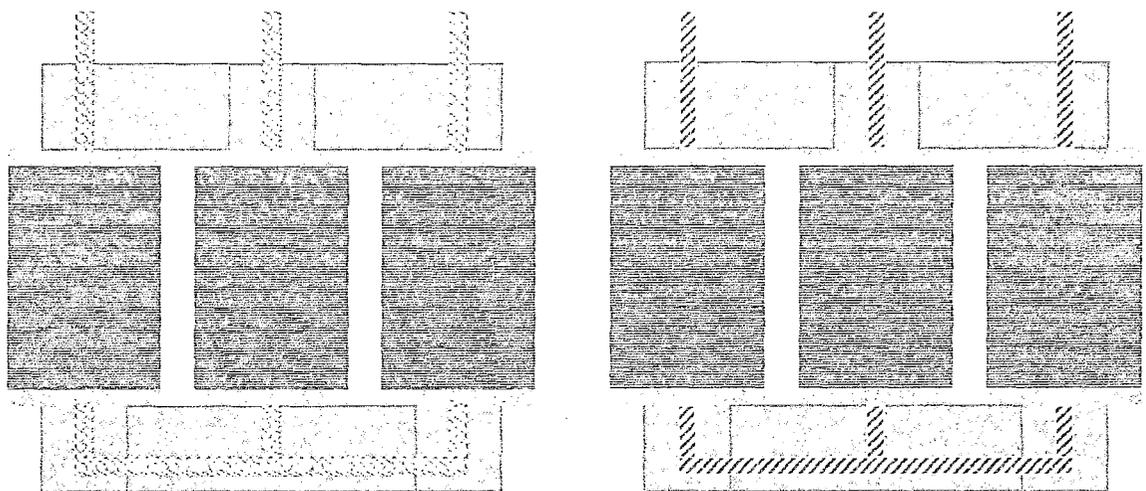


El esquema Nro.10 , nos muestra la Sección Transversal de una Bobina del Tipo Alternado ( Galletas ), con la disposición de la Baja y Alta Tensión respectivamente . En ambos casos , el Flujo Magnético Principal generado por la circulación de la corriente en las Bobinas del Transformador , será concentrado ó concatenado en la Columna del Núcleo

Esquema Nro.10  
( Bobinado Tipo Alternado )

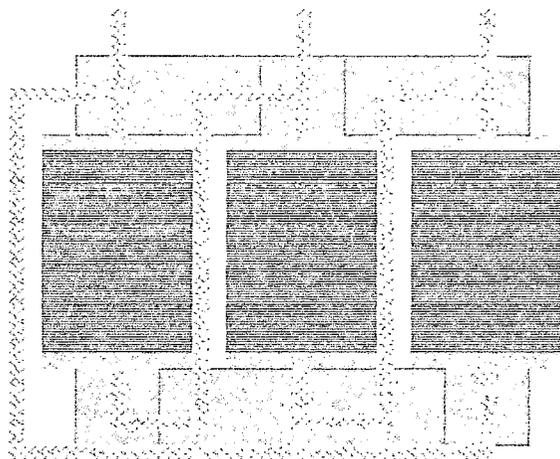


Las Bobinas , no solo están fabricadas con Alambre Esmaltado ó Pletina de Cobre forrada con material aislante ( Cinta de Algodón , de Vidrio , de Celulosa u otro material ) sino que también interviene el Papel Aislante ( Presspan ) con el cuál se permite el Aislamiento entre las Capas de las Bobinas , entre las Bobinas y el Yugo y entre las Bobinas entre sí. De acuerdo al Diseño que habremos definido para la Construcción de las Bobinas , habremos de ir habilitando el material respectivo para que este pueda usarse progresivamente durante el proceso referido . Así , para cada Tensión de Bobina usaremos determinado espesor de Papel Presspan entre las Capas , y este debe ser suficientemente grueso para poder soportar no solo el Doble de la Tensión de Capa Calculada tal como lo exigen las Normas Técnicas de Fabricación , sino para soportar la Tensión Mecánica al que esta sometido el mencionado papel durante el proceso de Bobinado por efecto de ajuste del Conductor de Cobre originado desde la Máquina de Bobinar. El Número de Espiras totales que es Calculado sobre la base de la Potencia Nominal (  $S_n$  ) del Transformador , la Sección Transversal del Conductor (  $A_{cu}$  ) y la Altura Neta de la Bobina (  $H_B$  ) , son los Parámetros más importantes para la Construcción de la Bobina y sobre la forma y tamaño de esta , se obtiene el valor de la Constante de Rogovski (  $K_v$  ) , que nos permite conocer el límite del valor de la Tensión de Cortocircuito que no es otro que el valor que nos indicará la capacidad del Transformador para soportar eventuales fallos de Cortocircuitos durante su operación . Las Bobinas del Transformador Trifásico , para que brinden su efecto cual es generar el Flujo Magnético Principal ; tienen que estar conectadas entre sí bajo distintas modalidades y Grupos Horarios tales como : Yd11 , Yd5 , Dy11 , Dy5 , Dyn5 , Dyn11 , etc. mediante los cuales se identifica a los Transformadores , sobre todo si estos van a operar en Paralelo y se elimine la aparición del fenómeno de las Corrientes Circulantes , perjudiciales desde todo punto de vista ; puesto que a la aparición de estas se presentan corrientes entre los Transformadores mermándose la capacidad de entrega de su plena Potencia Nominal ; cuando operen en paralelo .

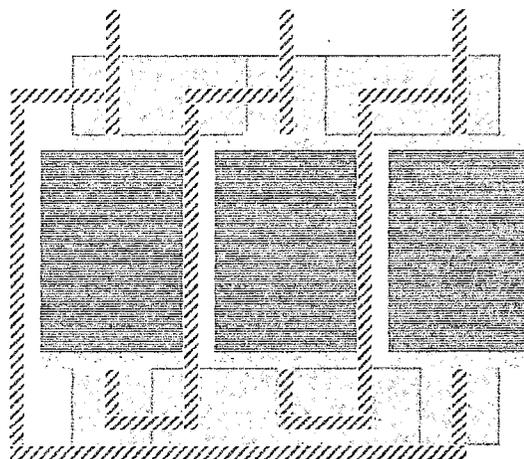


Conexión Estrella en Alta Tensión

Conexión Estrella en Baja Tensión



Conexión Triángulo en Alta Tensión



Conexión Triángulo en Baja Tensión

El procedimiento de Construcción de las Bobinas , nos señala que la de Baja Tensión queda ubicada al interior de todo el arrollamiento , y se monta sobre tubos de Papel Presspan , aislando completamente esta del núcleo del Transformador , sobre este tubo se arrolla la primera capa de conductor eléctrico que de acuerdo al cálculo habrá de usarse , al finalizar la primera capa se aísla esta , con una envoltura de Papel Presspan de espesor precalculado en el diseño ; se continúa de esta manera hasta completar el número de capas calculadas. Después de esta última , en la Bobina de Baja Tensión ; dejamos un espacio radial vacío a lo largo de toda la bobina conocido como Canal de Dispersión , el cuál debe cumplir con el distanciamiento mínimo entre esta bobina y la de Alta Tensión ; y permitiéndose el flujo del aceite que por un fenómeno conocido como Convección circulará por este Canal extrayendo el calor originado por el funcionamiento del Transformador , y desplazando las moléculas mas calientes hacia la parte superior del mismo y las mas frías hacia la parte inferior . Procedemos a colocar capas de Papel Presspan contra el canal de dispersión , que servirán de base para la primera capa de la Bobina de Alta Tensión ; cuando se termine de construir esta primera capa , se procederá a forrar esta con Papel Presspan , luego de esto se procede de la misma manera con las otras capas ; hasta completar el numero establecido por el Cálculo del devanado. Finalmente forramos la última capa con cinta de algodón para darle solidez mecánica a esta , culminando de esta manera la Construcción de la Bobina del Transformador .La descripción del proceso de Bobinado nos detalla la construcción de una Bobina de Tipo Tubular ó Capas que es el tipo de bobina que vamos a utilizar para el Diseño y Construcción del Transformador en referencia . Las condiciones mínimas que deben cumplir las Bobinas construidas no deben alejarse mucho de lo siguiente :

- a.- Deberán ser Económicas , tanto en su fabricación como durante el Servicio de Operación

- b.-Su Régimen Térmico , debe cumplir con las exigencias establecidas por las Normas de Fabricación tanto Nacionales como Internacionales.
- c.-Deberán tener suficiente Resistencia Mecánica para soportar posibles cortocircuitos instantáneos.
- d.-Deberán tener suficiente Rigidez Dieléctrica , contra posibles sobretensiones.

#### **1.4.-El Sistema de Refrigeración.-**

Como consecuencia de la Circulación de Corriente por el interior de los Conductores Eléctricos con los cuales se han construido las Bobinas , así como la circulación del Flujo Magnético Principal en las columnas y los yugos del Transformador , se presentan calentamientos normales en los mismos conocidos como Pérdidas y que toman los siguientes nombres :

- Pérdidas en el Fierro ó Perdidas por efecto Foucault en el Núcleo del Transformador
- Perdidas en el Cobre ó Perdidas por efecto Joule en las Bobinas del Transformador

En ambos casos estas pérdidas se miden en Watts (  $W$  ) , pues son calentamientos debidos a la parte de Potencia Activa , Real ó Util , de la Potencia Nominal ó Aparente (  $VA$  ) que se ha tomado como base de Cálculo para el Diseño y Fabricación del Transformador . Existen también calentamientos en el Núcleo por efecto de la Potencia Reactiva (  $VAR$  ) ; en todos los casos de Pérdidas de Potencia , el efecto inmediato es el calentamiento de todas las partes del Transformador , tanto interna como externamente lo cuál resulta perjudicial si el calor generado por estos efectos que se incrementan directamente con el aumento de la carga eléctrica , no es expulsado al medio ambiente; debido a este fenómeno de calentamiento se hace necesario el diseño de todo un Sistema de Refrigeración que nos permita mantener estos niveles de calor generados , dentro de rangos establecidos y exigidos por las Normas de Fabricación Nacionales e Internacionales. Este consiste en rodear de Aceite Refrigerante y Dieléctrico a la Parte Activa del Transformador ( Núcleo y Bobinas ) dentro de una Cuba ó Tanque que a su vez le servirá de protección contra deterioros ó accidentes de origen mecánico . Por lo tanto podemos dividir el Sistema de Refrigeración en dos partes perfectamente diferenciadas :

- La Cuba ó Tanque de Refrigeración
- El Aceite Refrigerante y Dieléctrico

##### **1.4.1.-La Cuba ó Tanque de Refrigeración.-**

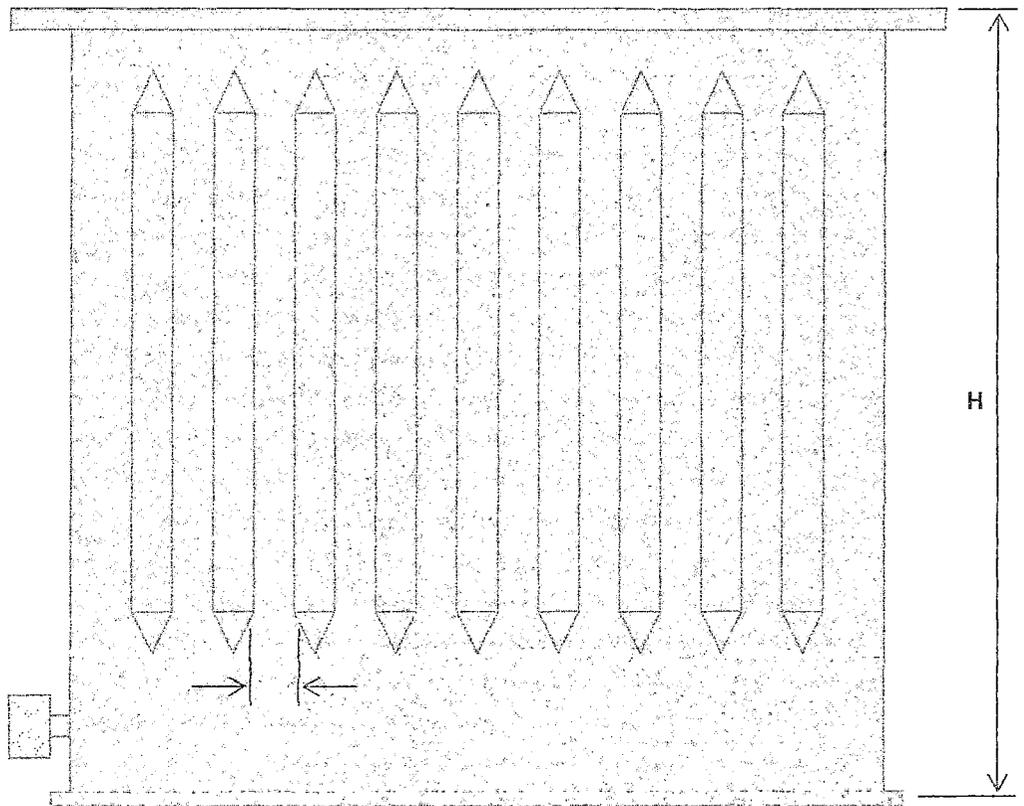
Se Fabrica con planchas de Metal , fundamentalmente con fierro laminado en caliente , el cuál es procesado de acuerdo a las dimensiones establecidas en el Cálculo General del Transformador , y para nuestro caso vamos a considerar un Sistema con Aletas Radiadoras , cuyo número dependerá de la cantidad de

energía que habrá de disiparse . El espesor de la Plancha de Fierro que seleccionaremos para la construcción de la Cuba ó Tanque del Transformador puede calcularse con bastante aproximación mediante la siguiente Fórmula :

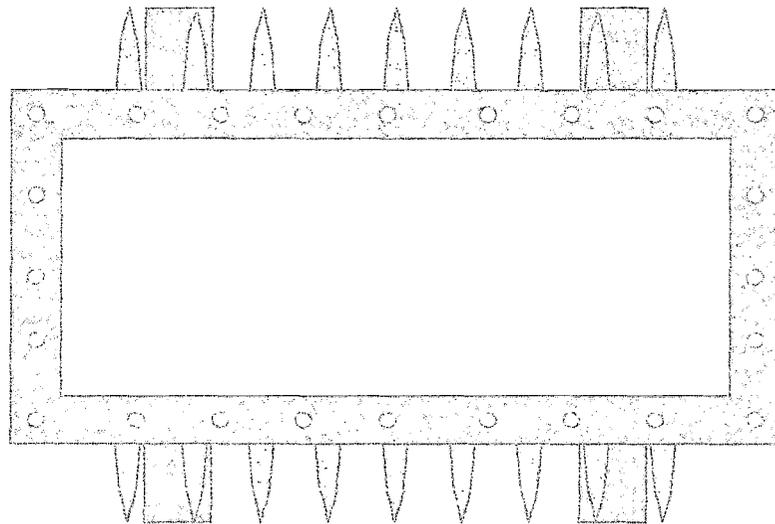
$$e = \frac{H^3}{0.045 h (1 + h / 1.5 b)}$$

En donde se tiene que :

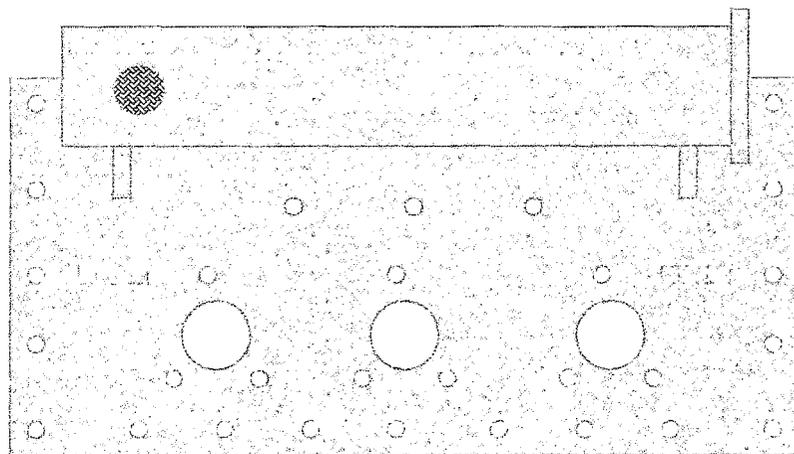
- e es el Espesor de la Lámina ( m.m.)
- H es la Altura de la Cuba ( m )
- b es el paso de la Aleta ( m.m.)
- h es la Profundidad de la Aleta ( m.m.)



En esta vista Frontal del Tanque se puede , apreciar la disposición de las Aletas Radiadoras ( AR ) que se encuentran simétricamente distribuidas , el niple ( N ) de vaciado y/ó toma de muestras de Aceite , los canales ( C ) de Fierro " U " de apoyo de la Base total del Transformador , así como la Brida de la Tapa ( BT ) y la plancha metálica del Fondo de la Cuba.



En la vista de Planta , antes mostrada se puede observar , los agujeros que van alrededor de la Brida de la Tapa , las Aletas Radiadoras salientes desde las partes laterales de la Cuba y el Canal de fierro "U" , soldado en el fondo de la Cuba. Así mismo , se aprecia la parte interior del Tanque , con un color distinto de Pintura respecto al exterior ; esta pintura aplicada debe cumplir con el doble requisito : ser anticorrosiva y ser compatible con el Aceite Dieléctrico, el interior debe calcularse con la holgura suficiente para alojar a la parte activa y permitir la distancia adecuada de la parte activa con las paredes del tanque.

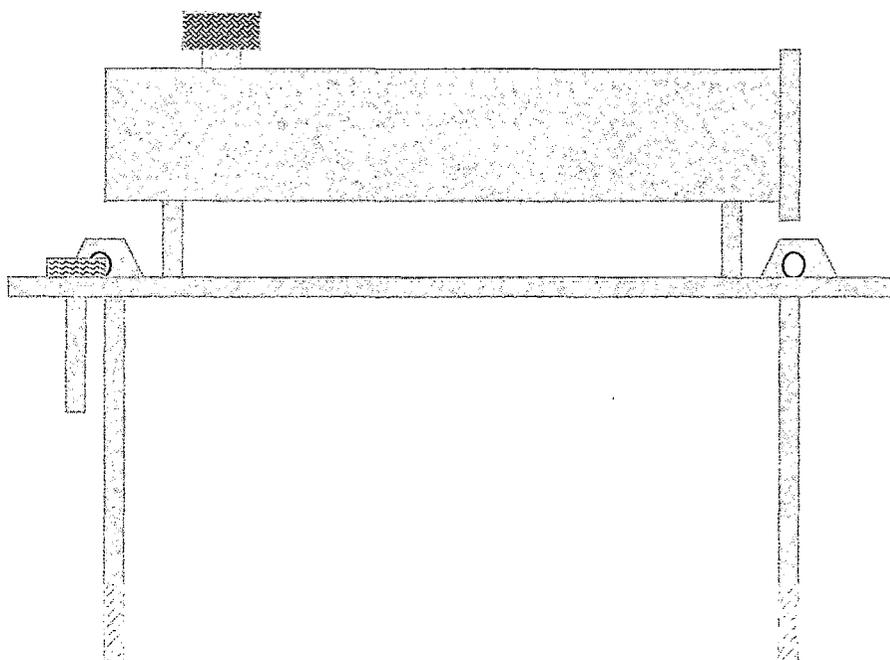


La tapa de la Cuba o Tanque , se fabrica con plancha de fierro mas gruesa que la utilizada en la construcción de la Cuba , sobre esta van soldadas en la parte exterior lo siguiente :

- Dos **Orejas de Izaje** , que sirven para la manipulación de todo el Transformador cuando este se encuentra herméticamente cerrado con empaquetadura compatible con el aceite , y ubicada entre esta y la brida del Tanque .
- El **Tanque Expansor** , que es de forma cilíndrica , cuya parte

central longitudinal coincide exactamente con la punta del Aislador de Alta Tensión , y que mediante dos tubos paralelos y soldados ortogonalmente a las paredes del cilindro, permiten el flujo de aceite que por convección llegan hasta el , y cuya dilatación puede observarse mediante el indicador **Visual del Nivel de Aceite**

-El **Pozo Termométrico** , mediante el cual podemos supervisar la Temperatura de Operación del Transformador , mediante un Termómetro de Mercurio especialmente acondicionado para este fin.



Los agujeros , que se muestran en la vista de Planta de la Tapa del Transformador , permiten sellar herméticamente al equipo , así como la colocación de los Aisladores de Porcelana que se utilizan en la salida de los Bornes de Alta y Baja Tensión. En la parte interior de la tapa , van soldados los ejes de fierro redondo roscados en el extremo inferior , los que van empernados a la parte activa formando un solo conjunto y que en su momento servirá para levantarse con las orejas de izaje respectivas y proceder al cerrado hermético del Transformador . Todas las uniones entre las distintas planchas utilizadas en la construcción del Tanque , serán soldadas de manera que la unión de las mismas no presente agujeros ni se permita la filtración del Aceite Dieléctrico , y el acabado de esta soldadura deberá ser de aspecto totalmente lizo. Como se puede entender el proceso de construcción de la Cuba o Tanque del Transformador de Distribución de Energía Eléctrica , requiere de sumo cuidado más si se trata conservar al aceite mediante el cual va a operar el equipo durante toda su vida útil .

#### **1.4.2.-El Aceite Dieléctrico.-**

El Aceite que utilizaremos en el llenado de la Cuba ó Tanque del Transformador , deberá cumplir con las siguientes exigencias :

- Tomar una muestra de Aceite ( 1 galón ) y proceder a efectuar un Ensayo de Rigidez Dieléctrica , para verificar su estado Eléctrico .
- Verificar si cumple con lo establecido en la Norma ASTM D – 1816 / D – 877 ; CEI 156 según se señala en la siguiente tabla.

Tensión Max. De Servicio del Transformador	CEI 156  KV/2,5mm	ASTM D – 1816  KV/0.08"	ASTM D – 877  KV/0,1
Hasta 36 KV	50	40	28
37 – 170 KV	55	45	29
171 – 300 KV	60	50	30
más de 300 KV	65	55	32

- Verificar el Nivel de humedad mediante los siguientes métodos
  - \*Higrómetro modelo 1000
  - \*Método de Karl Fischer

Habiéndose verificado el buen estado Electroquímico del Aceite , se procederá a utilizarlo en el Vaciado a la Cuba ó Tanque para sellar completamente el Transformador ; quedando éste expedito para ser sometido a los **Ensayos de Laboratorio** correspondiente.

#### **1.5.-Ensayos de Laboratorio del Transformador de Distribución.-**

Cuando el Transformador se encuentra sellado completamente , luego de haber sido sometido a controles de producción intermedios se hace necesario someterlo a los Ensayos de Laboratorio exigidos por las Normas de Fabricación , en ese sentido los Ensayos que se realizarán para considerar que el Equipo es ya un producto terminado y listo para ser entregado ; que de acuerdo con las Normas Itintec 370.002 y CEI son los siguientes :

- Relación de Transformación y Determinación del Grupo de Conexión
- Medidas de las Pérdidas en el Núcleo y Medición de la corriente de Vacío
- Medidas de las Pérdidas en los Devanados ( Bobinas ) y Medición de la Corriente de Cortocircuito y Determinación de la Tensión Porcentual de Cortocircuito
- Medida del Aislamiento ( Megohmetro )
- Ensayo de Tensión Aplicada
- Ensayo de Tensión Inducida o de Doble Frecuencia

## Capítulo II

### 2.-Procedimiento de Diseño y Cálculo de Transformador Trifásico de Distribución de Energía Eléctrica de 50KVA , $10 \pm 2,5\% \pm 5\%$ / 0.23 KV Yd11 , ONAN , 1000msnm .

El procedimiento a seguir para el Diseño y Cálculo de este Transformador Trifásico , es una combinación del Método Tradicional el cuál consiste en calcular específicamente cada una de las partes del Transformador y las Fórmulas Generalizadas establecidas para el Diseño Generalizado de Transformadores de Distribución de Energía Eléctrica presentado por mí en el año de 1983 ante la Gerencia General de la empresa en donde laboré. Estas fórmulas pueden ser comprobadas oportunamente . Los Parámetros de Diseño y Cálculo , necesarios para fabricar este Transformador habrán de ser los siguientes :

#### Características Técnicas

Potencia Nominal .....	50 KVA
Frecuencia Nominal.....	60 Hz
Número de Fases.....	Trifásico

#### Bobinado Primario

Tensión Nominal.....	10,000 V
Regulación.....	$\pm 2.5\% \pm 5\%$
Número de Tomas.....	5
Corriente Nominal.....	2,88 Amperios
Número de Bornes.....	3
Conexión.....	Estrella

#### Bobinado Secundario

Tensión Nominal.....	230 V
Corriente Nominal.....	125,51 Amperios
Número de Bornes.....	3
Conexión.....	Triángulo

#### Condiciones de Operación

Tipo de Montaje.....	Exterior / Interior
Temperatura Ambiental Máxima.....	40 °C
Grupo de Conexión.....	Yd11
Refrigeración.....	ONAN
Altura de Operación.....	1000 msnm

#### Accesorios

Tanque Expansor con Indicador Visual del Nivel de Aceite  
Orejas de Izaje  
Conmutador Manual de Tomas de accionamiento sin Carga  
Pozo Termométrico  
Borne de Puesta a Tierra

Ruedas Metálicas Orientables  
 Portaplaca Metálico  
 Placa de Aluminio de Características Técnicas con inscripción indeleble  
 Dotación de Aceite.

**Condiciones de Diseño y Fabricación**

Tipo de Núcleo.....Columnas  
 Número de Escalones.....4  
 Tipo de Plancha.....FierroSilicio de Grano Orientado  
 Espesor de Plancha.....0,30 mm  
 Densidad Máxima de Flujo Magnético..1,45 Wb/m<sup>2</sup>

Tipo de Bobina.....Capas  
 Aislamiento.....Papel Presspan  
 Arrollamiento Primario.....Alambre Esmaltado  
 Arrollamiento Secundario.....Platina de Cobre Forrada/Algodón  
 Densidad de Corriente.....2,5 Amperios / mm<sup>2</sup>

**2.1.-Diseño del Núcleo.-**

**2.1.1.-Cálculo de la Tensión por Espira ( E ).-**

Calcularemos la Tensión por Espira mediante la Fórmula que señalaremos a continuación.

$$E = 0,45 \sqrt{S_n} \quad \begin{matrix} \text{( Voltios / Espira )} \\ S_n \text{ ( KVA )} \end{matrix}$$

Por lo tanto :

$E = 3,18 \text{ Voltios / Espira}$
-------------------------------------

**2.1.2.-Cálculo de la Sección Transversal de la Columna del Núcleo ( A<sub>fe</sub> ).-**

Se conoce que la Sección Transversal de la Columna del Núcleo se puede Calcular por la Fórmula.

$$A_{fe} = \frac{E}{4,44 f B} \quad , \quad f \text{ ( Hz ) ; } B \text{ ( Wb / m}^2 \text{ )}$$

$$A_{fe} = \frac{3,18}{4,44 \times 60 \times 1.45} \text{ m}^2$$

$$A_{fe} = 0.0082375 \text{ m}^2$$

$A_{fe} = 8237.5 \text{ mm}^2$
--------------------------------

### 2.1.3.-Cálculo del Diámetro de la Columna ( $\phi$ ) .-

Se calculará el Diámetro de la Columna por la relación siguiente :

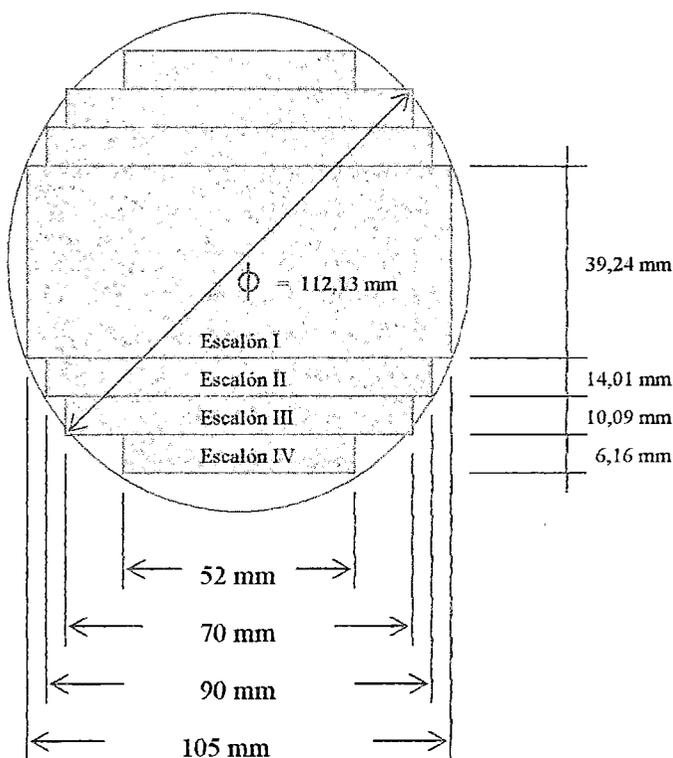
$$\phi = 42,17 \sqrt[4]{S_n} \quad (\text{mm})$$

Reemplazando el valor de ,  $S_n = 50 \text{ KVA}$  en la Fórmula anterior tendremos :

$$\phi = 112,13 \text{ mm}$$

### 2.1.4.-Cálculo de las Dimensiones de los Escalones.-

Por las condiciones de Diseño de la Sección Transversal de la Columna sabemos que el numero de Escalones es 4, por lo tanto :



#### Cálculo del Ancho de los Escalones

$$A = 19,40 \sqrt[4]{S_n} = 51,58 \text{ mm} = 52 \text{ mm}$$

$$B = 26,15 \sqrt[4]{S_n} = 69,53 \text{ mm} = 70 \text{ mm}$$

$$C = 33,74 \sqrt[4]{S_n} = 89,71 \text{ mm} = 90 \text{ mm}$$

$$D = 39,43 \sqrt[4]{S_n} = 104,85 \text{ mm} = 105 \text{ mm}$$

#### Cálculo de la Altura de los Escalones

$$e4 = 2,32 \sqrt[4]{S_n} = 6,16 \text{ mm}$$

$$e3 = 3,795 \sqrt[4]{S_n} = 10,09 \text{ mm}$$

$$e2 = 5,27 \sqrt[4]{S_n} = 14,01 \text{ mm}$$

$$e1 = 14,76 \sqrt[4]{S_n} = 39,24 \text{ mm}$$

### 2.1.5.-Cálculo del Número de Planchas por Escalón en la Columna.-

Para el Cálculo del Número de Planchas por cada Escalón , consideraremos un Factor de Apilamiento de 0,95 ; con lo cuál estaremos haciendo la corrección necesaria , cuando se proceda al Armado del Núcleo del transformador en referencia .

$$\# \text{ de Planchas por Escalón} = \frac{\text{Altura del Escalón} \times 0,95}{\text{Espesor de la Plancha}}$$

$$\# \text{ de Planchas en Escalón Nro. I} = 39,24 \times 0,95 / 0,3 = 124,26 \text{ PL.} = 124 \text{ PL}$$

$$\# \text{ de Planchas en Escalón Nro. II} = 14,01 \times 0,95 / 0,3 = 44,36 \text{ PL.} = 44 \text{ PL}$$

$$\# \text{ de Planchas en Escalón Nro. III} = 10,09 \times 0,95 / 0,3 = 31,95 \text{ PL.} = 32 \text{ PL}$$

$$\# \text{ de Planchas en Escalón Nro. IV} = 6,16 \times 0,95 / 0,3 = 19,50 \text{ PL.} = 19 \text{ PL}$$

La cantidad total de Planchas en los Escalones , se puede determinar como sigue :

PL. en Escalón I	= 124
PL. en Escalón II	= 2 x 44
PL. en Escalón III	= 2 x 32
PL. en Escalón IV	= 2 x 19

### **2.1.6.-Cálculo de la Sección Transversal de la Columna ( $A_{fe}$ )**

Calcularemos el valor de la Sección Transversal de la Columna , calculando el valor de la sección de cada Escalón , de la siguiente manera .

$$A_{fe} (\text{Escalón}) = (\text{Ancho de Escalón}) (\# \text{ PL.}) (\text{Espesor de Lámina})$$

Por lo tanto :

$$A_{fe} (\text{Escalón I}) = 105 \times 124 \times 0,30 = 3906 \text{ mm}^2$$

$$A_{fe} (\text{Escalón II}) = 90 \times 2 \times 44 \times 0,30 = 2376 \text{ mm}^2$$

$$A_{fe} (\text{Escalón III}) = 70 \times 2 \times 32 \times 0,30 = 1344 \text{ mm}^2$$

$$A_{fe} (\text{Escalón IV}) = 52 \times 2 \times 19 \times 0,30 = 592,8 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto , la Sección Transversal total de la Columna del Transformador resulta de la Sumatoria de las secciones parciales antes encontradas .

$*A_{fe} (\text{Columna}) = 8,218,8 \text{ mm}^2$
---

### **2.1.7.-Recálculo de la Densidad de Flujo Magnético**

La Sección Transversal de la Columna encontrada en el punto 2.6 corresponde a la Sección Real de Columna , respecto a la encontrada en el punto 2.2 , por lo tanto la Densidad de Flujo Magnético Real se calculará por :

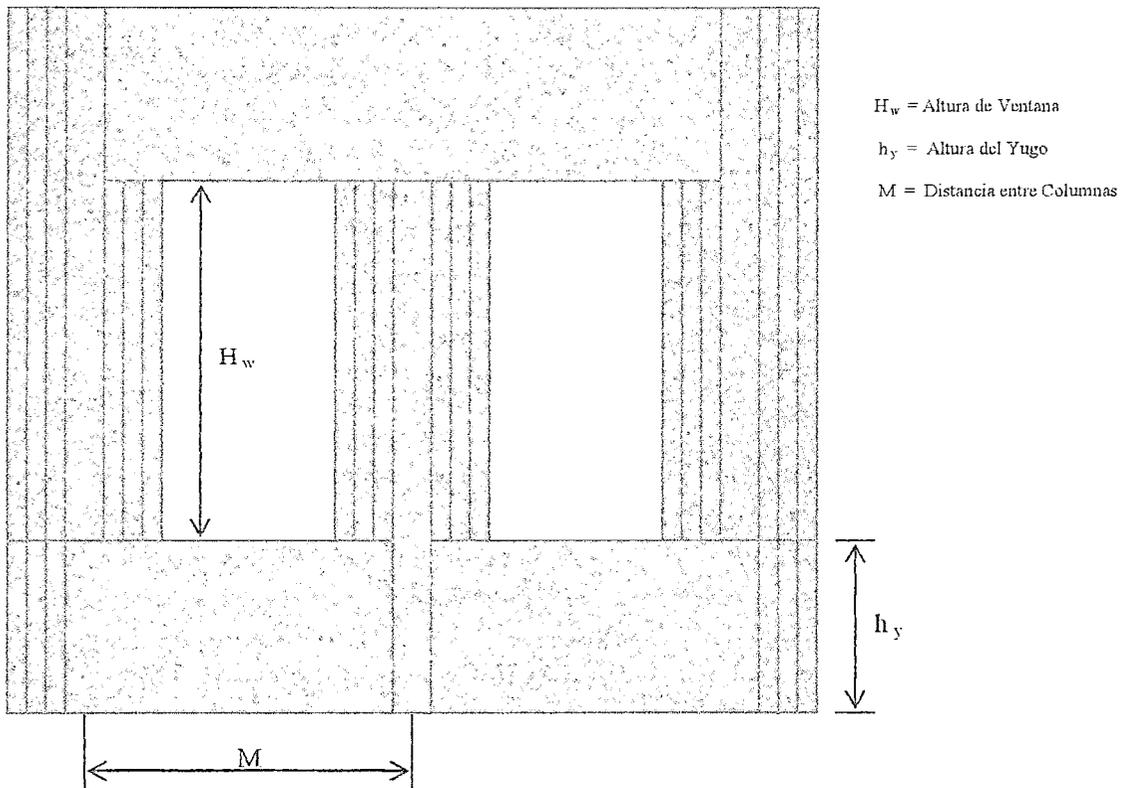
$$\text{Densidad de Flujo Magnético Real } (*B) = \text{Densidad de Flujo Magnético } (A_{fe} / *A_{fe})$$

$$*B = 1,45 ( 8,237,5 / 8,218,8 )$$

$*B = 1,453 \text{ Wb} / \text{mm}^2$
---------------------------------------

### 2.1.8.-Cálculo de la Altura de Ventana del Núcleo ( $H_w$ )

De acuerdo a los Datos de Diseño para el Transformador Trifásico , el núcleo recomendado es el de Tipo Columnas , el que ha sido dibujado a continuación En la figura adjunta están señalados las partes más importantes del mismo.



Las Fórmulas que nos permiten Calcular el valor de la altura de ventana antes señalada , se detalla a continuación .

$$H_w = 120 \sqrt[4]{S_n} \quad (\text{mm})$$

Reemplazando , el valor de la Potencia Nominal  $S_n = 50 \text{ KVA}$  , se tendrá :

$$H_w = 319 \text{ mm}$$

### 2.1.9.-Cálculo de la Altura del Yugo ( $h_y$ )

De la solución del Problema anterior , y del dibujo anterior tenemos que para el Cálculo de la Altura del Yugo , resultará :

$$h_y = 32,66 \sqrt[4]{S_n} \quad (\text{mm})$$

Reemplazando , el valor de la Potencia Nominal  $S_n = 50 \text{ KVA}$  , se tendrá :

$$h_y = 86,84 = 87 \text{ mm}$$

### 2.1.10.-Cálculo de la Distancia entre Columnas ( M )

La Distancia entre ejes ó entre los puntos medios de las Columnas del Núcleo del Transformador Trifásico , materia de esta Tesis ; se puede calcular con bastante aproximación mediante la siguiente Fórmula Experimental .

$$M = 8.651 \left[ 4.566 + 1 / K_v \right] \sqrt[4]{S_n} \quad (\text{mm})$$

El valor de “ K<sub>v</sub> “ establecido para 50 KVA es :

$$K_v = 0.246$$

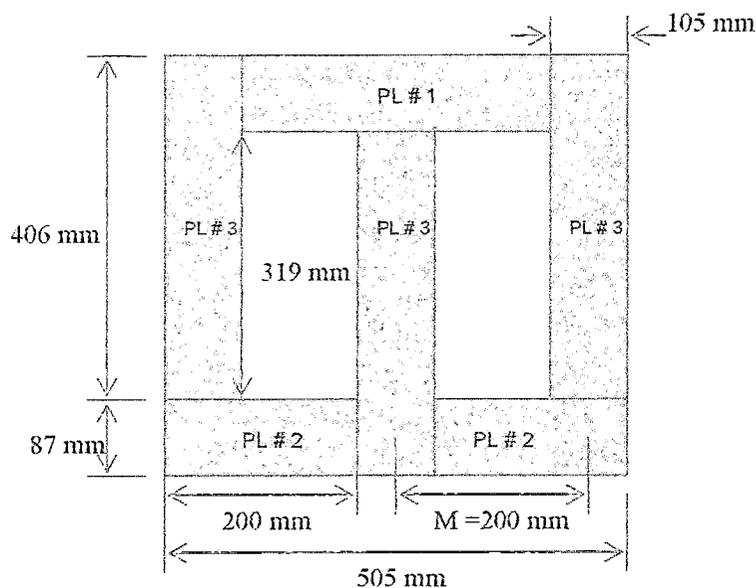
Por lo tanto , el valor de la Distancia entre ejes será :

$$M = 198.53 = 200 \text{ mm}$$

### 2.1.11.-Cálculo de las Dimensiones de las Planchas del Núcleo

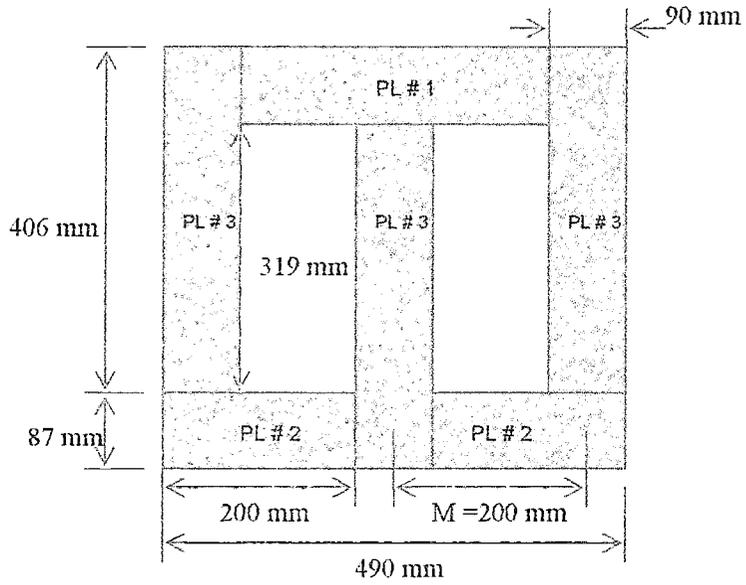
Habiéndose Calculado los valores principales de las Dimensiones del Núcleo Trifásico , podemos hacer en primera intención un primer dibujo del mismo pues las dimensiones definitivas se tendrán cuando se calculen las dimensiones finales de las bobinas del Transformador , puesto que estas deberán encajar perfectamente y con la holgura suficiente dentro de la Ventana del Núcleo .

Disposición de Planchas del Núcleo del Escalón I en armado al Solape



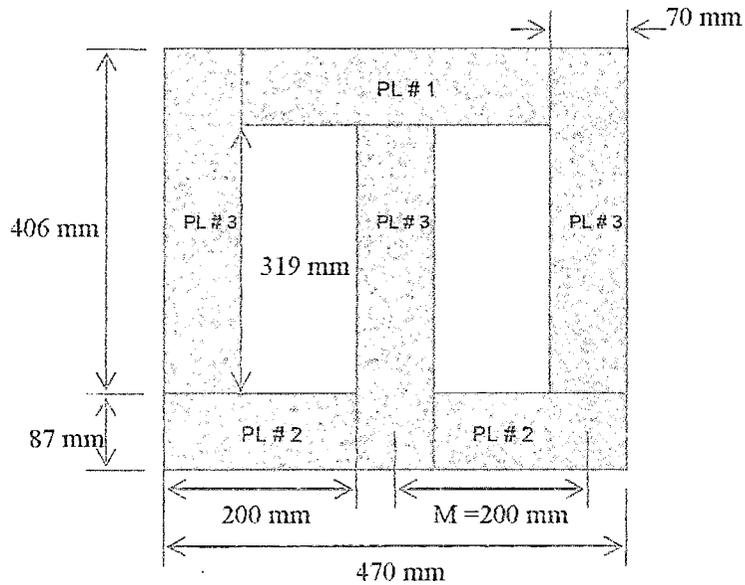
<u>Escalón I</u>	<u>Dimensiones</u>	<u># de Planchas</u>
PL # 1	87 x 295	124
PL # 2	87 x 200	248
PL # 3	105 x 453	372

Disposición de Planchas del Núcleo del Escalón II en armado al Solape



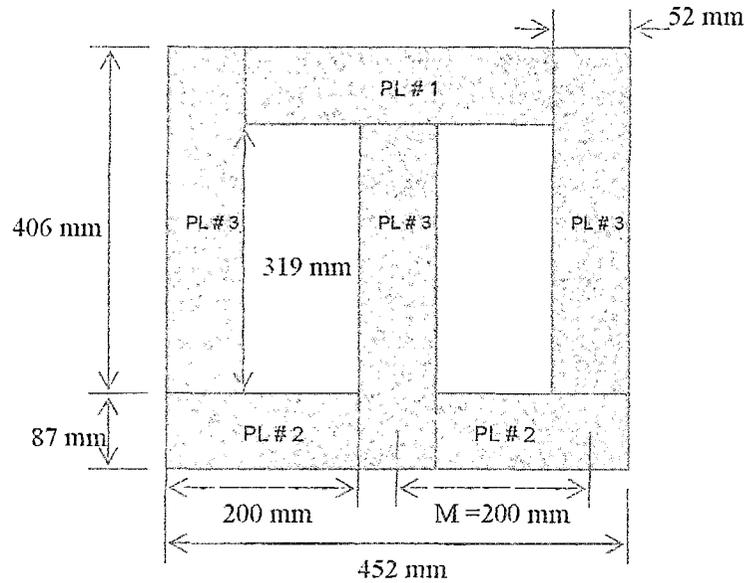
<u>Escalón II</u>	<u>Dimensiones</u>	<u># de Planchas</u>
PL # 1	87 x 310	88
PL # 2	87 x 200	176
PL # 3	90 x 453	264

Disposición de Planchas del Núcleo del Escalón III en armado al Solape



<u>Escalón III</u>	<u>Dimensiones</u>	<u># de Planchas</u>
PL # 1	87 x 330	176
PL # 2	87 x 200	352
PL # 3	70 x 453	528

**Disposición de Planchas del Núcleo del Escalón IV en armado al Solape**



<u>Escalón IV</u>	<u>Dimensiones</u>	<u># de Planchas</u>
PL # 1	87 x 348	38
PL # 2	87 x 200	76
PL # 3	52 x 453	114

Resumiendo , las Dimensiones de las Láminas del Núcleo del Transformador en la siguiente relación adjunta . tendremos :

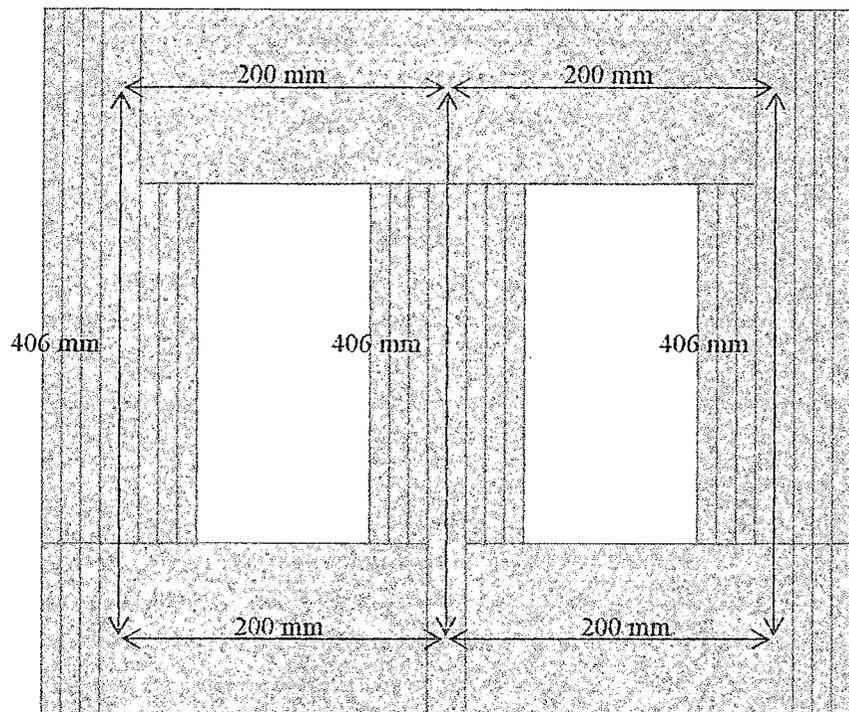
<u>Dimensiones ( mm)</u>	<u># de Planchas</u>
105 x 453	372
90 x 453	264
70 x 453	528
52 x 453	114
87 x 348	76
87 x 330	352
87 x 310	176
87 x 295	248
87 x 200	852

**2.1.12.-Cálculo de la Longitud del Circuito Magnético (  $L_{fe}$  ) del Núcleo.-**

La Longitud del Núcleo , se obtiene de las Dimensiones finales obtenidas para el Núcleo en cuestión y de acuerdo con la Figura adjunta :

$$L_{fe} = 3 ( H_w + h_y ) + 4 M$$

En donde :  $H_w$ (Altura de Ventana),  $h_y$ (Altura de Yugo),  $M$  (Distancia entre ejes)



Aplicando la Fórmula para el Cálculo de la Longitud del Circuito Magnético se tiene :

$$L_{fe} = 3 \times 406 + 4 \times 200$$

$$L_{fe} = 2,018 \text{ mm}$$

$$L_{fe} = 79.44 \text{ pulg.}$$

### 2.1.13.-Cálculo de Pérdidas de Potencia Reactiva ( $Q_{fe}$ ).-

Sabemos que las pérdidas de Potencia Reactiva (  $Q_{fe}$  ) del Núcleo del Transformador en cuestión , se calculan por la Fórmula siguiente :

$$Q_{fe} = \pi f \frac{B^2 P_{fe}}{\mu_0 \mu_r} 10^{-3} \text{ ( VAR )}$$

En donde :

- $Q_{fe}$  = Potencia Reactiva consumida por el Núcleo ( VAR )
- $f$  = Frecuencia de la Red de Alimentación ( Hz )
- $B$  = Densidad de Flujo Magnético ( T )

- $P_{fe}$  = Peso del Núcleo del Transformador ( Kgs. )
- $\mu_0$  = Permeabilidad Absoluta en Unidades M.K.S.
- $\mu$  = Permeabilidad Relativa
- $\gamma$  = Peso específico de la Lámina utilizada ( Kg / dm<sup>3</sup> )

Para nuestro caso , tenemos lo siguiente :

- $Q_{fe} = ?$  ( VAR )
- $f = 60$  Hz
- $B = 1.453$  T
- $P_{fe} = 197.86$  Kgs.
- $\mu_0$  = Permeabilidad Absoluta en Unidades M.K.S.
- $\mu$  = Permeabilidad Relativa
- $\gamma = 7.65$  Kg / dm<sup>3</sup>

Además encontramos por las Curvas de Magnetización del Fabricante que :  
 $B = 1.453$  T ;  $H = 200$  Av/m , por lo tanto :

$$\mu_0 \mu = \frac{1.453 \text{ T}}{200 \text{ Av / m}} = 7.26 \times 10^{-3}$$

$$Q_{fe} = \pi (60) \frac{1.453^2 (197.86)}{7.26 \times 10^{-3} \times 7.65} 10^{-3} \text{ ( VAR )}$$

$$Q_{fe} = 1,417 \text{ ( VAR )}$$

#### **2.1.14.-Cálculo del Peso del Núcleo.-**

El Peso del Núcleo del Transformador Trifásico , es igual al Peso de todas las Láminas Calculadas en el punto 2.1.11 , se conoce que el Peso específico de las Láminas de Fierro Silicio es de 7.65 gm / cm<sup>3</sup> , y se procederá de acuerdo a lo siguiente :

$$\text{Peso del Núcleo} = (\text{Dimensiones}) (\# \text{ de Planchas}) (\text{Espesor de Lámina}) (7.65 \times 10^{-6}) \text{ Kgs}$$

Aplicando la Fórmula anterior , y considerando el espesor de la Lamina señalado en los Datos de Diseño ( e = 0.30 mm ) tendremos el siguiente Cuadro :

<u>Dimensiones ( mm)</u>	<u># de Planchas</u>	<u>Peso ( Kgs )</u>
105 x 453	372	40,60
90 x 453	264	24,70
70 x 453	528	38,42
52 x 453	114	6,16
87 x 348	76	5,28

87 x 330	352	23,19
87 x 310	176	10,89
87 x 295	248	14,60
87 x 200	852	34,02
		197,86 Kgs.

Peso Total del Núcleo = 197.86 Kgs

**2.1.15.-Cálculo de las Pérdidas en el Núcleo.-**

Las Pérdidas en el Núcleo del Transformador pueden calcularse , conociendo las pérdidas específicas ( watts / Kgs. ) que nos señalan los fabricantes de las mismas , para nuestro caso podemos establecer de acuerdo con las Curvas de Magnetización promedio de los Fabricantes que :

$$\text{Watts / Kgs} = 1.66$$

Por lo tanto ,las Pérdidas de Energía Activa(  $P_{fe}$  ) en el presente Núcleo serán:

$$P_{fe} = ( \text{Peso Total del Núcleo} ) ( \text{Watts / Kgs} )$$

Reemplazando , los valores encontrados en la Fórmula anterior tenemos :

$$P_{fe} = ( 197.86 \text{ Kgs} ) ( 1.66 \text{ Watts / Kgs} )$$

$$P_{fe} = 328,44 \text{ Watts}$$

La Pérdida anterior corresponde a aquellas que se generarán en material virgen ; cuando el fierro silicio es sometido a los cortes correspondientes calculados en el diseño general del Núcleo , este se verá afectado por un factor llamado Factor de Fábrica que como valor promedio es de 1,8 ; por lo tanto las Pérdidas en el Núcleo se incrementarán a :

$$P_{fe} = 1,8 \times 328,44 \text{ Watts}$$

$$P_{fe} = 591.2 \text{ Watts}$$

**2.1.16.-Cálculo de la Potencia Aparente en Vacío (  $S_o$  )**

La Potencia Aparente en Vacío , nos permitirá calcular los valores de Corriente de Vacío o de Excitación (  $I_o$  ) y el ángulo de Conducción de esta Corriente (  $\phi_o$  )

La Potencia Aparente en Vacío será calculada por la Fórmula siguiente :

$$S_o = \sqrt{P_{fe}^2 + Q_j^2}$$

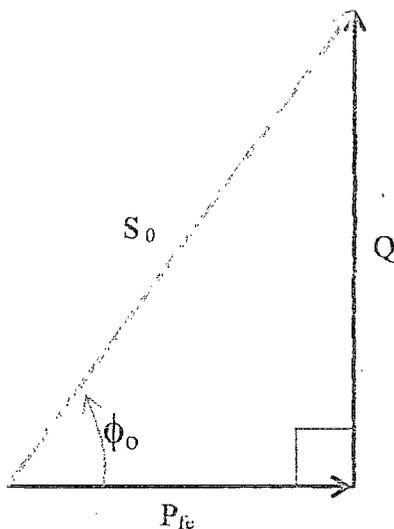
Reemplazando los Valores encontrados para  $P_{fe}$  y  $Q_j$

$$S_o = \sqrt{591.2^2 + 932.91^2}$$

$$S_o = 1,104.46 \text{ VA}$$

### 2.1.17.-Cálculo del Angulo de Conducción de la Corriente de Vacío ( $\phi_o$ )

De acuerdo al Triángulo de Potencias que a continuación mostraremos podemos señalar que :



$$\cos \phi_o = \frac{P_{fe}}{S_o}$$

$$\phi_o = \arccos \frac{P_{fe}}{S_o}$$

$$\phi_o = \arccos \frac{591.2}{1,104.46}$$

Por lo tanto :

$$\phi_o = 57.63^\circ$$

### 2.1.18.-Cálculo de la Corriente de Vacío o de Excitación ( I<sub>o</sub> )

El Valor de la Corriente de Excitación se puede calcular por la relación establecida para los Sistemas Trifásicos entre la Potencia , Tensión y Corriente tal como se muestra a continuación :

$$S_o = \sqrt{3} \text{ V } I_o$$

Por lo Tanto :

$$I_o = \frac{S_o}{\sqrt{3} \text{ V}}$$

Reemplazando los valores encontrados en la Fórmula anterior :

$$I_o = \frac{1,104.46 \text{ VA}}{\sqrt{3} (10,000\text{V})}$$

$$I_o = 0,0637 \text{ Amperios}$$

De donde las Componentes activa ( I<sub>p</sub> ) y reactiva ( I<sub>m</sub> ) de la Corriente de Magnetización se Calcularán por :

$$I_p = I_o \text{ Cos } \phi_o$$

$$I_m = I_o \text{ Sen } \phi_o$$

Por lo Tanto :

$$I_p = 0,0637 \text{ Cos } 57.63^\circ$$

$$I_m = 0,0637 \text{ Sen } 57.63^\circ$$

Entonces :

$$I_p = 0,0341 \text{ Amperios}$$

$$I_m = 0,0538 \text{ Amperios}$$

### **2.1.19.-Calculo del Costo de Fabricación del Núcleo ( C )**

El Precio de la Fabricación del Núcleo de Fierro Silicio del Transformador Trifásico de Distribución de Energía Eléctrica , puede Calcularse por la Siguiete expresión Matemática :

$$C = ( PR_{fe} ) ( W_{fe} ) + ( T ) ( MO )$$

En donde :

C = Precio Final del Núcleo (\$)

$PR_{fe}$  = Precio del Fierro Silicio puesto en Fábrica (\$ / Kgs.)

$W_{fe}$  = Peso Total del Núcleo ( Kgs. )

T = Tiempo de fabricación del Núcleo (Hora-Hombre)

MO = Costo de la Mano de Obra ( \$ / Hora – Hombre )

Por lo tanto para el Núcleo de nuestro Transformador de 50 KVA , se tiene lo siguiente :

$$PR_{fe} = 2,60 \text{ \$ / Kgs.}$$

$$W_{fe} = 197,86 \text{ Kgs}$$

$$T = 14 \text{ H - H}$$

$$MO = 0,78 \text{ \$ / H - H}$$

Entonces :

$$C = 2,60 \times 197,86 + 14 \times 0,78 \text{ ( \$ )}$$

$C = \$ 525.35 \text{ U.S. Dólares}$
--------------------------------------

### **2.1.20.-Resumen del Diseño del Núcleo.-**

Finalmente , el Núcleo del Transformador tiene las siguientes características *constructivas y operativas* :

<b><u>Dimensiones</u></b>
Peso Total : 197.86 Kgs.
Altura Total : 493,00 mm
Largo Total : 505,00 mm
Ancho Total : 99,76 mm
Costo Total : \$525.35 U.S. Dólares

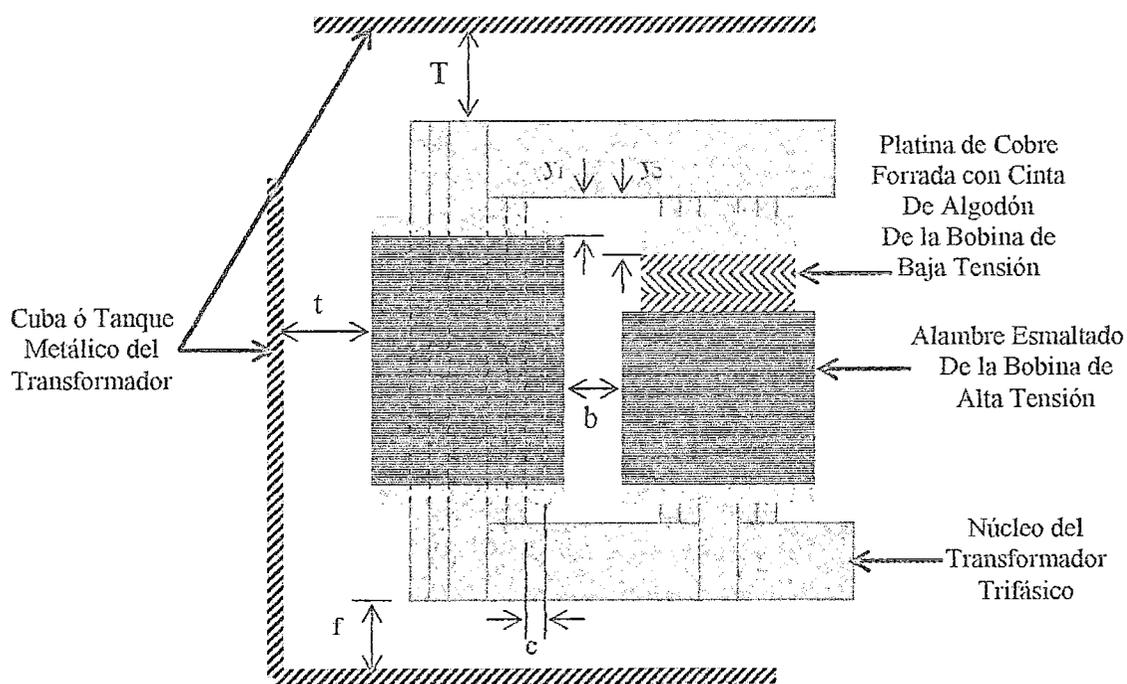
### Capítulo III

#### 3.-Diseño de las Bobinas , Devanados ó Arrollamientos

El tipo de Bobina que Construiremos , según los Datos de Diseño ; será la de Tipo TUBULAR, la misma que consiste en procesar alternativamente , Capas de Alambre Esmaltado y Folios de Papel Presspan , de Dimensiones en ambos casos que van a ser determinados por el proceso de Cálculo de las Bobinas .

#### Dimensiones Mínimas Recomendadas para la Fabricación de las Bobinas

Para la Fabricación de Transformadores de Distribución de Energía Eléctrica Sumergidos en Aceite de hasta 10,000 Voltios de Tensión de Servicio , se han determinado algunos valores mínimos de Distancias internas , sobre la Base de la Experiencia ; y por la innumerable cantidad de Ensayos de Laboratorio a los que se han sometido los Transformadores . A continuación algunas de las Distancias mínimas que se utilizan en la Fabricación de estos Equipos .



En donde , los valores de las variables de la figura anterior deben considerarse de la siguiente manera :

$b = 10 \text{ mm}$
$c = 3 \text{ a } 10 \text{ mm}$
$f = 50 \text{ mm}$
$t = 50 \text{ a } 60 \text{ mm}$
$T = 250 \text{ a } 400 \text{ mm}$
$y_1 = 30 \text{ a } 40 \text{ mm}$
$y_2 = 20 \text{ a } 35 \text{ mm}$

### **3.1.-Devanado ó Bobina de Baja Tensión**

#### **3.1.1.-Cálculo del Número de Espiras**

Conociendo el valor de la Tensión por Espira , podemos calcular el valor del Número de Espiras por Bobina , de la siguiente manera :

$$N_{E/B} = \frac{E_{BT}}{E_E}$$

En donde :

$$\begin{aligned} N_{E/B} &= \text{Número de Espiras por Bobina ( Espiras )} \\ E_{BT} &= \text{Tensión de Bobina ( Voltios )} \\ E_E &= \text{Tensión por Espira ( Voltios / Espira )} \end{aligned}$$

Para nuestro caso se tiene , una Conexión Triángulo para el lado de Baja Tensión por lo tanto :

$$E_{BT} = 230 \text{ V}$$

En consecuencia :

$$N_{E/B} = \frac{230 \text{ V}}{3.18 \text{ V / Esp.}}$$

$$N_{E/B} = 73,32 \text{ Espiras}$$

$$N_{E/B} = 73 \text{ Espiras}$$

#### **3.1.2.-Cálculo de la Corriente por el Conductor.-**

Se calculará por la siguiente Fórmula :

$$I_{BT} = \frac{S_n}{3KV} \text{ ( Conexión Triángulo )}$$

$$I_{BT} = \frac{50 \text{ KVA}}{3 \times 0,23 \text{ KV}}$$

$$I_{BT} = 72,46 \text{ Amperios}$$

### 3.1.3.-Cálculo de la Sección Transversal del Conductor ( $a_{cu/BT}$ ) .-

Por los Datos de Diseño señalados con anterioridad , sabemos que el valor de la Densidad de Corriente (  $J_{BT}$  ) para este caso será :

$$J_{BT} = 2,5 \text{ Amp / mm}^2$$

Por lo tanto :

$$a_{cu/BT} = \frac{I_{BT}}{J_{BT}}$$

$$a_{cu/BT} = \frac{72,46 \text{ Amp}}{2,5 \text{ Amp / mm}^2}$$

$$a_{cu/BT} = 28,98 \text{ mm}^2$$

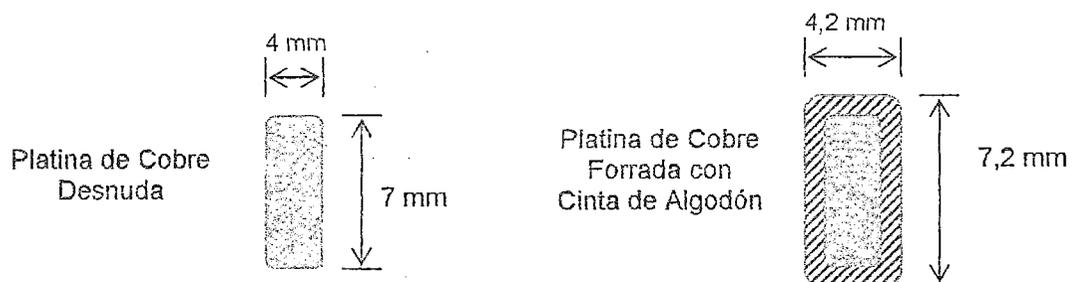
Debido a que no existe en nuestro medio , conductores de Sección Rectangular Normalizados ni Tabulados por fabricante alguno , procederemos a dimensionar nosotros este conductor ,

$$a_{cu/BT} = 4 \times 7 \text{ mm}^2$$

Con este valor seleccionado de Sección de Conductor , el valor de la Densidad de Corriente se ha modificado a :

$$*J_{BT} = 2,5 ( 28,98 / 28 ) = 2,58 \text{ Amp / mm}^2$$

El Conductor de Cobre Calculado para la Fabricación de la Bobina de Baja Tensión , tendrá que ser Forrado con material Aislante , para nuestro caso utilizaremos Cinta de Algodón ; quedando las Dimensiones finales de la sección Transversal de este , tal como se muestra a continuación



### 3.1.4.-Cálculo de la Altura de la Bobina ( $H_{BT}$ ).-

Por las recomendaciones dadas en las Dimensiones Mínimas para la Fabricación de Bobinas tenemos que para la Baja Tensión ,

$$H_{BT} = H_w - 2 y_2$$

En donde :

$H_{BT}$  = Altura Neta de Bobina

$$H_w = \text{Altura de Ventana del Núcleo} = 120 \sqrt[4]{S_n}$$

$y_2$  = Distancia de Aislamiento de BT = 25 mm

$$H_{BT} = 120 \sqrt[4]{S_n} - 2 \times 25$$

Reemplazando el valor de ,  $S_n = 50 \text{ KVA}$  , tendremos :

$$H_{BT} = 120 \sqrt[4]{50} - 2 \times 25$$

$$H_{BT} = 269 \text{ mm}$$

### 3.1.5.-Cálculo del Número de Espiras por Capa ( $N_{E/C}$ ).-

Calcularemos , el Número de Espiras por Capa en la Bobina de Baja Tensión por la relación entre la Altura de Neta de la Bobina de Baja Tensión (  $H_{BT}$  ) y la Altura de la Platina de Cobre (  $H_{PL}$  ) calculada :

$$N_{E/C} = \frac{H_{BT}}{H_{PL}}$$

Reemplazando los valores encontrados para las variables antes mencionadas tendremos :

$$N_{E/C} = \frac{269 \text{ mm}}{7,2 \text{ mm}}$$

$$N_{E/C} = 37,36 \text{ ( Esto es el valor Máximo de Espiras en una Capa )}$$

Debido a que el Número Total de Espiras es de 73 , utilizaremos el valor de :

$$N_{E/C} = 36$$

### 3.1.6.-Cálculo del Número de Capas por Bobina ( $N_{C/B}$ ).-

El Número de Capas por Bobina , se calculará por la relación entre el Número Total de Espiras por Bobina (  $N_{E/B}$  ) y el Número Total de Espiras por Capa (  $N_{E/C}$  ) según se puede apreciar lo siguiente :

$$N_{C/B} = \frac{N_{E/B}}{N_{E/C}}$$

Reemplazando los valores encontrados ; en la Fórmula anterior tendremos :

$$N_{C/B} = \frac{73}{36}$$

$$N_{C/B} = 2 \text{ capas } / ( 1 \times 36 + 1 \times 37 )$$

### 3.1.7.-Cálculo del Aislamiento entre Capas ( $\delta_{BT}$ ).-

El aislamiento que consideraremos a utilizarse entre las Capas de la Bobina , deberá soportar el doble de la tensión por capa , para ser sometido a los Ensayos de Tensión Inducida por lo tanto :

$$\delta_{BT} = \frac{2 V_c}{k_{pp}}$$

En donde :

$$V_c = \text{Tensión de Capa} = ( N_{E/C} ) ( E )$$

$$k_{pp} = \text{Rigidez Dieléctrica del Papel Presspan Embebido en Aceite} = 7.5 \text{ KV} / \text{mm}$$

$$\delta_{BT} = \frac{2 ( N_{E/C} ) ( E )}{k_{pp}}$$

Reemplazando los valores conocidos , en la Fórmula anterior tendremos :

$$\delta_{BT} = \frac{2 ( 37 \text{ Esp. } ) ( 3,18 \text{ V} / \text{Esp. } ) 10^{-3}}{7,5 \text{ KV} / \text{mm}}$$

$$\delta_{BT} = 0,03138 \text{ mm}$$

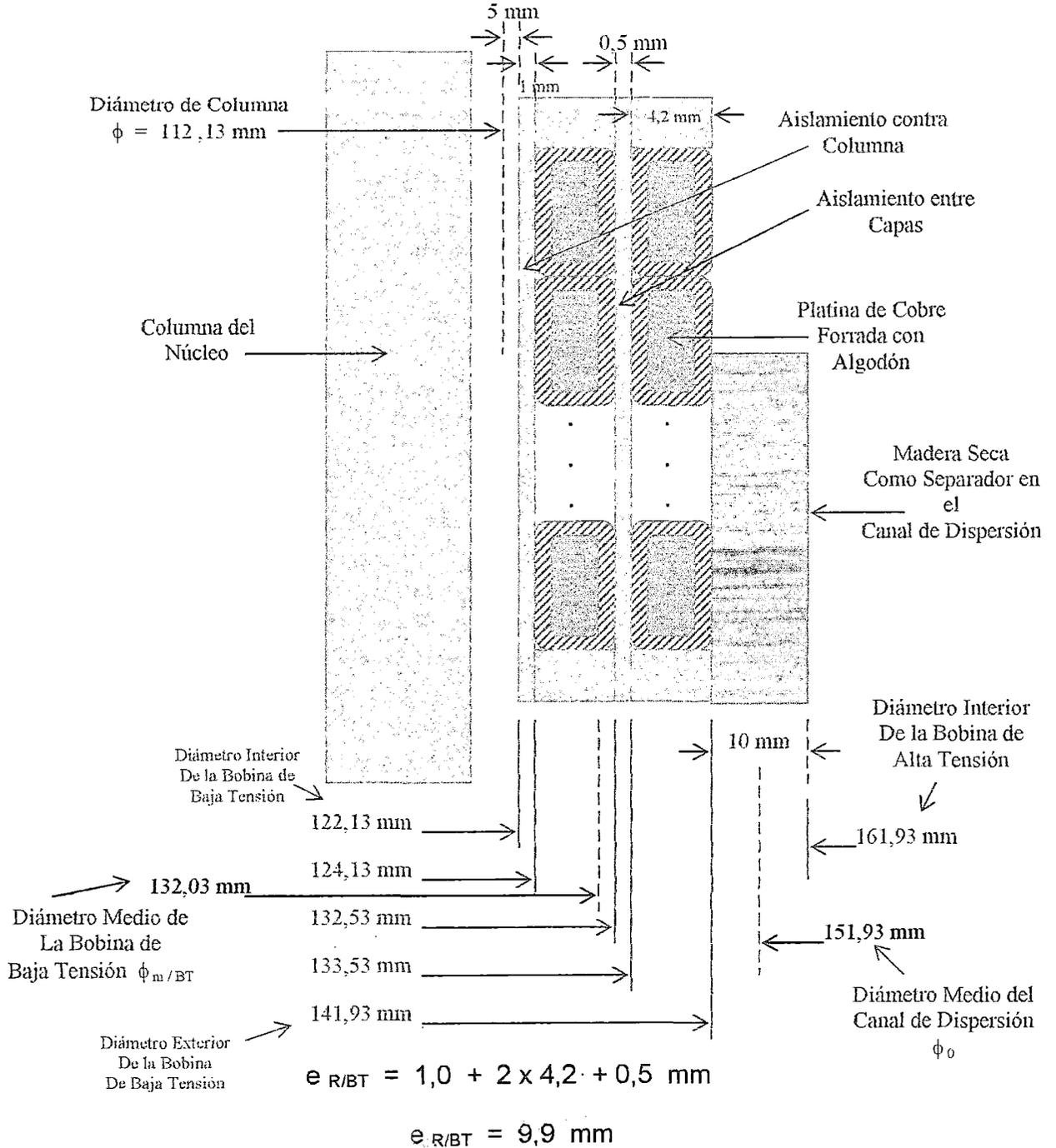
Utilizando un Factor de Seguridad igual a " 8 " , tendremos :

$$\delta_{BT} = 8 \times 0,03138 \text{ mm}$$

$$\delta_{BT} = 0,25 \text{ mm}$$

**3.1.8.-Cálculo del Espesor Radial de la Bobina (  $e_{R/BT}$  ).-**

El Espesor Radial (  $e_{R/BT}$  ) de la Bobina de Baja Tensión , lo vamos a determinar a partir de la observación de la siguiente figura :



Debido , a el proceso de Bobinado , el ajuste de la Platina de Cobre forrada con Cinta de Algodón contra el molde de Madera , nos arroja un Factor de Apilamiento , que en muchos casos puede considerarse 0,95 ; por lo tanto el espesor Radial de la Bobina de Baja Tensión final será :

$$e_{R/BT} = \frac{9,9 \text{ mm}}{0,95}$$

$$e_{R/BT} = 10,42 \text{ mm}$$

### 3.1.9.-Cálculo de la Reactancia de Dispersión de la Bobina ( $X_{L/BT}$ ).-

El valor de la Reactancia de Dispersión de la Bobina depende de , la frecuencia de la Red (  $f$  ) y de la Inductancia (  $L_{BT}$  ) de la misma y están relacionadas de la siguiente manera :

$$X_{L/BT} = 2 \pi f L_{BT}$$

En donde además se tiene que :

$$L_{BT} = \frac{\pi \mu_0}{H_w} N_{BT}^2 \left[ \frac{e_{R/BT}}{3} \phi_{m/BT} + \frac{e_0}{2} \phi_0 \right] \quad (\text{Henrios})$$

En donde :

$L_{BT}$  = Inductancia de la Bobina de Baja Tensión ( Henrios )

$\mu_0$  = Permitividad del Vacío =  $4 \pi \times 10^{-7}$

$H_w$  = Altura de la Ventana del Núcleo ( m )

$N_{BT}$  = Número de Espiras de Baja Tensión ( Espiras )

$e_{R/BT}$  = Espesor Radial de la Bobina de Baja Tensión ( m )

$\phi_{m/BT}$  = Diámetro Medio de la Bobina de Baja Tensión ( m )

$e_0$  = Espesor Radial del Canal de Dispersión ( m )

$\phi_0$  = Diámetro Medio del Canal de Dispersión ( m )

Reemplazando los valores encontrados , en la Fórmula anterior tendremos :

$$\begin{aligned}
L_{BT} &= ? \text{ (Henrios)} \\
\mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} \\
H_w &= 0,319 \text{ (m)} \\
N_{BT} &= 73 \text{ (Espiras)} \\
e_{R/BT} &= 0,01042 \text{ (m)} \\
\phi_{m/BT} &= 0,13203 \text{ (m)} \\
e_0 &= 0,010 \text{ (m)} \\
\phi_0 &= 0,15193 \text{ (m)}
\end{aligned}$$

Para la Inductancia de la Bobina tenemos :

$$L_{BT} = \frac{\pi (4\pi \times 10^{-7})}{0,319} 73^2 \left[ \frac{0,01042}{3} \times 0,13203 + \frac{0,010}{2} \times 0,15193 \right] \text{ (Henrios)}$$

$$L_{BT} = 0.8026 \times 10^{-4} \text{ (Henrios)}$$

Por lo tanto , la Reactancia de Dispersión de la Bobina de Baja Tensión tiene el siguiente valor :

$$X_{L/BT} = 2\pi (60) (0.8026 \times 10^{-4}) \Omega$$

$$X_{L/BT} = 0,03024 \Omega$$

### 3.1.10.-Cálculo de la Resistencia de la Bobina a la Corriente Continua .-

La Resistencia de la Bobina de Baja Tensión a la Corriente Continua esta calculada por la Fórmula siguiente :

$${}_{BT}R_{20}^0 C = \rho_{20}^0 C \frac{\pi (\phi_{m/BT}) (N_{E/B})}{a_{cu/BT}} \text{ (}\Omega\text{)}$$

La Bobina , incrementará su Resistencia Eléctrica cuando aumente la Temperatura de la misma por efecto de la carga aplicada al Transformador , en este caso tendremos :

$${}_{BT}R_{75}^0 C = {}_{BT}R_{20}^0 C \left[ \frac{234.5 + 75^0}{234.5 + 20^0} \right] \text{ (}\Omega\text{)}$$

Por lo tanto , la Resistencia a  $75^{\circ}$  se puede calcular por la siguiente expresión

$${}_{BT}R_{75}^{\circ} C = {}_{BT}R_{20}^{\circ} C ( 1.216 ) (\Omega)$$

En la Fórmula las distintas variables tienen el siguiente significado y valores :

$${}_{BT}R_{20}^{\circ} C = \text{Resistencia de la Bobina a } 20^{\circ} = !$$

$$\rho_{20}^{\circ} C = \text{Resistividad del Material del Conductor} = 1 / 58$$

$$\phi_{m/BT} = \text{Diámetro Medio de la Bobina} = 0,13203 \text{ ( m )}$$

$$N_{E/B} = \text{Número Total de Espiras de la Bobina} = 73$$

$$a_{cu/BT} = \text{Sección Transversal del Conductor} = 28 \text{ mm}^2 = 4 \times 7 \text{ mm}^2$$

Reemplazando estos Valores , tendremos :

$${}_{BT}R_{20}^{\circ} C = \frac{1}{58} \frac{\pi (0,13203) (73)}{28} (\Omega)$$

$${}_{BT}R_{20}^{\circ} C = 18,63 \times 10^{-3} (\Omega)$$

La Resistencia Eléctrica a  $75^{\circ}$  , será :

$${}_{BT}R_{75}^{\circ} C = 18,63 \times 10^{-3} ( 1.216 ) (\Omega)$$

$${}_{BT}R_{75}^{\circ} C = 0,02265 (\Omega)$$

### **3.1.11.-Cálculo del Volumen del Cobre de la Bobina .-**

El Volumen del Cobre utilizado en la Construcción de la Bobina , se calculará por la siguiente relación :

$$V_{cu/BT} = \pi (\phi_{m/BT}) (N_{E/B}) (a_{cu/BT}) \text{ m}^3$$

Por lo tanto :

$$V_{cu/BT} = \pi ( 0,13203 ) ( 73 ) ( 28 ) \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V_{cu/BT} = 0.0008473 \text{ m}^3$$

### **3.1.12.-Cálculo del Peso del Cobre por Bobina .-**

El peso del Conductor de Cobre utilizado para la Construcción de la Bobina de nuestro Transformador , será calculado por :

$$P_{cu/BT} = ( V_{cu/BT} ) ( \gamma_{cu} )$$

Donde el valor del Peso específico del Cobre es :  $\gamma_{cu} = 8,900 \text{ Kgs/m}^3$

$$P_{cu/BT} = 0.0008473 \times 8,900 \quad (\text{Kgs.})$$

$$P_{cu/BT} = 7,54 \quad (\text{Kgs.})$$

### **3.1.13.-Cálculo de las Pérdidas en la Bobina de Baja Tensión .-**

Debido al paso de la Corriente de Carga en las Bobinas del Transformador de Distribución de Energía Eléctrica objeto de este Estudio por Efecto Joule se originan Pérdidas de Potencia Activa las que pueden calcularse de la siguiente manera:

$$W_{cu/BT} = 2,4 ( P_{cu/BT} ) ( *J_{BT} )^2 \quad (\text{watts})$$

Por lo tanto , reemplazando los valores de  $P_{cu/BT}$  y  $*J_{BT}$  , en la Fórmula anterior

$$W_{cu/BT} = 2,4 ( 7,54 ) ( 2,58 )^2 \quad (\text{watts})$$

$$W_{cu/BT} = 120.45 \quad (\text{watts})$$

Las tres Bobinas de Baja Tensión , nos proporcionan unas Pérdidas de :

$$W_{cu/BT} = 3 \times 120.45 \quad (\text{watts})$$

$$W_{cu/BT} = 361.35 \quad (\text{watts})$$

### **3.1.14.-Cálculo del Costo $C_{T/cu/BT}$ del Cobre de la Bobina de Baja Tensión .-**

La Cantidad Total de Platina de Cobre de  $28 \text{ mm}^2$  de Sección Transversal para la Construcción de la Bobina de Baja Tensión ;es justamente calculado por

$$P_{T/cu/BT} = 3 P_{cu/BT}$$

$$P_{T/cu/BT} = 22,62 \text{ Kgs}$$

Y conociendo que , el Precio por kilogramo de Platina de Cobre es de \$6.00 entonces :

$$C_{T/cu/BT} = 22,62 \times 6 \text{ U.S.Dólares}$$

$$C_{T/cu/BT} = \$135,72 \text{ U.S.Dólares}$$

### **3.2.-Devanado ó Bobina de Alta Tensión**

#### **3.2.1.- Cálculo del Número de Espiras .-**

Conociendo el valor de la Tensión por Espira , podemos calcular el valor del Número de Espiras por Bobina , de la siguiente manera :

$$n_{E/B} = \frac{E_{AT}}{E_E}$$

En donde :

$$\begin{aligned} n_{E/B} &= \text{Número de Espiras por Bobina ( Espiras )} \\ E_{AT} &= \text{Tensión de Bobina ( Voltios )} \\ E_E &= \text{Tensión por Espira ( Voltios / Espira )} \end{aligned}$$

Para nuestro caso se tiene , una Conexión Estrella para el lado de Alta Tensión por lo tanto :

$$E_{AT} = 10,000 \text{ V}$$

Además la Regulación de la Tensión en la Bobina de Alta Tensión , que se da como parte de las Características Técnicas del Equipo es del orden de  $10,000 \text{ V} \pm 2,5\% \pm 5\%$  lo que significa que las Tensiones se encontrarán en los siguientes rangos

$$10,500 \text{ V}$$

$$10,250 \text{ V}$$

$$10,000 \text{ V}$$

$$9,750 \text{ V}$$

$$9,500 \text{ V}$$

Por lo tanto , el Número de Espiras y sus respectivas derivaciones se calculan de la siguiente manera :

$$n_{E/B} (-5\%) = 73 \times \frac{9,500}{1,73 \times 230} = 1,742.90 \text{ — } 1,743$$

$$n_{E/B} (-2,5\%) = 73 \times \frac{9,750}{1,73 \times 230} = 1,788.76 \text{ — } 1,789$$

$$n_{E/B} (0\%) = 73 \times \frac{10,000}{1,73 \times 230} = 1,834.63 \text{ — } 1,835$$

$$n_{E/B} (2,5\%) = 73 \times \frac{10,250}{1,73 \times 230} = 1,878.32 \text{ — } 1,881$$

$$n_{E/B} (5\%) = 73 \times \frac{10,500}{1,73 \times 230} = 1,926.36 \text{ — } 1,927$$

La Relación de Tensiones ( $r_T$ ) y la Relación de Espiras ( $r_E$ ), deben de tener un margen de error porcentual ( $e\%$ ) menor que 0.1, para que se considere que la Tensión de Servicio del Transformador esta dentro de los márgenes exigidos por la Norma de Fabricación; por lo tanto:

$$e\% = \frac{r_E - r_T}{r_E} \times 100 < 0,1$$

Aplicando este principio, vamos a proceder a corregir el Número de Espiras en la Bobina de Alta Tensión, de la siguiente manera:

<u>Posición</u>	<u>Tensión Primaria</u>	<u>Tensión Secundaria</u>	<u>Relación de Tensión (<math>r_T</math>)</u>
01	10,500	230	26.3580
02	10,250	230	25.7304
03	10,000	230	25.1029
04	9,750	230	24.4753
05	9,500	230	23.8477
	<u>Espiras /Primario</u>	<u>Espiras /Secundario</u>	<u>Relación de Espiras (<math>r_E</math>)</u>
01	1,927	73	26.3972
02	1,881	73	25.7671
03	1,835	73	25.1369
04	1,789	73	24,5068
05	1,743	73	23.8767

Por lo tanto , el cálculo del error porcentual (e %) será :

	<u>Relación de Espiras</u>	<u>Relación de Tensión</u>	<u>Error Porcentual (e %)</u>
01	26.3972	26.3580	0.1485
02	25.7304	25.7671	-0.1426
03	25.1029	25.1369	-0.1354
04	24.4753	24.5068	-0.1287
05	23.8477	23.8767	-0.1216

Los valores de e % , son mayores que 0.1% ; por lo tanto habrá que hacer correcciones al Número de Espiras que hemos calculado . En ese sentido vamos a fijar el valor del error porcentual en 0.05% por lo que de la expresión dada para el cálculo del error porcentual tendremos :

$$e \% = \frac{r_E - r_T}{r_E} \times 100 < 0,1$$

$$r_E = \frac{100}{100 - e \%} r_T$$

Por lo tanto :

$$r_E = (1.00050025) r_T$$

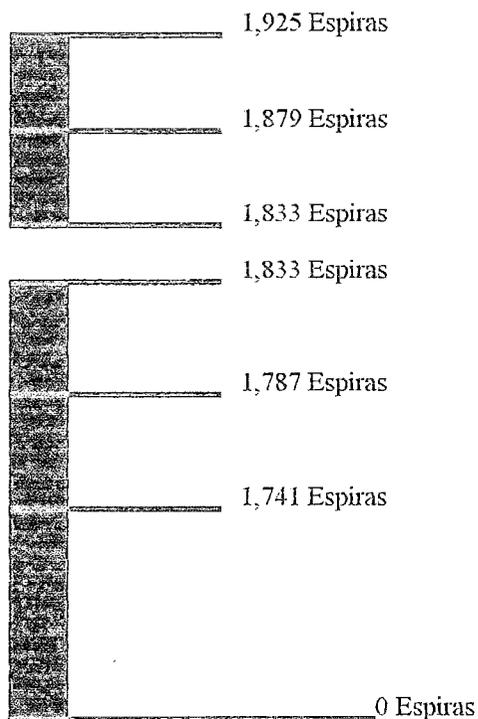
De acuerdo a la relación anterior podemos establecer lo siguiente :

	<u>Relación de Tensión</u>	<u>Relación de Espiras</u>	<u>Espiras/Primario(Apróx.)</u>
01	26.3580	26.3711	1,925
02	25.7304	25.7432	1,879
03	25.1029	25.1154	1,833
04	24.4753	24.4875	1,787
05	23.8477	23.8596	1,741

De esta manera , tenemos que el Número de Espiras , corregido nos permite obtener un Rango de Error Porcentual del orden del 0.05% con lo cuál estaríamos dentro de lo exigido por las Normas de Fabricación.

### 3.2.2.-Cálculo del Menor Taps de Regulación de la Bobina Primaria.-

De acuerdo con el Número de Espiras corregidos , podemos elaborar el siguiente Diagrama Unifilar del Bobinado de Alta Tensión , en donde se puede observar que el menor de los Taps ( de las Regulaciones ) está en la espira Nro. 1,741 .



### 3.2.3.-Cálculo de la Corriente por el Conductor.-

Se calculará por la siguiente Fórmula .:

$$I_{AT} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \text{ KV}} \quad (\text{ Conexión Triángulo } )$$

$$I_{AT} = \frac{50 \text{ KVA}}{\sqrt{3} \times 10 \text{ KV}}$$

$I_{AT} = 2,88 \text{ Amperios}$
----------------------------------

### 3.2.4.-Cálculo de la Sección Transversal del Conductor ( $a_{cu/AT}$ ) .-

Por los Datos de Diseño señalados con anterioridad , sabemos que el valor de la Densidad de Corriente (  $J_{AT}$  ) para este caso será :

$$J_{AT} = 2,5 \text{ Amp} / \text{mm}^2$$

Por lo tanto :

$$a_{cu/AT} = \frac{I_{AT}}{J_{AT}}$$

$$a_{cu/AT} = \frac{2,88 \text{ Amp}}{2,5 \text{ Amp} / \text{mm}^2}$$

$$a_{cu/AT} = 1.152 \text{ mm}^2$$

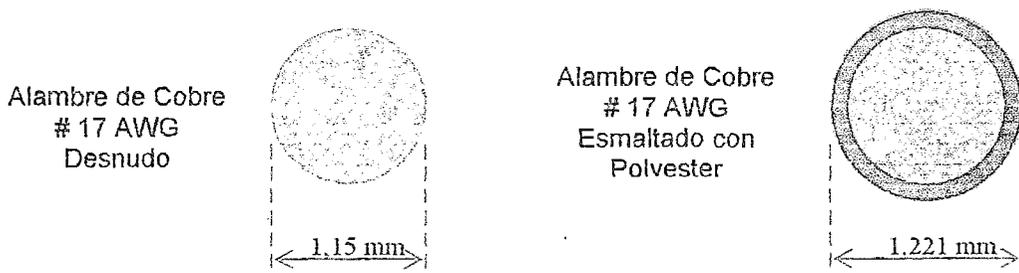
Ubicamos , dentro de la Tabla de Conductores Eléctricos Esmaltados , aquel que tiene la Sección Transversal mas próxima al Calculado determinándose que corresponde al Nro. 17 AWG , el cuál tiene las siguientes características :

$$\# 17 \text{ AWG} \longrightarrow *a_{cu/AT} = 1.04 \text{ mm}^2 \longrightarrow \phi_{cu/AT} = 1.221 \text{ mm}$$

Con tal información , podemos modificar el valor de la Densidad de Corriente del Conductor de Alta Tensión , obteniéndose el siguiente valor

$$*J_{AT} = 2,5 ( 1.152 / 1.04 ) = 2.769 \text{ Amp} / \text{mm}^2$$

El Conductor de Cobre Calculado para la Fabricación de la Bobina de Alta Tensión , posee una cobertura de material Aislante (Polyester) , quedando las Dimensiones finales de la sección Transversal de este , tal como se muestra a continuación



### 3.2.5.-Cálculo de la Altura de la Bobina ( $H_{AT}$ ).-

Por las recomendaciones dadas en las Dimensiones Mínimas para la Fabricación de Bobinas tenemos que para la Alta Tensión ,

$$H_{AT} = H_w - 2 y_1$$

En donde :

$H_{AT}$  = Altura Neta de Bobina

$$H_w = \text{Altura de Ventana del Núcleo} = 120 \sqrt[4]{S_n}$$

$y_1$  = Distancia de Aislamiento de AT = 30 mm

$$H_{BT} = 120 \sqrt[4]{S_n} - 2 \times 30$$

Reemplazando el valor de ,  $S_n = 50 \text{ KVA}$  , tendremos :

$$H_{AT} = 120 \sqrt[4]{50} - 2 \times 30$$

$$H_{AT} = 259 \text{ mm}$$

### 3.2.6.-Cálculo del Número de Espiras por Capa ( $n_{E/C}$ ).-

Calcularemos , el Número de Espiras por Capa en la Bobina de Alta Tensión por la relación entre la Altura de Neta de la Bobina de Alta Tensión (  $H_{AT}$  ) y el Diámetro Total del Alambre Esmaltado (  $\phi_{cu/AT}$  ) seleccionado :

$$n_{E/C} = \frac{H_{AT}}{\phi_{cu/AT}}$$

Reemplazando los valores encontrados para las variables antes mencionadas tendremos :

$$n_{E/C} = \frac{259 \text{ mm}}{1.221 \text{ mm}}$$

$n_{E/C} = 212$  ( Este es el valor Máximo de Espiras en una Capa )

$$n_{E/C} = 212$$

### 3.2.7.-Cálculo del Número de Capas por Bobina ( $n_{C/B}$ ).-

El Número de Capas por Bobina , se calculará por la relación entre el Número Total de Espiras por Bobina (  $n_{E/B}$  ) y el Número Total de Espiras por Capa (  $n_{E/C}$  ) según se puede apreciar lo siguiente :

$$n_{C/B} = \frac{n_{E/B}}{n_{E/C}}$$

Reemplazando los valores encontrados ; en la Fórmula anterior tendremos :

$$n_{C/B} = \frac{1925}{212}$$

$$n_{C/B} = 10 \text{ capas} / ( 9 \times 212 + 1 \times 17 )$$

### 3.2.8.-Cálculo del Aislamiento entre Capas ( $\delta_{AT}$ ).-

El aislamiento que consideraremos a utilizarse entre las Capas de la Bobina deberá soportar el doble de la tensión por capa , para ser sometido a los Ensayos de Tensión Inducida por lo tanto :

$$\delta_{AT} = \frac{2 V_c}{k_{pp}}$$

En donde :

$$V_c = \text{Tensión de Capa} = ( n_{E/C} ) ( E )$$

$$k_{pp} = \text{Rigidez Dieléctrica del Papel Presspan Embebido en Aceite} = 7.5 \text{ KV} / \text{mm}$$

$$\delta_{AT} = \frac{2 ( n_{E/C} ) ( E )}{k_{pp}}$$

Reemplazando los valores conocidos , en la Fórmula anterior tendremos :

$$\delta_{AT} = \frac{2 ( 212 \text{ Esp. } ) ( 3,18 \text{ V} / \text{Esp. } ) 10^{-3}}{7,5 \text{ KV} / \text{mm}}$$

$$\delta_{AT} = 0,18 \text{ mm}$$

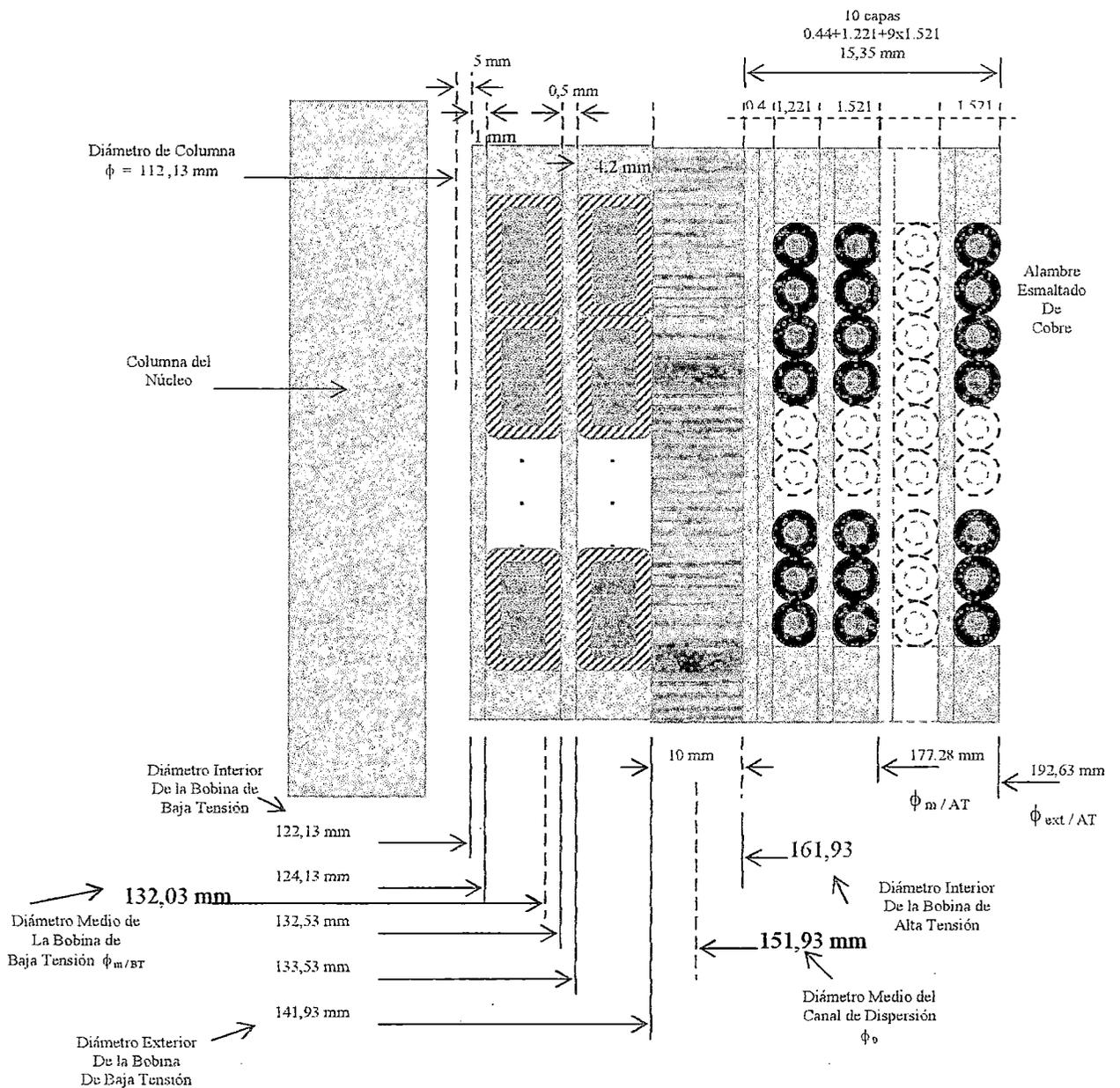
Utilizando un Factor de Seguridad igual a " 1,5 " , tendremos :

$$\delta_{AT} = 1,5 \times 0,18 \text{ mm}$$

$$\delta_{AT} = 0,30 \text{ mm}$$

**3.2.9.-Cálculo del Espesor Radial de la Bobina (  $e_{R/AT}$  )-**

El Espesor Radial (  $e_{R/AT}$  ) de la Bobina de Alta Tensión , lo vamos a determinar a partir de la observación de la siguiente figura :



$$e_{R/AT} = 2 \times 0,40 + 1.221 + 9 \times 1.521 \text{ mm}$$

$$e_{R/AT} = 15,71 \text{ mm}$$

Debido , al proceso de Bobinado , el ajuste del Alambre de Cobre impregnado de Polyester , nos arroja un Factor de Apilamiento , que en muchos casos puede considerarse 0,95 ; por lo tanto el espesor Radial de la Bobina de Alta Tensión final será :

$$e_{R/AT} = \frac{15,71 \text{ mm}}{0,95}$$

$$e_{R/AT} = 16,53 \text{ mm}$$

### 3.2.10.-Cálculo de la Reactancia de Dispersión de la Bobina ( $X_{L/AT}$ ).-

El valor de la Reactancia de Dispersión de la Bobina depende de , la frecuencia de la Red (  $f$  ) y de la Inductancia (  $L_{AT}$  ) de la misma y están relacionadas de la siguiente manera :

$$X_{L/AT} = 2 \pi f L_{AT}$$

En donde además se tiene que :

$$L_{AT} = \frac{\pi \mu_0}{H_w} n_{AT}^2 \left[ \frac{e_{R/AT}}{3} \phi_{m/AT} + \frac{e_0}{2} \phi_0 \right] \text{ ( Henrios )}$$

En donde :

$L_{AT}$  = Inductancia de la Bobina de Alta Tensión ( Henrios )

$\mu_0$  = Permitividad del Vacío =  $4 \pi \times 10^{-7}$

$H_w$  = Altura de la Ventana del Núcleo ( m )

$n_{AT}$  = Número de Espiras de Alta Tensión ( Espiras )

$e_{R/AT}$  = Espesor Radial de la Bobina de Alta Tensión ( m )

$\phi_{m/AT}$  = Diámetro Medio de la Bobina de Alta Tensión ( m )

$e_0$  = Espesor Radial del Canal de Dispersión ( m )

$\phi_0$  = Diámetro Medio del Canal de Dispersión ( m )

Reemplazando los valores encontrados , en la Fórmula anterior tendremos :

$$\begin{aligned}
 L_{AT} &= ? \text{ (Henrios)} \\
 \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} \\
 H_w &= 0,319 \text{ (m)} \\
 n_{AT} &= 1,925 \text{ (Espiras)} \\
 e_{R/AT} &= 0,01653 \text{ (m)} \\
 \phi_{m/AT} &= 0,17728 \text{ (m)} \\
 e_0 &= 0,010 \text{ (m)} \\
 \phi_0 &= 0,15193 \text{ (m)}
 \end{aligned}$$

Para la Inductancia de la Bobina tenemos :

$$L_{AT} = \frac{\pi (4\pi \times 10^{-7})}{0,319} 1,925^2 \left[ \frac{0,01653}{3} \times 0,17728 + \frac{0,010}{2} \times 0,15193 \right] \text{ (H)}$$

$$L_{AT} = 0.080 \text{ (Henrios)}$$

Por lo tanto , la Reactancia de Dispersión de la Bobina de Alta Tensión tiene el siguiente valor :

$$X_{L/AT} = 2\pi (60)(0.080) \Omega$$

$$X_{L/AT} = 30,14 \Omega$$

### **3.2.11.-Cálculo de la Resistencia de la Bobina a la Corriente Continua .-**

La Resistencia de la Bobina de Alta Tensión a la Corriente Continua esta calculada por la Fórmula siguiente :

$${}_{BT}R_{20}^0{}_C = \rho_{20}^0{}_C \frac{\pi (\phi_{m/AT}) (n_{E/B})}{a_{cu/AT}} \quad (\Omega)$$

La Bobina , incrementará su Resistencia Eléctrica cuando aumente la Temperatura de la misma por efecto de la carga aplicada al Transformador , en este caso tendremos :

$${}_{BT}R_{75}^0 C = {}_{BT}R_{20}^0 C \left[ \frac{234.5 + 75^0}{234.6 + 20^0} \right] (\Omega)$$

Por lo tanto , la Resistencia a  $75^0$  se puede calcular por la siguiente expresión

$${}_{BT}R_{75}^0 C = {}_{BT}R_{20}^0 C ( 1.216 ) (\Omega)$$

En la Fórmula las distintas variables tienen el siguiente significado y valores :

$${}_{BT}R_{20}^0 C = \text{Resistencia de la Bobina a } 20^0 = !$$

$$\rho_{20}^0 C = \text{Resistividad del Material del Conductor} = 1 / 58$$

$$\phi_{m/AT} = \text{Diámetro Medio de la Bobina} = 0,17728 \text{ ( m )}$$

$$n_{E/B} = \text{Número Total de Espiras de la Bobina} = 1,925$$

$$a_{cu/AT} = \text{Sección Transversal del Conductor} = 1,04 \text{ mm}^2$$

Reemplazando estos Valores , tendremos :

$${}_{BT}R_{20}^0 C = \frac{1}{58} \frac{\pi (0,17728) (1,925)}{1,04} (\Omega)$$

$${}_{BT}R_{20}^0 C = 17,76 (\Omega)$$

La Resistencia Eléctrica a  $75^0$  , será :

$${}_{BT}R_{75}^0 C = 17,76 ( 1.216 ) (\Omega)$$

$${}_{BT}R_{75}^0 C = 21,59 (\Omega)$$

### 3.2.12.-Cálculo del Volumen del Cobre de la Bobina .-

El Volumen del Cobre utilizado en la Construcción de la Bobina , se calculará por la siguiente relación :

$$V_{cu/AT} = \pi (\phi_{m/AT}) (n_{E/B}) (a_{cu/AT}) \text{ m}^3$$

Por lo tanto :

$$V_{cu/AT} = \pi ( 0,17728 ) ( 1,925 ) ( 1.04 ) \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V_{cu/AT} = 0.001114 \text{ m}^3$$

### **3.2.13.-Cálculo del Peso del Cobre por Bobina .-**

El peso del Conductor de Cobre utilizado para la Construcción de la Bobina de nuestro Transformador , será calculado por :

$$P_{cu/AT} = ( V_{cu/AT} ) ( \gamma_{cu} )$$

Donde el valor del Peso específico del Cobre es :  $\gamma_{cu} = 8,900 \text{ Kgs/m}^3$

$$P_{cu/AT} = 0.001114 \times 8,900 \text{ ( Kgs.)}$$

$$P_{cu/AT} = 9,91 \text{ ( Kgs.)}$$

### **3.2.14.-Cálculo de las Pérdidas en la Bobina de Baja Tensión .-**

Debido al paso de la Corriente de Carga en las Bobinas del Transformador de Distribución de Energía Eléctrica objeto de este Estudio por Efecto Joule se originan Pérdidas de Potencia Activa las que pueden calcularse de la siguiente manera:

$$W_{cu/AT} = 2,4 ( P_{cu/AT} ) ( *J_{AT} )^2 \text{ ( watts )}$$

Por lo tanto , reemplazando los valores de  $P_{cu/AT}$  y  $*J_{AT}$  , en la Fórmula anterior

$$W_{cu/AT} = 2,4 ( 9,91 ) ( 2,769 )^2 \text{ ( watts )}$$

$$W_{cu/AT} = 182.36 \text{ ( watts )}$$

Las tres Bobinas de Alta Tensión , nos proporcionan unas Pérdidas de :

$$W_{cu/AT} = 3 \times 182.36 \text{ ( watts )}$$

$$W_{cu/AT} = 547.08 \text{ ( watts )}$$

**3.2.15.-Cálculo del Costo  $C_{T/cu/AT}$  del Cobre de la Bobina de Alta Tensión .-**  
 La Cantidad Total de Alambre Esmaltado Nro.17 AWG para la Construcción de la Bobina de Alta Tensión ;es justamente calculado por

$$P_{T/cu/AT} = 3 P_{cu/AT}$$

$$P_{T/cu/BT} = 29,73 \text{ Kgs}$$

Y conociendo que , el Precio por kilogramo del Alambre de Cobre es de \$6.00 entonces :

$$C_{T/cu/AT} = 29,73 \times 6 \text{ U.S.Dólares}$$

$$C_{T/cu/AT} = \$178,38 \text{ U.S.Dólares}$$

**3.2.16.-Cálculo de las Pérdidas Totales en las Bobinas del Transformador .**  
 Las Pérdidas Totales será la Suma de las Pérdidas Parciales de Cada Bobina por lo tanto :

$$W_{cu} = W_{cu/AT} + W_{cu/BT}$$

$$W_{cu} = 547.08 + 361.35 \text{ ( watts )}$$

$$W_{cu} = 908.43 \text{ ( watts )}$$

**3.2.17.-Resumen del Diseño de las Bobinas del Transformador .-**

Peso del Cobre Baja Tensión = 22,62 Kgs

Peso del Cobre Alta Tensión = 29,73 Kgs

Costo del Cobre de Baja Tensión = \$135,72 U.S.Dólares

Costo del Cobre de Alta Tensión = \$178,38 U.S.Dólares

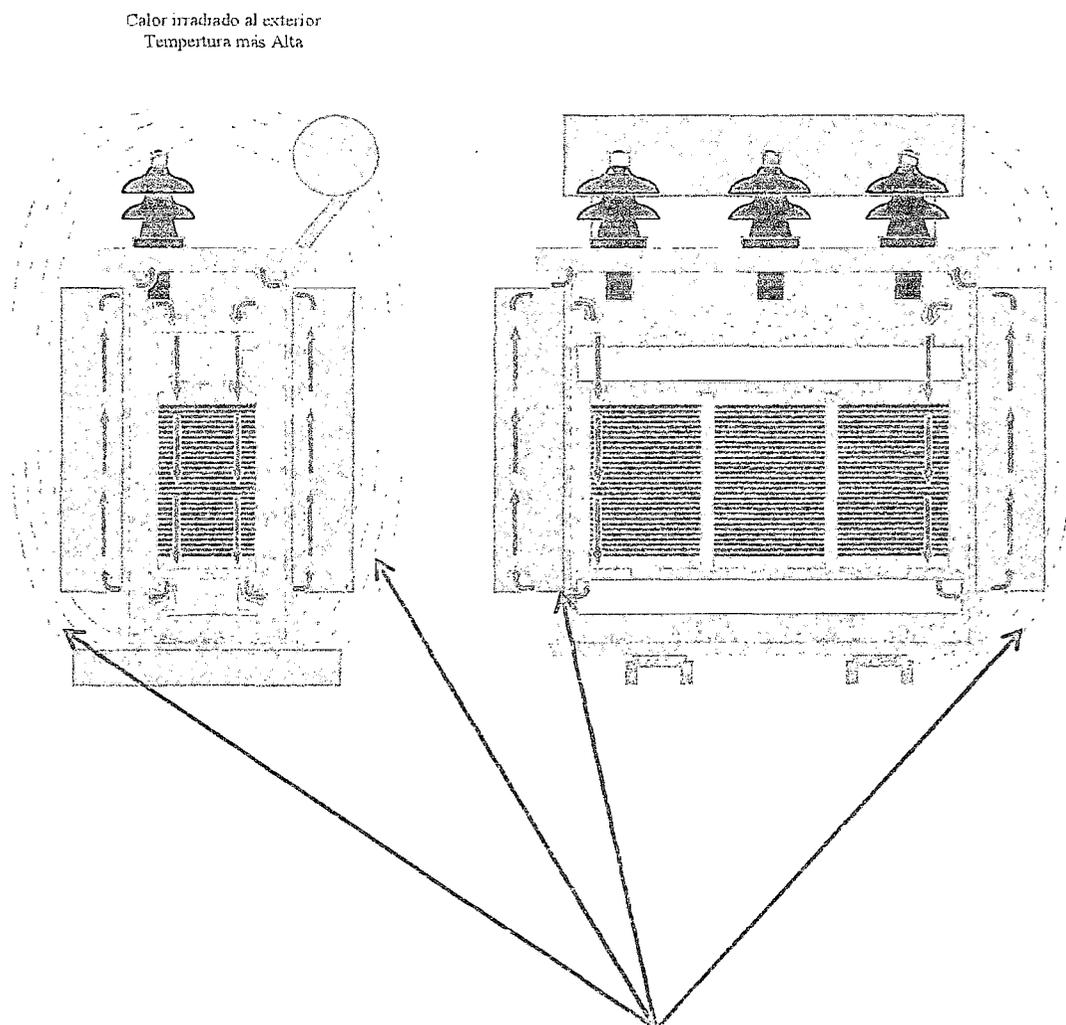
Pérdidas en Baja Tensión = 361,35 watts

Pérdidas en Alta Tensión = 908.43 watts

## Capítulo IV

### 4.-Diseño de la Cuba ó Tanque del Transformador.-

Para el Diseño de la Cuba ó Tanque de los Transformadores de Distribución de Energía Eléctrica , debe de hacerse previamente un análisis de las Condiciones Térmicas de Operación de estos Equipos , vale decir ; del Circuito Térmico al que estarán sometidas todas las partes del Transformador ; para tal efecto tomaremos como referencia el esquema de Operación Térmica adjunto :



Cuando el Transformador está operando a condiciones nominales , la Energía que se origina por efecto de las Pérdidas ( Joule y Foucault ) , se encuentran en Equilibrio Térmico , con referencia a la Energía almacenada que calienta al Transformador y la que es irradiada al exterior del mismo . Esta relación Térmica se puede expresar mediante la siguiente Ecuación Diferencial .

$$W_{cu} + W_{fe} = \sigma M \frac{d\theta}{dt} + \alpha A \Delta\theta$$

Por las condiciones Térmicas de Operación del Transformador, afirmamos que para un tiempo infinito ; el Incremento de Temperatura (  $\Delta\theta$  ) debe permanecer constante , de esto se deriva la expresión diferencial siguiente :

$$\frac{d(\Delta\theta)}{dt} = 0$$

Para simplificar la expresión del primer miembro de la Ecuación Diferencial del Equilibrio Térmico del Transformador utilizaremos el siguiente cambio de variable :

$$P = W_{cu} + W_{fe}$$

Y procedemos a resolver la Ecuación respectiva , obteniéndose lo siguiente :

$$\Delta\theta = \frac{P}{\alpha A} \left[ 1 - e^{-\alpha At / \sigma M} \right]$$

De esta manera podemos afirmar que :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d(\Delta\theta)}{dt} = 0$$

$$\frac{d(\Delta\theta)}{dt} = \frac{P}{\sigma M} \left[ 1 - \frac{\alpha A \Delta\theta}{P} \right]$$

Por lo tanto :

$$\Delta\theta = \frac{P}{\alpha A}$$

Con la expresión anterior , representamos la variación de Temperatura cuando el Transformador tenga un tiempo infinito de Operación , vale decir cuando este se encuentre operando según las condiciones de servicio para el que fue Diseñado y Fabricado ; para un trabajo permanente .

Por otro lado , se sabe que la Potencia de Pérdidas ( P ) es una función directa del cuadrado de la corriente ( I<sup>2</sup> ) que circula por el Conductor Eléctrico y de la resistencia eléctrica ( R ) de dicho conductor , esto es :

$$P = R I^2$$

Además , en una Bobina se puede establecer que la resistencia eléctrica de la misma ( R ) se puede calcular por :

$$R = \rho \frac{L N}{A}$$

$$A = K L H_B$$

En donde :

R = Resistencia del Conductor ( Ω )

ρ = Resistividad del Material del Conductor

L = Longitud total de la Bobina ( cm )

N = Número de Espiras

A = Sección Total del Conductor ( mm<sup>2</sup> )

H<sub>B</sub> = Altura de la Bobina ( cm )

I = Corriente por el Conductor ( Amperios )

K = Coeficiente de Radiación = 6 W/m<sup>2</sup>- °C

Reemplazando la información , en Δθ :

$$\Delta\theta = \frac{\rho}{K\alpha} \left[ \frac{I}{A} \right] \left[ \frac{NI}{H_B} \right]$$

Los valores de :

I / A = Densidad de Corriente ( Amp / mm<sup>2</sup> )

NI / H<sub>B</sub> = Intensidad de Flujo Magnético ( Amp – V / cm )

Por lo tanto :

$$\Delta\theta = \frac{\rho}{K\alpha} \left[ J \vec{a}_c \right]$$



$$*J_{BT} = 2,58 \text{ Amp} / \text{mm}^2$$

$$\tilde{a}_{c/BT} = \frac{73 \times 72,46}{26,9} = 196,63 \text{ (Amp} - \text{v} / \text{cm)}$$

Por lo tanto :

$$\Delta\theta_{BT} = \frac{2,58 \times 196,63}{200} \times 50^\circ \text{ C}$$

$$\Delta\theta_{BT} = 126,82^\circ \text{ C}$$

#### **4.2.-Cálculo del Incremento de Temperatura en la Bobina de Baja Tensión**

Utilizando las Fórmulas de la solución anterior , para el Cálculo del Incremento de la Temperatura en los Devanados ó Bobinas (  $\Delta\theta$  ) , tendremos lo siguiente :

$$\Delta\theta_{AT} = \frac{P_{AT}}{\alpha_{AT} A_{cu/AT}} = \frac{(*J_{AT} \tilde{a}_{AT})}{(J \tilde{a}_c)_{AT}} \times 50^\circ \text{ C}$$

Donde :  $(J \tilde{a}_c)_{AT} = \text{Permisible} = 360$

$$*J_{AT} = 2.769 \text{ Amp} / \text{mm}^2$$

$$\tilde{a}_{c/AT} = \frac{1925 \times 2,88}{25,9} = 214,05 \text{ (Amp} - \text{v} / \text{cm)}$$

Por lo tanto :

$$\Delta\theta_{AT} = \frac{2.769 \times 214,05}{360} \times 50^\circ \text{ C}$$

$$\Delta\theta_{AT} = 82,32^\circ \text{ C}$$

#### **4.3.-Cálculo de las Dimensiones de la Cuba ó Tanque.-**

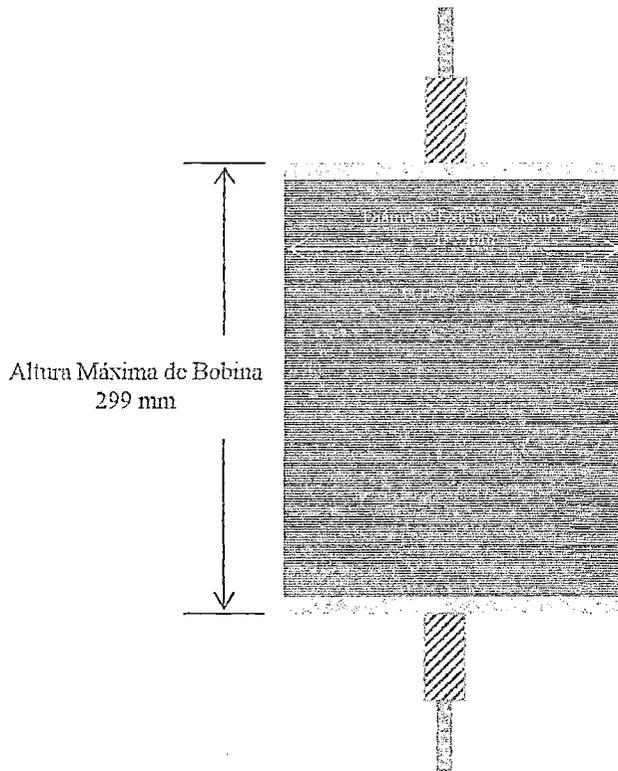
Para determinar las dimensiones de la Cuba o Tanque del Transformador de Distribución de Energía Eléctrica , debemos tener en cuenta lo siguiente :

- 4.3.1.-Las Dimensiones Finales de las Bobinas
- 4.3.2.-Las Dimensiones Finales del Núcleo
- 4.3.3.-La Sobre-elevación de Temperatura del Tanque

Desarrollando cada uno de los acápites anteriores tendremos :

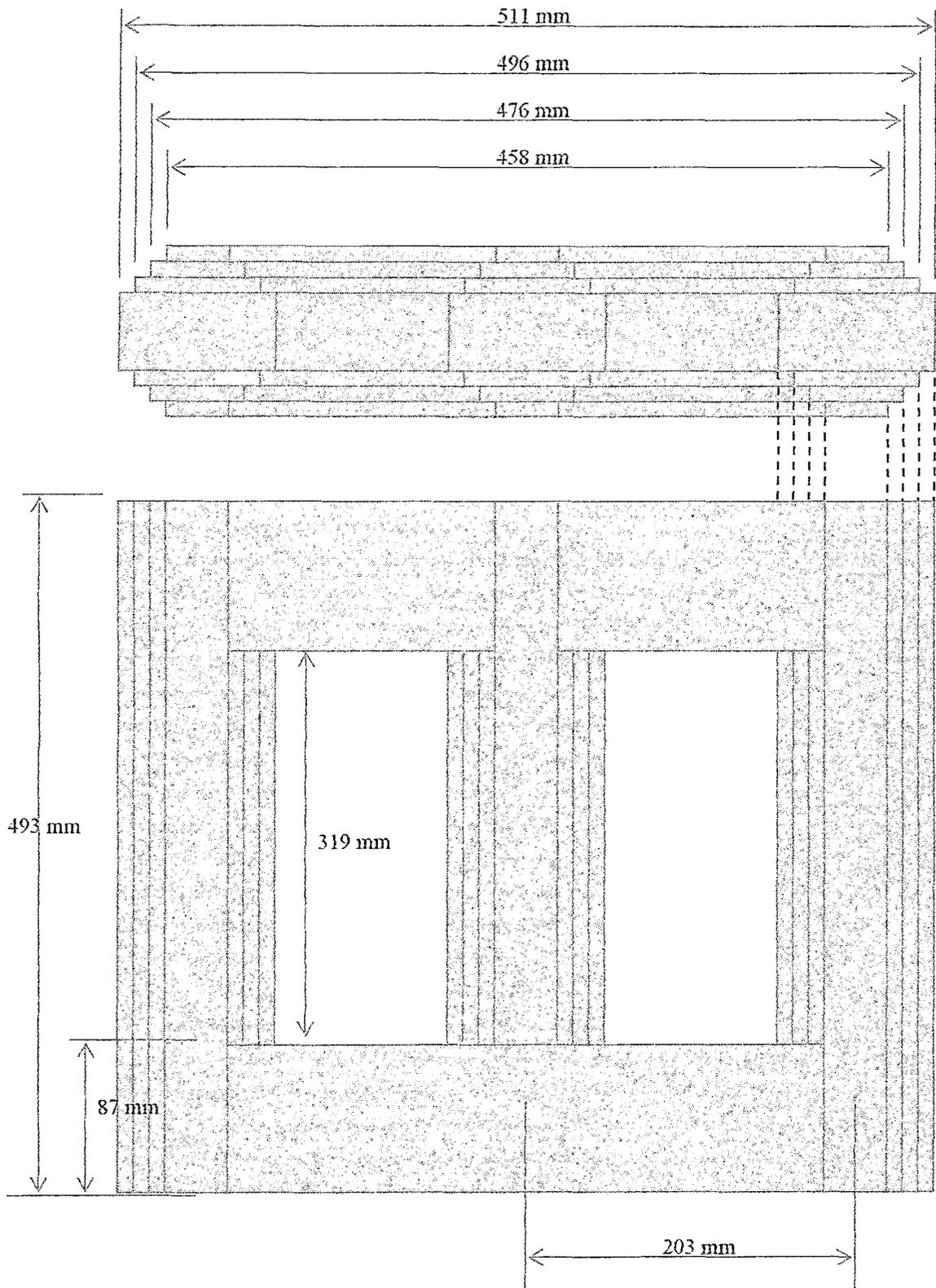
**4.3.1.-Las Dimensiones Finales de las Bobinas.-**

Las Bobinas Diseñadas , en las líneas anteriores nos indican que las Dimensiones finales de estas son :



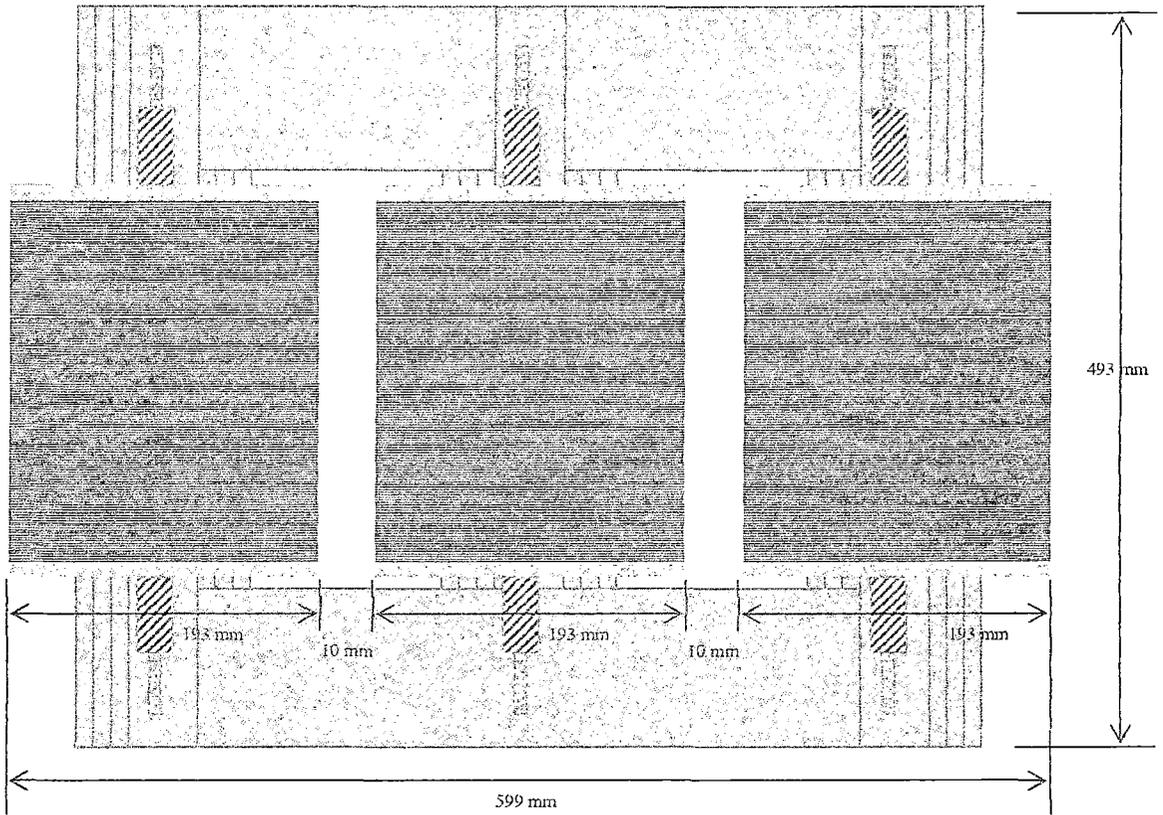
**4.3.2.-Las Dimensiones Finales del Núcleo.-**

El Núcleo del Transformador debe alojar holgadamente a las Bobinas del Transformador ,en tal caso la distancia entre los centros de las Bobinas debe ser exactamente igual a la distancia entre los Ejes ó centros de Columnas del Núcleo , en el supuesto caso en que la distancia entre ejes , no permita el fácil montaje de las Bobinas ; se debe tener en cuenta las dimensiones mínimas recomendadas para el Diseño del Transformador como ya se ha señalado , por lo que habrá de considerarse a la distancia entre ejes como 10mm mas larga que el Diámetro Externo de la Bobina por lo que estamos en capacidad de mencionar que la distancia entre ejes recomendada es de 203 mm. Las dimensiones finales del Núcleo se muestran a continuación.

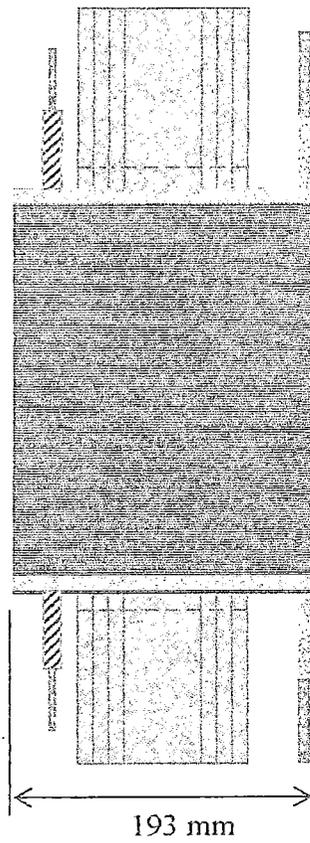


En el montaje final de las Bobinas , estas deben quedar holgadamente en las Columnas del Núcleo del Transformador Trifásico , de manera que se va a tener una disposición como la que se muestra a continuación , en donde observamos las distancias mínimas en este montaje.

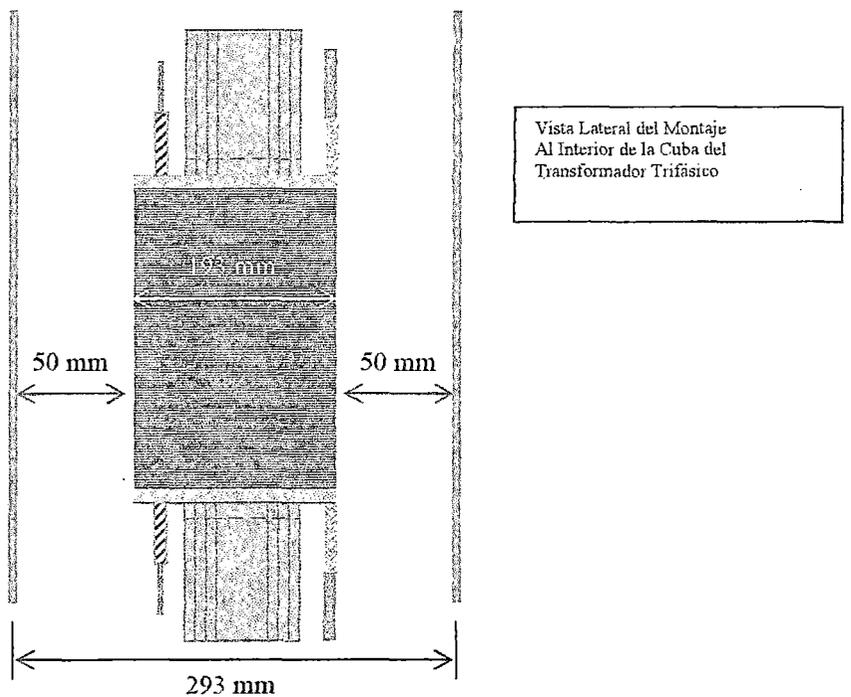
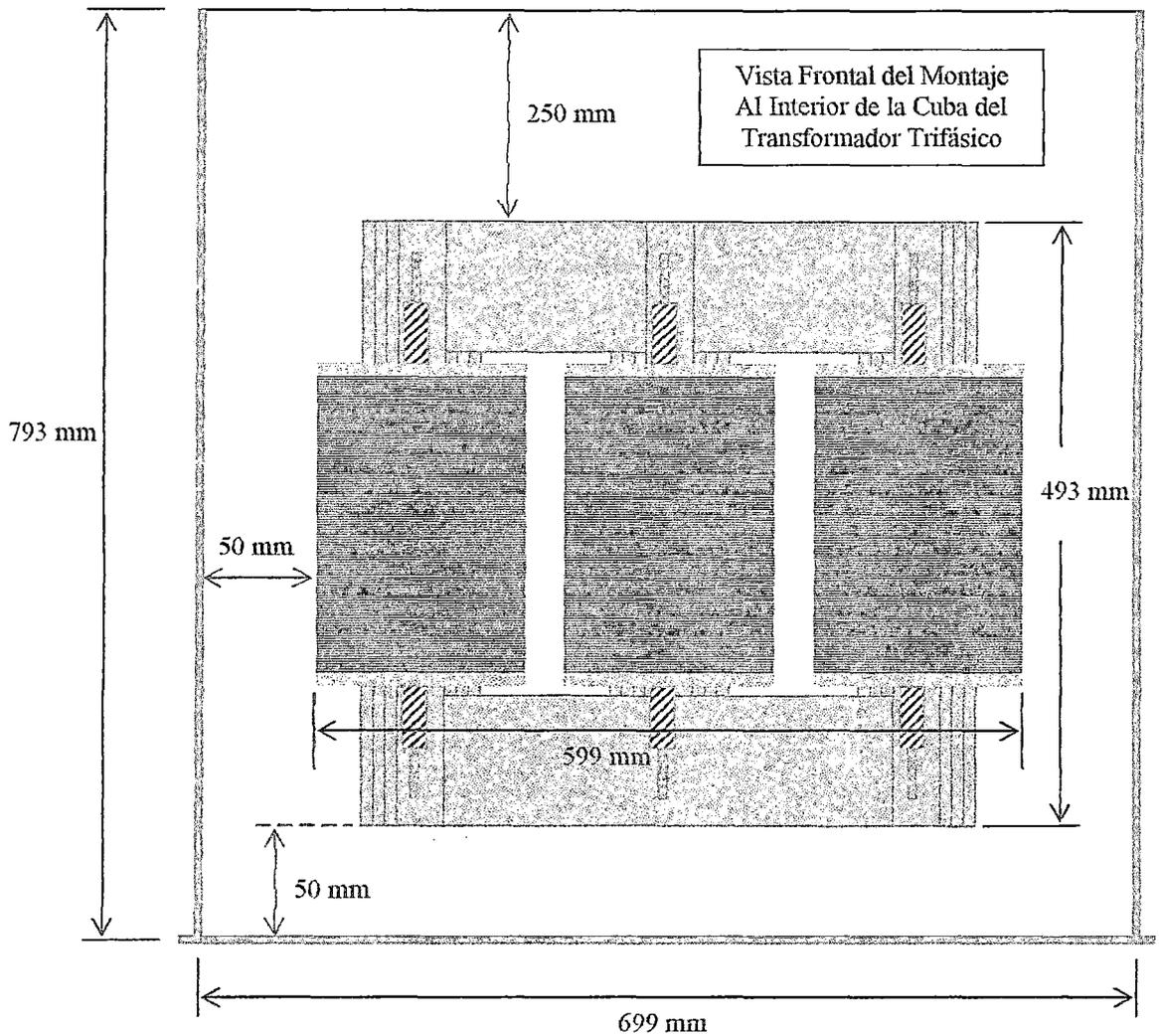
Vista Frontal de Montaje de Bobinas



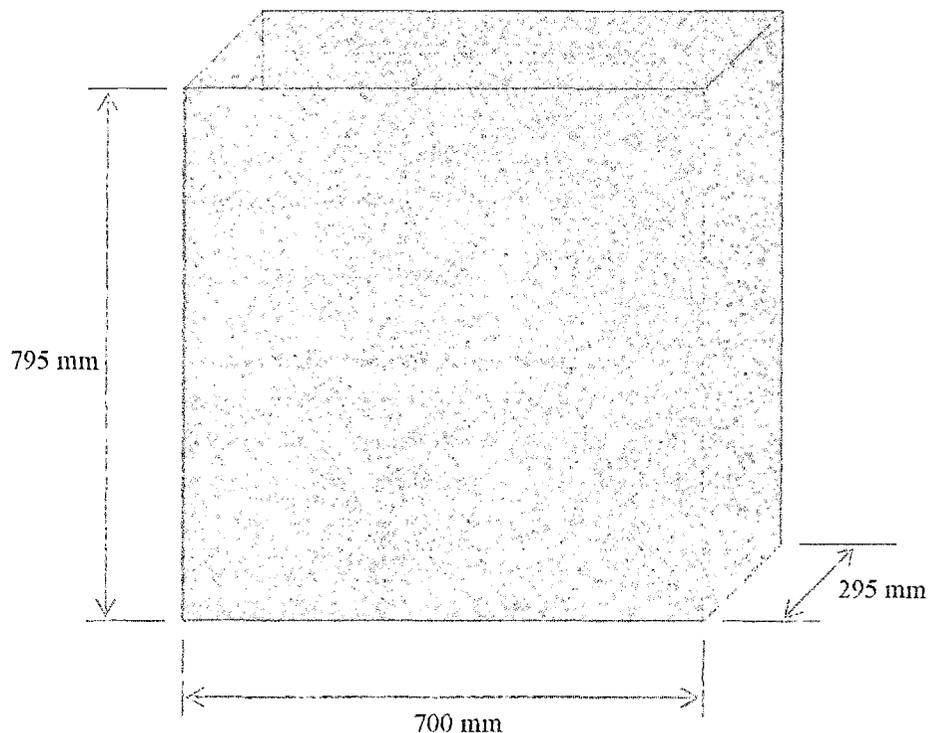
Vista Lateral del Montaje De Bobinas



Con las dimensiones antes encontradas del montaje de la Parte Activa del Transformador , podemos dimensionar la parte de la Cuba o Tanque en donde será sumergida en Aceite Dieléctrico , esto es :



De lo expuesto , en los Diagramas anteriores podemos establecer las Dimensiones de la Cuba o Tanque , en donde por motivos prácticos se han corregido estas dimensiones a su inmediato superior , de la siguiente manera :



#### 4.3.3.-Cálculo de la Superficie de Refrigeración o Aletas Radiadoras .-

La figura cuyas dimensiones hemos encontrado anteriormente , forma parte de la Superficie de Refrigeración (  $S_{RF}$ ) necesaria para disipar las Pérdidas Totales que se producen básicamente por efectos Joule y Foucault , por lo que en primer intento tenemos que la superficie hábil es la correspondiente a :

$$S_{RF} = ( 79,5 \text{ cm } ) ( 70,0 \text{ cm } + 29.5 \text{ cm } ) ( 2 )$$

$$S_{RF} = 15,820 .50 \text{ cm}^2$$

Además sabemos que , las Pérdidas en el Cobre y en el Fierro son :

$$W_{fe} = 591.20 \text{ Watts}$$

$$W_{cu} = 547.08 \text{ Watts}$$

De donde las Pérdidas Totales serán :

$$W = 1,138.28 \text{ Watts}$$

Hemos de considerar que la sobreelevación de Temperatura en la Cuba o Tanque tendrá como límite  $35^{\circ}\text{C}$ , por lo que :

$$A_{RF} = \frac{1,138.28}{12,5 \times 35^{\circ}\text{C}}$$

$$A_{RF} = 2.601782 \text{ m}^2$$

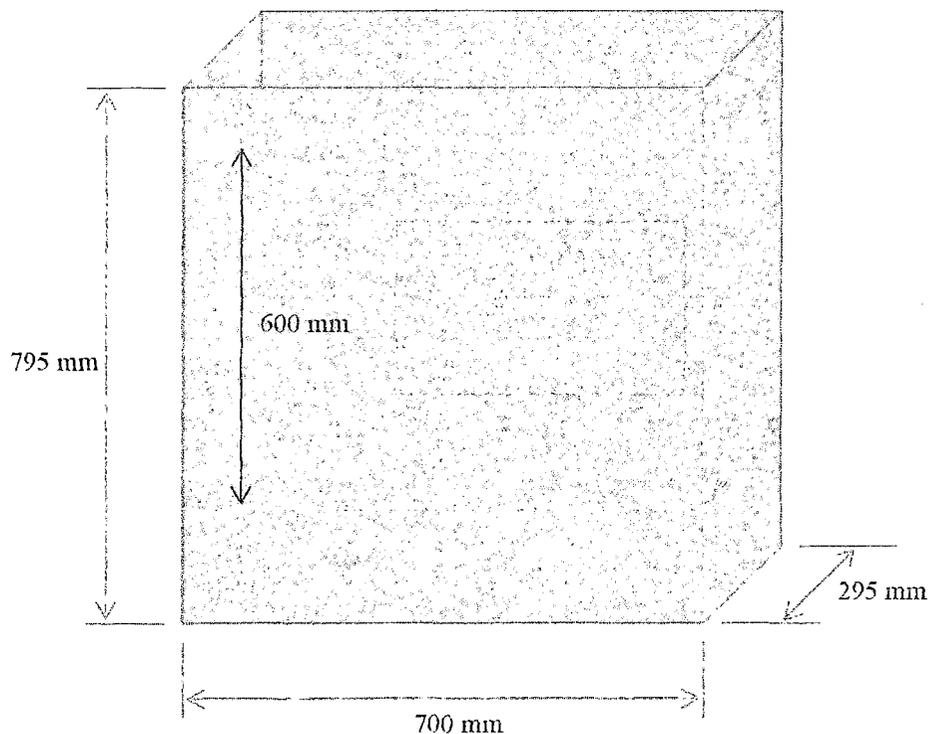
$$A_{RF} = 26,017.82 \text{ cm}^2$$

La diferencia de superficies entre  $A_{RF}$  y  $S_{RF}$ , es la cantidad que se necesita para dimensionar las Aletas Radiadoras, en consecuencia :

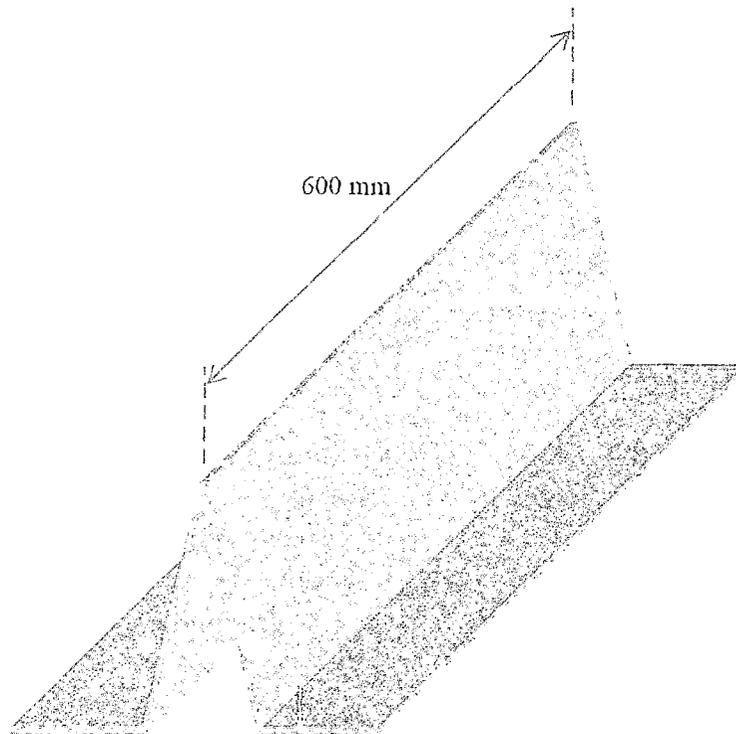
$$\Delta S = A_{RF} - S_{RF}$$

$$\Delta S = 10,197.32 \text{ cm}^2$$

Por efectos constructivos, la Aleta Radiadora debe comenzar allí donde empieza la Bobina, y culminar 50 mm antes del final de la Cuba; observemos el siguiente diagrama :



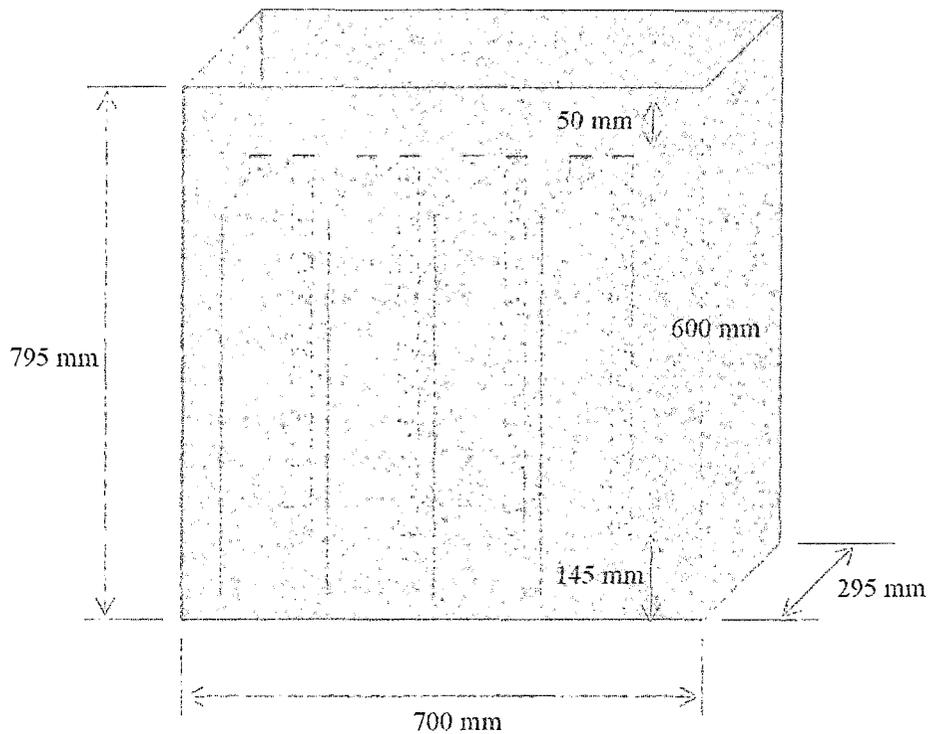
El valor de 600 mm encontrado en la zona que hemos denominado de Aletas es el largo de las Aletas Radiadoras que habrán de fabricarse para la disipación de las pérdidas totales del Transformador. Vamos a considerar una Altura de Aleta de 100 mm , con lo que las Dimensiones de las mismas quedará limitado a lo siguiente :



La superficie neta de la Aleta será de  $20 \times 66 \text{ cm}^2$  por lo que estaríamos necesitando la cantidad de :

$$\frac{10,197.32 \text{ cm}^2}{20 \times 66 \text{ cm}^2} = 7,72 \text{ Aletas como Mínimo}$$

Como no es posible físicamente 7,72 Aletas ; necesitaremos un mínimo de 8 Aletas Radiadoras soldadas alrededor de la Zona de Aletas ,es evidente que cuanto mayor es el Número de Aletas Radiadoras , la refrigeración del Transformador en su conjunto mejorará notablemente , por ello se recomienda mediante un análisis de las dimensiones de la Cuba ó Tanque incrementar a voluntad el Número de Aletas hasta tener una capacidad de disipación de las pérdidas en el Transformador , de : 300 a 350 W / m<sup>2</sup> . El tanque del Transformador de la Cuba ó Tanque quedará con el aspecto que a continuación mostraremos.



Las dimensiones básicas que se han obtenido , durante el proceso de Cálculo de la Cuba ó Tanque para nuestro Transformador de Distribución de Energía Eléctrica , nos muestra la forma , tamaño y otras dimensiones que encajan perfectamente con el resto de partes que son componentes del Transformador sumergido en aceite . Se tiene la intención de sentar las pautas , para que este trabajo se tome como fundamento de Cálculo de otros Transformadores que tienen distintos usos y sobre la base de que existen infinitas formas de calcular y diseñar estos Transformadores y que existe el Modelo Generalizado ó Modelo Matemático mediante el cuál se puede deducir cada parte dimensional de los Transformadores , cualesquiera que sea su tipo de servicio . En el fondo de la Cuba ó Tanque , se soldará una Plancha de fierro suficientemente grueso que permita soportar el peso total de la Parte Activa y del Transformador en general , la tapa con sus agujeros ya descritos con anterioridad será la que soporte el Peso en el momento de izaje , así como la instalación de los Aisladores de Porcelana que de acuerdo a norma deben utilizarse . Todo el sistema de ajuste y sujeción interno y propio de la Parte Activa esta fabricado de metal y los prensados de Bobina contra los canales de ajuste se realizan con madera seca expresamente habilitada para ese fin.

#### 4.4.4.-Cálculo de las Dimensiones del Tanque Expansor.-

El Volumen del Cilindro que nos servirá para la construcción del Tanque Expansor que va sobre la tapa del Transformador y cuyo punto medio coincide con la punta del aislador de Alta Tensión , se calcula por la Fórmula siguiente :

$$V_{T.Exp.} = \frac{1}{20} (V_{Tanque} + n_A V_{Aletas})$$

En donde :

$V_{T.Exp.}$  = Volumen del Tanque Expansor

$V_{Tanque}$  = Volumen del Tanque

$V_{Aletas}$  = Volumen de las Aletas

Además sabemos que :

$$V_{Tanque} = 71,0 \times 30,0 \times 79,5 \text{ cm}^3$$

$$V_{Tanque} = 169,335 \text{ cm}^3$$

$$V_{Aletas} = \frac{1}{3} (10,0 \times 3,2) \times 60,0$$

$$V_{Aletas} = 640 \text{ cm}^3$$

Por lo tanto :

$$V_{T.Exp.} = \frac{1}{20} (169,335 + 14 \times 640) \text{ cm}^3$$

$$V_{T.Exp.} = 8,914.75 \text{ cm}^3$$

Considerando que el Tanque Expansor es Cilindrico , asumiendo que estará ubicado a lo largo de la mayor Longitud de la Tapa , y que la Longitud de este es de  $L = 60,0 \text{ cm}$  ; entonces se tiene que el Volumen del cilindro se calculará por la siguiente expresión :

$$V_{T.Exp.} = \frac{\pi L D^2}{4}$$

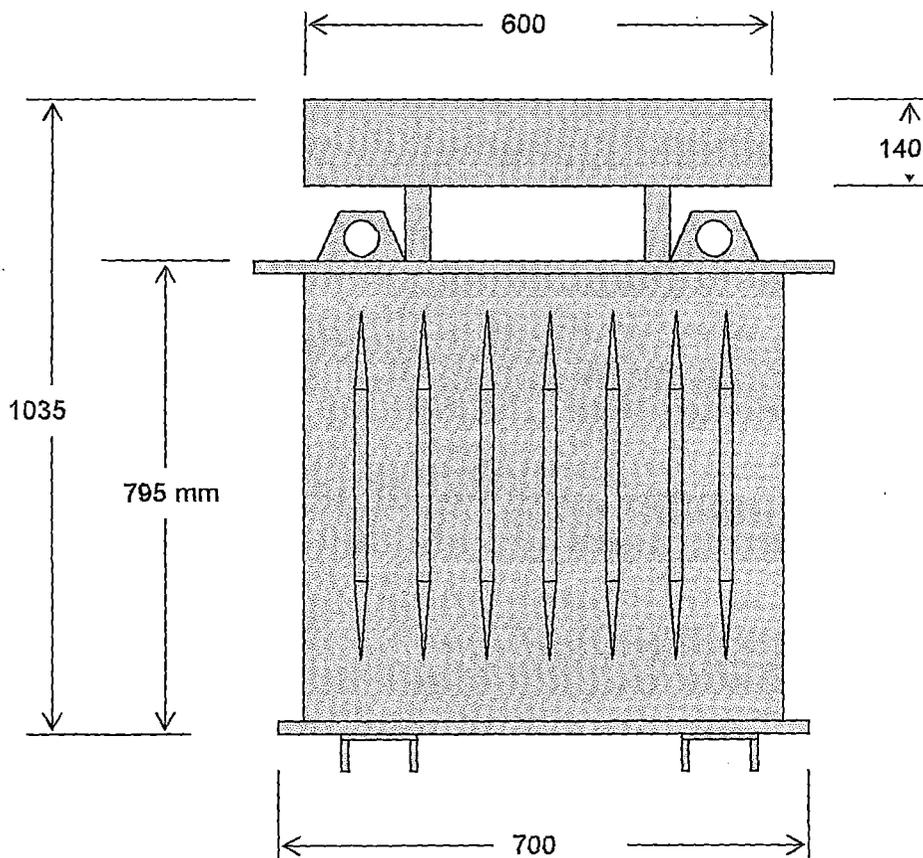
$$D = \sqrt{\frac{4 V_{T.Exp.}}{\pi L}}$$

$$D = 13.75 \text{ cm}$$

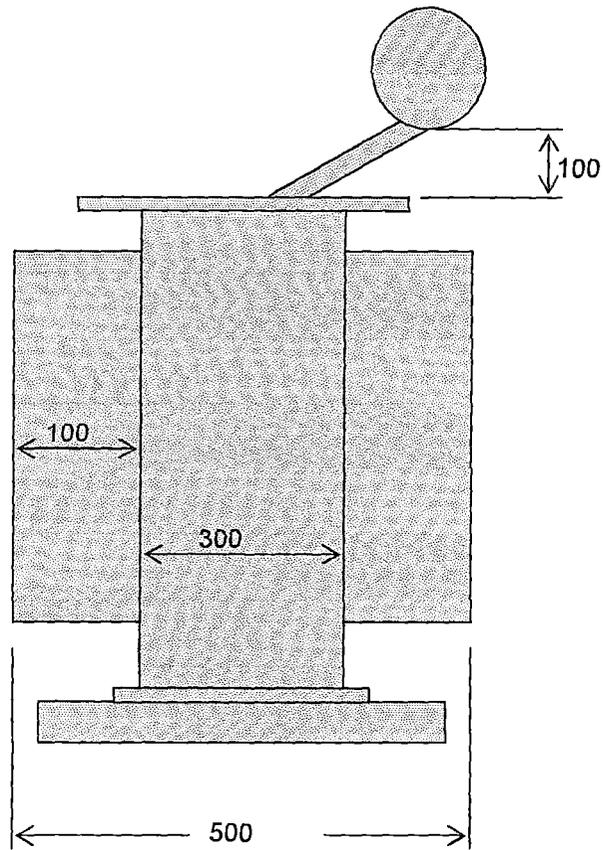
Por motivos Constructivos tendremos que :

$$D = 14 \text{ cm} = 140 \text{ mm}$$

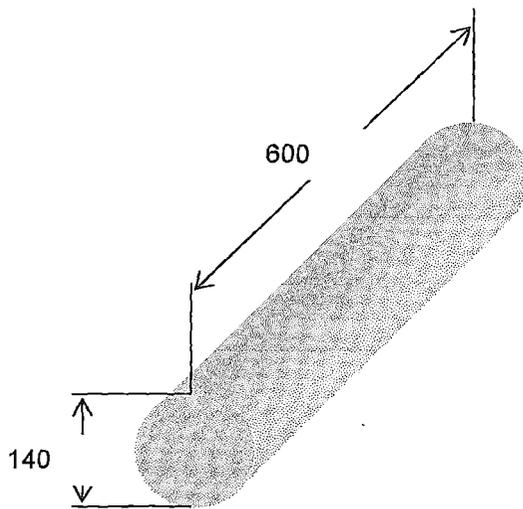
De acuerdo a estas dimensiones obtenidas para el Tanque del Transformador se tiene el Esquema siguiente :



Vista Frontal del Tanque del Transformador



Vista Lateral del Tanque del Transformador



Vista en Perspectiva del tanque Expansor

En la vista Frontal y Lateral del Esquema Final del Tanque se puede apreciar la Forma y Dimensiones que han sido calculadas en el Proceso de Diseño General del Transformador , con sus respectivos Canales de Apoyo , Aletas Radiadoras , Tapa y Tanque Expansor .

## Capítulo V

### Ensayos de Laboratorio en el Transformador Diseñado

Los Ensayos a los que son sometidos los Transformadores de Distribución de Energía Eléctrica , están regulados por la Comisión Electrotécnica Internacional ( CEI ) , de donde podemos extraer las siguientes líneas :

“ Los ensayos deben realizarse a una temperatura comprendida entre 10<sup>0</sup>C y 40<sup>0</sup>C , todos los elementos constituyentes y accesorios exteriores susceptible de influenciar en el funcionamiento del Transformador deben de estar en su sitio . El conmutador debe estar colocado en la toma nominal .Para toda característica que no se refiera al aislamiento los ensayos se basan en las condiciones nominales . Cuando se quiera que los resultados de los ensayos se deban convertir a una temperatura de referencia , nos habremos de guiar del siguiente cuadro.

#### Temperaturas de Referencia

<u>Clase de Calentamiento</u>	<u>Temperatura de Referencia</u>
A	
E	75 <sup>0</sup> C
B	
F	
H	115 <sup>0</sup> C
C	

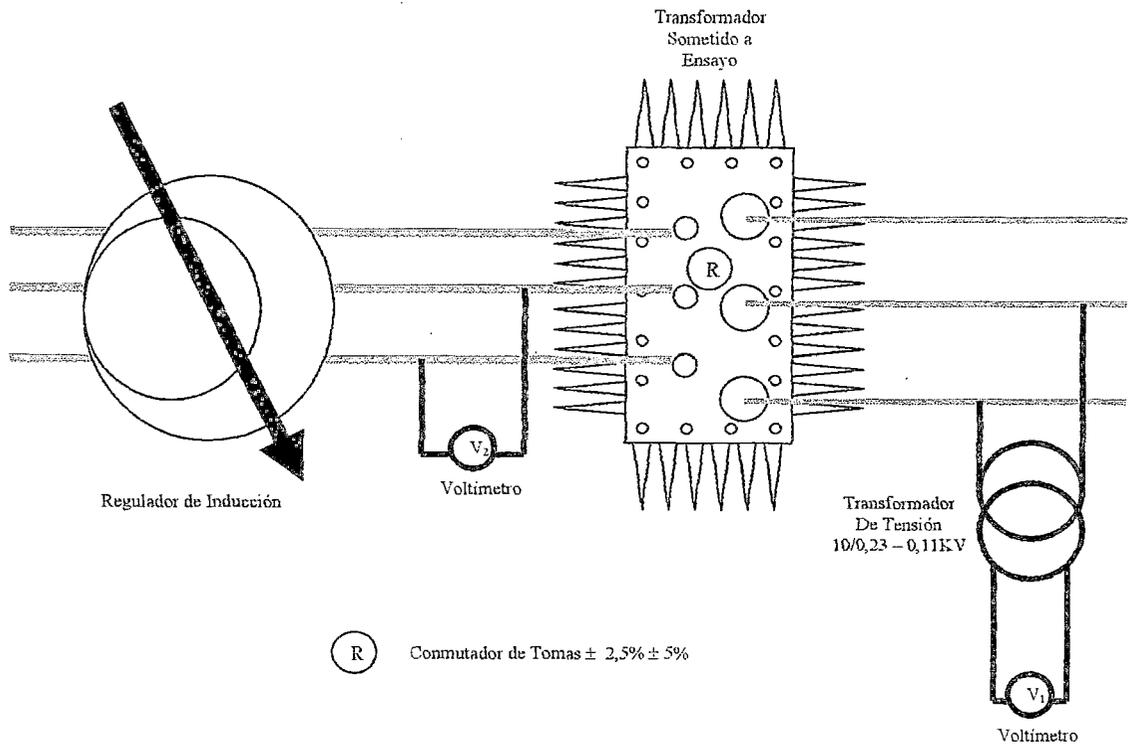
#### **5.1.-Ensayos de Rutina ó Individuales.-**

##### **5.1.a.-Medida de la Resistencia de los Arrollamientos .-**

Este ensayo se realiza con Corriente Continua , debe registrarse la resistencia de cada arrollamiento , los bornes entre los cuales se mide y la Temperatura de los Arrollamientos. Los efectos de Inducción deben disminuirse al mínimo en todas las medidas de resistencia. Durante la medida de la Resistencia en Frío habrá de anotarse el tiempo necesario para la estabilidad de la corriente medida para poder tenerlo en cuenta en la medida de la resistencia en caliente. Estas resistencias habrán de calcularse a su equivalente a las temperaturas de referencia correspondientes.

##### **5.1.b.-Medida de la Relación de Transformación y Grupo de Conexión .-**

Se debe medir la relación de Transformación en cada toma . Se puede utilizar un puente u otro que garantice la tolerancia establecida ó en caso contrario se realizará esta medición como se indica en la siguiente figura.



Las lecturas se realizan en los Voltímetros  $V_1$  y  $V_2$  ; correspondiente a cada toma del conmutador de manera que se han de obtener las siguientes relaciones :

$$N_1 = \frac{V_1 + 5\%}{V_2}$$

$$N_2 = \frac{V_1 + 2,5\%}{V_2}$$

$$N_3 = \frac{V_1}{V_2}$$

$$N_4 = \frac{V_1 - 2,5\%}{V_2}$$

$$N_5 = \frac{V_1 - 5\%}{V_2}$$

Estas relaciones nos darán la relación de Transformación para cada toma del conmutador . En cuanto a la medición del Grupo de Conexión ; puede también hacerse uso de un **Puente de Polaridad** .

### **5.1.c.-Medida debida a la Carga y la Tensión de Cortocircuito ( Pérdidas )**

La medida de las pérdidas debidas a la carga se efectuarán a Frecuencia Nominal , con una Corriente "  $I_E$  " , que está limitada así :  $25\% I_N \leq I_E \leq I_N$  . Se corrige el valor obtenido del Ensayo multiplicándolo por la relación obtenida entre el cuadrado de la Corriente Nominal y el cuadrado de la Corriente utilizada para el Ensayo . Estas pérdidas así obtenidas deben llevarse a la temperatura de Referencia apropiada ; tomando en cuenta que las pérdidas por efecto Joule (  $R I^2$  ) varía en razón directa de las otras pérdidas . Las medida de la Tensión de Cortocircuito , se realiza a la Frecuencia Nominal usando una Fuente de Tensión aproximadamente sinusoidal y equilibrada . La medida se puede efectuar con una corriente  $I_E$  , obtenido del Ensayo , multiplicandolo por la Relación entre la Corriente Nominal y la Corriente usada para el Ensayo . Esta Tensión así obtenida debe ser llevada a la temperatura de referencia apropiada según la Clase de calentamiento establecido.

### **5.1.c.-Medida de las Pérdidas en Vacío y la Corriente de Vacío.-**

Se realizaran estas medidas a Tensión y Frecuencia Nominales. La tensión aplicada debe ser prácticamente sinusoidal y equilibrada . La Tensión Nominal debe aplicarse a los Bornes de uno de los Arrollamientos , estando el otro arrollamiento en circuito abierto . Se mide la tensión aplicada con la ayuda de un voltímetro que mide el valor medio de la Tensión y está graduado para indicar el valor eficaz de una Tensión Sinusoidal que tenga el mismo valor medio . Cuando la Tensión Nominal aplicada no es sinusoidal , se mide las pérdidas en vacío (  $P_o$  ) a la Tensión Nominal (  $V_N$  ) utilizando el voltímetro que indica la Tensión Media . Se mide también el valor eficaz (  $V_f$  ) de la misma tensión . Las pérdidas en vacío con una tensión sinusoidal son dadas por la fórmula :

$$P = \frac{P_o}{P_1 + K P_2}$$

En donde :

$P_1$  = Proporción de Pérdidas por Histéresis

$P_2$  = Proporción de Pérdidas por Corriente Foucault

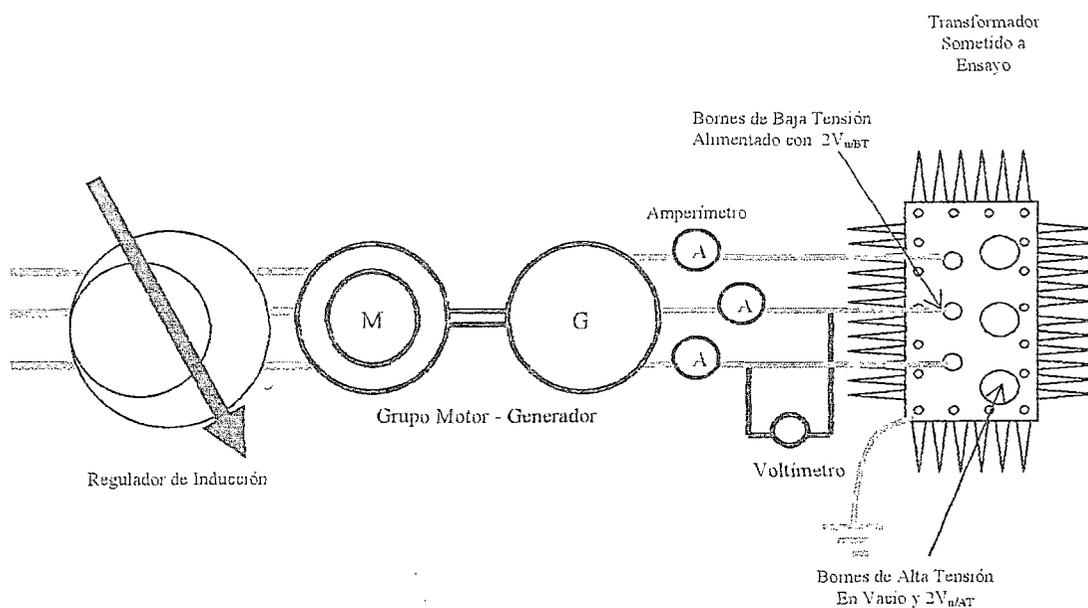
$$K = \left[ \frac{V_m}{V_f} \right]^2$$

Según ITINTEC 370.002 , se tiene que : Para las inducciones normalmente utilizadas , se toma los valores siguientes o los indicados por el Fabricante del Fierro Silicoso.

	$P_1$	$P_2$
PL. Laminadas en Frío	0,5	0,5
PL. Laminadas en Caliente	0,8	0,2

#### 5.1.d.-Ensayo de Tensión Inducida.-

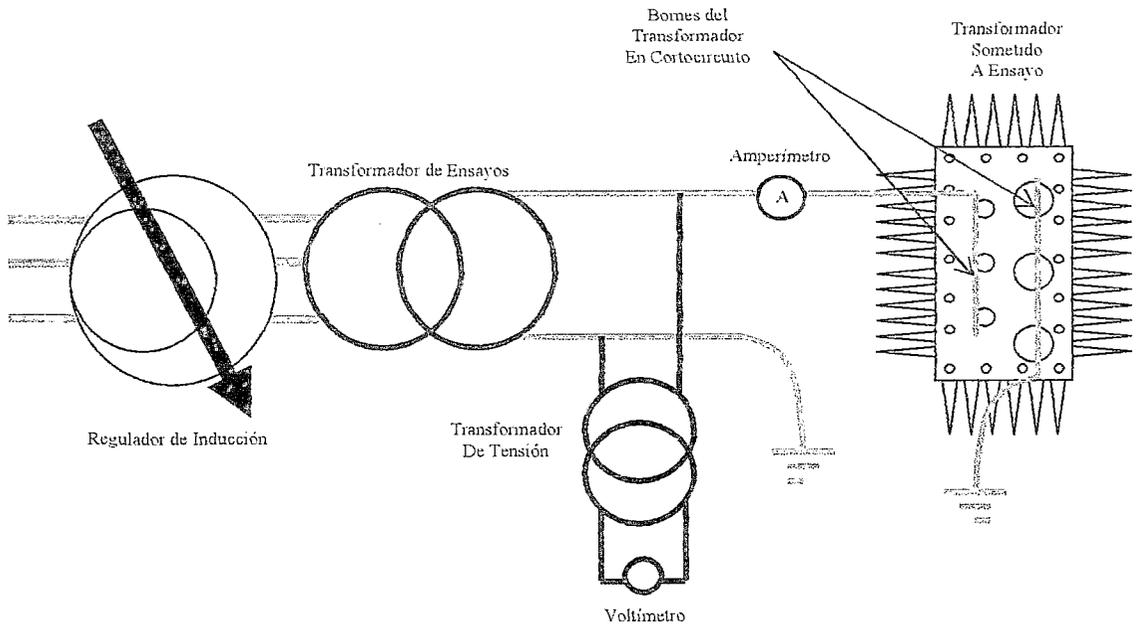
El objetivo de este Ensayo es probar la calidad del aislamiento entre : Espiras Bobinas , Tomas de Regulación , Conexiones de las Tomas y los Bornes de los Arrollamientos . El procedimiento consiste en aplicar una Tensión a los bornes de un arrollamiento del Transformador . La Tensión deberá ser lo más exacta posible , de forma sinusoidal y frecuencia suficientemente por encima de la frecuencia nominal , para evitar una excesiva corriente de excitación durante el ensayo . Normalmente usamos 120 Hz en este ensayo . Además deben tenerse precauciones contra excesivas tensiones en los arrollamientos . Se debe alimentar el Transformador a ensayar con 1/3 del valor de ensayo , elevándose esta a la tensión de ensayo lo más rápido posible sin que se interrumpa el circuito . Al final del ensayo se reduce rápidamente la tensión a un valor inferior a 1/3 de su pleno valor antes de desconectar . El ensayo dura 60 segundos para frecuencia  $f \leq 120$  Hz. El esquema correspondiente a este ensayo será :



#### 5.1.e.-Ensayo de Tensión Aplicada.-

Este ensayo se efectúa a con una tensión alterna monofásica de forma lo más cercana posible a la forma sinusoidal y a una frecuencia apropiada de por lo menos el 80% de la Nominal .Para el ensayo en nuestro transformador

utilizaremos 28 KV y 60 Hz . La tensión apropiada suministrada por una fuente separada , debe ser aplicada en forma gradual entre cada arrollamiento , sometido a ensayo y los otros arrollamientos ; el circuito magnético y el Tanque deberán estar conectados conjuntamente a un circuito de tierra . El ensayo debe empezar con una tensión eficaz , máxima igual a 1/3 del valor de la tensión de ensayo ; elevando esta tensión al valor apropiado lo más rápido que se pueda sin que el aparato interrumpa el circuito . Al final del ensayo se reduce rápidamente la tensión a un valor inferior a 1/3 de su pleno valor antes de desconectar. El esquema correspondiente a este ensayo será :



# *ANEXOS*

**Fórmulas Generalizadas Utilizadas**  
**para el Diseño y Cálculo del Transformador Trifásico de**  
**50 KVA , 10,000 ± 2.5% ± 5% , 60 Hz , Yd11 , ONAN , 1000 msnm**  
**Núcleo de 4 Escalones**

**Fórmulas Generalizadas para el Núcleo ( $S_n$  = Potencia Nominal en KVA )**

1.-Fórmula De Cálculo de la Tensión por Espira

$$E = 0.45 \sqrt{S_n} \quad (V/Esp)$$

2.-Fórmula De Cálculo para el Diámetro Exterior de la Columna del Núcleo

$$\phi = 42.17 \sqrt[4]{S_n} \quad (mm)$$

3.-Fórmula De Cálculo para la Sección Transversal de la Columna del Núcleo

$$A_{fc} = 1165 \sqrt{S_n} \quad (mm^2)$$

4.-Fórmula De Cálculo para el Ancho de los Escalones de la Columna del Núcleo

$$\text{Escalón IV} \quad A = 19.40 \sqrt[4]{S_n} \quad (mm)$$

$$\text{Escalón III} \quad B = 26.15 \sqrt[4]{S_n} \quad (mm)$$

$$\text{Escalón II} \quad C = 33.74 \sqrt[4]{S_n} \quad (mm)$$

$$\text{Escalón I} \quad D = 39.43 \sqrt[4]{S_n} \quad (mm)$$

5.-Fórmula De Cálculo para el Ancho de los Escalones de la Columna del Núcleo

$$\text{Escalón IV} \quad e4 = 2.32 \sqrt[4]{S_n} \quad (mm)$$

$$\text{Escalón III} \quad e3 = 3.79 \sqrt[4]{S_n} \quad (mm)$$

$$\text{Escalón II} \quad e2 = 5.27 \sqrt[4]{S_n} \quad (mm)$$

$$\text{Escalón I} \quad e1 = 14.76 \sqrt[4]{S_n} \quad (mm)$$

6.-Fórmula De Cálculo para el N° de Planchas por Escalón de la Columna del Núcleo

$$\text{Escalón IV} \quad \text{NPL4} = 7.97 \sqrt[4]{S_n} \quad (\text{Planchas})$$

$$\text{Escalón III} \quad \text{NPL3} = 13.02 \sqrt[4]{S_n} \quad (\text{Planchas})$$

$$\text{Escalón II} \quad \text{NPL2} = 18.11 \sqrt[4]{S_n} \quad (\text{Planchas})$$

$$\text{Escalón I} \quad \text{NPL1} = 50.72 \sqrt[4]{S_n} \quad (\text{Planchas})$$

7.-Fórmula De Cálculo para la Altura de la Ventana del Núcleo

$$H_w = 120 \sqrt[4]{S_n} \quad (\text{mm})$$

8.-Fórmula De Cálculo para la Altura del Yugo del Núcleo

$$h_y = 32.66 \sqrt[4]{S_n} \quad (\text{mm})$$

9.-Fórmula De Cálculo para la Distancia entre Columnas del Núcleo ( $K_n = 0.243$ )

$$M = 8.651 \left[ 4.566 + 1/K_v \right] \sqrt[4]{S_n} \quad (\text{mm})$$

10.-Fórmula De Cálculo para el Volumen del Núcleo

$$V_{fe} = 743 \sqrt[4]{S_n^3} \quad (\text{cm}^3)$$

11.-Fórmula De Cálculo para el Peso del Núcleo

$$P_{fe} = 5.68 \sqrt[4]{S_n^3} \quad (\text{Kgs.})$$

12.-Fórmula De Cálculo para las Pérdidas Activas en el Núcleo

$$W_{fe} = 14.76 \sqrt[4]{S_n^3} \quad (\text{Watts})$$

## Fórmulas Generalizadas para el Devanado ( $S_n$ = Potencia Nominal en KVA )

13.-Fórmula De Cálculo para la Altura del Devanado

$$H_{dev} = 120 \sqrt[4]{S_n} - 50 \quad (mm)$$

14.-Fórmula De Cálculo para la Altura Máxima de Capa del Devanado

$$H_{capa} = 120 \sqrt[4]{S_n} - 100 \quad (mm)$$

15.-Fórmula De Cálculo para el N° de Espiras Totales del Devanado

$$N_{espiras} = V_n / (0.45 \sqrt{S_n}) \quad (Espiras)$$

$V_n$  = Tensión Nominal del Devanado

16.-Fórmula De Cálculo para el N° Máximo de Espiras por Capa del Devanado

$$N_{espiras/capa} = (120 \sqrt[4]{S_n} - 100) / \phi_{cu} \quad (Espiras)$$

$\phi_{cu}$  = Diámetro Total del Conductor ( mm )

17.-Fórmula De Cálculo para el N° Máximo de Capas del Devanado

$$N_{capas} = V_n \phi_{cu} / \left[ (54 \sqrt[4]{S_n} - 45) \sqrt{S_n} \right] \quad (Capas)$$

18.-Fórmula De Cálculo para Tensión Máxima de Capa del Devanado

$$V_{capa} = \left[ \sqrt{S_n} (54 \sqrt[4]{S_n} - 45) \right] / \phi_{cu} \quad (Voltios)$$

19.-Fórmula De Cálculo para el Aislamiento Mínimo entre Capas del Devanado

$$V_{capa} = \left[ \sqrt{S_n} (14.4 \sqrt[4]{S_n} - 12) \right] / \phi_{cu} \quad (Voltios)$$

Nota.- Se ha considerado lo siguiente :

Rigidez Dieléctrica del Papel Presspan Embebido en Aceite = 7.5 KV/mm

## Conclusiones y Recomendaciones

Todo el proceso de Diseño y Cálculo que se ha desarrollado a lo largo de las páginas del presente trabajo, es un poco el resumen de los conocimientos Teóricos y Experimentales obtenidos en años dedicados a la Fabricación de Transformadores de Distribución de Energía Eléctrica, de diversas Potencias y Tensiones así como en el Campo de las Reparaciones de estos equipos. Después de leer estas informaciones, el lector podrá tener un conocimiento más profundo de lo que es un Transformador de Distribución, seguramente que a partir de aquí se podrá incentivar a los Egresados de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, para que se orienten a la investigación de otros equipos de uso Industrial y logren Fabricar los modelos iniciales que permitan su posible Producción a gran escala, si las necesidades de Desarrollo Industrial de nuestro País así lo requiriese. El gran compromiso que adquirimos los Profesionales de Ingeniería es el Desarrollar las Bases necesarias para implementar una infraestructura Industrial suficientemente sólida para el Desarrollo Económico de nuestra Sociedad en su conjunto y brindar la oportunidad a otros Profesionales para que su conocimiento se traduzca en aplicaciones realizables de modelos de Productos que mejoren nuestra Calidad de Vida, en general. El Conocimiento de las Leyes Matemáticas de las relaciones entre las partes de tal ó cuál Producto, es fundamental para poder diseñar y posteriormente calcular el mismo, además de mantener un perfecto equilibrio entre los aspectos Técnico y Económico que no pueden pasarse por alto, si queremos obtener la rentabilidad deseada. Me quedo con la esperanza, de haber aportado un granito de conocimiento al difundir estas experiencias, que estoy seguro; el lector de este Trabajo sabrá aprovechar para beneficio de otros y del suyo mismo. Mi agradecimiento permanente, a mis maestros que desinteresadamente supieron en su oportunidad transferir el conocimiento y experiencias suficientes para en su momento llegar al desarrollo de este Trabajo y a las personas que comprendieron mis propuestas y que permitieron el desarrollo de otros productos a partir de las fórmulas experimentales deducidas y que se materializaron en : Soldadoras de Arco Eléctrico, Soldaduras de Punto Eléctrico, Transformadores de Uso Doméstico, AutoTransformadores para Arranque de Motores Eléctricos, etc, y mi agradecimiento también a los lectores del presente trabajo por dedicarles su valioso tiempo a la Lectura de cada una de las páginas impresas anteriormente.

## **Bibliografía**

*M.P. Kostenko, L.M. Piotrovski : Máquinas Eléctricas, Tomo I, Editorial MIR, 1975*

*Robert Kuhn , VDI : Pequeños Transformadores, MARCOMBO S.A., Barcelona, España, 1976*

*Enrique Raz Oliva, Dr.Ing.Ind. : Transformadores De Potencia, De Medida y de Protección, MARCOMBO S.A., Barcelona, España, 1975*

*Juan Corrales Martín : Cálculo Industrial de Máquinas Eléctricas, Tomo I, MARCOMBO S.A., Barcelona, España, 1982*

*Catálogo : D.J.Ristuccia , El Transformador de Distribución CSP, 1981*

*Catálogo : Construcciones Electromecánicas Delcrosa, Transformadores de Distribución y Potencia, 1982*

*Catálogo : BBC – Industrial Cánepa Tabini S.A., Manual de Instrucción de Servicio y Mantenimiento, 1980*

*Catálogo : IMEC, Isolatori Passanti per Trasformatori ( Italia ), 1982*

*Catálogo : CED, Conmutatore Trifase Singolo ( Italia ), 1982*

*Catálogo : INDECO PERUANA S.A., Alambres Esmaltados para Uso Magnético, 1982*

*Catálogo : KREMPEL Electrical Insulations, Pressboard Insulation Class A, 1983*

*Catálogo : NIPPON STEEL, Magnetics Properties, 1983*