

**Universidad Nacional de Ingenieria**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**Electrica y Electronica**



**UN TRANSFORMADOR DE DISEÑO DE  
ENSAYO PARA PRUEBAS DIÉLECTRICAS  
CON TENSIONES DE HASTA 100 KV.**

**TESIS**

**Para Optar El Título Profesional de:**

**Ingeniero Electricista**

**Presentado por:**

**GERARDO DOMINGUEZ FRETTEL**

**LIMA - PERU - 1985**

## I N D I C E

	Página
INTRODUCCION .....	1
1. CUESTIONES GENERALES .....	1
1.1. VOLTAJES Y EQUIPOS PARA ENSAYOS EN CORRIEN TE AL TERNA, DEFINICIONES Y REQUERIMIENTOS	1
1.1.1. Definiciones .....	1
1.1.1.1. Descarga Disruptiva .....	1
1.1.1.2. Voltaje de Resistencia Nominal .....	1
1.1.1.3. Valor del Voltaje de Prueba .....	1
1.1.1.4. Descarga Superficial (Flashover) .....	1
1.1.1.5. Perforación .....	2
1.1.1.6. Voltajes de Prueba a Frecuencia Industrial de 1 minuto de duración en Muestras Secas y Mojadas .....	2
1.1.1.7. Tensión de Contorno a Frecuencia Industrial en Seco y Bajo Lluvia .....	2
1.1.1.8. Tensión de Perforación en aceite a Frecuen- cia Industrial .....	2
1.1.1.9. Condiciones Atmosféricas Normalizadas .....	3
1.1.2. Requerimientos para Ensayos en C.A. a Altos Voltajes .....	3
1.1.2.1. Requerimientos para el Voltaje de Ensayo ..	3
1.1.2.2. Generación de Voltajes de Ensayo .....	3
1.1.2.3. Requerimientos para el Circuito de Ensayo - del Transformador .....	4
1.2. SELECCION DE UN SISTEMA DE ENSAYO PARA C.A. Y DETERMINACION DE LA POTENCIA NOMINAL DEL TRANSFORMADOR .....	4

	<u>Página</u>
1.2.1. Selección de un Sistema de Ensayo en C.A.	4
1.2.2. Determinación de la Potencia Permanente del Transformador .....	5
1.3. ENSAYOS DIELECTRICOS EN AISLADORES PARA LINEAS AEREAS DE 1 KV Y SUPERIORES. DATOS DE PLACA DEL TRANSFORMADOR .....	7
1.3.1. Reglas Generales para Ensayos a Frecuencia Industrial .....	7
1.3.2. Clasificación de los Ensayos .....	9
1.3.2.1. Ensayos del Grupo I .....	9
1.3.3. Datos de Placa .....	11
2. DISEÑO DEL CIRCUITO MAGNETICO .....	12
2.1. GENERALIDADES .....	12
2.2. MATERIAL MAGNETICO. ARREGLO DE LAMINAS ...	12
2.2.1. Material Magnético .....	12
2.2.2. Arreglo de Láminas .....	12
2.3. SECCION DEL NUCLEO .....	13
2.4. CARACTERISTICAS DEL TRANSFORMADOR .....	14
2.5. CARGAS ESPECIFICAS .....	15
2.5.1. Densidad Magnética ( $B_m$ ) .....	15
2.5.2. Densidad de Corriente (J) .....	15
2.5.3. Valores Iniciales de Densidad Magnética y Densidad de Corriente .....	15
2.6. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO .....	15
2.7. TENSION UNITARIA ( $E_t$ ) .....	17
2.8. CALCULO DE LA SECCION DEL NUCLEO .....	18
2.9. CALCULO DEL AREA DE VENTANA .....	19

	<u>Página</u>
2.10.	CALCULO DEL DIAMETRO DEL CIRCULO CIRCUNSCRITO AL NUCLEO ..... 19
2.11.	DETERMINACION DEL NUMERO DE LAMINAS DE FIERRO DEL NUCLEO ..... 19
2.12.	CALCULO DEL AREA REAL DEL NUCLEO ( $A_{iC}$ ) .... 21
2.13.	INDUCCION MAGNETICA CORREGIDA ( $B_{mC}$ ) ..... 21
2.14.	AREA DE VENTANA DE NUCLEO CORREGIDA ( $A_{wC}$ ) . 21
2.15.	F.E.M. UNITARIA CORREGIDA 21
2.16.	CALCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA VENTANA .. 22
2.16.1.	Altura de Ventana (H) ..... 22
2.16.2.	Ancho de Ventana (W) 22
2.16.3.	Esquema del Circuito Magnético ..... 23
2.17.	PESO TOTAL DEL FIERRO ..... 24
2.18.	CALCULO DE LAS DIMENSIONES DE LAS LAMINAS DE FIERRO DEL CIRCUITO MAGNETICO ..... 24
3.	DISEÑO DE LOS DEVANADOS Y DEL AISLAMIENTO 27
3.1.	FACTORES DE DISEÑO DE LOS DEVANADOS ..... 27
3.1.1.	Resistencia Dieléctrica ..... 27
3.1.2.	Refrigeración de las Bobinas ..... 28
3.1.3.	Reactancia de Dispersión ..... 28
3.2.	DISPOSICION DE ARROLLAMIENTOS ..... 29
3.3.	TIPOS DE DEVANADOS 29
3.3.1.	Devanado para Bajo Voltaje ..... 29
3.3.2.	Devandos para Altos Voltajes ..... 31
3.4.	CRITERIOS PARA EL CALCULO DEL DEVANADO DE ALTA TENSION ..... 31
3.4.1.	Intensidad Uniforme de Campo Radial ..... 32

	<u>Página</u>
3.4.2. Gradiente Axial Uniforme .....	33
3.5. DISEÑO DEL AISLAMIENTO .....	34
3.5.1. Condiciones Generales para la Descarga Disruptiva en Sistemas Aislantes Mixtos .....	34
3.5.2. Influencias Externas para las Descargas Disruptivas .....	35
3.5.3. Tipos de Disturbios .....	35
3.6. PROTECCION INTERNA DEL TRANSFORMADOR .....	37
3.6.1. Blindaje Electrostático contra la Penetración de Sobretensiones al Circuito Primario .....	37
3.6.2. Placa Estática para Uniformizar los Esfuerzos Dieléctricos en el Devanado de Alta Tensión .....	39
3.7. CALCULO DEL NUMERO DE ESPIRAS DEL PRIMARIO Y DEL SECUNDARIO .....	40
3.7.1. Cálculo de las Tensiones de Vacío Primaria ( $E_1$ ) y Secundaria ( $E_2$ ) .....	40
3.7.2. Determinación del Número de Espiras .....	41
3.8. CALCULO DEL ARROLLAMIENTO DE BAJA TENSION - (B.T.) .....	41
3.8.1. Descripción .....	41
3.8.2. Cálculo de cada Media Bobina .....	41
3.8.3. Características del Arrollamiento de B.T. ...	43
3.8.4. Cálculo de la Resistencia del Devanado de B.T. ....	43
3.9. CALCULO DEL ARROLLAMIENTO DE ALTA TENSION - (A.T.) .....	44
3.9.1. Cálculo de la Sección del Conductor en A.T. ....	44

	<u>Página</u>
3.9.2. Cálculo del Número de Capas .....	46
3.9.3. Cálculo de las Dimensiones del Devanado de A.T. ....	46
3.9.4. Cálculo de la Resistencia del Devanado de - A.T. ....	48
3.9.5. Dimensiones Adoptadas de los Arrollamientos de A.T. y B.T.	49
3.9.6. Cálculo de las Reactancias .....	51
4. COMPOR TAMIENTO DEL TRANSFORMADOR EN SERVICIO DE CORTA DURACION Y SERVICIO CONTINUO .....	56
4.1. SERVICIO A CONDICIONES NOMINALES .....	56
4.1.1. Pérdidas en el Cobre .....	56
4.1.2. Pérdidas en el Fierro a Tensión Nominal ...	60
4.1.3. Cálculo de la Corriente Magnetizante .....	62
4.1.4. Potencia Reactiva en Vacío .....	64
4.2. CALCULO DE ESFUERZOS TERMICOS .....	65
4.2.1. Cargas Básicas para una esperanza de vida - normal del Transformador .....	65
4.2.2. Sobretemperatura Maxima Promedio de los Arro llamientos. Sobretemperatura Máxima Prome- dio del Aceite.....	65
4.2.2.1. Dimensiones del Tanque y su Sobretemperatura	66
4.2.2.2. Sobretemperatura del Aceite	70
4.2.2.3. Sobretemperatura del Cobre ( $\Delta T_{cu}$ )	71
4.2.2.4. Temperatura de la Región más caliente .....	73
4.2.3. Sobrecarga Límite para una esperanza de vi da normal .....	74

	<u>Página</u>
4.2.4. Sobrecarga de Corta Duración (Ensayos de hasta 30 minutos de duración) .....	76
4.2.4.1. Elevación de Temperatura del Aceite de la capa superior para una Sobrecarga Continua.	76
4.2.4.2. Cálculo de la Constante de Tiempo a Condiciones Nominales	77
4.2.4.3. Sobretemperatura del Aceite de la Capa Superior para Ensayos de Corta Duración .....	79
4.3. COMPROBACION DE ESFUERZOS EN LOS DIELECTRICOS .....	80
4.3.1. Esfuerzos Radiales en los Dieléctricos entre Arrollamientos	80
4.3.2. Esfuerzos en los Dieléctricos en el Devanado de A.T.	84
4.3.2.1. Cálculo de la Tensión Inicial de Efluvios	84
4.3.2.2. Tensión Inicial de Descarga Rampante Ramificada .....	86
4.3.3. Esfuerzos en los Dieléctricos entre el Devanado de A.T. y Masa .....	87
4.4. DISTRIBUCION DE LA ONDA DE SOBREVOLTAJE ...	88
4.4.1. Cálculo de la Capacidad Serie .....	89
4.4.2. Cálculo de la Capacitancia a Tierra .....	90
4.4.3. Cálculo del Factor de Distribución Inicial de Voltaje .....	90

CONCLUSIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANEXO : Materiales magnéticos, eléctricos, dieléctricos y otros.

## I N T R O D U C C I O N

El presente trabajo se refiere al Diseño de un Transformador de Ensayo para Pruebas Dieléctricas en muestras aislantes y aparatos, con tensiones de salida relativamente altas (alrededor de 50 y 100 KV, respectivamente).

En él se intenta, dar un estudio detallado de los criterios que se siguen para el cálculo de las diferentes componentes del transformador (núcleos, devanados, etc.), considerando genéricamente los fenómenos presentes en las altas tensiones. Sin embargo, el proyecto no cubre toda la problemática que implica la generación de voltajes elevados, como por ejemplo, el criterio adicional de compensar la energía reactiva capacitiva que se absolvería durante la carga de un transformador para tensiones mayores de 200 KV en el secundario. De ahí que el diseño se sujete a las necesidades y limitaciones del caso particular que se trata.



# C A P I T U L O I

## CUESTIONES GENERALES

## 1. CUESTIONES GENERALES

### 1.1. VOLTAJES Y EQUIPO PARA ENSAYOS EN CORRIENTE ALTERNA, DEFINICIONES Y REQUERIMIENTOS

#### 1.1.1. Definiciones

Las definiciones necesarias para el presente proyecto, han sido tomadas de las normas técnicas IEC, Publicación: 60 y 87, [10R], [11R], que concuerda con la VDE 0433, Part 1, (Generación y uso de altos voltajes para propósitos de ensayos).

##### 1.1.1.1. Descarga Disruptiva

Es el fenómeno asociado a la falla de un aislante bajo esfuerzos eléctricos, por el cual se establece la descarga entre los electrodos a través del aislante en ensayo, reduciéndose el voltaje a cero o aproximadamente cero.

##### 1.1.1.2. Voltaje de Resistencia Nominal

El voltaje de resistencia nominal de un objeto en prueba, es un valor de voltaje especificado, el cual caracteriza el aislante del objeto con respecto al ensayo de resistencia dieléctrica.

##### 1.1.1.3. Valor del Voltaje de Prueba

Está definido por su valor pico entre  $\sqrt{2}$ .

##### 1.1.1.4. Descarga Superficial (Flashover)

Es una descarga a través del interfase,

tomando la forma de un arco o chispa o un conjunto de ellos, conectando las partes de un aislador, el cual está normalmente operando a un voltaje, entre ellos.

1.1.1.5. Perforación

Es una destrucción local o total del aislante, causado por una descarga que ha pasado a través de ella.

1.1.1.6. Voltajes de Prueba a Frecuencia Industrial de 1 minuto de duración en Muestras Secas o Mojadas

Es un voltaje a frecuencia industrial, el que puede resistir un aislador de una cadena, o una cadena, o un aislador rígido, durante 1 minuto, sea seco o mojado, bajo condiciones fijadas por la norma respectiva, sin flashover o perforación.

1.1.1.7. Tensión de Contorno a Frecuencia Industrial en Seco y Bajo Lluvia.

Es el voltaje a frecuencia industrial, el cual causa descargas superficiales en la unidad o en la cadena aislante, o en el aislador rígido bajo condiciones prescritas más adelante.

1.1.1.8. Tensión de Perforación en Aceite a Frecuencia Industrial

Es el voltaje de un aislador por el que se causa su destrucción, dentro del seno del aceite, para evitar descargas de contorno.

#### 1.1.1.9. Condiciones Atmosféricas Normalizadas

Para los propósitos de ensayos de aisladores para líneas aéreas, son:

Temperatura del ambiente: 20 °C

Presión barométrica 1014 milibar (760 mm Hg).

Humedad, 11 gramos de agua por metro cúbico, correspondiendo a 63 % de humedad relativa a 20 °C.

#### 1.1.2. Requerimientos para Ensayos en A.C. a Altos Voltajes

Los requerimientos para los ensayos de dieléctricos han sido tomados de la norma IEC, [11R].

##### 1.1.2.1. Requerimientos para el Voltaje de Ensayo

La frecuencia del voltaje de ensayo, estará en el rango de 40 a 60 ciclos por segundo. La forma de onda del voltaje será aproximadamente senoidal, con sus medios ciclos semejantes y con una razón de valor pico a valor eficaz, igual a  $\sqrt{2}$  con un margen de + 5%.

##### 1.1.2.2. Generación de Voltajes de Ensayo

Una de las posibilidades de generación de altos voltajes, es mediante el transformador de ensayos (alto voltaje).

Para reducir los esfuerzos eléctricos sobre el transformador, causado por descargas parciales sobre el objeto en ensayo, puede arreglarse una resistencia en el circuito de alto voltaje, en serie con el objeto que se prueba. Su valor será tal, que la caída de tensión que ocasione no exceda

del 3% del voltaje de ensayo, siendo recomendable que no sea mayor de 10 K $\Omega$ .

### 1.1.2.3. Requerimientos para el Circuito de Ensayo del Transformador

El voltaje en el circuito de ensayo, será suficientemente estable, para no ser prácticamente afectado, por las breves caídas de tensión en el objeto de prueba, debido a descargas parciales o predescargas, de forma que la medición del voltaje de resistencia y el voltaje de descarga disruptiva, no sea influenciado.

La estabilidad de voltaje requerido, se logra simultáneamente, si:

La capacitancia total del objeto en ensayo o cualquier otro capacitor adicional, no sea menor que 1000 pF.

La corriente de estado estacionario suministrado por el transformador, si el objeto en prueba es cortocircuitado al voltaje de ensayo y para muestras secas o pequeñas (sólidos o líquidos), no será menor que 0.1 Amp.

## 1.2. SELECCION DE UN SISTEMA DE ENSAYO PARA CORRIENTE ALTERNATA Y DETERMINACION DE LA POTENCIA NOMINAL DEL TRANSFORMADOR DE ENSAYO

### 1.2.1. Selección de un Sistema de Ensayo en C.A.

Para seleccionar un sistema de ensayo en C.A. es recomendable seguir los siguientes criterios:

Seleccionar el propio voltaje nominal de salida. Ideal

del 3% del voltaje de ensayo, siendo recomendable que no sea mayor de 10 K $\Omega$ .

#### 1.1.2.3. Requerimientos para el Circuito de Ensayo del Transformador

El voltaje en el circuito de ensayo, será suficientemente estable, para no ser prácticamente afectado, por las breves caídas de tensión en el objeto de prueba, debido a descargas parciales o predescargas, de forma que la medición del voltaje de resistencia y el voltaje de descarga disruptiva, no sea influenciado.

La estabilidad de voltaje requerido, se logra simultáneamente, si:

La capacitancia total del objeto en ensayo o cualquier otro capacitor adicional, no sea menor que 1000 pF.

La corriente de estado estacionario suministrado por el transformador, si el objeto en prueba es cortocircuitado al voltaje de ensayo y para muestras secas o pequeñas (sólidos o líquidos), no será menor que 0.1 Amp.

### 1.2. SELECCION DE UN SISTEMA DE ENSAYO PARA CORRIENTE ALTERNIA Y DETERMINACION DE LA POTENCIA NOMINAL DEL TRANSFORMADOR DE ENSAYO

#### 1.2.1. Selección de un Sistema de Ensayo en C.A.

Para seleccionar un sistema de ensayo en C.A. es recomendable seguir los siguientes criterios:

Seleccionar el propio voltaje nominal de salida. Ideal

mente, el sistema de ensayo de alto voltaje, debe escogerse, para operación normal cercano al voltaje máximo de salida. Sin embargo debe ser usado para aplicar ensayos de sobrepotencial a muchas muestras diferentes, requiriendo así, un amplio rango de voltajes de ensayos, bajo criterios básicos de obtener las mediciones con exactitud y estabilidad del sistema de ensayo.

- Determinar los KVA de salida requeridos.

Desde que el alto voltaje es aplicado entre dos electrodos o entre un conductor y un punto aterrado, a través del aislante en ensayo, fluye una corriente muy baja, fundamentalmente capacitiva, con una pequeña componente resistiva, expresada usualmente en relación a la corriente como  $\text{tg}\delta$ . Por tanto, la capacitancia del objeto de ensayo, es el factor principal en la determinación de los KVA nominales.

#### 1.2.2. Determinación de la Potencia Permanente del Transformador

La carga del transformador de ensayo, lo constituyen generalmente los dieléctricos. La capacitancia del circuito de ensayo está constituido, además de la capacitancia del objeto de ensayo, de la capacitancia propia del transformador, y la originada por las pantallas y conexiones [11R].

La potencia de salida del transformador, puede evaluarse

por la expresión:  $S = 2 \pi f V^2 \times C \times 10^{-9}$

donde:        S = potencia en KVA  
              f = frecuencia en cps  
              V = voltaje de prueba en KV, eficaces en los -  
                  terminales del transformador.  
              C = capacitancia de carga en pF.

Aunque acerca de la capacitancia de las muestras para ensayos, existe cierta información [11R]; las capacitancias propia del transformador y de las pantallas, es difícil conocer sus valores exactos, a menos que se tratará de mejorar el diseño de un prototipo.

De ahí que las distintas normas técnicas (ASTM, VDE, IEC), recomiendan rangos de potencia según la clase de muestras que se pretende ensayar.

El presente estudio, en primera instancia, fué dado para el ensayo de aisladores en "seco". Así que el ensayo de aisladores para líneas aéreas a frecuencia industrial, con voltajes de resistencia y de contorno, requiere una potencia tal, que se tenga una corriente permanente de cortocircuito en el lado de A.T. de 0.1 Amp., según el IEC-87, [12R] Considerando también, cierta parte de la potencia para suministrar la corriente de carga capacitiva del transformador, es menester contar con 20 KVA para la tensión de salida de 100 KV, que cubre tensiones de ensayo de aquellas muestras para tensiones nominales de servicio de hasta 20 KV.

Con la finalidad de aumentar el uso del transformador para



el ensayo de aisladores bajo lluvia simulada, se optó finalmente en considerar como potencia permanente para el transformador 30 KVA y para tensión de salida de hasta 100 KV.

La relativa alta tensión en el diseño del transformador, que motiva un alto costo del mismo, así como de la necesidad de contar generalmente con un aparato que pueda servir para ensayos de muestras distintas, ha motivado diseñar el transformador para dos niveles de tensión. En consecuencia, con el deseo de utilizar el transformador para el ensayo de muestras pequeñas (ejm.: trozos de cables, transformadores de pequeña potencia, etc.), se calculó, el transformador con dos bobinas idénticas primarias a fin de conseguir por un lado, la potencia y tensión mencionada más arriba, shuntando las bobinas primarias y también la mitad de la potencia y tensión de salida, es decir: 15 KVA y 50 KV, respectivamente, mediante una conexión en serie de las bobinas primarias. En ambos casos  $V_1 = 220$  Volts.

### 1.3. ENSAYOS DIELECTRICOS EN AISLADORES PARA LINEAS AEREAS DE 1 KV Y SUPERIORES

Para mostrar la aplicación del transformador, recurrimos a las recomendaciones técnicas para el ensayo de aisladores para líneas aéreas, según la IEC 87, [12R].

#### 1.3.1. Reglas Generales para Ensayos a Frecuencia Industrial

a) La frecuencia del voltaje de prueba, será entre -

15 y 100 ciclos por segundo y la onda de voltaje será aproximadamente senoidal.

b) Los voltajes serán medidos por la separación en tre electrodos esféricos o por cualquier otro método que arrojen resultados que no difieran por más del 3% de los obtenidos por el método de esferas.

c) Los valores medidos de voltajes, serán tomados o convertidos a condiciones normalizadas de presión y temperatura (760 mm/Hg, 20 °C respectivamente).

d) Las pruebas serán realizadas, preferiblemente ba jo condiciones normalizadas de humedad atmosférica (11 gra mos por metro cúbico), o en otro caso aplicar factores de corrección. Los ensayos de descargas de contorno en ambien te seco a frecuencia industrial, no será realizado cuando la humedad relativa del aire, excede de 95%.

e) El transformador y el circuito de ensayo será tal, que la corriente alterna en estado estacionario al voltaje de prueba presumido, cuando el aislador es corto - circuitado, no será menor que 0.1 amperios.

Cuando la medición directa de la corriente de cortocircui- to al voltaje de prueba nominal, no es práctico, debido al posible daño del equipo, es permisible extrapolar la corrien- te, haciendo la medición a una fracción conocida, no menor que 1/10 del máximo voltaje a circuito abierto del trans- formador.

### 1.3.2. Clasificación de los Ensayos

- Ensayos del Grupo I. Estos ensayos son entendidos para verificar las características de un elemento o un conjunto de una cadena aislante, o de un aislador rígido, los cuales dependen solamente de la forma y tamaño del aislador y de sus características. Son hechas una sola vez en el primer lote ofertado.

- Ensayos del Grupo II. Sirven para la verificación de otras características de una componente de la cadena aislante o aislador rígido y de la calidad de los materiales usados. Son realizados en aisladores, tomados al azar de cada lote ofertado.

- Ensayos del Grupo III. Sirven para los propósitos de eliminación de aisladores con defectos de fabricación. Son realizados en cada aislador ofertado.

#### 1.3.2.1. Ensayos del Grupo I

De todas las pruebas de este grupo, trataremos sólo uno de ellas, relacionado con la capacidad del transformador de ensayo en cuestión: Ensayos a frecuencia industrial de 1 minuto de duración, en muestras secas. Ésta prueba se realiza en aisladores secos y limpios.

El voltaje de ensayo de 1 minuto a ser aplicado al aislador será determinado a partir del voltaje de prueba de 1 minuto a frecuencia industrial especificado, tomando en cuenta las condiciones atmosféricas.

El aislador no deberá sufrir descargas superficiales, durante el ensayo.

Si uno o más aisladores no cumplen con este requerimiento, el aislador será considerado que no cumple con las especificaciones técnicas.

Si es especificado por el comprador, el voltaje de contorno en seco del aislador, será determinado aumentando el voltaje a partir del valor igual al 75% del voltaje de prueba - de 1 minuto en seco, en una razón constante, hasta alcanzar el voltaje de contorno entre 5 y hasta 30 segundos.

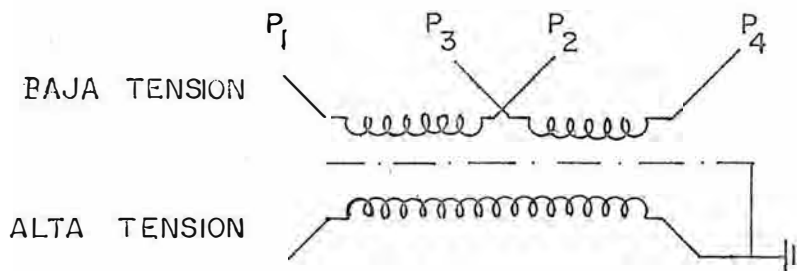
1.3.3. DATOS DE PLACA

TRANSFORMADOR MONOFASICO

REFRIGERACION NATURAL POR ACEITE

SERVICIO CONTINUO: 30 KVA

\* SERVICIO DE CORTA DURACION (15 Min.): 60 KVA



TENSION KVA PRIMARIA	KVA SECUNDARIA	POTENCIA KVA	CONEXIONES EN B.T.
0.220	50	15	P <sub>2</sub> -P <sub>3</sub>
0.220	100	30 60*	P <sub>1</sub> -P <sub>3</sub> , Y P <sub>2</sub> -P <sub>4</sub>

FRECUENCIA : 60 C.P.S.

VOLTAJE DE IMPEDANCIA A

CONDICIONES NOMINALES : Aproximadamente 6%

SOBRETENPERATURA MAXIMA DEL ACEITE : 1. Servicio continuo: Aproximadamente 20 °C  
2. Servicio de corta duración aproximadamente 38 °C

VOLTAJE DE PRUEBA A 60 Hz, DURANTE 1 MINUTO : 1. Al primario 1.5 KV  
2. Al secundario 125 KV

# C A P I T U L O   I I

## DISEÑO DEL CIRCUITO MAGNETICO

## 2. DISEÑO DEL CIRCUITO MAGNETICO

### 2.1. GENERALIDADES

El circuito magnético comprende el conjunto de láminas de fierro aisladas, unas de otras y unidas rígidamente formando las columnas, los yugos y la estructura de unión y mordaza.

### 2.2. MATERIAL MAGNETICO - ARREGLO DE LAMINAS

#### 2.2.1. Material Magnético

El material utilizado es una aleación de fierro y silicio, de alta calidad, laminada en frio. El sílice reduce la resistencia viscosa a la magnetización, histéresis y también evita que la pérdida aumente con el tiempo.

#### 2.2.2. Arreglo de Láminas

Las láminas son colocadas por "entrelaminación" con la finalidad de colocar puentes en los entrehierros para el flujo magnético, es decir, los entrehierros de una capa de láminas, es cubierta por la capa siguiente inmediata. La entrelaminación permite el armado y desarmado del yugo con facilidad.

A fin de mantener las especiales características del fierro orientado, es decir una alta permeabilidad y pérdida inferior, las chapas deben cortarse y ensamblarse de manera que siempre el flujo siga la orientación del laminado del material. De ahí que pueden utilizarse los siguientes arreglos de láminas. El segundo tipo de chapas es usado para núcleos

donde no hay mucha exigencia, con respecto a la corriente de magnetización alta [1L].

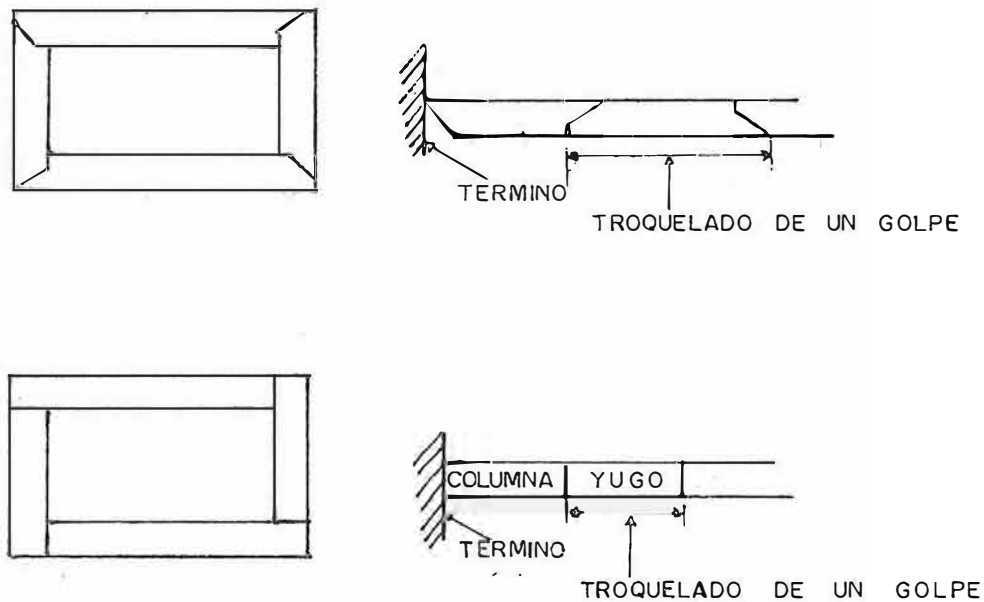
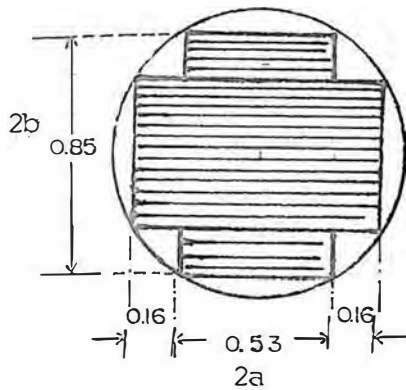


FIG. 2.1 - TROQUELADURAS RECORTADAS DE UNA TIRA CONTINUA

### 2.3. SECCION DEL NUCLEO

En los transformadores de ensayo, se usan núcleos de sección escalonado [1R]. En los de menor capacidad, la sección puede ser cruciforme y a mayores capacidades de varios escalones. Con estas secciones se reduce la longitud de la espira media de los devanados y por consiguiente las pérdidas Joule. Para nuestro caso, tomamos una sección cruciforme [2L], tal como muestra la figura 2.2.





% DEL AREA DEL CIRCULO CIRCUNSCRITO		SECCION CRUCI-FORME
AFE	Bruta	79
	Neta	71
N° de Paquetes		3
AFE = $Kd^2$ ; K =		0.56

FIG. 2.2 - SECCION DEL NUCLEO

#### 2.4. CARACTERISTICAS DEL TRANSFORMADOR

- Transformador monofásico para prueba de tensión - aplicada a frecuencia industrial en dieléctricos sólidos.

POTENCIA KVA	TENSION DE ENTRADA KV	TENSION DE SALIDA KV	COPRIENTE DE SALIDA MAX. A	SERVICIO	FRECUENCIA Hz
30	0.220	100	0.3	Continuo	60
15	0.220	50	0.3	Continuo	60
60	0.220	100	0.6	Por 15 min. cada 8 hras. sin servicio	60

Refrigeración natural por aceite

Otras características relacionadas con el circuito magnético, son:

Tipo de lámina            Z10, Acero de grano orientado (véase el anexo), de espesor 0.35 mm.

Espesor de lámina        0.35 mm.

## 2.5. CARGAS ESPECIFICAS

### 2.5.1. Densidad Magnética ( $B_m$ )

Como se muestra en el anexo I, el material magnético es de alta calidad y sus pérdidas específicas aún a 1.7T es baja. Pero a fin de tener una onda de voltaje de salida sinusoidal [3L], y considerando la estadística de un bajo porcentaje de armónicos, para dicho material magnético al valor de inducción magnético de 1.4T, tomamos este valor como un valor de partida.

### 2.5.2. Densidad de Corriente (J)

Atendiendo al tipo de servicio del transformador (ensayos de rutina) y al tipo de los arrollamientos a utilizar (mayor disipación de pérdidas por unidad de área), y siendo la refrigeración por aceite y natural, la densidad de corriente puede tomarse entre 2.1 y 2.9 A/mm<sup>2</sup>, véase [2L]

### 2.5.3. Valores Iniciales de Inducción Magnética y de Densidad de Corriente

De acuerdo a lo mencionado en los acápites anteriores, los valores de partida para los cálculos, son:

$$B_m = 1.4 \text{ Wb/m}^2 \quad \text{y} \quad J = 2.5 \text{ Amp/mm}^2$$

## 2.6. FUNDAMENTO DEL DISEÑO

El fundamento del diseño es la selección de la sección neta del núcleo  $A_i$  y el área neta de la ventama  $A_w$  de acuerdo a los valores fijados de la inducción magnética, la den

sidad de corriente y el factor de espacio de ventana.

La sección del núcleo depende del diámetro del círculo circunscrito "d" y de la forma del núcleo.

El área de ventana  $A_w$ , encierra todas las espiras del primario y secundario. Sin embargo, una pequeña parte de  $A_w$  ocupa el cobre, el resto es ocupado por el aislante, separadores, espacios libres. De ahí que para altos voltajes y pequeños transformadores, mucho más pequeño será el área activa de la ventana  $K_w A_w$ , [2L].

La f.e.m. unitaria está dada por la ecuación:

$$E_t = 4.44 f \phi_m = 4.44 f B_m A_i \text{ voltios}$$

El área de cobre dentro de la ventana es:

$$a_1 N_1 + a_2 N_2 = K_w A_w$$

Como:  $a_1 N_1 = a_2 N_2$  y  $I_1 = a_1 J = (K_w A_w J) / 2 N_1$

De modo que para los ampere-espira del primario (o secundario)

$$NI = N_1 I_1 = N_2 I_2 = \frac{1}{2} K_w \cdot A_w \cdot J$$

La capacidad del transformador en volt-ampere:

$$S = V_1 I_1 = (V_1 / N_1) N_1 I_1 = E_t \cdot N_1 I_1$$

$$S = 4.44 \times f \times B_m \times A_i \times \frac{1}{2} \times K_w \times A_w \times J$$

Es decir:

$$S = 2.22 f B_m A_i K_w A_w J \times 10^6 \text{ Volt-Amp.}$$

(2.1)

Con respecto a las demás cantidades, la aclaración es:

$$N_1, N_2 = \text{número de espiras primarias}$$

$I_1, I_2$  = corriente en ampere en los devanados

$f$  = frecuencia en Herzios

$A_i$  = área del núcleo en metros cuadrados

$A_w$  = área de ventana en metros cuadrados

$K_w$  = factor de espacio de ventana que es función de la potencia y de la tensión de salida = 0.045

$J$  = densidad de corriente en  $MA/m^2 = A/mm^2$

$B$  = inductancia magnética en  $Wb/mm^2$

## 2.7. TENSION UNITARIA ( $E_t$ )

Como se deduce del articulo anterior, el flujo  $\phi_m$  de termina la sección del núcleo y los ampere-espira  $NI$  fija el total del área de cobre. De ahí que la razón  $r = \phi_m / (NI)$ , será constante para un transformador de un tipo dado, servicio y método de construcción.

Sabemos por la expresión de la potencia:

$$\begin{aligned} S &= VI = 4.44 f N \phi_m \times I \times 10^{-3} \text{ KVA} \\ &= 4.44 f (\phi_m^2 / r) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

de donde:

$$\phi_m = \sqrt{S} \times \sqrt{(r \times 10^3) / 4.44 f}$$

Reemplazando en la fórmula para la f.e.m. unitaria citada en 2.6, se tiene:

$$E_t = 4.44 f \sqrt{S} \times \sqrt{(r \times 10^3 / 4.44 f)} = \sqrt{S} \times \sqrt{4.44 \times f \times r \times 10^3}$$

$$E_t = K \sqrt{S} \tag{2.2}$$

donde:

$K = \sqrt{4.44 \times f \times r \times 10^3}$  depende del material, tipo de transformador, costos, etc.

S, en KVA.

Para la potencia en KVA, la estadística de diseño [2L], muestra valores para K, según la siguiente tabla:

T I P O	K
Transf. Trifásico tipo acorazado	1.3
Transf. Trifásico de potencia tipo núcleo	0.6 - 0.7
Transf. Trifásico de distribución tipo núcleo	0.45
Transf. Monofásico tipo acorazado	1.0 - 1.2
Transf. Monofásico tipo núcleo	0.75- 0.85

Tomamos  $K = 0.82$

Luego la f.e.m. unitaria, de acuerdo con la fórmula (2.2):

$$E_t = 0.82\sqrt{30}$$

$$E_t = 4.49 \text{ Voltios por espira}$$

## 2.8. CALCULO DE LA SECCION DEL NUCLEO

Sabemos que para un voltaje de excitación sinusoidal, la f.e.m. unitaria, esta dado por:

$$E_t = 4.44 f B_m A_i$$

de donde:

$$A_i = E_t / (4.44 f B_m)$$

Reemplazando los valores prefijados:

$$A_i = 4.49 / (4.44 \times 60 \times 1.4)$$

$$A_i = 0.012 \text{ m}^2$$

2.9. CALCULO DEL AREA DE VENTANA ( $A_w$ )

Según la expresión (2.1):

$$S = 2.22 f B_m A_i K_w A_w J \times 10^{-6}$$

de donde:

$$A_w = S / (2.22 f B_m A_i K_w J \times 10^6)$$

Reemplazando tenemos:

$$A_w = 30,000 / (2.22 \times 60 \times 1.4 \times 0.012 \times 0.045 \times 2.5 \times 10^6)$$

$$A_w = 0.1191667 \text{ m}^2$$

2.10. CALCULO DEL DIAMETRO DEL CIRCULO CIRCUNSCRITO AL NUCLEO

Para la sección de núcleo cruciforme, su área neta, tal como se muestra en el acápite 2.3, es:

$$A_i = 0.56 d^2$$

de donde:

$$d = \sqrt{0.012 / 0.56} = 0.146 \text{ m}$$

Tomamos:  $d = 0.15 \text{ m} = 15 \text{ cm}$ .

2.11. DETERMINACION DEL NUMERO DE LAMINAS DE FIERRO DEL NUCLEO

Según las figuras 2.2 y 2.3, el escalón I, tiene las siguientes dimensiones:

$$\text{Espesor del Escalón I} = 2a = 0.53d = 0.53 \times 15 = 7.95 \text{ cm}$$

$$\text{Ancho de la lámina} = 2b = 0.85d = 0.85 \times 15 = 12.75 \text{ cm}$$

Y el escalón tipo II (exteriores), tiene por dimensiones:

Espesor del Escalón II =  $b-a = 0.16d = 0.16 \times 15 = 2.4 \text{ cm}$

Ancho de la lámina =  $2a = 0.53d = 0.53 \times 15 = 7.95 \text{ cm}$

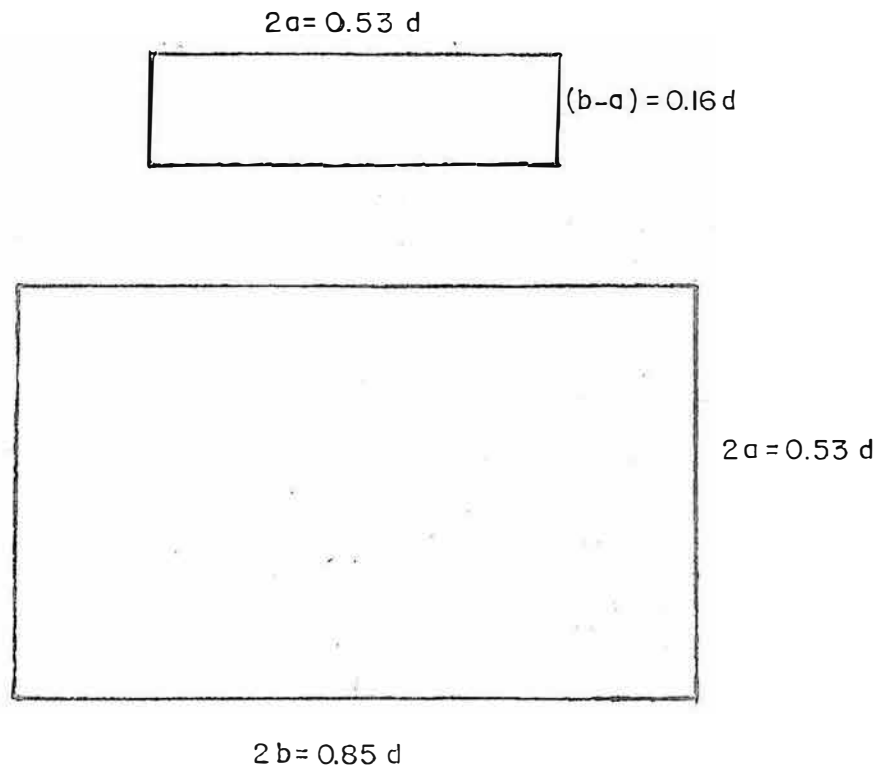


FIGURA 2.3 - Esquema de Escalones

Número de láminas (N): La cantidad de pláncas magnéticas, es calculada según la expresión siguiente:

$$N = (\text{Espesor del escalón} \times K_a) / \text{Espesor de lámina}$$

donde:  $K_a$  = Factor que considera la pérdida de área de fierro por la aislación de la láminas, prensado, etc. y que tomamos como 0.90 para la chapa de 0.35 mm. de espesor.

Luego, el número de láminas del escalón tipo I:

$$N_I = (2a \times K_a) / 0.35 = (79.5 \times 0.9) / 0.35 = 204$$

Y la cantidad de láminas del escalón tipo II

$$N_{II} = |2(b-a) \times K_a| / 0.35 = |2 \times 24 \times 0.9| / 0.35 = 124$$

2.12. CALCULO DEL AREA REAL DEL NUCLEO ( $A_{iC}$ )

$A_{iC}$  = N° de láminas x Ancho de lámina x Espesor de lámina. Para los dos escalones, la suma de sus áreas, es:

$$A_{iC} = 204 \times 12.75 \times 0.35 \times 10^{-1} + 124 \times 7.95 \times 0.35 \times 10^{-1} = 125.5 \text{ cm}^2 = 0.01255 \text{ m}^2$$

2.13. INDUCCION MAGNETICA CORREGIDA ( $B_{mC}$ )

$$B_{mC} = (B_m A_i) / A_{iC} = (1.4 \times 0.012) / 0.01255$$

$$B_{mC} = 1.34 \text{ W}_b / \text{m}^2$$

2.14. AREA DE VENTANA DE NUCLEO CORREGIDA ( $A_{wC}$ )

Usando:

$$A_{wC} = S / (2.22 \times f \times B_{mC} \times A_{iC} \times K_w \times J \times 10^6)$$
$$= 30,000 / (2.22 \times 60 \times 1.34 \times 0.01255 \times 0.045 \times 2.5 \times 10^6)$$

$$A_{wC} = 0.124502 \text{ m}^2$$

2.15. F.E.M. UNITARIA CORREGIDA

La expresión a usar es:

$$E_{tC} = 4.44 \times f \times B_{mC} \times A_{iC}$$

$$E_{tC} = 4.44 \times 60 \times 1.34 \times 0.0125 = 4.46 \text{ Volts. por espira}$$



## 2.16. CALCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA VENTANA

### 2.16.1. Altura de Ventana (H)

Según el tipo de transformador, existe una relación deseada de pérdida en el material magnético a pérdida en el cobre o peso del núcleo a peso de cobre. De ahí que hay una relación entre la altura de ventana a su ancho  $[4L]$ , dada por la relación:

$$H/W = 2.0 \text{ a } 4.0 \quad (2.3)$$

### 2.16.2. Ancho de Ventana (W)

Está dado obviamente por la expresión:

$$W = H/(2.0 \text{ a } 4.0) \text{ cm} \quad (2.4)$$

Sabemos además que el área de ventana:

$$A_w = H \times W \quad (2.5)$$

Fijamos:  $H/W = 2.5$

Reemplazando en la expresión (2.5):

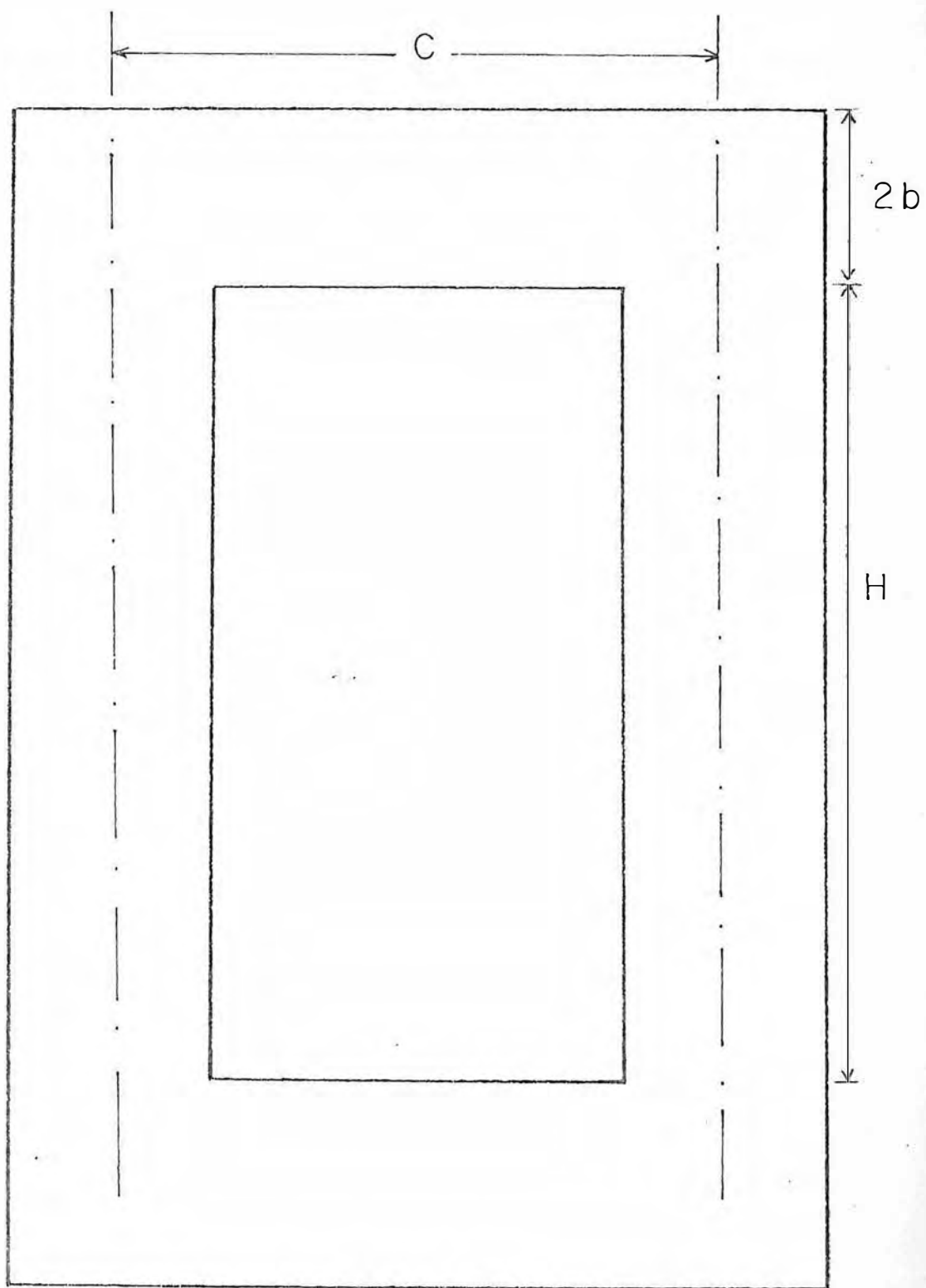
$$H = \sqrt{2.15 \times A_{wC}} = \sqrt{2.15 \times 0.1245} = 0.5174 \text{ m}$$

Luego, el ancho de ventana:

$$W = H/2.15 = 0.241 \text{ m}$$

Como primera aproximación tomamos el valor del ancho de ventana algo mayor, considerando el aislamiento considerable - que debe existir entre las capas del devanado de A.T., como también la gran distancia aislante entre la superficie - del devanado de A.T. y el circuito magnético. Luego la altura del núcleo y el ancho de ventana son:

$$H = 51 \text{ cm} \quad \text{y} \quad W = 26 \text{ cm}$$



Dimensiones en mm

Escala 1/4

FIG. 2.4 - ESQUEMA DEL CIRCUITO MAGNETICO

### 2.17. PESO TOTAL DEL FIERRO

Usamos la figura 2.5 y el peso específico del material de  $7.65 \text{ gr/cm}^3$ . Además, establecemos:

Que las culatas tienen la misma forma y valor de la sección del núcleo.

La distancia entre ejes de columnas, la denominamos por  $C = W + 2b = 26 + 12.75 = 38.75 \text{ cm}$ .

$$\begin{aligned} \text{Peso de las columnas} &= P_{iC} = 2A_{iC} \times H \times p_i, \quad p_i = \text{peso específico} \\ &= 2 \times (125.5 \times 51 \times 7.65 \times 10^{-3}) = \\ &97.9 \text{ Kgs.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Peso de las culatas} &= P_{iY} = 2 (A_{iC} \times C \times p_i) \\ &= 2 (125.5 \times 41 \times 7.65 \times 10^{-3}) = 78.7 \text{ Kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Peso de las esquinas} &= P_{iESQ} = 4 \times 0.5 \times A_{iC} \times 2b \times p_i \\ &= 4 \times 0.5 \times 125.5 \times 12.75 \times 7.65 \\ &= 24.5 \text{ Kgs.} \end{aligned}$$

$$\text{Peso total del fierro} = 97.9 + 78.7 + 24.5 = 201.1 \text{ Kgs.}$$

### 2.18. CALCULO DE LAS DIMENSIONES DE LAS LAMINAS DE FIERRO DEL CIRCUITO MAGNETICO

Usando las figuras 2.3 y 2.5, que como ejemplo muestra la distribución de láminas para el escalón tipo I, determinamos las dimensiones de las láminas de fierro, las mismas que son resumidas en el cuadro siguiente. Los valores numéricos que figuran en el cuadro, son dados, suponiendo que la distancia entre ejes de columnas es la definitiva. Sin embargo también se muestra en dicho cuadro, entre paréntese -

sis, las dimensiones de las láminas para el yugo en función de la distancia entre ejes "C" a fin de preveer cualquier modificación al término de la construcción de las bobinas.

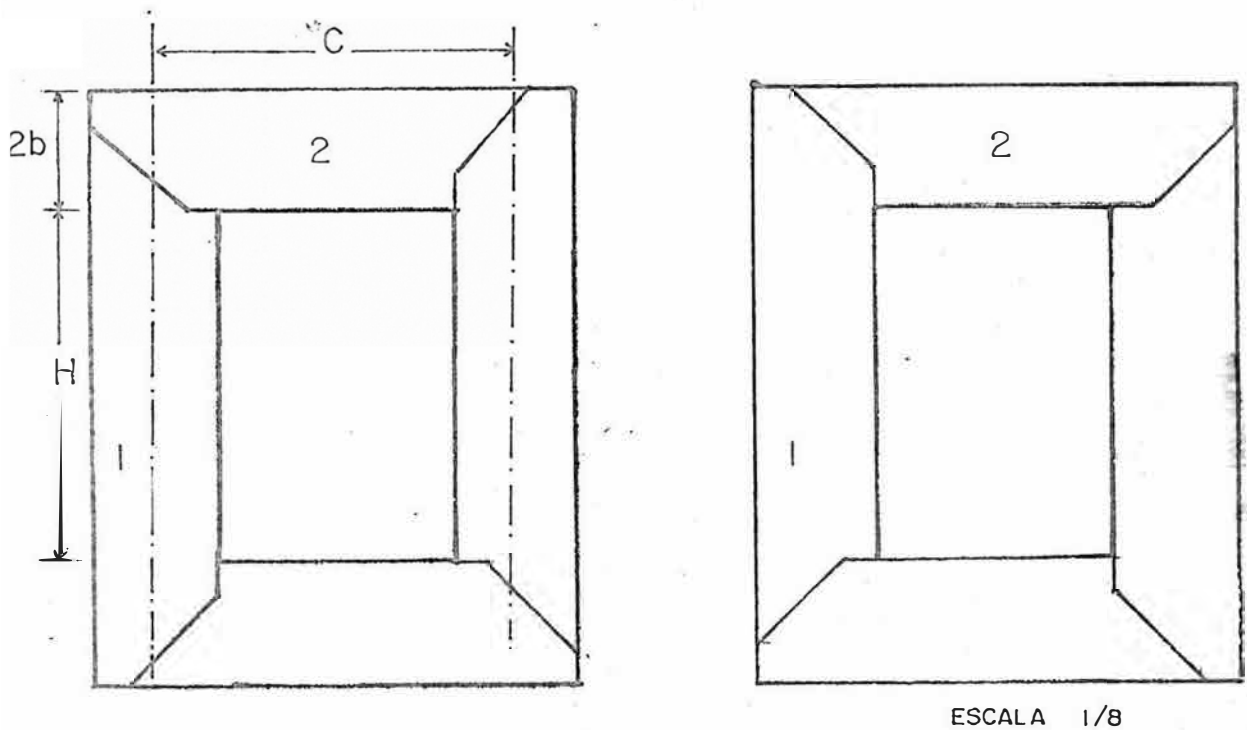


FIGURA 2.5 - Esquema de Distribución de Láminas para el Escalón, tipo I.

CUADRO QUE MUESTRA LAS DIMENSIONES DE LAS LAMINAS

Láminas Tipo	Escalón Tipo	Dimensiones de Láminas (en mm)	Número de Láminas
1	I	$2b \times (H + 2b) = 127.5 \times 637.5$	408
2	I	$2b \times c = 127.5 \times 387.5$ ( $2b \times c = 127.5 \times c$ )	408
3	II	$2a \times (H + 2a) = 79.5 \times 589.5$	248
4	II	$2a \times c = 79.5 \times 339.5$ ( $2a \times c = 79.5 \times c$ )	248

## C A P I T U L O   I I I

### DISEÑO DE LOS DEVANADOS Y DEL AISLAMIENTO

### 3. DISEÑO DE LOS DEVANADOS Y DEL AISLAMIENTO

#### 3.1. FACTORES DE DISEÑO DE LOS DEVANADOS

El arreglo de cada devanado, se hace contemplando: su resistencia dieléctrica, su refrigeración, la reactancia de dispersión, [1L], [3L].

##### 3.1.1. Resistencia Dieléctrica

Debe ser adecuada y efectiva para soportar los esfuerzos dieléctricos producidos por diversos voltajes, como:

VOLTAJES NORMALES. El dieléctrico aislante de tierra, debe soportar el 100% de la tensión nominal de servicio.

VOLTAJES DE CORTA DURACIÓN. Son sobrevoltajes que se presentan en el transformador, durante la recuperación de las descargas parciales o disruptivas en el objeto de ensayo, creando una situación potencialmente dañina para el transformador y el objeto en ensayo.

De ahí que los campos eléctricos no uniformes, ocasionados por tales sobrevoltajes, deben ser uniformizados por un adecuado arreglo de los devanados y/o por pantallas.

VOLTAJES DE PRUEBA. Por el tipo de servicio, el transformador de ensayo, es exento de sobretensiones producidas por descargas de rayo o por maniobra de interruptores.

Por otro lado, la tensión de descarga de sus atravesados, constituye una protección contra las sobretensio -

nes que puedan sufrir los devanados.

Asimismo, según el diseño del transformador, constituye también, una protección contra la acumulación de sobretensiones en el transformador, la resistencia de amortiguación entre el objeto en ensayo y el lado de alta tensión. De ahí que algunas normas europeas, tal como la VDE, recomienda como tensión de prueba para los arrollamientos, durante 1 minuto alrededor de un 1.1 a 1.2 de la tensión más alta de servicio.

Nosotros fijamos la tensión de prueba a considerar para el diseño, la experiencia de la AEG, la cual recomienda  $U_p = 1.2 U_N + 5 \text{ KV}$  con la tensión nominal  $U_N$  en KV.

### 3.1.2. Refrigeración de las Bobinas

El arreglo de los ductos de refrigeración, depende del tipo de servicio del transformador de ensayo. Para servicio de corta duración, no se requiere mayor necesidad de canales de ventilación.

En nuestro diseño, por ser para servicio continuo en ensayos de calentamiento o pérdidas, se considera ductos verticales de refrigeración, pero no tan amplias como en un transformador de potencia.

### 3.1.3. REACTANCIA DE DISPERSION

La reactancia de dispersion, como factor limitador de las corrientes de cortocircuito, no tiene mayor importancia, porque las demás reactancias (dispositivos de regulación, etc), son más considerables que la del transformador.



Pero la gran aislación requerida entre espiras, capas y arrollamientos; como también el arreglo adecuado de los devanados de alta y baja tensión, obliga indirectamente a tener altos valores de reactancia de cortocircuito. De ahí que la norma VDE 0433, Parte I, [3R], contempla que:

Un voltaje de impedancia a frecuencia y corriente nominales, de 10% para transformadores de ensayo de hasta 500 KV de salida.

### 3.2. DISPOSICION DE ARROLLAMIENTOS

El arreglo adecuado de los devanados, depende de la distribución de voltaje sobre el arrollamiento.

En el transformador de ensayo, el primario es diseñado para la conexión a una fuente de bajo voltaje (220 V).

Los devanados de baja tensión y alta tensión, se devanan concéntricamente con el núcleo y para tensiones de salida, relativamente alta (hasta 200 KV), el primario es devanado más próximo al núcleo. Y la distribución del alto voltaje del secundario, se consigue:

Aterrando un terminal de la bobina, para obtener el mayor voltaje en el otro terminal (ver figura 3.2). Con esta disposición, se consigue graduar el aislamiento a masa, en tre devanados, etc. consiguiéndose una buena distribución de esfuerzos dieléctricos.

### 3.3. TIPOS DE DEVANADOS

#### 3.3.1. Devanado para Bajo Voltaje

En el diseño se utilizó un devanado cilíndri

co de capas. Por ser la sección transversal de la espira relativamente grande ( $54.54 \text{ mm}^2$ ), se adoptó un devanado - de dos capas de conductor de sección transversal rectangular (un ejemplo se muestra en la figura 3.1). La capa del devanado forma las espiras arrolladas helicoidalmente, muy juntas una de otra a lo largo de la generatriz del cilindro. El conductor es devanado de plano, es decir con la mayor dimensión de la sección del conductor (ancho) en forma axial, con la finalidad de reducir las pérdidas por corrientes parásitas.

Para conseguir diferentes capacidades y tensiones de salida, el arrollamiento de baja tensión se dividió en dos bobinas cilíndricas, de dos capas cada una y devanadas superpuestas axialmente.

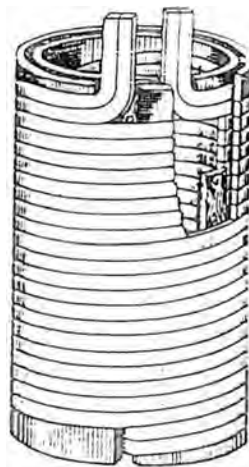


FIGURA 3.1 - Devanado Cilíndrico de dos Capas

### 3.3.2. Devanado para Alto Voltaje

(Bobina cilíndrica Guadrada o Arrollamiento Antiresonante)

El término "graduado" está relacionado con el hecho, que al disponer la bobina concéntrica por capas, con la capa más interna, conectada a tierra, el voltaje aumentará escalonadamente, hasta la capa exterior, obteniendo el voltaje máximo de diseño; el aumento gradual del voltaje, motiva el escalonamiento del correspondiente aislamiento a tierra, desde un valor mínimo, para la capa neutra, hasta un aislamiento mayor (para la máxima tensión de salida) para la última capa de mayor potencia. La figura 3.2 muestra los detalles de aislamiento de un transformador. - (Véase [1L] , [2L] ).

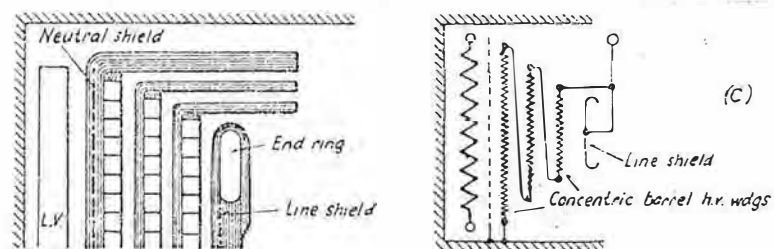


FIGURA 3.2 - DETALLES DE AISLAMIENTO DEL TRANSFORMADOR

### 3.4. CRITERIOS PARA EL CALCULO DEL DEVANADO DE ALTA TENSION

El cálculo del devanado de alto voltaje, debe efectuarse, partiendo de una de las condiciones [5L] previas

fundamentalmente:

Intensidad uniforme de campo radial

Gradiente axial constante.

### 3.4.1. Intensidad Uniforme de Campo Radial

El arrollamiento concéntrico graduado, representa -  
con sus capas de espiras y un dieléctrico entre ellas, un -  
conjunto de capacitores, cuya capacitancia es dada por la -

fórmula:  $C_k = (2 r \epsilon_0 \epsilon l) / \ln (r_k / r_{k-1})$  (3.1)

donde:  $r_k$  = radio exterior de dieléctrico en la capa "k"

$\epsilon$  = permitividad dieléctrica relativa

$l$  = longitud de la capa conductora.

Esa capacitancia es mantenida constante, manteniendo inva -  
riable, el espesor del dieléctrico en cada capa y disminu -  
yendo la longitud.

Por ser los radios de cada capa, muy grandes, comparados  
con los espesores del dieléctrico, las capacitancias pueden  
calcularse aproximadamente por la fórmula para condensado -  
res planos. Esto es:

$$C = (2 r \epsilon_0 \epsilon x l) / l \quad (3.2)$$

y según la hipótesis:

$$x l = (C l) / (2 r \epsilon_0 \epsilon) = \text{constante} \quad (3.3)$$

Si  $R$  es el radio de la capa más interna y  $L$  su longitud, la  
longitud de cualquier capa, puede calcularse según:

$$l = (R L) / x \quad (3.4)$$

Luego para obtener una intensidad de campo eléctrico radial constante, hay que tener espesores de dieléctrico constante, pero longitudes de capas variables  $[6L]$ ,  $[2L]$ , según puede observarse de la relación (3.3). Además la diferencia de longitudes de las capas exteriores consecutivas, son mucho menores que la de las capas internas, razón por lo que las capas externas, estarían con sobrecarga axial excesiva, facilitando las descargas superficiales por corrimiento. De ahí que el criterio de campo radial constante exclusivo no será usado.

### 3.4.2. Gradiente Axial Uniforme

Para que el gradiente superficial sea constante, es suficiente que la tensión se reparta igualmente y que la distancia de dos capas consecutivas a sus extremos, sea constante  $[6L]$ , luego:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 2 r l X}{e} = \text{CTE}, \text{ de donde } e = C' \cdot l X$$

$$\text{ó } dl = \text{CTE} = b ; \quad \frac{dl}{dx} = -\frac{b}{l} = -\frac{b}{C' l X}$$

$$\text{Luego: } \frac{l^2}{2} = A - B L_n X ; \quad B = \frac{b}{C'}$$

La ecuación del lugar geométrico de los puntos extremos de las capas, puede reescribirse en función del radio interior  $r_0$  y exterior  $r_1$ , así como de las longitudes de las capas extremas respectivas,  $l_0$  y  $l_1$ , dado en  $[2R]$ , por :

$$l_0^2 - l^2 = \frac{l_0^2 - l_1^2}{\ln \frac{r_1}{r_0}} \ln \frac{r}{r_0} ; \quad \text{con } r = x$$

En cada capa aislante, se cumple una relación entre la gradiente de potencial radial y axial, dado por:  $- E_r d_r = E_l d_l$   
Manteniendo  $E_l$  constante, el gradiente de potencial radial es variable [2R] y está dado por:

$$E_r = \frac{U_s}{2} \times \frac{l_0 + l_1}{r_1 \ln \frac{r_1}{r_0}} \times \frac{1}{r_l}$$

donde:  $U_s$ , tensión de servicio en KV  
Longitudes en cm.

### 3.5. DISEÑO DEL AISLAMIENTO

#### 3.5.1. Condiciones Generales para la Descarga Disruptiva en Sistemas Aislantes Mixtos

En transformadores de ensayo, para aumentar el aislamiento, generalmente se usa el aceite.

La descarga disruptiva en un sistema de aceite y un dieléctrico sólido, puede darse según las siguientes características:

- Cuando la frontera de los aislantes, coinciden por lo menos, con superficiales equipotenciales, cada dieléctrico soporta una fracción de la tensión aplicada.
- La descarga puede producirse en cualquiera de los aislantes, afectando por consiguiente el otro.
- Los esfuerzos admisibles permanentes o momentáneos para -

el aceite son generalmente, relativamente algo distintos - (un 40% de diferencia). Sucede lo contrario para los aislantes sólidos [7L].

### 3.5.2. Influencias Externas para las Descargas Disruptivas

- La frecuencia afecta muy poco las características de los dieléctricos con tensión de corta duración, pero a tensión permanente, la frecuencia tiene un efecto apreciable sobre la rigidez dieléctrica de un sólido [7L].

- Los depósitos y la humedad son perjudiciales, ya que abren el camino a las descargas superficiales y disminuyen la rigidez dieléctrica del aceite.

- Las descargas parciales, deben ser evitadas, por que debilitan a los aislantes sólidos.

Luego el cálculo de la disposición de dieléctricos se realiza considerando las máximas sollicitaciones y debe ser previsto cada dieléctrico, teniendo en cuenta el tiempo, temperatura, forma de electrodos y la distancia disruptiva. Con tensiones permanentes, deben evitarse los efluvios, ya que contribuyen a la descomposición química del aceite (lodos y gases) y deterioran los dieléctricos sólidos.

### 3.5.3. Tipos de Disturbios

#### a) EFLUVIOS.

La tensión inicial de efluvios, depende del grueso de las capas aislantes y de la capacidad específica del mismo (por centímetro cuadrado de superficie), [7L], y está dada por la expresión:

$$U_K = (1.06 \times 10^{-5}) / C^{0.45} \text{ KV}$$

C, en F/cm<sup>2</sup>

Esas venas de cargas eléctricas o corona se facilitan en los lugares, donde hay sobrecarga axial excesiva, como se puede ver en la figura (3.3), por ejemplo, cuando se producen fallas en el objeto de prueba [14R].

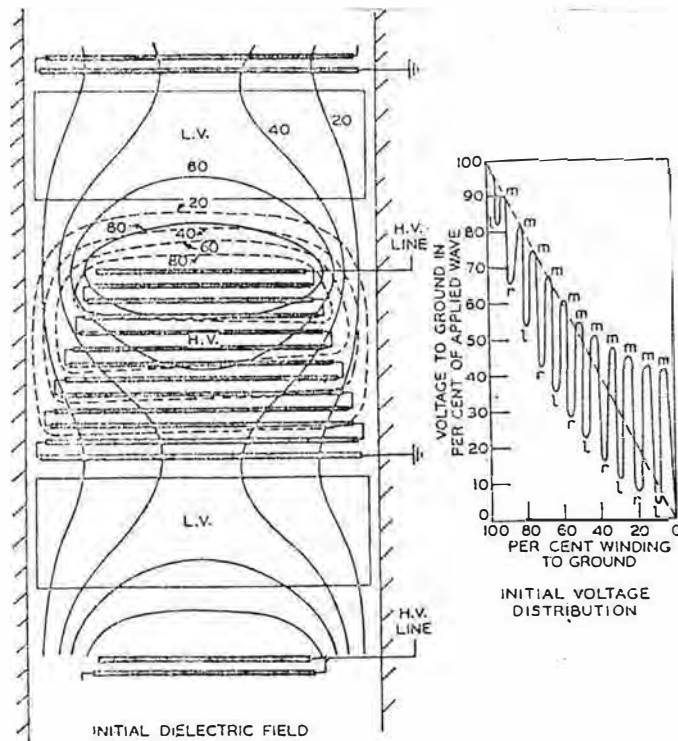


FIG. 3.3 - CARACTERISTICAS DEL CAMPO DIELECTRICO INICIAL

b) DESCARGAS SUPERFICIALES.

Se presentan en sistemas, donde las líneas de campo eléctrico en el aceite, corren paralelamente a la superficie de las sustancias aislantes sólidas.



La aparición de descargas superficiales debe evitarse en servicio normal y a tensiones de corta duración (una forma, mediante las ondulaciones de los dieléctricos).

La tensión inicial de la descarga rampante en el aceite, es aproximadamente el triple que en el aire [7L], siendo para éste, calculable según:

$$U = (1.355 \times 10^{-4})/C^{0.44} \text{ KV.}$$

donde: C capacidad específica en F/cm

### 3.6. PROTECCION INTERNA DEL TRANSFORMADOR

La perforación del objeto de ensayo o cualquier descarga en el lado de alta tensión, produce sobretensiones. Estas ondas actúan sobre las capacidades, entre bobinas de un mismo devanado, entre devanados, y entre las capacidades de un devanado y masa. Por tales capacitancias se transmiten las ondas de sobrevoltaje al lado de baja tensión con efectos negativos, como perforaciones de dieléctricos, etc. También son esas capacidades (capacidad paralelo y capacidad serie del devanado de alta tensión), las que motivan una distribución uniforme o irregular de los esfuerzos eléctricos a lo largo del arrollamiento de alta tensión, pudiendo causar la perforación en ciertas espiras y bobinas de dicho devanado [7L].

#### 3.6.1. Blindaje Electrostatico contra la Penetración de Sobretensiones al Circuito Primario

Consiste de una lámina metálica (por ejemplo cobre) o de una platina de cobre, convenientemente aislada y eléc-

tricamente abierta y conectada a tierra. Esta placa neutra es devanada entre los arrollamientos de B.T. y A.T. (ver figura 3.2.) en la región más cercana a los puntos de mayor esfuerzos eléctricos (lado de A.T.). De esa forma se previene de cualquier posibilidad de transferencia de voltajes dañinos del lado de A.T., hacia los circuitos de entrada a través de una perforación del aislante. Entonces cualquier falla, en el objeto de ensayo o en el circuito de A.T. será confinado a su propio devanado.

El cálculo de la placa neutra, es dada considerando que el esfuerzo eléctrico, debido a los voltajes anormales, representado por un voltaje de alrededor de 125%, del valor máximo del voltaje de servicio [7L], se reparte entre los diferentes capacitores del arrollamiento de A.T. y la placa neutra, ésta y el devanado de B.T.

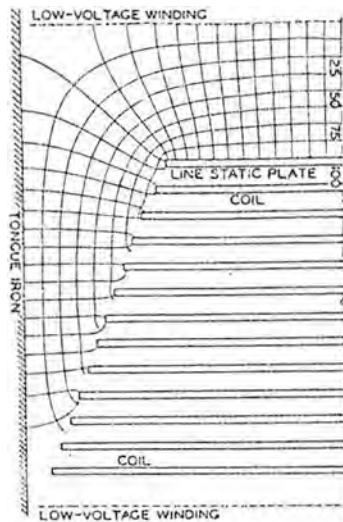


FIG. 3.4 - BLINDAJE ELECTROSTATICO DE LAMINAS DE COBRE

### 3.6.2. Placa Estática para Uniformizar los Esfuerzos Dieléctricos en el Devanado de Alta Tensión

La perforación del aislante del objeto de ensayo, - produce sobretensiones en el lado de A.T. Estas ondas de - alta frecuencia, se distribuye en dicho arrollamiento a través de los primeros capacitores, aproximadamente en proporción inversa a sus capacitancias. Si las capacitancias (entre espiras y entre bobinas respectivamente, del mismo devanado), son mucho menores que las capacitancias a tierra (entre bobinas y masa), respectivas, se comprende que la mayor proporción del voltaje aparece a través de las espiras finales, mientras que las espiras hacia el terminal aterrado, estarán inferiormente esforzadas. De ahí que la eliminación o reducción de las capacitancias a tierra, conduce a evitar la concentración de voltaje indebidos y además las oscilaciones (que se presentarían después del momento inicial).

Ese efecto se logra con un blindaje electrostático [14R], a través de una placa (o platina arrollada), de un material conductor, abierta y conectada al terminal de línea (figura 3.4).

El diseño del arrollamiento "apantallado", se realiza considerando, que para condiciones normales, de operación y para toda condición anormal, no debe fluir corriente de carga electrostática en las espiras en cualquier punto del arrollamiento. Esto implica que el blindaje, sea espaciado, de manera que la corriente de carga electrostática que entrega

al arrollamiento de A.T. sea igual a la corriente de carga electrostática que estaría fluyendo desde el mencionado devanado hacia el devanado de B.T., núcleo y tanque [8L].

Por eso el blindaje, debe ser de material conductor, con bordes redondeados y debe estar conectado al terminal de línea. Debe ser cuidadosamente proporcionado, espaciado y además debe estar aislado completamente de tierra y del arrollamiento de B.T. (observar la figura 3.2).

Sin embargo, en el diseño del transformador, no será considerado el cálculo de la placa estática de línea [1L], [8L] [9L], porque:

El arrollamiento de A.T., siendo un devanado cilíndrico concéntrico y con aislamiento y distancias disruptivas, graduado en las capas, presenta capacitancias con respecto a masa casi exclusivamente, en las proximidades del terminal aterrado, resultando un devanado libre de oscilaciones (no resonante), es decir la distribución inicial y final de las sobretensiones, son casi similares.

Estudios al respecto [5L], recomiendan que se considere la placa estática para tensiones nominales, superiores a 110 KV.

### 3.7. CALCULO DEL NUMERO DE ESPIRAS DEL PRIMARIO Y SECUNDARIO.

#### 3.7.1. Cálculo de las Tensiones de Vacío Primaria ( $E_1$ ) y Secundaria ( $E_2$ ).

Asumiendo una caída del 6% de las tensiones nominales res-

pectivas [10L], en la impedancia de cortocircuito, las f.e.

m.  $E_1$  y  $E_2$  son:

$$E_1 = 220 - 0.03 \times 220$$

$$E_1 = 213.4 \text{ V.}$$

$$E_2 = 100,000 + 0.03 \times 100,000$$

$$E_2 = 103,000 \text{ V.}$$

### 3.7.2. Determinación del Número de Espiras

Según la sección 2.15, la tensión unitaria  $E_{tc} = 4.46 \text{ V}$ . El número de espiras del lado de B.T. es:

$$N_1 = E_1/E_{tc} = 213.4/4.46 = 47.8$$

tomamos:  $N_1 = 47$  espiras

También el número de espiras en A.T., es:

$$N_2 = (E_2 \times N_1)/E_1 = (103,000 \times 47)/213.4$$

$$N_2 = 22,685$$

## 3.8. CALCULO DEL ARROLLAMIENTO DE BAJA TENSION (B.T.)

### 3.8.1. Descripción

Este devanado es dividido en dos bobinas concéntricas semejantes, axialmente superpuestas, con la finalidad de obtener, por conexiones externas:

- a) Potencia y tensión de salida máxima, conectando las bobinas en paralelo; y
- b) Potencia y tensión de salida en el 50% de sus valores máximos, enseriando las bobinas.

### 3.8.2. Cálculo de cada Media Bobina

Para potencia y tensión de salida máximos, -

la corriente tomada de la red, es:

$$I_1 = 30,000/220 = 136.36 \text{ Amp.}$$

La sección del conductor pertinente, para la densidad de corriente fijada (véase 2.5.2), es de:

$$a = 136.36/2.5 = 54.54 \text{ mm}^2$$

y la sección del conductor de cada media bobina de B.T. es de:

$$A_{\text{cu B.T.}} = 68.18/2.5 = 27.27 \text{ mm}^2$$

Para lograr un equilibrio magnético, entre los arrollamientos de B.T. y A.T.; fijamos la separación de las bobinas hacia los yugos, de 25 mm.

Una distribución adecuada de las espiras implica un devanado concéntrico de dos capas, logrando así, la salida de los terminales, por un mismo lado. De ahí que distribuimos 24 espiras por capa. El conductor es un cinta de cobre (véase anexos), de cantos redondeados y aislada con tira de papel de 0.35 mm. de espesor, devanado éste en hélice. Además, externamente, cada bobina es reforzada con tiras de papel de 0.375 mm de espesor, devanada solapada a 1/2.

Luego, las dimensiones del conductor son:

CONDUCTOR DESNUDO : Espesor x Ancho = 3.263 mm x 8.951 mm  
Sección = 26.55 mm<sup>2</sup>

CONDUCTOR AISLADO : Espesor x Ancho = 3.963 mm x 9.301

Para evacuar el calor del interior del devanado de B.T. consideramos un ducto axial de 4 mm entre capas, mediante sepa

radores de fibra [5L].

Devanando el conductor de plano, sobre un formador de bobina de papel de 0.375 mm de espesor, las dimensiones de cada bobina, es de:

$$\text{ESPESOR RADIAL} : 2 \times 3.963 + 4 \times 0.375 + 0.375 = 12.676$$

$$\text{LONGITUD AXIAL} : 24 \times 9.301 = 223.224 \text{ mm.}$$

La longitud axial del devanado de B.T., considerando un aislante separador en el centro y también cierta holgura, es de:  $L_{B.T.} = 2 \times 223.224 + 9.6 = 456$

### 3.8.3. Características del Arrollamiento de B.T.

$$\text{SECCION DEL CONDUCTOR} : 53.1 \text{ mm}^2$$

$$\text{ESPESOR RADIAL DEL DEVANADO B.T.} : 12.676 \text{ mm}$$

$$\text{LONGITUD AXIAL DEL DEVANADO B.T.} : 456. \text{ mm}$$

$$\text{DENSIDAD DE CORRIENTE DE TRABAJO, J: } 2.57 \text{ A/mm}^2$$

$$(J = 136.36/53.1 = 2.57 \text{ A/mm}^2)$$

### 3.8.4. Cálculo de la Resistencia del Devanado de B.T.

Según 3.8.1, la sección del conductor es:

$$A_{Cu_{B.T.}} = 26.55 \text{ mm}^2$$

Para el cálculo de la longitud de la espira media, es necesario conocer:

Diámetro del círculo circunscrito al núcleo ..... 150 mm  
(véase 2.10).

Diámetro interior del devanado de B.T., contemplando una distancia hacia el núcleo de 7 mm (3 mm de espesor del tubo

aislante y 4 mm para un ducto axial de refrigera	
ción de la entrecara muerta) . . . . .	164 mm
Diámetro exterior del devando de B.T. ( $D_{e_{B.T.}}$ )	189.352
Diámetro medio del devanado de B.T. ( $D_{m_{B.T.}}$ )	176.676
Longitud de la espira media de la bobina de B.T.	
( $L_{tm_{B.T.}}$ ) . . . . .	0.555 m

La resistividad eléctrica a la temperatura de referencia de 75 °C, [4R] es de 0.021 (OHM x mm<sup>2</sup>)/m.

Luego la resistencia del devanado de B.T. (bobina en paralelo) es calculada, según la expresión:

$$R_{B.T.} = ( \quad \times N_1 \times L_{tm_{B.T.}} ) / A_{cu_1} = (0.021 \times 48 \times 0.555) / 53.1$$

$$R_{B.T.} = 0.0105 \text{ OHMS.}$$

### 3.9. CALCULO DEL ARROLLAMIENTO DE ALTA TENSION A.T.

#### 3.9.1. Cálculo de la Sección del Conductor en A.T.

La separación entre los arrollamientos de B.T. y A.T. es de 12 mm (determinada en la sección 4.3.1).

También la separación de los extremos de la capa de menor potencial del devanado de A.T. (arrollamiento circular con céntrico, tipo cónico), hacia los yugos es de 25 mm [2L], como puede observarse en la figura 3.5 de experiencias británicas. (Valor que concuerda con experiencias alemanas, recopiladas en el tratado de la Escuela del Técnico - Electricista, [10L]).



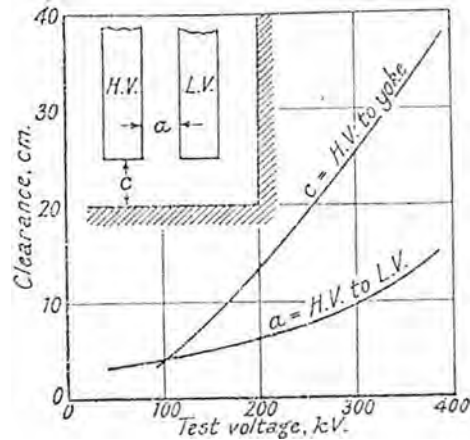


FIG. 3.5. - DISTANCIAS AISLANTES

Para la corriente nominal de salida y la densidad de corriente seleccionada ( $J = 2.5 \text{ A/mm}^2$ ), la sección del conductor sería :  $A_{\text{Cu}} = 0.3/2.5 = 0.12 \text{ mm}^2$ .

Esta sección corresponde al calibre 26 AWG.

Pero la superficie de apoyo de tal conductor, sobre el papel aislante, es inadecuado y el papel no ofrece garantías mecánicas. De ahí que adoptamos el conductor N° 23 AWG, cuyas características (véase anexo) son:

CONDUCTOR DESNUDO : Sección  $A_{\text{Cu A.T}} = 0.255 \text{ mm}^2$

Diámetro  $\phi = 0.574 \text{ mm}$

CONDUCTOR AISLADO : Sección  $0.325 \text{ mm}^2$

(Doble capa de esmalte sintético) Diámetro  $\phi = 0.643 \text{ mm}$

En la columna de núcleo disponible, para la primera capa aterrada, en número de espiras es:

$$456/0.643 = 709.17 \text{ espiras}$$

Tomamos 708 espiras

### 3.9.2. Cálculo del Número de Capas

Los dieléctricos entre capas a utilizar, son el aceite y el papel baquelizado, cada uno, con una rigidez dieléctrica y permitividad relativa, a condiciones normales, respectivas de:

$$\begin{array}{ll} 80 \text{ KV/cm} & \epsilon_a = 2.2 \\ 300 \text{ KV/cm} & \epsilon_p = 5 \end{array}$$

Para la tensión eficaz máxima posible en condiciones anormales, de 125 KV y asumiendo un coeficiente de seguridad (C.S) de 2 para el aceite, con el criterio inicial de fijar entre las capas un gradiente radial constante (véase 3.4.1), el espesor total del dieléctrico, bajo condiciones desfavorables, es de:  $d = 125/40 = 3.125 \text{ cm}$

Adoptando 44 capas de conductores, el espesor radial constante, es de:  $l = 3.125/44 = 0.071 \text{ cm}$

La distancia radial mínima para conducir el conductor del extremo de una capa al otro extremo inicial de otra capa consecutiva (véase la figura 3.2), es igual al diámetro del conductor aislado. La distancia radial crítica para el aceite, será entonces de 0.7 mm.

Además, como apoyo de las capas conductoras, consideramos capas de papel en un espesor de 0.375 mm.

### 3.9.3. Cálculo de las Dimensiones del Devanado de A.T.

Tomando como criterio base, un gradiente radial constante (véase 3.4.1), la longitud de la segunda capa interna, está dada por:  $l = (RL)/x$

donde:  $R$  = radio de la primera capa conductora (véase 4.3.1)

$L_{1A.T.}$  = longitud de la primera capa (menor potencial)

$x$  = radio de la segunda capa conductora.

Luego:  $R = D_{A.T.} / 2 = 213.352 / 2 = 106.676$

$L_{1A.T.} = N^{\circ}$  de espiras capa 1 x Diámetro conductor aislado =  $708 \times 0.643 = 455.24$

$x = R + 0.7 + 0.375 = 106.676 + 1.075 = 107.75$

De donde:

$l = (455.24 \times 106.676) / 107.75 = 450.7$  mm

Los extremos homólogos de dos capas consecutivas se diferencian en una longitud  $\Delta l$ :

$\Delta l = (L_{1A.T.} - l) / 2 = 2.27$  mm

Este valor equivale a 3.5 espiras alineadas y juntas.

De ahí que adoptamos un  $\Delta l = 2.6$  mm o sea una longitud equivalente a 4 espiras alineadas y juntas (para mejorar la distancia contra descargas superficiales). Luego la capa conductora, es inferior a la inmediata anterior, comenzando desde la capa aterrada, en  $2 \Delta l$  o sea ocho espiras.

Siguiendo esas consideraciones, las espiras se distribuyen en 42 capas, resultando un total de 22,848 espiras; con 708 espiras para la capa más interna y 380 espiras para la capa a mayor potencial. Con esta disposición se logran distancias aislantes a masa de 25 mm y de 100 mm (para 125 KV). Además del aceite y del papel entre capas, para conseguir mayor rigidez mecánica, el devanado de A.T. es encintado con

papel de 0.25 mm de espesor, devanada, solapada a 1/2.

También consideramos un formador de bobina de papel baquelizado, para distribuir mejor los esfuerzos eléctricos [7L].

El espesor del formador es de 1.5 mm.

Luego las dimensiones del devanado de A.T. son:

$$\text{ESPESOR RADIAL } (b_2) : 42 \times 0.643 + 41 \times 1.075 + 1.5 + 0.5$$

$$b_2 = 73.08 \text{ mm}$$

$$\text{LONGITUD DE LA CAPA 1} = L_{1 \text{ A.T.}} = 708 \times 0.643 = 455.24$$

$$\text{LONGITUD DE LA CAPA 42} = L_{2 \text{ A.T.}} = 380 \times 0.643 = 244.34$$

$$\text{DENSIDAD DE CORRIENTE DE TRABAJO } (J_{\text{A.T.}}) : J_{\text{A.T.}} = 0.3/0.25 = 1.2 \text{ A mm}^2$$

#### 3.9.4. Cálculo de la Resistencia del Devanado de A.T.

$$\text{Sección del conductor } A_{\text{cu A.T.}} = 0.255 \text{ mm}^2$$

El cálculo de la longitud de la espira media, es dada siguiendo los siguientes pasos :

$$\text{Diámetro interior del devanado de A.T. } (D_{i \text{ A.T.}}) \dots 214.85$$

(véase sección 4.3.1)

$$\text{Diámetro exterior del devanado de A.T. } (D_{e \text{ A.T.}}) \dots 361.01$$

(usando los cálculos de 3.9.3)

$$\text{Diámetro medio } (D_{m \text{ A.T.}}) \dots \dots \dots 287.93$$

Entonces la longitud de la espira media del devanado de A.T. es dada por:

$$L_{tm \text{ A.T.}} = \pi D_{m \text{ A.T.}} = \pi \times 306.43 = 904 \text{ mm} = 0.904 \text{ m}$$

La resistencia eléctrica a la temperatura de referencia de 75 °C, [4R]; es evaluada con la resistividad a dicha tempe-

ratura, según la siguiente expresión:

$$R_{A.T.} = (\rho_{75} \times N_2 \times L_{tm_{A.T.}}) / A_{cu_{A.T.}}$$

donde:  $\rho_{75} \text{ }^\circ\text{C} = 0.021 (\Omega \times \text{mm}^2) / \text{m}$

$$N_2 = \text{N}^\circ \text{ de espiras del devanado de A.T.} = 22,848$$

$$L_{tm_{A.T.}} = 0.904 \text{ m}$$

$$A_{cu_{A.T.}} = 0.255 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luego: } R_{A.T.} = (0.021 \times 22,848 \times 0.904) / 0.255 = 1700 \text{ OHMS}$$

### 3.9.5. DIMENSIONES ADOPTADAS DE LOS DEVANADOS DE A.T. y B.T.

(Véase figura 3.6)

#### DEVANADO DE B.T.:

$$\text{Diámetro interior } D_{i_{B.T.}} = 164 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro exterior } D_{e_{B.T.}} = 189.352 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud de espira media } L_{tm_{B.T.}} = 0.555 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud axial } L_{B.T.} = 456$$

$$\text{Espesor radial } b_1 = 12.676 \text{ mm}$$

$$\text{Número de espiras } N_1 = 48$$

#### DEVANADO DE A.T.

$$\text{Diámetro interior } D_{i_{A.T.}} = 214.85$$

$$\text{Diámetro exterior } D_{e_{A.T.}} = 361.85$$

$$\text{Longitud de espiras media } L_{tm_{A.T.}} = 0.904 \text{ m}$$

$$\text{Longitud axial 1ra. capa } L_{1_{A.T.}} = 455.24 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud axial última capa } L_{2_{A.T.}} = 244.34 \text{ mm}$$

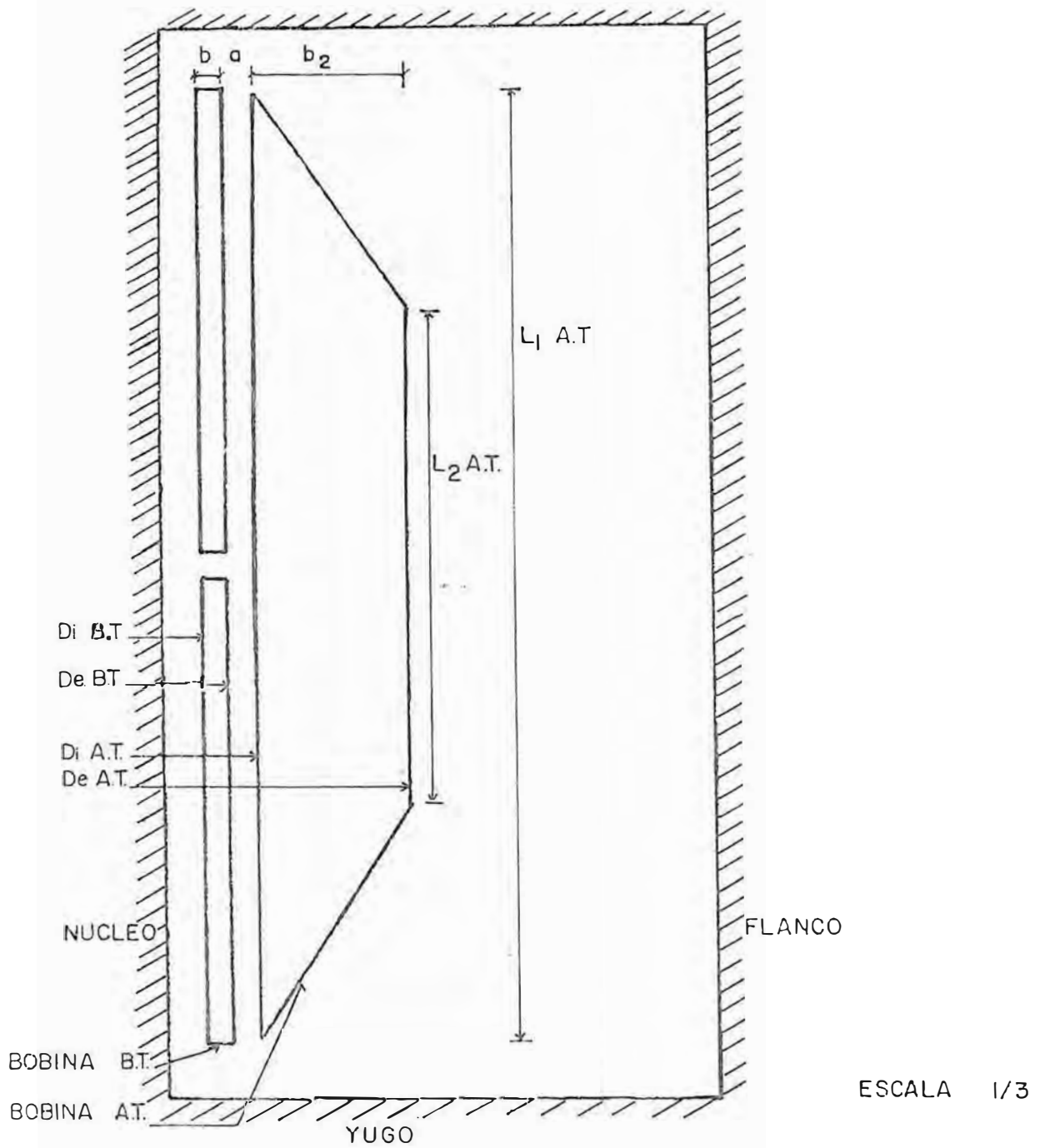


FIG. 3.6 - DIMENSIONES DE LA BOBINA

Espesor radial	$b_2 = 73.08$ mm
Distancia entre devanados	$a = 12$ mm
Número de espiras	$N_2 = 22848$

### 3.9.6. Cálculo de las Reactancias

La reactancia del devanado de B.T. y del devanado de A.T., son calculados por las siguientes fórmulas  $[2L]$ , para el primario y para el lado de alta tensión:

$$x_1 = 2 \pi f \mu_0 N_1^2 \frac{L_{tm_{B.T.}}}{L_{B.T.}} \left( a + \frac{b_1}{3} \right) \text{ OHMS}$$

$$x_2 = 2 \pi f \mu_0 N_2^2 \frac{L_{tm_{A.T.}}}{L_{A.T.}} \left( a + \frac{b_2}{3} \right) \text{ OHMS}$$

También, la reactancia total en términos del primario, es dado por:

$$x_1' = x_1 + x_2' = x_1 + x_2 \left( N_1/N_2 \right)^2 = 2 \pi f \mu_0 N_1^2 \frac{L_{tm}}{L_e} \left( a + \frac{b_1+b_2}{3} \right)$$

En este caso la reactancia por unidad, puede calcularse según la expresión:

$$\epsilon_x = (I_1 X_1) / V_1 = \frac{2 \pi f \mu_0 (NI) L_{tm}}{L_E E_t} \left( a + \frac{b_1 + b_2}{3} \right)$$

donde:  $f$  = frecuencia

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

$N$  = número de espiras pertinentes

$L_{tm}$  = longitud de la espira media respectiva o equivalente, en m

$b_1, b_2$  = espesor de bobinas en m

$a$  = separación de arrollamiento en m

$L$  = longitud axial de cada bobinado

$E_t$  = tensión por espira

Las fórmulas arriba enunciadas son válidas para devanados concéntricos, de igual longitud, que no tienen inclinación en sus extremos, ni que son divididos a lo largo de su longitud axial.

En el presente diseño, el devanado de B.T. está dividido en dos partes iguales, presentando un espacio en el centro "g". También el devanado de A.T. es del tipo barril y presenta una inclinación "p" en sus extremos.

Por último, los devanados son de diferente longitud. Estas divergencias de las hipótesis, establecidas en las fórmulas enunciadas, obliga a corregir la "longitud de dispersión"  $L$ , según las experiencias del Dr. Andrés Halacsy [5R].

Leakage Reactance of Transformer - AIEE, April 1956.

En los cálculos que siguen, se hace uso de las siguientes - figuras:

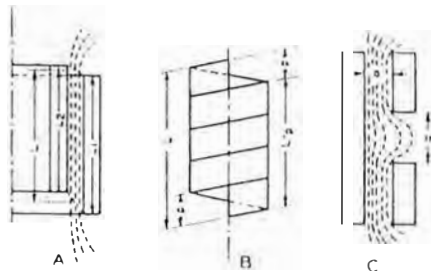


FIG. 3.7 - FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DETERMINACION DE LA LONGITUD EQUIVALENTE DE LA BOBINA DE A.T.

A = Longitudes de bobinas diferentes  $L_1$  y  $L_2$

B = Inclinación  $p$

C = Longitud axial  $g$



a) Corrección de la Longitud del Devanado de B.T., debido a la abertura axial "g".

El espacio libre axial "g", motiva que el flujo se comba en ello y en sus alrededores, generando además una distorsión del flujo magnético disperso en los extremos de la bobina, - cercada al yugo, en forma de abanico (véase figura 3.7c), en un grado tal, que aumenta la dispersión con un aumento de "g". La consideración de tales efectos, equivale a una reducción de la longitud de la bobina de B.T. La reducción de la influencia de la abertura "g", depende de la distribución del flujo en la entrecara "a". Considerando la geometría del flujo en "g" y sus alrededores y de la evaluación de los resultados de ensayos, permitieron al Dr. A. Halacsy [5R], - concluir que la influencia de una abertura en el medio de una bobina, es equivalente a reducir en  $\left| \frac{2}{3} \left( 1 + \frac{1}{2a} \right) g \right|$ , la longitud de la misma.

Como:  $a = 12 \text{ mm}$  (De 3.9.5)

$g = 9.6 \text{ mm}$  (De 3.8.2)

La longitud del devanado de B.T. se reduce en  $\Delta L$  y ésta es evaluada por:

$$\Delta L = \frac{2}{3} \times \left( 1 + \frac{1}{2 + 12} \right) \times 9.6 = 6.6$$

Luego la longitud de la bobina de B.T. ya corregida (de acuerdo a 3.9.5), es de:

$$L_1 = L_{1_{B.T.}} - g = 456 - 6.6 = 449.4 \text{ mm}$$

$$L_1 = 449.4 \text{ mm}$$

b) Corrección de la Longitud del Devanado de A.T., debido a las inclinaciones en sus extremos.

El devanado tipo barril de A.T. tiene una inclinación que reduce la longitud de la bobina. La reducción aumenta - desde 0 hasta  $p$ , a lo largo de la primera y última espira, siendo el promedio total  $2p/2 = p$ . Respectivamente la longitud promedio de la bobina es:  $L-p$ , [5R] (véase figura 3.7b). Usando los resultados de 3.9.5, la inclinación  $p$ , es dada

$$\text{por: } p = (L_{1_{A.T.}} - L_{2_{A.T.}}) / 2 = (455.24 - 244.34) / 2$$

$$p = 105.45 \text{ mm}$$

Luego la longitud promedio de la bobina de A.T., es de:

$$L_2 = (L_{1_{A.T.}} - p) = (455.24 - 105.45) = 349.79$$

$$L_2 = 349.79 \text{ mm}$$

#### Reactancia del devanado de B.T.

Usando los resultados de 3.9.5 y la fórmula ya expuesta, ajustando con la corrección de la longitud de la bobina, según - (a), la reactancia es:

$$x_1 = 2 \pi \times 60 \times 4 \pi \times 10^{-7} \times 48^2 \times \frac{0.555}{0.449} \left( \frac{0.012}{2} + \frac{0.0127}{3} \right)$$

$$x_1 = 0.0137 \text{ OHMS}$$

#### Reactancia del devanado de A.T.

Según 3.9.5 y la fórmula para el cálculo de la reactancia  $x_2$ , ajustando previamente con el valor corregido de la longitud de la bobina de A.T., tenemos que la reactancia en cuestión, es de:

$$x_2 = 2 \pi \times 60 \times 4 \pi \times 10^{-7} \times (22848)^2 \times \frac{0.904}{0.349} \left( \frac{0.012}{2} + \frac{0.073}{3} \right)$$

$$x_2 = 19,411 \text{ OHMS}$$

Reactancia total referida al primario

Está dada por la expresión:

$$X_1 = x_1 + x_2' = x_1 + x_2 \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = 0.0137 + 19411 \times \left( \frac{48}{22848} \right)^2$$

$$X_1 = 0.099 \text{ OHMS}$$

Reactancia por unidad ( $\epsilon_x$ )

Está dada por la expresión:

$$\epsilon_x = (I_1 X_1) / V_1 = (136.36 \times 0.099) / 220 =$$

$$\epsilon_x = 0.061 \text{ p.u.}$$

Este valor es inferior al límite fijado por la norma VDE - 0433, Part 1, la misma que establece que el voltaje de impedancia nominal de un transformador de ensayo a frecuencia y corriente nominal, no excederá de aproximadamente 10% del valor nominal para transformadores con tensiones de salida de hasta 500 KV.

## C A P I T U L O   I V

COMPORTAMIENTO DEL TRANSFORMADOR EN SERVICIO DE  
CORTA DURACION Y SERVICIO CONTINUO

#### 4. COMPORTAMIENTO DEL TRANSFORMADOR EN SERVICIO DE CORTA DURACION Y SERVICIO CONTINUO

##### 4.1. SERVICIO A CONDICIONES NOMINALES

##### 4.1.1. Pérdidas en el cobre

Las pérdidas en el cobre se dividen en pérdidas por efecto Joule y las pérdidas debidas a corrientes adicionales. Las pérdidas óhmicas puras, es calculada como si fuera producida por una corriente continua de valor igual al valor eficaz de la corriente alterna. Las pérdidas adicionales, son debidas a corrientes parásitas, generada por el flujo disperso, transversal a los conductores [9L]. Las pérdidas en el cobre, totales, es calculada según la expresión:

$$P_{cu} = I^2 R$$

donde: R = resistencia equivalente que incluye, además del efecto Joule, el debido a corrientes parásitas, (es referida a la tensión nominal del devanado para una corriente I nominal).

I = valor nominal de la corriente .

La resistencia óhmica pura de cada devanado, es calculada considerando las dimensiones geométricas del conductor y de la conductividad del cobre a la temperatura de referencia de 75 °C, para aislamiento clase A, tal como recomienda la norma IEC 76, parte I, en las secciones 3.83 y 3.9.4.

La segunda componente de la resistencia o sea las que se relacionan con las corrientes parásitas, depende de la forma

de las bobinas y de los conductores, como también de la frecuencia. Tal resistencia es evaluada indirectamente, calculando un factor K, que expresa la relación entre las pérdidas totales (Joule más parásitas) con las pérdidas Joule. Según las experiencias del Dr. R. Richter, expresada en la obra TRANSFORMADORES por el Dr. W. Schafer [9L], tal constante es calculable, según las fórmulas siguientes:

$$K_1 = 1 + \frac{m^2 - 0.2}{9} e^4 \quad (\text{conductor rectangular})$$

$$K_2 = 1 + \frac{m^2 - 0.2}{15.25} e^4 \quad (\text{conductor cilíndrico})$$

y

$$e = 2 \pi h \sqrt{\frac{n \times b \times f}{l_s \times r \times 10^5}}$$

donde:

h = espesor radial del conductor en cm

n = número de capas del devanado axialmente superpuestas

b = longitud axial de un conductor en cm

f = frecuencia

$l_s$  = longitud axial del circuito magnético de dispersión en cm = L + 2H

r = resistencia del conductor en (Ohm x mm<sup>2</sup>)/m

m = número de capas del devanado radialmente superpuestas.

Los símbolos que aparecen en las fórmulas están contenidas en la figura 4.1.

a1. Cálculo de K para el devanado de B.T.

Con cierta aproximación, de las secciones 3.8.1 y -

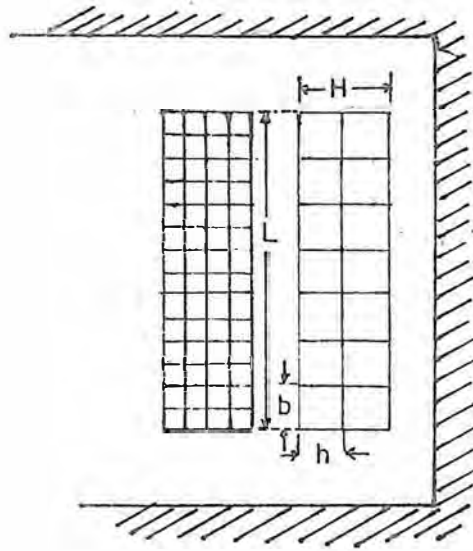


FIGURA 4.1 - Cálculo de las Pérdidas Adicionales en los De vanados Cilíndricos

3.8.3, se tiene que:

$$h = 0.326 \text{ cm}$$

$$n = 48$$

$$b = 0.895 \text{ cm}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$l_s = L + 2H = 45.6 + 2 \times 1.27 = 48.14 \text{ cm}$$

$$r = 0.021 \text{ (ohm} \times \text{mm}^2\text{)}/\text{m}$$

$$m = 2$$

Reemplazando en las fórmulas dadas, se tiene:

$$e = 2 \pi h \sqrt{\frac{n b f}{l_s \times 10^5}} = 2 \pi \times 0.326 \sqrt{\frac{48 \times 0.895 \times 60}{48.14 \times 0.021 \times 10^5}}$$

$$e = 0.327 \text{ y } e^4 = 0.011$$

Finalmente:  $K_{B.T} = 1 + \frac{m^2 - 0.2}{9} e^4 = 1 + \left(\frac{2^2 - 0.2}{9}\right) \times 0.011$

$$K_{B.T} = 1.005$$

Como la resistencia óhmica a 75 °C, calculada en 3.8.3 es de 0.0105 Ohm, la resistencia total equivalente, es:

$$R_{T1} = R_{B.T} \times K = 0.0105 \times 1.005$$

$$R_{T1} = 0.01055 \text{ ohmios}$$

a2. Pérdida en el Cobre del Bobinado de B.T.

La corriente nominal del devanado en cuestión es de 136.36 amperios y las pérdidas en el cobre del devanado de B.T. es de:

$$P_{cu_{B.T.}} = I^2 R_{T1} = (136.36)^2 \times 0.01055$$

$$P_{cu_{B.T.}} = 196.2 \text{ W.}$$

b1. Cálculo de K para el Devanado de A.T.

De la sección 3.9, se tiene:

$$h = 0.0643 \text{ cm}$$

$$n = \frac{1}{2} (708 + 380) = 544$$

$$b = 0.0643 \text{ cm}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$l_s = L + 2H = 34.4 + 2 \times 7.3 = 49.5 \text{ cm}$$

$$r = 0.021 \text{ (ohm} \times \text{mm}^2) / \text{m}$$

$$m = 42$$

de donde: 
$$e = 2 \pi \times 0.057 \frac{544 \times 0.0643 \times 60}{49.5 \times 0.021 \times 10^5} = 0.05$$

y ; 
$$e^4 = 0.0000067$$

Juego: 
$$K_{A.T.} = 1 + \left( \frac{m^2 - 0.2}{15.25} \right) \times e^4 = 1 + \left( \frac{42^2 - 0.2}{12.25} \right) \times$$

$$0.0000067 = 1.0008$$



Valor que significa un incremento por corriente parásita de la resistencia, en algo menos que el 0.1%. De ahí que la resistencia efectiva del devanado de A.T., la tomamos como fué calculada en 3.9.4 o sea de 1700 ohmios.

b2. Cálculo de las pérdidas en el cobre del Devanado de A.T a Condiciones Nominales

La corriente nominal del devanado de A.T. es de 0.3 A. y las perdidas en el cobre del devanado es de:

$$P_{cu_{A.T.}} = (0.3)^2 \times 1700 = 153 \text{ W.}$$

c. Pérdidas Totales en el cobre

Usando los resultados de los acápites anteriores, las pérdidas totales en el cobre de los arrollamientos, son:

$$P_{cu} = P_{cu_{B.T}} + P_{cu_{A.T}} = 196.2 + 153 = 349.2 \text{ W}$$

4.1.2. Pérdidas en el Fierro a Tensión Nominal

De las secciones 2.13 y 2.17, se conoce que la densidad magnética y el peso de fierro, respectivamente, son:

$$B_{mc} = 1.34 \text{ Wb/m}^2 \text{ y } P_i = 201.1 \text{ Kg}$$

Otra consideración a seguir, es que las pérdidas específicas en el fierro, para inducciones medias, varía con la frecuencia [5L], según la expresión:

$$\omega_i = \omega_{i50} \times (60/50)^{1.25}$$

Para un acero laminado en frío (véase anexos), considerando además un aumento en las pérdidas en el fierro de un 20%, debido al manipuleo y mecanizado de las láminas, las pérdi-

das específicas, dadas por el fabricante, deben ser corregidas, o bien tomar tales pérdidas específicas de curvas experimentales de pérdidas, sobre núcleos terminados, en los que ya se han considerado, tales incrementos de pérdidas por manipuleo, etc. Una de estas curvas [2L], es la mostrada en la figura 4.2.

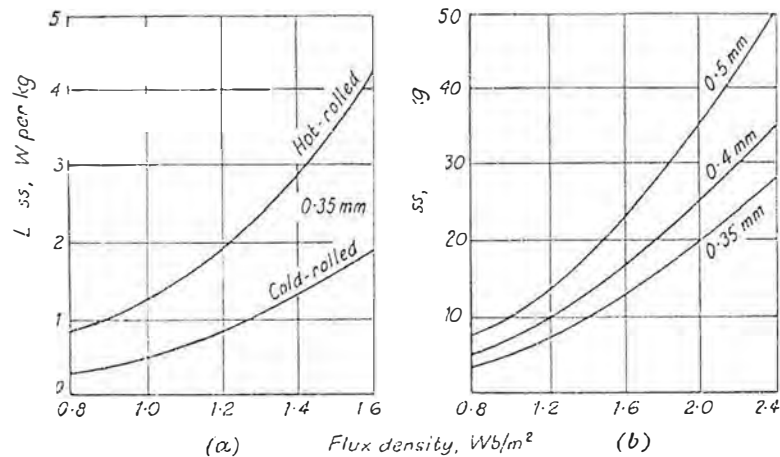


FIG. 4.2 - PERDIDAS EN EL NUCLEO a 50 C.P.S

a) Transformadores                      b) Máquinas

Para  $B_{mc} = 1.34 \text{ Wb/m}^2$ , las pérdidas específicas en el hierro, considerando los incrementos de pérdidas por manipuleo etc. es de  $\omega_{ic} = 145 \text{ W/Kg}$ . a la frecuencia de 50 Hz.

Tal valor corregido a la frecuencia de trabajo es de:

$$\omega_i = 1.45 (60/50)^{1.25} = 1.82 \text{ W/Kg}$$

Luego las pérdidas en el fierro en Watts, considerando el peso del circuito magnético, es de:

$$W_i = \omega_i \times P_i = 1.82 \times 201.1 = 364.5 \text{ W.}$$

ción del núcleo y el radio de espiras media.

La corriente magnetizante, puede estimarse también en curvas de  $B_m$  vs.  $Atm$ . del material, tal como se muestra a continuación:  $E_1 = 4.44 f N_1 B_m A_i$

Los volt-ampere de magnetización, son de:

$$E_1 I_{or} = 4.44 f B_m A_i N_1 I_{or} = (4.44 f B_m A_i L_i Atm) / \sqrt{2}$$

Como el peso específico del material es de:  $7.65 \text{ gr/cm}^3$ , entonces  $7650 A_i L_i$ , es el peso en Kg. del circuito magnético. En consecuencia, los volt-ampere de magnetización por Kg., - está dado por la siguiente expresión:

$$4.1 \times 10^{-4} \times f \times B_m \times Atm$$

La corriente magnetizante es estimada, considerando los amp-espira por metro del núcleo y del yugo respectivamente, los que para la densidad de  $B_m = 1.4 \text{ Wb/m}^2$  y según la figura 4.3 [2L] que se muestra, es de:  $80 \text{ (amp-esp)/m}$ .

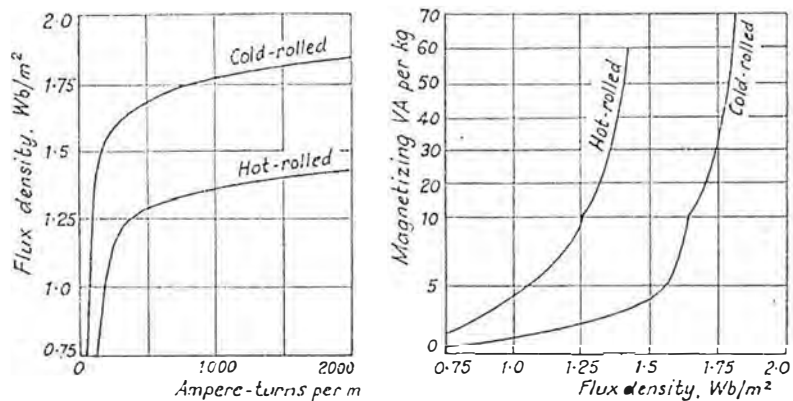


FIG. 4.3 - CURVAS DE MAGNETIZACION B/Amp-Esp y Volt-Amp.

Utilizando además, la figura 2.4 para magnetizar el fierro, requerimos:

$$\text{Núcleo} = 2 \times 80 \times 51 \times 10^{-2} = 81.6 \text{ Amp-Esp}$$

$$\text{Yugos} = 2 \times 80 \times 38.75 \times 10^{-2} = 62 \text{ Amp-Esp}$$

---

$$\text{Total: } 143.6 \text{ Amp-Esp.}$$

Luego la corriente magnetizante es de:

$$I_{or} = (at_m \times L_i) / (\sqrt{2} N_1) = 143.6 / (\sqrt{2} \times 48)$$

$$I_{or} = 2.12 \text{ A.}$$

Y en por ciento, con respecto a la corriente nominal, es de:

$$I_{or} = (100 \times 2.12) / 136.36 = 1.55\%$$

También la componente activa de la corriente de vacío, está dado por:  $I_{oa} = W_{1T} / V_1 = 382.7 / 220 = 1.73 \text{ A.}$

donde se utilizó las pérdidas en el fierro total, dado en -  
4.1.2.

Tal componente, expresada porcentualmente es de:

$$I_{oa} = 1.26\%$$

#### 4.1.4. Potencia Reactiva en Vacío

Los volt-ampere de magnetización, es determinada considerando la figura 4.3 y la inducción  $B_m = 1.34 \text{ Wb/m}^2$ . De donde, los volt-ampere por Kg. son de: 3 (volt-amp)/Kg. Y los volt-amp, totales, sabiendo que el peso del circuito magnético es de 201.1 Kg (véase 2.17), son de:

$$V-A = 3 \times 201.1 = 603.3 \text{ Volt-Amp.}$$

Por otro lado, la potencia consumida para magnetizar el -

fierro, es de 382.7 W. (Véase 4.1.2), la potencia reactiva en vacío es de :

$$Q_o = (V-A)^2 - W_{iT}^2 = 603.3^2 - 382.7^2$$
$$Q_o = 466.4 \text{ VAR}$$

#### 4.2. CALCULO DE ESFUERZOS TERMICOS

##### 4.2.1. Cargas Básicas para una esperanza de Vida Normal del Transformador

"Cargar" el transformador de ensayo para una esperanza de vida normal, es cargarlo continuamente a capacidad nominal, para operar a condiciones normales de servicio.

La temperatura del punto más caliente del arrollamiento, es el factor determinante en la vida del transformador, debido al proceso de carga. Aquella temperatura a condiciones nominales, es determinada en función de la temperatura promedio del devanado y cierta tolerancia, que según la norma IEC 354 (Loading Guide for Oil-Immersed Transformer), es de **10°C**.

Hay una temperatura de la región más caliente, para cada nivel de carga. Su cálculo es dado por la suma de la temperatura del aire refrigerante, de la sobretemperatura del arrollamiento y de la gradiente de temperatura de la región más caliente [6R].

##### 4.2.2. Sobretemperatura Máxima Promedio de los Arrollamientos, Sobretemperatura Máxima Promedio

del Aceite

4.2.2.1. Dimensiones del Tanque y su Sobretemperatura

La cuba del transformador de ensayo en cuestión, es de acero no magnético, de superficies planas y con esquinas redondeadas [7L].

a) Longitud (L)

$$L = C + D_{e_{A.T.}} / 2 + 2b/2 + g + g_o$$

donde:

C = distancia entre ejes de las columnas del núcleo (véase 2.18) = 387.5 mm.

$D_{e_{A.T.}}$  = diámetro exterior de la bobina de A.T.= (véase 3.9.5) = 361 mm.

g = distancia aislante de la superficie del devanado de A.T. a la cuba = 290 mm. (véase fig.4.4)

$g_o$  = distancia de la masa magnética a la cuba = 10 mm.

2 b/2 = mitad del ancho de lámina del escalón tipo I = 63.7 mm.

Las distancias no aludidas a un cálculo anterior, son determinadas, considerando superficies de refrigeración adecuados y además de acuerdo a la figura 4.4, [10L].

Reemplazando valores se obtiene:

$$L = 387.5 + 361/2 + 63.7 + 290 + 10 = 939.7$$

$$L = 940 \text{ mm.}$$

b) Ancho (A)

$$A = D_{e_{A.T.}} + 2g$$

de donde:

$$A = 361 + 2 \times 290 = 941 \text{ mm.}$$

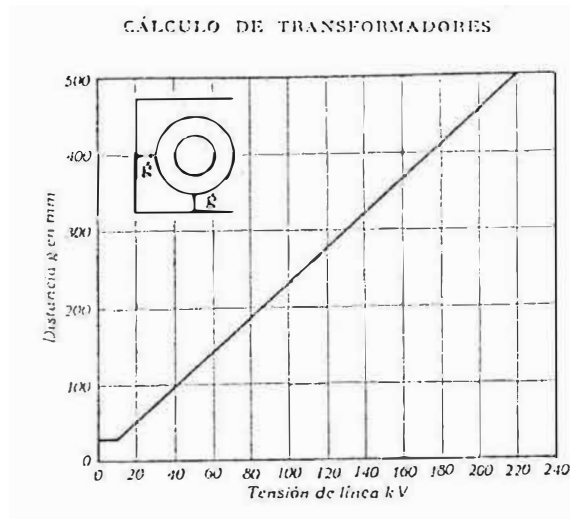


FIG. 4.4 - DISTANCIAS MINIMAS ENTRE LAS BOBINAS Y LA CUBA

Considerando un espacio para la salida de conductores y el conmutador de conexiones de B.T., tomamos:

$$A = 960 \text{ mm.}$$

c) **Altura ( $H_T$ )**

$$H_T = H + 2 \times 2b + h$$

$H$  = altura de las columnas = 510 mm (véase 2.16).

$$2b = 127.5 \text{ mm.}, \text{ según 2.17}$$

$h$  espacio a considerar para el espacio de tomas y la parte interna del bushing (véase anexo) de salida =  $9 \frac{1}{2}$  pulg. = 24.13 centímetros

Considerando un espacio adicional para las conexiones, tomamos:  $h = 300 \text{ mm.}$

$$\text{Luego: } H_T = 510 + 2 \times 127.5 + 300 = 1065 \text{ mm}$$

Los devanados y el núcleo depositan el calor generado por sus pérdidas sobre el aceite y éste sobre la su

perficie de la cuba, mediante fenómenos de conducción, radiación y convección.

La transferencia del calor del aceite, sobre el tanque, motiva que éste, eleve su temperatura con respecto al ambiente. Tal gradiente de temperatura, denominada sobretemperatura del tanque  $\Delta T_t$ , es evaluada considerando la relación entre las pérdidas a disipar por las paredes del tanque y la sobretemperatura del mismo, la temperatura ambiental, la presión relativa del aire, etc. Entonces la sobretemperatura  $\Delta t_t$  del tanque, con respecto al ambiente para temperaturas ambientales, entre 0°C y 50°C, pueden evaluarse por la fórmula dada por L.F. Blume [8L], que considera la difusión del calor por radiación y convección:

$$\omega = 0.285 \times 10^3 E \times \Delta T^{1.19} \left(1 + \frac{1.1 T_a}{100}\right) + 0.217 \times 10^{-3} \times F \Delta T^{1.25} \sqrt{p}$$

donde:

$\omega$  = pérdidas totales disipadas por centímetro cuadrado de superficie plana equivalente del tanque

$\Delta T_t$  = sobretemperatura del tanque en °C

E = factor de irradiación de la superficie exterior del tanque = 0.95 (para superficies con pinturas oscuras y dentro de temperaturas de servicio del transformador).

$T_a$  = temperatura ambiental de referencia máxima en grados centígrados = 40 °C (según la norma IEC 76)

F = coeficiente de rozamiento del aire sobre las paredes del tanque = 1 (para superficies planas)

P = presión barométrica relativa (densidad relativa del



aire) = 1.0 (para altura de trabajo sobre el nivel del mar de 0 metros).

También por ser un tanque de superficies planas, la superficie disipadora de calor por convección y radiación son similares.

La superficie total de disipación es de:

$$S_T = 2 (L H_T + A H_T) = 2 \times 106.5 (94 + 96)$$
$$S_T = 40,470 \text{ cm}^2$$

Las pérdidas totales a disipar es de:

CIRCUITO MAGNETICO: 382.7 W, según 4.1.2

ARROLLAMIENTO 349.2 W, según 4.1.1

$$\text{Total } W = 731.9 \text{ W}$$

Luego los voltios a disipar, por unidad de superficie del tanque, es de:

$$\omega = 731.9/40470 = 0.018 \text{ W/cm}^2$$

Reemplazando este valor y los ya fijados en la fórmula para el cálculo de la sobretemperatura del tanque, tal sobretemperatura es de:

$$0.018 = 0.285 \times 10^{-3} \times 0.95 \times \Delta T^{1.19} \left(1 + \frac{1.1 \times 40}{100}\right) + 0.217 \times 10^{-3} \times \Delta T^{1.25}$$

Resolviendo esta ecuación, se tiene que la sobretemperatura del tanque es de:

$$\Delta T_t = 16.43 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A continuación se resumen las dimensiones del tanque:

$$\text{LONGITUD } L = 940 \text{ mm}$$

$$\text{ANCHO } A = 960 \text{ mm}$$

$$\text{ALTURA } H_T = 1065 \text{ mm}$$

#### 4.2.2.2. Sobrettemperatura del Aceite

De la figura 4.5, tomada de TRANSFORMER ENGINEERING por A.F. Blume [8L], se deduce que la caída de temperatura, desde el aceite hacia la superficie interior del tanque, es pequeña. No existe también, una caída de temperatura a través del metal y que el 90%, de la caída total de temperatura del aceite hacia el aire, es desde la superficie exterior del tanque hacia el aire. De la figura citada se desprende que la sobrettemperatura del aceite, con respecto al tanque, es aproximadamente 10/70 de la sobrettemperatura del tanque, respecto al ambiente. Usando el resultado de 4.2.2.1.

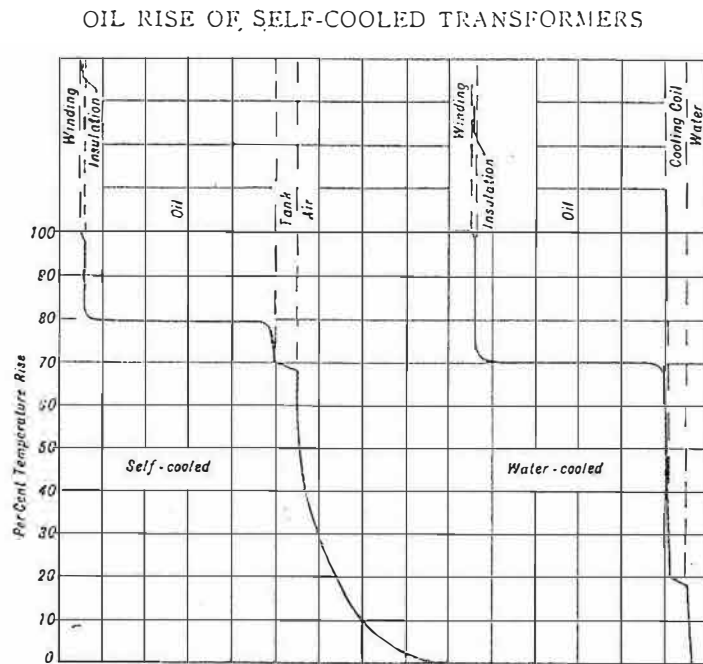


FIG. 4.5 - GRADIENTE DE TEMPERATURA DESDE EL ARROLLAMIENTO HACIA EL MEDIO REFRIGERANTE

tenemos que:  $T_{ac.m\acute{a}x} - T_{t.m\acute{a}x} = \frac{10}{70} \times 16.43 = 2.3 \text{ } ^\circ\text{C}$

De las dos últimas expresiones, se deduce:

$$T_{ac.m\acute{a}x} - T_a = 18.73 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por tanto el valor de la sobretemperatura del aceite, es muy inferior al máximo establecido por las especificaciones técnicas correspondientes [6R], para transformador con conservador y sellados, es de 60°C.

#### 4.2.2.3. Sobretemperatura del Cobre ( $\Delta T_{cu}$ )

Es expresada según las siguientes relaciones:

$$\Delta T_{cu} = T_{cu} - T_a = (T_{cu} - T_{ac}) + (T_{ac} - T_a) = T_1 + T_2$$

Se conoce de 4.2.2.2  $\Delta T_2 = T_{ac} - T_a = 18.73 \text{ } ^\circ\text{C}$

Pero  $\Delta T_1 = T_{cu} - T_{ac} =$  Gradiente de temperatura media, desde la región caliente hacia el aceite.

##### a) Gradiente máximo de temperatura en el devanado de A.T.

El gradiente máximo de temperatura de un arrollamiento, con superficies de enfriamiento, sólo verticales, está dado por la fórmula [3L] siguiente:

$$T_1 = \left( \frac{K_i t_i}{2K \text{ ml}} + \frac{t_e}{2K \text{ m'l}} + \frac{t_s}{2K_s \text{ m'l}} \right) \omega$$

El primer sumando representa la transmisión de calor por conducción, el segundo sumando, la transmisión de calor, a través los aislantes externos de la bobina y el tercero, representa el calor transmitido en la frontera de las superficies en contacto de la bobina y del aceite.

Además:

$K_i$  = factor que depende del número de capas de las bobinas, a través de las cuales se transmite el calor = 0.24 para 7 ó más capas.

$t_i$  = es el espesor total del aislante interno en pulgadas

$m$  = longitud de la espira media en pulgadas

$K$  = conductividad térmica del aislante

$t_e$  = espesor del aislante externo en pulgadas a cada lado

$m'$  = perímetro medio neto, considerando la superficie de enfriamiento perdida; debido a los espaciadores, en pulgadas.

$t_s, K_s$  = representa el espesor equivalente y la conductividad térmica equivalente de la superficie. De la experiencia es conocida la razón  $t_s/K_s = 10 - 30$ , (véase [3L]).

$w$  = pérdidas en W en la bobina

#### Gradiente máximo de la bobina de A.T.

El cálculo de la caída de temperatura en el arrollamiento de A.T. se realiza para las peores condiciones, aquí, considerando una sola superficie de enfriamiento.

$$K = 0.24$$

$$t_i = 41 \times 1.075 \text{ mm (según 3.9.3)} = 1.73 \text{ pulg.}$$

$$K_i t_i = 0.24 \times 1.73 = 0.42 \text{ pulg.}$$

$$m = 90.4 \text{ cm. según 3.9.4} = 35.59 \text{ pulg.}$$

$$l = L_2 \text{ (véase 3.9.6b)} = 349.8 \text{ mm} = 13.77 \text{ pulg.}$$

(valor aproximado, considerando que cada capa tiene un canal de aceite).

$$t_e = 0.5 \text{ mm, véase 3.9.3} = 0.02 \text{ pulg.}$$

$$m' = \pi D_{e \text{ A.T.}} = \pi \times 361 \text{ mm (véase 3.9.5)} = 44.6 \text{ pulg.}$$

$$t_s/K_s = 15$$

$$w = 153 \text{ W, según 4.1.1}$$

Reescribiendo la fórmula, para el cálculo de gradiente de temperatura, tenemos:

$$\begin{aligned}\Delta T_1 &= \left( \frac{K_i t_i}{K_m} + \frac{t_e}{m' K} + \frac{t_s}{K_s} \cdot \frac{1}{m'} \right) \frac{\omega}{e} = \\ &= \left( \frac{0.42}{0.004 \times 35.59} + \frac{0.02}{0.004 \times 44.6} + \frac{15}{44.6} \right) \left( \frac{153}{13.77} \right) \\ \Delta T_1 &= 37.7 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

b) Gradiente máximo para la bobina de B.T.

El valor de la constante K para una bobina de dos capas, es cero, según la experiencia del Dr. E Wild. Por tanto, el gradiente de temperatura para la bobina de B.T. es cero, se justifica este valor, porque tal bobina cuenta con dos ductos verticales y uno horizontal, que le da una amplia superficie de refrigeración. Luego, retornando al inicio de 4.2.2.3 la sobretemperatura del cobre, es de:

$$\Delta T_{cu} = \Delta T_1 + T_2 = 37.7 + 18.73 = 56.43 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Esta sobretemperatura máxima del cobre, es inferior al máximo fijado por la norma pertinente [6R], que es de 65 °C, para devanados con refrigeración natural por aceite y cuba sellada con depósito de expansión.

4.2.2.4. Temperatura de la región más caliente

Aplicando las definiciones de 4.2.1 y los resultados de 4.2.2.3, la temperatura de la región más caliente, a condiciones nominales, puede evaluarse mediante la expresión:

$$T_{HO} = T_a + \Delta T_{cu_o} + \Delta T_o$$

Donde:  $T_a$  = temperatura del aire refrigerante igual a  $40^\circ\text{C}$ , como máximo (según IEC 354)

$\Delta T_o$  = gradiente de temperatura, desde la región más caliente e igual a  $10^\circ\text{C}$  para transformadores refrigerados por aceite, según las especificaciones IEC 354. (Tolerancia de temperatura referencial).

$T_{HO}$  = temperatura en  $^\circ\text{C}$  de la región más caliente a condiciones nominales

$\Delta T_{cu_o}$  = sobretemperatura del cobre a P.C. e igual a  $56.43^\circ\text{C}$ .

Reemplazando se tiene:

$$T_{HO} = 40 + 56.43 + 10 =$$

$$T_{HO} = 106.43^\circ\text{C}$$

Este valor es inferior al límite establecido, para el aislante tipo A, según las especificaciones técnicas IEC 85 e IEC 354, el cual es de  $115^\circ\text{C}$  [11L]. Por consiguiente, siendo la temperatura de la región más caliente, la indicadora del grado de esfuerzo que soporta los aislantes de los devanados, será posible recargar el transformador por períodos cortos.

#### 4.2.3. Sobrecarga Límite para una esperanza de Vida Normal.

Asumiendo una sobrecarga continua de 8%, determinaremos la temperatura del punto más caliente [8L], aprovechando el límite inferior de la región más caliente. El cálculo está basado en la ecuación dada por A.E. Knowlton [8R]:

$$\Delta T_{cu_1} = \Delta T_{ac} \left( \frac{L R P^2 + 1}{R + 1} \right)^{n_o} + \Delta T_{cu-ac} (L P^2)^{n_c}$$

- Donde:  $\Delta T_{cu_1}$  = sobrettemperatura en el cobre
- $\Delta T_{ac}$  = sobrettemperatura del aceite a C.N. = 13.73°C  
(véase 4.2.2.2)
- R = relación entre las pérdidas en el cobre y -  
en el fierro a condiciones nominales =  
349.2/382.7 (según 4.1.1 y 4.1.2)
- $\Delta T_{cu-ac}$  = sobrettemperatura del cobre, respecto del acei-  
te con carga nominal = 37.7°C (según 4.2.2.3)
- $n_o$  = exponente de las pérdidas en función de la  
elevación de temperatura del aceite, sobre el  
ambiente = 0.8 (cuba con superficies planas)
- P = exceso o deficiencia de carga con respecto a  
la carga a C.N.
- $n_c$  = exponente de las pérdidas en función de la so-  
brettemperatura de los devanados sobre el acei-  
te = 0.8, para refrigeración por termosifón.
- $L = \frac{234 + T_a + \Delta T_{cu_1}}{234 + T_a + \Delta T_{ac} + \Delta T_{cu-ac}}$  ; donde  $T_a$  = tempera-  
tura ambiente.

Con las aproximaciones que se tiene en la evaluación de las temperaturas medias, asumimos  $L = 1$ , y reemplazando tenemos:

$$\Delta T_{cu_1} = 18.73 \left( \frac{0.91 \times 1.08^2 + 1}{0.91 + 1} \right)^{0.8} + 37.7 (1.08^2)^{0.8}$$

$$\Delta T_{cu_1} = 62.5^\circ\text{C}$$

Por tanto la temperatura del punto más caliente, es:

$$T_{H1} = \Delta T_{cu_1} + T_a + \Delta T = 62.5 + 40 + 10 = 112.54$$

$$T_{H1} = 112.54^\circ\text{C}$$

Aún en estas condiciones de sobrecarga continúa, tenemos un límite inferior para la temperatura de la región más calien

te, pero el 8% de sobrecarga, parece ser adecuada para un -  
envejecimiento normal de los aislantes, y aún más, si se re-  
cuerda las aproximaciones consideradas.

#### 4.2.4. Sobrecarga de Corta Duración (ensayos de hasta 30 minutos de duración)

La mayoría de ensayos de tensión aplicada y de con-  
torno, a frecuencia industrial, son de corta duración (1 mi-  
nuto, 5 minutos y hasta 30 minutos, [3R]). Además, como se  
verá después, debido a la constante de tiempo grande del trans-  
formador, es común usar el transformador para ensayos de cor-  
ta duración y cargas altas que exigen un 200% de sobrecarga  
[8R], siempre que no se rebase los límites de sobretemperatu-  
ra.

##### 4.2.4.1. Elevación de Temperatura del aceite de la Capa - Superior para una Sobrecarga Continúa

A fin de calcular las sobretemperaturas para en-  
sayos de hasta 30 minutos, calculamos la elevación de tempe-  
ratura del aceite, bajo una carga continua de 200%. Tal so-  
bretemperatura es evaluada, según la fórmula expresada en  
4.2.3 por la primera componente de la derecha.

Simbolizando por  $\Delta T_{ac}$ , la sobretemperatura media del aceite,  
para la sobrecarga mencionada arriba, tenemos:

$$\Delta T_{ac} = 18.73 \left( \frac{0.91 \times 2^2 + 1}{0.91 + 1} \right)^{0.8}$$
$$\Delta T_{ac} = 38.26^{\circ}\text{C}$$



4.2.4.2. Cálculo de la Constante de Tiempo a Condiciones Nominales

La constante de tiempo a C.N. es evaluada por la expresión  $[8L]$ , siguiente:

$$B_R = \frac{C \times \Delta T_{ac}}{P_T}$$

donde:

$B_R$  = constante de tiempo en horas a condiciones nominales

$\Delta T_{ac}$  = sobretemperatura del aceite de la capa superior a P.C. = 18.73°C (véase 4.2.2.2)

$P_T$  = pérdidas totales a P.C. = 731.9 W (véase 4.2.2.1)

$C$  =  $|0.132 \times \text{Kg (cobre + hierro)} + 0.088 \times \text{Kg de caja} + 0.353 \times \text{Galones de aceite}|$  (W-hr)/(Kg x °C)

-- PESO DEL COBRE

Los pesos de cada devanado (cobre desnudo), es evaluada por la expresión elemental :

$$G = \gamma V = \frac{7 d^2}{100} (l_{mt} \cdot N)$$

donde:  $V$  = volumen en  $\text{cm}^3$

$\gamma$  = peso específico en  $\text{gr/cm}^3 = 8.9 \text{ gr/cm}^3$

$d$  = diámetro del conductor en mm

$l_{mt}$  = longitud de la espira media en cm

$N$  = número de espiras

Usando los resultados de 3.9.1 y 3.9.4, tenemos:

$$G_{A.T.} = \frac{7 \times 0.574^2}{100} (90.4 \times 22848)$$

$$G_{A.T.} = 47,636 \text{ grs.}$$

Similarmente, usando 3.8.1, 3.8.2 y 3.8.3, el peso del arrollamiento de B.T., es de:

$$G_{B.T.} = 213,394 \text{ grs.}$$

Luego el peso total del cobre es de:

$$G_T = 260.9 \text{ Kg.}$$

También según 2.17, el peso del fierro es de: 201 Kg.

#### - PESO DE LA CUBA

El espesor mínimo de la plancha puede calcularse por la expresión [10L] siguiente:

$$t = 3 \sqrt[3]{H}$$

donde:  $t$  = espesor en mm

$$H = \text{altura del tanque en m} \doteq 1.0 \text{ m (4.2.2.1)}$$

Luego, reemplazando y aproximando, tenemos:

$$t_{\min} = 3.1 \text{ mm}$$

De 4.2.2.1, el área total de cuba es de:  $58328 \text{ cm}^2$  y el volumen es de:  $0.31 \times 58328 = 18,082 \text{ cm}^3$ .

Luego el peso de la cuba es:

$$G_{\text{cuba}} = \gamma V = 7.8 \times 18082 = 141,037 \text{ gr.}$$

$$G_{\text{cuba}} = 141 \text{ Kg.}$$

#### - CALCULO DE LOS GALONES DE ACEITE

$$\begin{aligned} \text{Volumen de la cuba: } A \times B \times C &= 9.4 \times 9.6 \times 10.65 = \\ &961. \text{ dm}^3 \text{ (4.2.2.1)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen del hierro magnético} &= 201/7.65 = 26.3 \text{ dm}^3 \\ &= 26.3 \text{ dm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen de cobre} &= 260.9/8.9 = 29.2 \text{ dm}^3 \\ &= 29.2 \text{ dm}^3 \end{aligned}$$

Peso del hierro de la estructura =  $0.25 \times 201 = 50.3$  Kg

Volumen de hierro de la estructura =  $50.3/7.84 = 6.4$

$$= 6.4 \text{ dm}^3$$

Volumen parte sumergida =  $26.3 + 29.2 + 6.4 = 61.9 \text{ dm}^3$

Volumen ocupado por el aceite =  $961 - 61.9 = 899.1 =$

$$899.1 \text{ dm}^3 = 237.7 \text{ galones}$$

El factor C para el cálculo de la constante de tiempo, -

es de :  $C = 0.132 (260.9 + 201) + 0.088 \times 141 +$

$$0.353 \times 237.7 = 157.29$$

Usando los valores pertinentes expuestos, la constante -

de tiempo a C.N. es:

$$B_R = \frac{157.29 \times 18.73}{731.9}$$

$$B_R = 4.03 \text{ horas}$$

#### 4.2.4.3. Sobretemperatura del Aceite de la Capa Superior para Ensayos de Corta Duración

Con la sobrecarga del 200%, consecutiva a la carga nominal, el incremento de la temperatura del aceite es de:

$$\Delta T_{\text{fac}} = 38.26 - 18.73 = 19.53^\circ\text{C}, \text{ según } 4.2.4.1 \text{ y } 4.2.2.2.$$

Donde:  $\Delta T_{\text{fac}}$  = incremento de la sobretemperatura del aceite para una sobrecarga continúa.

La elevación de temperatura del aceite, en un período intermedio,  $\Delta T_{\text{ac}}$ , puede evaluarse por la expresión [8L] siguiente:

$$\Delta T_{\text{ac}} = \Delta T_{\text{fac}} (1 - e^{-t/B})$$

donde:  $t$  = tiempo en horas

$B$  = constante de tiempo en horas = 4.03 horas

$$\Delta T_{\text{fac}} = 19.53^{\circ}\text{C}$$

Los incrementos de la sobret temperatura del aceite para 0.5 y 1 hora respectivamente, son:

$$2.27^{\circ}\text{C} \text{ y } 4.29^{\circ}\text{C}$$

Un análisis "frío" del proceso térmico, durante una sobre carga, motiva considerar la duración de la misma, hasta alcanzar una temperatura menor que  $8^{\circ}\text{C}$ , para asegurar un envejecimiento prudente del aislante. Aún más, el transformador de ensayo, raramente está conectado a P.C. y en servicio continuo (cuanto más es de 8 horas consecutivas). De ahí que se analiza la sobrecarga del 200%, para 0.5 y 1 hora, obteniéndose como se vió, incrementos de sobret temperatura muy inferior al límite, los cuales no ocasionarían esfuerzos térmicos peligrosos. Por tanto, como es muy frecuente, el transformador puede ser usado para ensayos de 1 minuto y hasta de 15 minutos de duración [3R], garantizándose la vida del transformador, desde el punto de vista térmico.

#### 4.3. COMPROBACION DE ESFUERZOS EN LOS DIELECTRICOS

##### 4.3.1. Esfuerzos Radiales en los Dieléctricos entre Arrollamientos

La distancia aislante entre ambos, el devanado de A.T. y el de B.T., es determinada de la figura 3.5, [2L], para el potencial en exceso de la primera capa, alrededor de 10 KV. Tal distancia es de 10 mm y concuerda con las distancias aislantes, según otras experiencias, [10L], tal como se

muestra en la figura 4.6.

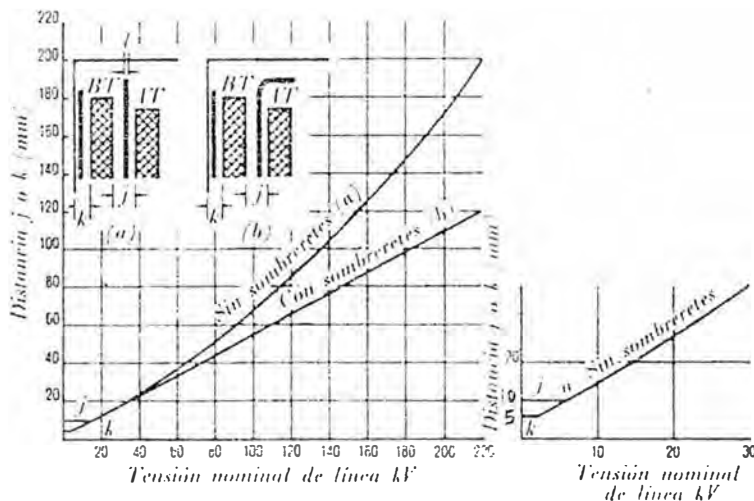


FIG. 4.6 - DISTANCIA MINIMA j ENTRE DEVANADOS A.T. Y B.T.

Sobre tal distancia, se incluye también el espesor de la placa neutra, que es la que evitará la penetración de las ondas de sobrevoltaje [8L], procedente del lado de A.T. El escudamiento se logra rodeando al primario con un material de baja resistividad eléctrica, procurando evitar formar un circuito cerrado, además debe estar aterrado [12L]. En cuanto al espesor, es suficiente aún, láminas o cintas muy delgadas. Tomamos una platina de sobre, de espesor de 0.75 mm. Luego la distancia aislante entre devanados es de 12 mm.

El aislante, utilizado entre el primario y la placa neutra, es papel aceitado (véase anexo) y entre la placa neutra y el devanado de A.T. Se tienen capas de papel aceitado, tipo cable y papel baquelizado (mayor permitividad dieléctrica) más cercano al devanado de alta tensión, según la fig.

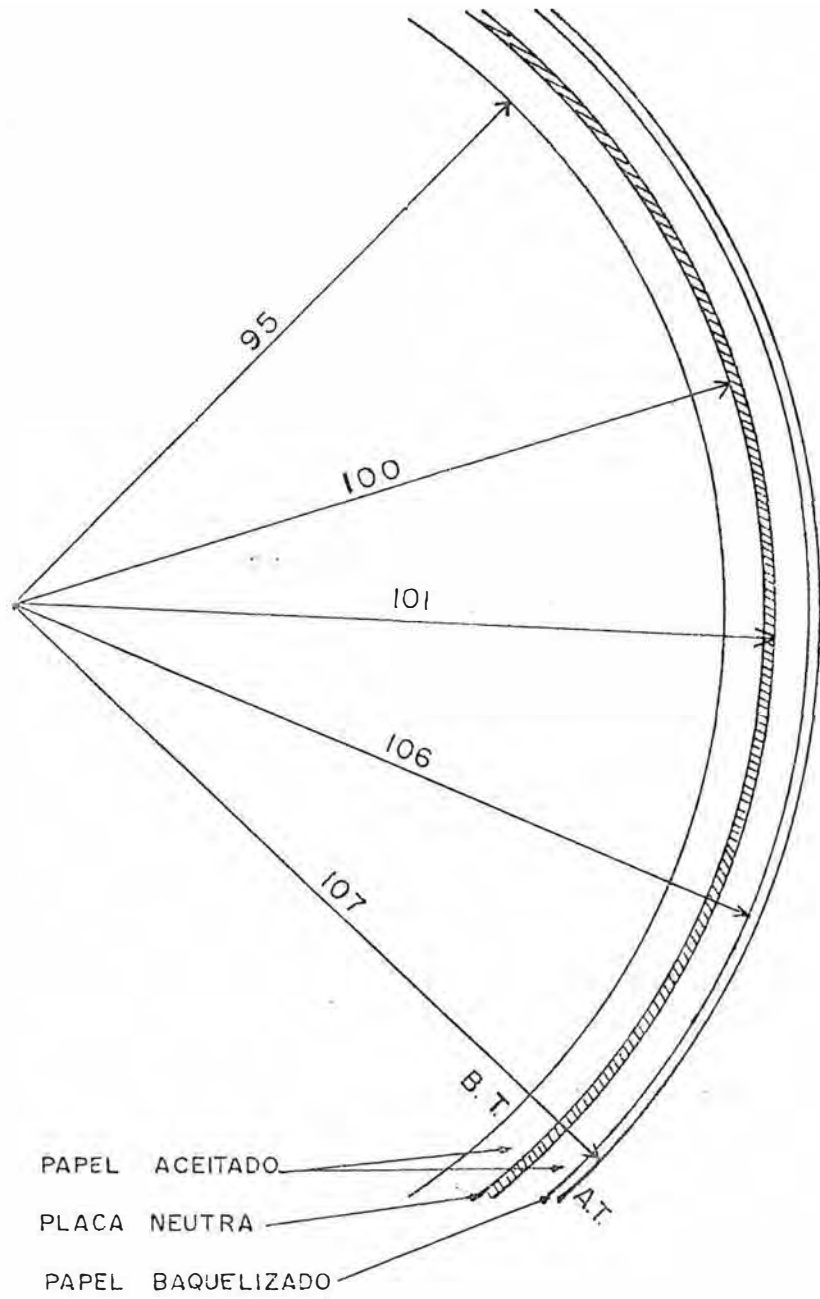


FIG. 4.7 - AISLAMIENTO ENTRE B.T. Y A.T.

4.7.

Los datos de ambos aislantes son:

PAPEL ACEITADO, TIPO CABLE

Rigidez dieléctrica durante 1 minuto:

A 20 °C                      27 KV/mm

A 90 °C                      26 KV/mm

Rigidez dieléctrica al impulso 1/50

Permitividad dieléctrica relativa ... 4.2

PAPEL BAQUELIZADO

Rigidez dieléctrica durante 1 minuto:

A 20 °C                      30 KV/mm

A 90 °C                      28 KV/mm

Permitividad dieléctrica relativa ... 5.0

El esfuerzo radial de los dieléctricos entre B.T. y A.T., es calculado considerando los devanados pertinentes como electrodos cilíndricos [8L]. Genéricamente para la capa "i"-ésima, el esfuerzo a una distancia x, está dado por:

$$E_{xi} = \frac{V}{e_i x_i K} \text{ KV/mm}$$
$$K = \frac{\ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}{e_i}$$

Donde:  $e_i$  = permitividad dieléctrica del aislante "i"  
 $x_i$  = distancia radial en  
 $r_i$  = radio interior del aislante de la capa "i"  
 $V$  = tensión entre electrodos, en KV.

Para el sistema de la figura 4.7, los esfuerzos radiales máximos en los dieléctricos, desde las capas más cercanas al arrollamiento de B.T. hacia el de A.T., respectivamente, son:

$$K = \frac{\ln \frac{199.102}{189.352}}{4.2} + \frac{\ln \frac{211.852}{199.102}}{4.2} + \frac{\ln \frac{214.852}{211.852}}{5.0}$$

$$K = 0.02954$$

Luego:

$$E_1 = \frac{125}{94.68 \times 4.2 \times 0.02954} ; E_1 = 10.64 \text{ KV/mm}$$

$$E_2 = \frac{125}{99.551 \times 4.2 \times 0.02954} ; E_2 = 10.12 \text{ KV/mm}$$

$$E_3 = \frac{125}{105.926 \times 5.0 \times 0.02954} ; E_3 = 7.99 \text{ KV/mm}$$

Estos gradientes máximos, comparados con los esfuerzos tolerables, origina coeficientes de seguridad de 2.44, 2.57, y 3.5 respectivamente. Entonces los gradientes de trabajo - garantizan esfuerzos adecuados en los aislantes.

#### 4.3.2. Esfuerzos en los Dieléctricos en el Devanado de A.T

##### 4.3.2.1. Cálculo de la Tensión Inicial de Efluvios

La tensión inicial de efluvios es evaluada (véase 3.5.3), según la expresión:

$$U_K = (1.06 \times 10^{-5}) / C^{0.45}, \text{ KV}$$

La capacidad específica "C", es calculada considerando dos cilindros coaxiales y referido a su superficie interior [7L] conforme a:



$$C_i = \frac{\epsilon_o \epsilon}{r_i \ln \frac{r_e}{r_i}} = \frac{\epsilon \times 0.0884}{r_i \ln \frac{r_e}{r_i}} \times 10^{-12} \text{ F/cm}^2$$

$r_i, r_e$  en centímetros

La capacitancia de la superficie interior cilíndrica de la primera y segunda capa (terminal aterrado), es evaluada según los siguientes pasos:

$$r_i = 107.425 \text{ m.m, según 3.9.5}$$

$$r_e = 108.500 \text{ m.m, según 3.9.2}$$

$$C_1 = \frac{4.2 \times 0.0884 \times 10^{-12}}{10.85 \times \ln \frac{10.85}{10.75}} = 3.6998445 \times 10^{-12}$$

$$C_1 = 0.036998445 \times 10^{-10} \text{ F/cm}^2$$

La capacitancia de la superficie interior cilíndrica de la penultima y última capa (terminal de línea), es determinada según los siguientes pasos:

$$r_e = 18.505 \text{ cm, según 3.9.5}$$

$$r_i = 17.943 \text{ cm, según 3.9.2}$$

y:

$$C_2 = \frac{4.2 \times 0.0885 \times 10^{-12}}{17.943 \times \ln \frac{18.0505}{17.943}} =$$

$$C_2 = 0.03464 \times 10^{-10} \text{ F/cm}^2$$

Con los valores de las capacitancias halladas, las tensiones iniciales de efluvios son, respectivamente:

$$U_1 = \frac{(1.06 \times 10^{-5})}{(0.036998445 \times 10^{-10})^{0.45}} = \frac{1.06 \times 10^{-5}}{7.172697165 \times 10^{-6}}$$

$$U_1 = 1.4778 \text{ KV, para las primeras capas.}$$

$$U_2 = \frac{(1.06 \times 10^{-5})}{(0.03464 \times 10^{-10})^{0.45}} = \frac{1.06 \times 10^{-5}}{6.9632 \times 10^{-6}} = 1.5 \text{ KV}$$

$U_2 = 1.5 \text{ KV}$ , para las últimas capas (de línea).

Considerando la tensión unitaria por capa de 4.46 V. y de acuerdo a 3.9.3, del número de espiras por capa, las diferencias de voltaje en las primeras y en las últimas capas, son respectivamente de:

$$U'_1 = 708 \times 4.46 = 3157 \text{ V} = 3.2 \text{ KV}$$

$$U'_2 = 380 \times 4.46 = 1695 \text{ V} = 1.7 \text{ KV}$$

La tensión inicial de la descarga rampante, en el aceite, es el triple que en el aire [7L]. De los cálculos anteriores, la tensión inicial de descarga rampante crítica, es de

$$U_0 = 3 \times 1.4 = 4.2 \text{ KV}$$

Este valor es superior, a la tensión inicial rampante probable que se presenta en el sistema (3.2 KV). Además tal valor es acrecentado, debido al aumento de las distancias disruptivas, por inclusión de balones de dieléctricos entre las diversas capas, garantizando más aún, la rigidez dieléctrica axial entre capas, tanto a frecuencia de servicio normal como a las debidas a sobrevoltajes de recuperación de los cortocircuitos en los objetos de ensayo [7L].

#### 4.3.2.2. Tensión Inicial de Descargas Rampante Ramificada

Tal tensión es evaluada por la expresión [7L], si guiente:

$$U_g = (1.355 \times 10^{-4}) / C^{0.44} \text{ KV}$$

C, capacidad específica en F/cm<sup>2</sup>

Usando los resultados de 4.3.2.1, para un caso crítico, la tensión inicial de descarga rampante sacrificada es:

$$U_g = \frac{1.355 \times 10^{-4}}{(0.036998445 \times 10^{-10})^{0.44}}$$

$$U_g = 14.51906 \text{ KV}$$

Este voltaje es superior a los voltajes que crean los esfuerzos críticos en las capas analizadas. Por tanto se tiene - coeficientes de seguridad de trabajos altos.

#### 4.3.3. Esfuerzos en los Dieléctricos entre el Devanado de A.T. y Masa

Sólo se observa el cálculo de esfuerzos en los dieléctricos del devanado de A.T. y masa por ser la situación más crítica.

Usando los resultados dados en las secciones 2.1.7 y 3.9.5, la distancia disruptiva entre un extremo del devanado de A. T. y Masa, es de 132.8 mm. Como la rigidez dieléctrica del aceite, es de 8 KV/mm, la razón de esfuerzo crítico a es - fuerzo de trabajo, es de:

$$C.S. = (8 \times 132.8)/125 = 8.5$$

tal coeficiente de seguridad es tan alto, además tal distancia está garantizada con demasía, por las distancias aislantes mínimas, recomendada por otros diseñadores [10L], tal - como se observa en la sección 4.3.1.

En lo que respecta de la distancia aislante, entre la superficie externa del arrollamiento de A.T. y la columna vecina,

aquella se obtiene usando los resultados de las secciones 2.10, 2.16, y 3.95, la que es aproximadamente, 154.495 mm. Luego el coeficiente de seguridad, en condiciones anormales, sabiendo que el dieléctrico es aceite, es de:

$$C.S. = (154.445 \times 8) / 125 = 9.89$$

Este coeficiente garantiza plenamente el servicio óptimo del sistema. Además tal distancia aislante, es también ga rantizada por otras experiencias [10L].

#### 4.4. DISTRIBUCION DE LA ONDA DE SOBREVOLTAJE

La distribución de la onda de voltaje, luego de una falla en el objeto de prueba, según la teoría de la onda estacionaria [8L], cuando un extremo del arrollamiento esta aterrado, está dado por la siguiente expresión:

$$e_x = \frac{\text{sen } h \cdot ax}{\text{sen } ha} \quad E$$

Donde:  $a = C_g / C_s$  = factor de la distribución inicial de la onda de voltaje

$x$  = distancia a lo largo de la pila de bobinas, como una fracción de la altura total

$e_x$  = voltaje a tierra en el punto  $x$

$C_s$  = capacitancia interna, medida desde el extremo de línea al terminal aterrado

$C_g$  = capacitancia del arrollamiento a tierra

$E$  = voltaje del terminal de línea a tierra.

#### 4.4.1. Cálculo de la Capacidad Serie

La capacidad serie  $C_s$ , para un arrollamiento concéntrico, por capas [12L], está dado por:

$$C_s = C_o \times \frac{4}{3} \left( \frac{N-1}{N} \right)^2$$

$$C_o = C/(N-1)$$

$$C = (2 \pi RL)/t$$

donde:  $C_o$  = capacidad del arrollamiento, considerado como dos electrodos cilíndricos, con la primera y última capa solamente, y un aislante de (N-1), veces el espesor de dieléctrico de una capa;

$C$  = capacidad de dos capas consecutivas;

$C_s$  = capacidad serie equivalente;

$R$  = radio medio de dos capas consecutivas;

$L$  = longitud del arrollamiento en la capa de menor potencial;

$t$  = espesor del aislante entre dos capas

$N$  = número de capas

Considerando los resultados de 3.9.3. y 3.9.5, los cálculos se dan en los siguientes pasos:

$$C = \frac{2 \pi RL}{t} = \frac{2 \pi \times 107.962 \times 455.24 \times 10^{-6}}{1.075 \times 10^{-3}}$$

$$C = 813536.4287 \times 10^{-12} \text{ F} = 813,536.428 \text{ pF}$$

Luego la capacidad entre la primera y última capa para  $N = 42$  capas, es de:

$$C_o = C/(N-1) = 813,536.428/41$$

$$C_o = 19,842.352 \text{ pF.}$$

Por tanto la capacitancia en serie equivalente es:

$$C_s = C_o \times \frac{4}{3} \left( \frac{N-1}{N} \right)^2 = 19,842.352 \times \frac{4}{3} \left( \frac{41}{42} \right)^2$$

$$C_s = 25,211.635 \text{ pF}$$

#### 4.4.2. Cálculo de la Capacitancia a Tierra

Para el cálculo de esta capacitancia, consideramos sólo la componente más importante [9R], es decir la capacitancia entre el arrollamiento de A.T. y de B.T. y es evaluado de acuerdo a la expresión:

$$C_g = \frac{2 \pi L \epsilon_o}{K}$$

donde: L = longitud de los electrodos = 455.24 mm

$$K = 0.02954, \text{ (véase 4.3.1)}$$

$$\epsilon_o = 8.85 \times 10^{-10} \text{ F/m}$$

Reemplazando:

$$C_g = 8.85 \times 10^{-10} \times \frac{2 \pi 0.45524}{0.02954}$$

$$C_g = 85,694.7228 \text{ pF}$$

Pero, la capacitancia a tierra real, es determinada considerando, el efecto de la placa neutra, como una superficie equipotencial. Así la capacitancia a tierra equivalente es:

$$C_{gE} = 2 C_g = 171,389.4456 \text{ pF}$$

#### 4.4.3. Cálculo del Factor de Distribución

Con las capacitancias halladas, tenemos:

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_{gE}}{C_s}} = \sqrt{\frac{171,389.4456}{25,211.635}} = 2.61$$

$$\alpha = 2.61$$

Luego la distribución inicial de voltaje, es tal como se esperaba, debido al tipo de devanado utilizado, tal como puede verse en la figura 4.8, [8L].

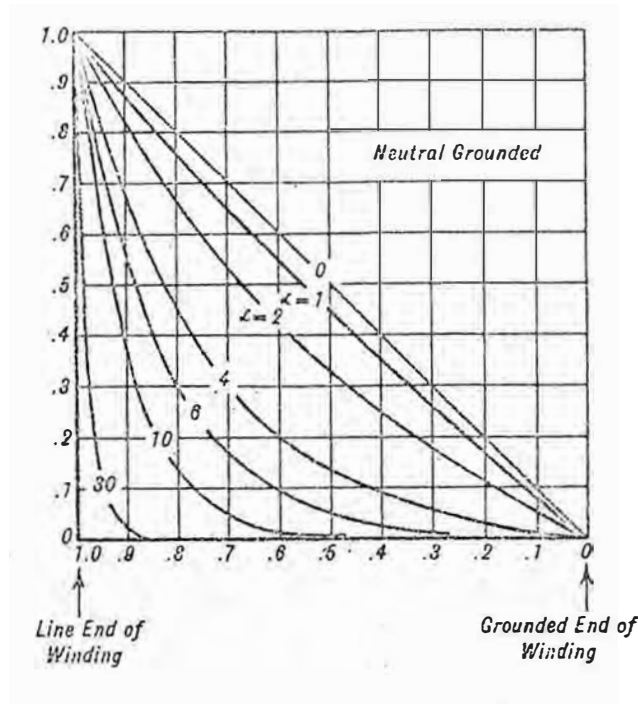


FIG. 4.8 - DISTRIBUCION HIPERBOLICA DEL VOLTAJE, DENTRO DEL ARROLLAMIENTO DEL TRANSFORMADOR CON EL NEUTRO ATERRADO

## C O N C L U S I O N E S

Modestamente podemos afirmar que el cálculo del transformador realizado, puede servir de base para el diseño de otros transformadores de ensayo, dentro del rango de tensiones de hasta 200 KV. Inclusive puede servir para el cálculo del transformador de ensayo para un funcionamiento en cascada, para conseguir tensiones muy elevadas, salvo que entre otros requerimientos a considerar, se tendrá que contemplar la gran carga capacitiva, como también el filtrado de los armónicos de voltaje.

En nuestro estudio, la corriente de carga capacitiva es ta dado por  $I_c = 2 \pi f C_{ef} \times U \times 10^{-9}$  amperios, cuando:

$$C_{ef} = \sqrt{C_g C_s} \text{ y } \alpha = 3, \text{ [14R]}. \text{ Con los resultados de 4.4.}$$

1. y 4.4.2,  $I_c = 2.5$  amperios.

Este valor comparado con la corriente reactiva inductiva absorbida en vacío (véase 4.1.3), asegura un funcionamiento estable del sistema:



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. LIBROS
  - [1L] TRANSFORMADORES PARA LA INDUSTRIA ELECTRICA  
Richard Bean - N. Chackan, etc.  
October, 1963
  - [2L] THE PERFORMANCE AND DESIGN OF ALTERNATING CURRENT  
MACHINES  
M. G. Say - 1965
  - [3L] TRANSFORMERS  
Eric E. Wild - 1948
  - [4L] DISEÑO DE APARATOS ELECTRICOS  
John H. Kuhlmann  
Mayo, 1959
  - [5L] MAQUINAS ELECTRICAS, Tomo I  
M. P. Kostenko - 1975
  - [6L] APPAREILLAGE ELECTRIQUE HAUTE TENSION  
Charles Bresson - 1930
  - [7L] TECNICA DE LA ALTA TENSION  
Arnold Roth - Gerard De Senarclens, etc.  
1966
  - [8L] TRANSFORMERS ENGINEERING  
L. F. Blume - A. Boyajian, etc.
  - [9L] TRANSFORMADORES  
Wilhelm Schafer 1957
  - [10L] TEORIA, CALCULO Y CONSTRUCCION DE TRANSFORMADORES  
Juan Corrales Martin - 1969
  - [11L] TRANSFORMADORES DE POTENCIA, DE MEDIDA Y DE PROTECCION  
Enrique Ras - 1978

- [12L] PRINCIPLES OF RADIO COMMUNICATION  
John Morecroft - 1933
2. ESPECIFICACIONES TECNICAS, MANUALES, REVISTAS
- [1R] TRANSFORMADORES DE ENSAYOS MODERNOS  
AEG - 1954
- [2R] BULLETIN DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ELECTRICIENS  
Serie 7° (Tomo III) - 1958 - N° 91
- [3R] GENERATION AND MEASUREMENT OF HIGH VOLTAGES REGULATIONS FOR THE GENERATION AND USE OF ALTERNATING AND DIRECT VOLTAGES FOR TESTING PURPOSES  
VDE 0433, Part 1/1.66 - 1967
- [4R] POWER TRANSFORMERS PART 1  
INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION  
PUBLICATION 76-1 - 1976
- [5R] LEAKAGE REACTANCE OF TRANSFORMERS  
Andres Halacsay  
Power Apparatus and Systems - AIEE 1956
- [6R] POWER TRANSFORMER - PART 2  
IEC - Publication 76-2: 1976
- [7R] MANUAL STANDARD DEL INGENIERO ELECTRICISTA - 71  
A.E. Knowlton - 1967
- [8R] INSTALACIONES DE PRUEBAS DE CORRIENTE ALTERNA  
Revista Siemens - 1966
- [9R] BULLETIN OERLIKON 328/329  
Oerlikon Engineering Company - Zurich 1958
- [10R] HIGH VOLTAGES TEST TECHNIQUES  
IEC Publications 60-1, 60-2: 1976
- [11R] HIGH VOLTAGE LABORATORY EQUIPMENT HAEFELY  
E. Haefely and Company USA - 1977

- [12R] IEC ESPECIFICATION FOR GLASS INSULATORS FOR OVER-  
HEAD LINES WITH ANOMINAL VOLTAGE OF 1000 VOLTS  
AND UPWARDS  
IEC - Publication 87: 1957
- [13R] ABNORMAL VOLTAGES WITHIN TRANSFORMERS  
L. F. Blume - A. Boyajian  
A.I.E.E. 1919
- [14R] SURGE - PROGF TRANSFORMERS  
H. V. Putman  
A.I.E.E. 1932

\* \* \* \* \*