

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



TESIS DE GRADO

**DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR TRIFASICO CON
ENFRIAMIENTO NATURAL EN ACEITE
DE 5000 Kva, 60 cps. 60,000 / 10,000 voltios**

EMILIO NAVARRO CASTAÑEDA

LIMA - PERU

1967

T E S I S D E G R A D O

T E M A -

DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR TRIFASICO
CON ENFRIAMIENTO NATURAL DE ACEITE DE
5000 kva. 60 cps. 60.000/10.000 voltios

T E M A R I O -

Página

1.- Consideraciones generales de diseño	
. 1 Costos fijos y costos variables	8
. 2 Relación mas conveniente de pérdidas en el fierro a pérdidas en el cobre	18
2.- Teoria y fórmulas de diseño	
. 1 Proporciones óptimas de pre-diseño	23
. 2 Cálculo de las bobinas	
1. Distribución de los arrollamientos	30
2. Características físicas	33
3. Disipación térmica	43
4. Esfuerzos dieléctricos	46
5. Esfuerzos mecánicos	58

. 3	Cálculo del núcleo	
1.	Características físicas	68
2.	Disipación térmica	71
. 4	Cálculo del tanque y el aceite	
1.	Resistencia mecánica	72
2.	Disipación térmica	74
3.	Características físicas	77
3.-	Cálculo del transformador	
. 1	Proporciones óptimas	79
. 2	Cálculo de las bobinas	84
. 3	Cálculo del núcleo	114
. 4	Cálculo del tanque y la dotación de aceite	117
. 5	Resumen del diseño	132

T E M A

1.- ESPECIFICACION GENERAL

Diseño de un transformador trifásico con aislamiento clase A. autorrefrigerado en aceite mineral con enfriamiento natural por aire, para servicio continuo y montaje a la intemperie de :

- Potencia nominal : 5,000 kva
- Frecuencia nominal : 60 cps
- Tensión nominal primaria : 60,000 voltios
- Tensión nominal secundaria : 10,000 voltios
- Taps (tomas) exteriores en el arrollamiento primario accionables sin tensión : $\pm 2\frac{1}{2} \% \pm 5\%$
- Corriente nominal primaria : 49.1 Amp
- Corriente nominal secundaria : 288.7 Amp
- Conexión primaria : Estrella
- Conexión secundaria : Triángulo
- Altura sobre el nivel del mar : hasta 1000 m.s.n.m.

2.- NORMAS DE FABRICACION

De acuerdo a lo especificado en el British Standard 171:1959 y en la publicación 76 de la Comisión Electrotécnica Internacional :

2.1 CALENTAMIENTO

- Máxima sobreelevación de temperatura en los arrollamientos medida por el método de la resistencia : 60° C
- Máxima sobreelevación de temperatura en el aceite medida por termómetro : 50° C
- Máxima temperatura ambiente : 40° C
- Máximo promedio de la temperatura ambiente mensual : 30° C
- Máximo promedio de la temperatura ambiente anual : 20° C

2.2 NIVEL DE AISLAMIENTO

- Para el arrollamiento de 60.000 v.
lo asimilamos a la clase 61 kv
del B.S. 171:1959, que especifica
Prueba de Impulso : 300 kv. de 1 x 50
Prueba a frecuencia industrial : 115 kv

- Para el arrollamiento de 10.000 v.
lo asimilamos a la clase 12.5 kv
del B.S. 171:1959, que especifica :

Prueba de Impulso : 95 kv.de 1 x 50
Prueba a frecuencia industrial : 28 kv.

3.- GARANTIAS DE FUNCIONAMIENTO :

Para 60.000/10.000 v y 49.1/288.7 A :

- Pérdidas en cobre a 75° C 30.000 w † tol 14%
- Pérdidas en fierro a 60 cps : 9.000 w † tol 14%
- Pérdidas totales : 39.000 w † tol 10%
- Tensión de cortocircuito a 75°C : 6.5% † tol 10%

1.- CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO

1.1 COSTOS FIJOS Y COSTOS VARIABLES

En términos generales se puede enfocar el aspecto de costo de un transformador desde el punto de vista del usuario o desde el punto de vista del fabricante.

Desde el punto de vista del usuario se deben tener en cuenta los siguientes factores, que afectan al costo y que están relacionados con la eficiencia :

1.- Costos fijos:(Proporcionales al precio)

- Intereses del capital
- Depreciación
- Seguros

2.- Costos de operación : (Dependientes de la eficiencia)

- Consumo de energía para suministrar las pérdidas en el hierro y en el cobre
- Demanda máxima adicional causada por las pérdidas .

Es decir, parte de los costos dependen del precio que es directamente proporcional a la eficiencia

dentro de límites normales, y el resto de los costos son inversamente proporcionales a la eficiencia .

En la práctica el fabricante trata de utilizar los materiales al máximo, empleando la mayor densidad de flujo admisible sin que se sature el núcleo, y la mayor densidad de corriente compatible con las garantías térmicas .

Las pérdidas que resultan de esta consideración son en general aceptables y si el fabricante trata de producir una unidad mas eficiente , el aumento del costo de producción influye mucho mas que la economía que se obtiene por menores costos de operación .

Concretamente , si al bajar las pérdidas $a\%$, el costo del transformador aumenta en $b\%$, siendo $b\% > a\%$, y si además los costos fijos son mayores que los costos de operación, lo que corresponde al caso normal, al aumentar la eficiencia, el costo del usuario vá a aumentar .

Vamos a analizar este planteamiento de una manera somera .

COSTO DE TRANSFORMADOR

DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL USUARIO

$$\begin{aligned} C_T &= \text{COSTOS FIJOS} \uparrow \text{COSTOS DE OPERACION} \\ &= C_f \uparrow C_o \end{aligned}$$

$$C_f = i \times P_T$$

donde i = porcentaje de depreciación,
intereses y seguros .

P_T = precio del transformador

$$\begin{aligned} C_o &= \text{costo de kw-h} \uparrow \text{costo de demanda} \\ &= 8760 (W_{fe} \uparrow f^2 \times W_{cu}) E \uparrow (W_{fe} \uparrow m^2 W_{cu}) D \end{aligned}$$

donde

8760 = n° de horas por año

W_{fe} = pérdidas en el hierro (kw)

W_{cu} = pérdidas en el cobre a
plena carga (kw)

f = Relación de la corriente eficaz de carga
calculada sobre un período de un año ,
a la corriente eficaz a plena carga

E = costo de un kw-h de pérdidas en
el transformador (\$/ kw-h)

m = relación de la máxima demanda en kva,
a la potencia nominal del transfor-
mador en kva.

D = costo anual de la máxima demanda
causada por las pérdidas en el
transformador (Soles/kva-año)

Factor de potencia = 1.0

Este planteamiento se basa en que la tarifa de consumo de
electricidad, tiene un recargo por el consumo de energía
(kw-h) y un recargo por máxima demanda (kva)

$$C_o = W_{fe}(8760 E + D) + W_{cu} (8760 f^2 E + m^2 D)$$

haciendo :

$$a = 8760 E + D$$

$$b = 8760 f^2 E + m^2 D$$

resulta :

$$C_o = W_{fe} \cdot a + W_{cu} \cdot b$$

Igualmente vamos a suponer que variando dentro de límites razonables el peso del cobre y hierro del transformador, el incremento del precio es proporcional al incremento del peso de cobre y hierro en proporción de 1 a 2 . Es decir que al aumentar 10% el peso el precio aumenta aproximadamente 5%, ya que la mano de obra no aumenta en la misma proporción, ni tampoco los gastos generales .

Luego tenemos :

$$C_T = i \cdot k \cdot (P_{fe} + P_{cu}) + W_{fe} \cdot a + W_{cu} \cdot b$$

Si demostramos que al aumentar la eficiencia el primer término aumenta en mayor proporción, que el segundo, se habrá probado que es preferible tener un transformador mas económico antes que uno mas eficiente, pero mas caro .

Las pérdidas en el fierro se sabe que en forma aproximada son proporcionales al cuadrado de la densidad de flujo (B) , para los valores normales empleados :

$$W_{fe} = K \cdot P_{fe} \cdot B^2$$

Por otro lado las pérdidas en el cobre son proporcionales al peso de cobre y al cuadrado de la densidad de corriente (Δ)

$$W_{cu} = K \cdot P_{cu} \cdot \Delta^2$$

A su vez el peso de fierro (P_{fe}), depende de la sección transversal del núcleo ($S_{fe} = K \cdot D_f^2$) que es proporcional al cuadrado del diámetro del círculo circunscrito. Si por otro lado se admite, lo que es en general cierto, que el peso de las columnas y culatas es igual, se podrá asumir que el peso es proporcional a la altura de la ventana (L) :

$$P_{fe} = k \cdot D_f^2 \cdot L$$

El peso de cobre será proporcional al área de la ventana (L . a) ocupada por cobre (porcentaje dado por el factor de ventana F_c), y al diámetro medio que será igual al diámetro del fierro mas el ancho de la ventana ($D_f \dagger a$)

$$P_{cu} = k \cdot L \cdot a \cdot (D_f \dagger a)$$

Supongamos a continuación que para reducir las pérdidas, se disminuye la densidad de flujo y la densidad de corriente por el factor p (p.e. $p = 1.10$) :

1.- Para igual tensión nominal y

$\frac{B}{p}$, la S_{fe} aumentará a pS_{fe}

2.- Para igual corriente nominal e igual número de espiras si se toma $\frac{\Delta}{p}$; es preciso aumentar las dimensiones de la ventana a $L \cdot \sqrt{p}$ y $a \cdot \sqrt{p}$, para que entre $p \cdot S_{cu}$

3.- Al aumentar la S_{fe} a $p \cdot S_{fe}$, el diámetro del fierro aumenta a $\sqrt{p} \cdot D_f$ y como la ventana ha aumentado a $L \sqrt{p}$ y $a \cdot \sqrt{p}$ el peso de cobre aumenta en $p \sqrt{p}$:

$$\begin{aligned} & (L \cdot \sqrt{p}) (a \cdot \sqrt{p}) (\sqrt{p} D_f + \sqrt{p} a) \\ &= L \cdot a \cdot (D_f + a) \cdot p \sqrt{p} \\ & \text{o sea aumenta por } p \cdot \sqrt{p} \end{aligned}$$

4.- Las pérdidas en el cobre disminuyen en $\frac{1}{\sqrt{p}}$

$$P_{cu} \cdot p \sqrt{p} \cdot \left[\frac{\Delta}{p} \right]^2 = \frac{W_{cu}}{\sqrt{p}}$$

5.- El peso de hierro aumenta en $p \sqrt{p}$:

$$(D_f \sqrt{p})^2 \cdot L \sqrt{p} = P_{fe} \cdot p \cdot \sqrt{p}$$

6.- Las pérdidas en el hierro disminuyen

en $\frac{1}{\sqrt{p}}$:

$$P_{fe} \cdot p \cdot \sqrt{p} \cdot \left[\frac{B}{p} \right]^2 = \frac{W_{fe}}{\sqrt{p}}$$

En resumen el peso de cobre y hierro aumenta en $p \sqrt{p}$ las pérdidas disminuyen en $\frac{1}{\sqrt{p}}$ y el precio aumentará aproximadamente en $\frac{p \sqrt{p}}{2}$

Finalmente para demostrar que en el costo influye mas el precio del transformador que sus pérdidas, vamos a asumir un juego de valores prácticos para el caso del transformador de 5000 kva considerado en este trabajo :

PESO = 19.000 kgs.

PRECIO = \$ 40.-/kg

= \$ 760.000.--

i = Depreciación lineal en 10 años

† 12% de intereses del capital

† 1% de seguros

= 10 † 12 † 1 = 23% = 0.23

m = 1.0

f = Asumiendo 1/3 del día a
plena carga resulta

$$f = \frac{\sqrt{\frac{1}{24} \times (5000)^2 \times 8}}{5000} = 0.577$$

$$E = 0.37 \text{ \$/kw-h}$$

$$D = 39 \text{ \$/mes-kva} \times 12 \text{ meses/año}$$
$$= 468 \text{ \$/kva-año .}$$

RESULTARA :

$$C_f = 0.23 \times 760.000 = \text{\$} 174.800$$

$$C_o = 9.0 [8760 \times 0.37 + 468]$$
$$+ 30 [8760 \times (0.577)^2 \times 0.37 + 1^2 \times 468]$$
$$= 9.0 (3240 + 468) + 30 (1080 + 468)$$
$$= 9 \times 3708 + 30 \times 1548$$
$$= 33372 + 46440 = \underline{\underline{\text{\$} 79.812}}$$

$$C_T = 254,612$$

El incremento de los costos de operación al reducir las pérdidas en 10% será :

$$C_f = 174.800 \left[\frac{1.10 \sqrt{1.10} + 1}{2} \right]$$

$$C_f = \$ 188.100$$

$$C_o = \frac{79,812}{\sqrt{1.10}} = \$ 76.100$$

$$C_T = 264.200$$

Es decir el costo se habrá incrementado en

$$264.200 - 254.612 = \$ 9.588$$

Por lo tanto será mas conveniente continuar con las pérdidas consideradas inicialmente, que se pueden obtener trabajando el hierro con densidades de flujo normales y el cobre con densidades de corriente compatibles con el calentamiento admisible .

En el caso considerado aún cuando " i " se redujera, depreciando en 20 años y pagando intereses del orden del 7 u 8% todavía el incremento del costo fijo sería mayor que el incremento de los costos de operación .

1.2 RELACION MAS CONVENIENTE DE PERDIDAS

EN EL FIERRO A PERDIDAS EN EL COBRE

En el acápite anterior se ha visto que en general es preferible utilizar los materiales al máximo, pero no se ha considerado la relación que debe existir entre las pérdidas, para que el costo de operación del usuario sea lo menor posible , para igual costo fijo.

Vamos ahora a derivar este costo de operación para tratar de minimizarlo .

Se considera el caso de factor de potencia unitario :

$$C_o = W_{fe} [8760 E + D] + W_{cu} [8760 f^2 E + m^2 D]$$

haciendo

$$a = 8760 E + D$$

$$b = 8760 f^2 E + m^2 D$$

$$C = W_{fe} x a + W_{cu} x b$$

Veamos ahora que el producto de las pérdidas en el hierro por las pérdidas en el cobre, que vamos a llamar W , puede ser considerado una constante para un peso de hierro y de cobre mantenido constante .

$$W = W_{fe} \cdot W_{cu} = k P_{fe} \cdot B^2 \cdot P_{cu} \cdot \Delta^2$$

$$W = k (D_f^2 \cdot L) \cdot B^2 \cdot [L \cdot a \cdot (D_f + a)] \cdot \Delta^2$$

$$W = k (B^2 \cdot \Delta^2) [D_f^2 \cdot L^2 \cdot a (D_f + a)]$$

Si aumentamos B por ejemplo 10% y Δ se disminuye 10% las pérdidas en el hierro habrán aumentado 20% y las pérdidas en el cobre habrán disminuido 20%, permaneciendo igual el peso de hierro y el peso de cobre y por lo tanto no variando el precio del transformador. Lo que realmente se haría es utilizar 10% menos de espiras en 10% mas de sección y 10% menos densidad de corriente, con lo cual el peso de cobre se mantendría igual, disminuyendo las pérdidas en el cobre 20%. El peso del fierro permanece igual y sus pérdidas aumentan 20% por el aumento de densidad de flujo en 10%

Por lo tanto :

$$C_o = W_{fe} \cdot a + \frac{W}{W_{fe}} \cdot b$$

$$\frac{\partial C_o}{\partial W_{fe}} = a - \frac{W \cdot b}{W_{fe}^2} = 0$$

$$W_{fe} = \sqrt{\frac{W \cdot b}{a}}$$

$$W_{cu} = \frac{W}{W_{fe}} = \sqrt{\frac{W \cdot a}{b}}$$

y finalmente :

$$r = \frac{W_{cu}}{W_{fe}} = \frac{a}{b} = \frac{8760 E \div D}{8760 f^2 E \div m^2 D}$$

Es decir la relación obtenida nos dá el costo de operación mínimo, para un cierto costo fijo (precio) del transformador .

Aparentemente la solución sería tratar siempre de obtener la relación de pérdidas ideal, a fin de minimizar los costos de operación . Sin embargo este aspecto tan discutido en la literatura técnica, no es tan crítico como se podría pensar . Es decir, si se construyen transformadores con relaciones de pérdidas diferentes de la ideal, por ser conveniente desde el punto de vista práctico del fabricante, los costos de operación aumentan en muy poco .

Se sabe que :

$$C_o = W_{fe} \cdot a + W_{cu} \cdot b$$

$$W = W_{fe} \cdot W_{cu}$$

$$r = \text{ideal} = \frac{a}{b}$$

Sea " d " el factor de desviación de la relación ideal (p.e. d = 1.50)

$$W_{cu} = d \cdot r$$

$$W_{fe}$$

$$W_{cu} = \frac{W}{W_{fe}} = d \cdot r \cdot W_{fe}$$

$$W_{fe} = \sqrt{\frac{W}{d \cdot r}}$$

$$W_{cu} = \sqrt{W \cdot d \cdot r}$$

de donde :

$$\begin{aligned} C &= \sqrt{\frac{W}{d \cdot r}} \cdot a + \sqrt{W \cdot d \cdot r} \cdot b \\ &= \sqrt{W} \left[\frac{a}{\sqrt{d} \cdot \sqrt{r}} + \sqrt{d} \cdot \sqrt{r} \cdot b \right] \\ &= \sqrt{W} \left[\frac{a \cdot \sqrt{b}}{\sqrt{d} \sqrt{a}} + \sqrt{d} \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{b}} \cdot b \right] \\ &= \sqrt{W \cdot a \cdot b} \left[\frac{1}{\sqrt{d}} + \sqrt{d} \right] \end{aligned}$$

para :

d = 1.0	C _o = 2.0	$\sqrt{W \cdot a \cdot b}$
d = 1.5	C _o = 2.042	$\sqrt{W \cdot a \cdot b}$
d = 2.0	C _o = 2.12	$\sqrt{W \cdot a \cdot b}$
d = 3.0	C _o = 2.31	$\sqrt{W \cdot a \cdot b}$
d = 0.5	C _o = 2.12	$\sqrt{W \cdot a \cdot b}$

O sea que para relaciones de pérdidas que son incluso el triple de lo ideal, el costo de operación es solo 15% mayor, y ya hemos visto que el costo de operación influye menos que los costos fijos .

Por lo tanto de los análisis anteriores se deduce que en general lo que prima en la fabricación del transformador es reducir el costo en lo mas posible, tratando por supuesto de mejorar los diseños y los materiales para minimizar las pérdidas .

El siguiente paso será entrar ya en consideraciones de fabricación, en las que en primer término se tratará de obtener las proporciones óptimas de diseño , que nos darán el menor costo de material para una densidad de flujo B y una densidad de corriente Δ fijadas

Las pérdidas asumidas para el transformador de 5000 kva son valores promedios ofrecidos por diversos fabricantes y permiten trabajar los materiales adecuadamente .

2.- TEORIA Y FORMULAS DE DISEÑO .

2.1 PROPORCIONES OPTIMAS DE PRE-DISEÑO.

Para establecer las proporciones óptimas de diseño que dan un costo mínimo, hay que calcular el costo total de fierro y cobre y diferenciar dicha cantidad con respecto a las dimensiones escogidas como variables .

PESO DEL FIERRO

Para núcleos de 3 columnas escalonadas y 2 culatas escalonadas con sección 20% mayor que las culatas, tenemos :

$$P_{fe} = \text{Peso 3 columnas} + \text{Peso 4 semi-culatas} \\ + 6 \text{ esquinas}$$

Por esquinas se entienden los pesos de los volúmenes de intersección de columnas y culatas .

$$P_{fe} = \epsilon_f \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot D_f^2 \cdot F_u \right) \cdot k_2 \cdot L \\ + \epsilon_f \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot D_f^2 \cdot F_u \cdot r \right) \cdot K_1 \cdot a \\ + \epsilon_f \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot D_f^2 \cdot F_u \cdot r \right) \cdot k_3 \cdot D_f$$

simplificando :

$$P_{fe} = \frac{\pi}{4} \cdot g_f \cdot F_u D_f^2 (k_2 L + k_1 r a + k_3 r D_f) \quad (1)$$

DONDE :

g_f = Densidad del fierro en gr/cm³ (7.65)

D_f = Diámetro del círculo circunscrito a la sección transversal escalonada del núcleo (cm)

F_u = Factor de utilización de la sección transversal del núcleo, que dá el porcentaje del área del círculo circunscrito realmente ocupada por hierro . La pérdida de area se debe al escalonamiento del núcleo y al aislamiento entre planchas .

L = Altura de la ventana (cm)

a = Ancho de la ventana = distancia entre centros de columnas - diámetro del círculo circunscrito al núcleo (cm)

$$k_1 = 4 ; k_2 = 3 ; k_3 = 6 ; r = 1.2$$

PESO DEL COBRE

Es igual al peso de las 3 bobinas y se obtendrá en función del factor de ventana (F_c) que nos dá el porcentaje del área de ventana ocupada por cobre . El resto de la ventana está ocupada por material aislante sólido o líquido . Este factor se conoce de manera bastante exacta, por la experiencia con transformadores ya construidos, y evidentemente variará con la potencia y la tensión de servicio .

P_{cu} = densidad . sección transversal .
 espira media . n° de bobinas

$$P_{cu} = g_c \cdot \left[\frac{a \cdot (L \cdot F_c)}{2} \right] \cdot \left[\pi \cdot (D_f + \frac{1}{2} a) \right] \cdot k_2$$

$$P_{cu} = \frac{\pi}{4} \cdot g_c \cdot a \cdot L \cdot F_c \cdot (2 D_f + a) \cdot k_2 \quad (2)$$

haciendo :

$$P = \frac{\pi}{4} \cdot g_f \cdot F_u \cdot (\text{costo por kg de fierro})$$

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot g_c \cdot F_c \cdot (\text{costo por kg de cobre})$$

tenemos que el costo total de fierro y cobre será :

$$C = P \cdot D_f^2 (k_2 L + k_1 r a + K_3 r D_f) + Q \cdot a L (2 D_f + a) \cdot k_2 \quad (3)$$

Por otro lado se pueden calcular las dimensiones partiendo de la ecuación básica que relaciona tensión inducida con frecuencia, densidad de flujo y sección transversal de fierro :

$$E = k_4 \cdot f \cdot B \cdot S_{nf} \cdot n \quad (4)$$

donde :

E = Tensión inducida por fase (voltios)

k_4 = constante = $4.44 \cdot 10^{-8}$

f = frecuencia (cps)

B = densidad de flujo (gauss)

S_{nf} = sección neta de fierro = $\frac{\pi}{4} \cdot D_f^2 \cdot F_u$ (cm²)

n = número de espiras

Se sabe además que la potencia de un transformador trifásico es :

$$N = 3 \cdot E \cdot I \cdot 10^3 \quad (5)$$

y que $I = \Delta \cdot S_{cu}$

$$I = \Delta \cdot \frac{a \cdot L \cdot F_c}{2 \cdot 2 \cdot n} \cdot 10^2 \quad (6)$$

donde :

N = Potencia en kva

Δ = densidad de corriente en amp/mm²

S_{cu} = sección transversal de cobre (mm²)

Luego substituyendo (4) y (6) en (5) :

$$N = 3 \cdot \left[k_4 \cdot f \cdot B \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot D_f^2 \cdot F_u \right) \cdot n \right] \cdot \left[\Delta \cdot \frac{a \cdot L \cdot F_c}{4 \cdot n} \cdot 10^2 \right] \cdot 10^{-3}$$

$$N = \frac{3\pi}{160} \cdot k_4 \cdot (a \cdot L \cdot D_f^2) \cdot B \cdot \Delta \cdot F_u \cdot F_c \cdot f$$

$$a L D_f^2 = \frac{4 \cdot N \cdot 10^8}{B \cdot \Delta \cdot F_u \cdot F_c \cdot f} = k_5 \quad (7)$$

Para un transformador de potencia definida , fijadas f , B y Δ , siendo F_u y F_c valores practicamente constantes, la ecuación (7) es una constante y por consiguiente :

$$L = \frac{cte}{a D_f^2} = \frac{k_5}{a D_f^2}$$

que se puede substituir en la ecuación (3) :

$$C = P D_f^2 \left(k_2 \cdot \frac{k_5}{a D_f^2} + k_1 r a + k_3 r D_f \right)$$

$$+ Q \cdot a \cdot \frac{k_5}{a D_f^2} \cdot (2 D_f + a) \cdot k_2$$

$$C = P \left(\frac{k_2 k_5}{a} + k_1 r a D_f^2 + k_3 r D_f^3 \right)$$

$$+ Q \left(\frac{2 k_2 k_5}{D_f} + \frac{k_2 k_5 a}{D_f^2} \right) \quad (8)$$

Diferenciando esta ecuación con derivadas parciales respecto de a y de D_f , haciendo previamente

$$R = \frac{P}{Q} ; \quad e = \frac{a}{L} ; \quad m = \frac{a}{D_f}$$

Resultarán los siguientes valores :

$$R = 2 m^2 \left(m + \frac{3 k_3}{4 k_1} + \frac{1}{2} \right) \quad (9)$$

$$e = \frac{k_2}{r k_1} \left(1 - \frac{m^2}{R} \right) \quad (10)$$

Es decir que k_5 que es una constante que varía con la potencia del transformador no interviene y por lo tanto las proporciones óptimas entre las dimensiones no dependen de la potencia del transformador, excepción hecha, claro está de las variaciones de F_c y F_u para diversas potencias.

Por lo tanto calculado el valor de R que es conocido y despejado el valor de m de la ecuación cúbica (9), se pueden reemplazar estos valores en (10) y calcular e . Se habrán obtenido así las proporciones óptimas.

Estos valores de m y e se sustituirán en (7) para una potencia definida y nos ayudarán a despejar D_f en primer término, para después calcular a y L .

Las soluciones normales de m y e para diversos valores de R están tabuladas.

2.2 CALCULO DE LAS BOBINAS

2.2.1 DISTRIBUCION DE LOS ARROLLAMIENTOS

- Definido del pre-diseño el tamaño del núcleo que se vá a utilizar se procede a calcular los voltios por espira :

$$E = 4.44 \cdot f \cdot B \cdot S_{nf} \cdot 10^{-8} \quad \left(\frac{\text{voltios}}{\text{espira}} \right)$$

Con este valor y con la tensión de fase correspondiente , se obtiene el número de espiras tanto de la baja como de la alta tensión .

- De las corrientes de fase y de la densidad de corriente asumida en el pre-diseño, se obtienen las secciones transversales de cobre requeridas .
- A continuación se debe tratar de distribuir dentro de la altura y el ancho de la ventana, la cantidad de cobre correspondiente a las espiras de la sección requerida .
Si el factor de ventana asumido no es exacto , alguna de las dimensiones de la ventana tendrá que variar, prefiriéndose en general que sea el diámetro . De todos modos

el resultado obtenido a veces tendrá que ser modificado para obtener la impedancia requerida, ya que ésta es inversamente proporcional a la longitud efectiva de la bobina y directamente proporcional al diámetro medio .

- Para empezar el tanteo se debe asumir un tipo de bobina, de acuerdo a la experiencia existente. Al asumir el tipo de bobina , se asumirá igualmente la distribución de aislamientos que la experiencia indica que es satisfactoria en esos casos .

En nuestro caso se utilizarán bobinas de discos continuos con aislamiento entre discos de $1/8''$ para la baja tensión y $3/16''$ para la alta tensión. Igualmente se utilizará un forro de papel de $0.020''$ para la baja tensión y de $0.030''$ para la alta tensión .

- Los arrollamientos de alta tensión y de baja tensión deberán balancearse en lo posible a fin de evitar la fuerza de asimetría axial por lo menos en el tap normal .
- Por último habrá que considerar lo que se pierde en la altura de la ventana por aislamiento de

los extremos del arrollamientos a las culatas, y por aislamiento entre los taps centrales para que no descargue ni por efecto de la distribución inicial de la onda de impulso , ni por la onda de impulso reflejada .

- Finalmente se asumirá una sección de alambre de la tabla de tamaños existentes en el comercio , cuidando que sea fácil de trabajar y que en lo posible no sea de las mas costosas .

- En determinado tipo de bobinas habrá que preveer igualmente la pérdida de espacio por transposiciones ó por efecto de hélice .

2.2.2 - CARACTERISTICAS FISICAS

Se procede a continuación a calcular diversas características físicas, de la distribución de arrollamientos obtenida :

- Espira media = T (m) = π . Diámetro medio (m)

- Longitud del arrollamiento L_A (m) =

$$L_A = T \cdot n \cdot k_3$$

donde

n = número de espiras

k_3 = número de bobinas = 3

- Peso neto de cobre P_{Cu} (kg) =

$$P_{Cu} = 8.88 \cdot L_A \cdot S_{Cu} \cdot 10^{-3}$$

donde :

S_{Cu} = sección transversal de
cobre de la espira (mm^2)

- Resistencia de la longitud del arrollamiento
a 75°C = R (ohms)

$$R_{75^\circ\text{C}} = 0.021 \cdot \frac{L_A}{S_{Cu}}$$

- Pérdidas por efecto Joule en el arrollamiento a 75°C :

$$W_{cu} = I^2 R \quad (\text{vatios})$$

donde :

I = corriente nominal de fase del arrollamiento (amp)

R = resistencia de todo el arrollamiento o sea en el tap máximo (ohms)

PERDIDAS POR CORRIENTES CIRCULATORIAS EN LOS CONDUCTORES Y EN EL ARROLLAMIENTO -

El flujo axial de dispersión induce una tensión en el conductor, que hace circular una corriente dentro del conductor .

Esta pérdida será proporcional al cuadrado de la corriente circulatoria que depende de los amperios - vuelta y del espesor radial del conductor .

La fórmula empleada, expresando las pérdidas por corrientes circulatorias como porcentaje de las pérdidas $I^2 R$ es a 75°C :

$$\% W_{I.C.} = \left(\frac{nI \cdot t \cdot 0.0563}{L_e} \right)^2 \cdot \frac{1}{W/kg}$$

donde :

n = número de espiras por fase

I = corriente de fase (amp)

t = espesor radial del conductor (mm)

L_e = longitud efectiva de la bobina

W/kg = vatios de I^2R por kg de cobre

Esta fórmula es aplicable en el caso de un solo conductor, o varios conductores transpuestos perfectamente en sentido radial . Si este no es el caso , se produce adicionalmente una corriente circulatoria entre los conductores que forman la espira , debido a que las tensiones inducidas en conductores en diferente posición radial, no son iguales . El análisis de este problema depende del número de conductores en sentido radial, del número de capas y del lugar donde se efectúa la transposición (a la mitad o al final de la capa)

En nuestro caso solo hay 2 conductores en la baja tensión y la transposición se efectúa al medio y es completa, por lo tanto no se produce aumento de pérdidas por corrientes circulatorias entre conductores , Las pérdidas producidas por la componente radial del flujo de dispersión, son en general despreciables y no las calcularemos .

PERDIDAS ADICIONALES EN EL TANQUE -

Además de las pérdidas en los arrollamientos se producen pérdidas en el tanque, por las siguientes razones :

- Por corrientes circulatorias inducidas en la plancha de hierro que corre paralela a los conductores de las conexiones de salida .
- Por corrientes circulatorias inducidas en la tapa o en el costado del tanque por donde pasan los aisladores de salida .
- Por el flujo de dispersión que se cierra sobre la plancha del costado del tanque .

La primera de estas pérdidas se trata de eliminar diseñando los arrollamientos de alta corriente con 2 capas en espiral, de modo que las entradas y salidas sean por la parte superior de la bobina y por lo tanto no existan tramos largos de conductores de alto amperaje corriendo paralelos al tanque .

La segunda se elimina o se reduce colocando planchas o inserciones de material no magnético .

La tercera no se puede reducir mayormente a no ser que se agrande el tanque . Se puede asumir que esta pérdida varía proporcionalmente a los kvar .

Para nuestro caso el valor de los vatios de pérdida inducidos en la tapa, sale de una curva experimental, y el valor de las pérdidas por el flujo de dispersión que se cierra sobre el tanque se estima en 5.8 W/kvar .

IMPEDANCIA O TENSION DE CORTOCIRCUITO -

Se expresa en porcentaje sobre la impedancia de base que es la que corresponde a la tensión nominal de fase y corriente nominal de fase .

Si bien la componente de reactancia no varía con la temperatura ; la componente de resistencia sí varía y se tiene que utilizar una temperatura de referencia . La práctica establecida es tomar un valor promedio de 75°C para aislamientos clase A .

La fórmula para calcular la reactancia se deduce asumiendo que la distribución del flujo de dispersión es uniforme y constante axialmente, en el espacio entre el arrollamiento de baja y el de alta tensión , y que dicho flujo disminuye linealmente hasta llegar a cero en la superficie interior de baja tensión y la exterior de alta tensión .

Además se asume que fuera de la longitud de los arrollamientos la reluctancia es muy reducida , lo cual es aproximadamente cierto , ya que el flujo de dispersión se cierra ó sobre el núcleo ó sobre el tanque . Es necesario observar que para que se mantenga la distribución uniforme del flujo de dispersión, es preciso que ambos arrollamientos sean de igual longitud efectiva y que no tengan taps que puedan introducir asimetrías que produzcan componentes de flujo radiales . Además la permeabilidad del camino recorrido por el flujo de dispersión fuera del largo de la bobina, se considera despreciable ; y por último la diferencia entre los amperios - vuelta del primario y el secundario, debido a la corriente de magnetización, no es tenida en cuenta .

Sea nI los amperios - vuelta del primario o del secundario , por cada columna . La densidad de flujo entre arrollamientos será :

$$B_d = \mu_0 \text{ (fuerza magnetomotriz)}$$
$$= \mu_0 \cdot \frac{nI}{L_e}$$

Tomando la mitad del flujo de dispersión en el ducto ,

como flujo concatenado con cada arrollamiento (lo cual si bien aproximado, no afecta mayormente el resultado final) , calculamos $n\phi$:

$$n\phi = n_1 \cdot \left[\mu_0 \frac{n_1 I_1}{L_e} \cdot \frac{d}{2} \cdot T_d \right] = n_1 \cdot B_d \cdot \frac{d}{2} \cdot T_d$$

Ahora bien el flujo de dispersión a una distancia radial x de la superficie interior del arrollamiento de baja tensión será $\frac{x}{a} \cdot B_d$

El flujo de un cilindro concéntrico de ancho dx será para una espira media T_a

$$d\phi = T_a \cdot \frac{x}{a} \cdot B_d \cdot dx$$

Este flujo solo concatena la porción interior del arrollamiento que tiene $n_1 \cdot \frac{x}{a}$ espiras .

El flujo concatenado será :

$$\begin{aligned} n \cdot d\phi &= n_1 \frac{x}{a} \cdot \left[T_a \cdot \frac{x}{a} \cdot B_d \cdot dx \right] \\ &= n_1 \cdot \frac{T_a B_d}{a^2} \cdot x^2 dx \end{aligned}$$

Para todo el ancho radial de la baja tensión se tendrá que integrar :

$$\begin{aligned} \int n \cdot d\phi &= n_1 \cdot \frac{T_a \cdot B_d}{a^2} \int_0^a x^2 dx \\ &= \frac{1}{3} \cdot n_1 \cdot T_a \cdot B_d \cdot a \end{aligned}$$

El flujo total concatenado con la baja tensión será :

$$n_1 B_d \left[T_d \cdot \frac{d}{2} + T_a \cdot \frac{a}{3} \right]$$

De manera análoga el flujo concatenado con la alta tensión será :

$$n_2 \cdot B_d \left[T_d \cdot \frac{d}{2} + T_b \cdot \frac{b}{3} \right]$$

La reactancia estará dada por el flujo total de dispersión, por amperio, multiplicado por $2\pi f$:

Para la baja tensión tendremos :

$$X_1 = 2\pi f \left[\frac{n_1 \mu_0}{L_e} \cdot \frac{n_1 I_1}{L_e} \right] \left[T_d \cdot \frac{d}{2} + T_a \cdot \frac{a}{3} \right]$$

$$X_1 = 2\pi f \mu_0 \cdot \frac{n_1^2}{L_e} \left(T_d \cdot \frac{d}{2} + T_a \cdot \frac{a}{3} \right) \quad (\text{ohms})$$

Para la alta tensión tendremos :

$$X_2 = 2\pi f \mu_0 \frac{n_2^2}{L_e} \left(T_d \cdot \frac{d}{2} + T_b \cdot \frac{b}{3} \right) \quad (\text{ohms})$$

La reactancia de la baja tensión en términos de la reactancia de la alta tensión será :

$$X_1 = 2\pi f \mu_0 \cdot \frac{n_2^2}{L_e} \left(T_d \cdot \frac{d}{2} + T_a \cdot \frac{a}{3} \right)$$

La reactancia total será :

$$X = 2\pi f \mu_0 \frac{n_2^2}{L_e} \cdot \left(T_a \cdot \frac{a}{3} + T_d \cdot d + T_b \cdot \frac{b}{3} \right)$$

Este resultado se puede simplificar si aceptamos

que $\frac{T_a + T_b}{2} = T_d$ aproximadamente

$$X = 2\pi f \mu_0 \frac{n_2^2}{L_e} \cdot T_d \left(d + \frac{a + b}{3} \right) \quad (\text{ohms})$$

Esta reactancia se puede expresar como porcentaje de la reactancia de base obtenida de la tensión nominal y la corriente nominal de fase

$$X \text{ base} = \frac{E \text{ base}}{I \text{ base}} = \frac{E_f}{I_f}$$

$$\text{pero } N = (va) = 3 E_f I_f$$

$$X \text{ base} = \frac{E_f}{\frac{N}{3E_f}} = \frac{3 E_f^2}{N}$$

$$X\% = \frac{2\pi f \mu_0}{\frac{3E_f^2}{N}} \cdot \frac{n_2^2}{L_e} \cdot T_d \left(d + \frac{a + b}{3} \right)$$

$$X\% = \frac{f \cdot N \cdot T_d}{\frac{3}{2\pi \mu_0} \cdot N^\circ \text{ de fases} \cdot L_e \left(\frac{E_f}{n_2} \right)^2} \cdot \left(d + \frac{a + b}{3} \right)$$

llamando $E_t = \frac{E_f}{n_2}$ y simplificando la fórmula resulta :

$$\% X = \frac{f \cdot \text{KVA} \cdot T}{1270 \cdot \text{N}^\circ \text{ fases} \cdot L_e \cdot E_t^2} \left(d + \frac{a + b}{3} \right)$$

donde :

f = frecuencia

KVA = potencia del transformador

T = espira media (mm)

L_e = longitud efectiva (mm)

E_t = voltios por espira

d = separación entre Alta y Baja Tensión (mm)

a = ancho radial del arrollamiento de Baja Tensión, incluyendo ductos interiores (mm)

b = ancho radial del arrollamiento de Alta Tensión, incluyendo ductos interiores (mm)

En esta fórmula se introduce una pequeña modificación reemplazando L_e por $L_e + \frac{2}{3} (d + a + b)$ para tener en cuenta que tanto el arrollamiento de Baja Tensión como el de Alta para el tap normal, tienen una zona central sin espiras . En este caso L_e es la longitud efectiva restando la zona central sin espiras .

$$\% X = \frac{f \cdot \text{KVA} \cdot T \left(d + \frac{a + b}{3} \right)}{1270 \cdot \text{N}^\circ \text{ de fases} \cdot \left[L_e + \frac{2}{3} (d + a + b) \right] \cdot E_t^2}$$

2.2.3 DISIPACION TERMICA

- La gradiente de temperatura entre los arrollamientos y el aceite se calculará obteniendo la gradiente de temperatura en la película de aceite y sumándola a la gradiente de temperatura en el aislamiento .

- El segundo de estos valores es uniforme para bobinas de discos y puede expresarse por la fórmula :

$$= 6.45 \cdot \frac{\text{vatios}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{\text{espesor del aislamiento (pulg)}}{0.004''}$$

Donde cm^2 se refiere a la superficie total de cada arrollamiento, y el espesor al forro de papel .

- La gradiente de temperatura en la película de aceite , se obtiene de una curva experimental que para cada valor de $\text{vatios}/\text{cm}^2$ de superficie efectiva, dá una gradiente determinada .

Por superficie efectiva se entiende la superficie equivalente que disipa libremente el calor en el aceite. Se admite que si una superficie vertical tiene un ducto de $1/3''$ es 100% efectiva , y si tiene un ducto menor, su eficiencia disminuye por un factor que es 3 veces el ancho del ducto .

Las superficies horizontales si tienen un ducto de 1/2" y una relación de ducto a ancho radial de arrollamiento de 0.25 son 100% efectivas . En caso contrario su eficiencia se reduce linealmente con la dimensión del ducto y en menor proporción por el mayor ancho radial del arrollamiento .

CALENTAMIENTO DURANTE CORTOCIRCUITO

La máxima densidad de corriente admisible para diseñar un transformador, se deduce asumiendo que urante un cortocircuito todo el calor se almacena en los arrollamientos, y estos que están en la parte superior a 105°C no deben exceder los 250°C al final del cortocircuito, cuya duración en general no debe exceder de 5 segundos .

La fórmula dada en las normas es :

$$D = \sqrt{\frac{25,000}{S} \log 10 \left[\frac{\left(\frac{T + 234.5}{309.5}\right)^2 + E}{\left(\frac{T_1 + 234.5}{309.5}\right)^2 + E} \right]}$$

donde :

D = densidad de corriente ($\frac{\text{kilo amp}}{\text{pulg. cuadrada}}$)

S = tiempo de duración del cortocircuito (seg)

T = Temperatura final (°C)

T₁ = Temperatura inicial (°C)

E = porcentaje de pérdidas por corrientes
circulatorias, expresado en por unidad .

Una vez obtenido D se procede a calcular la densidad de corriente del transformador cuando se cortocircuitan sus bornes de salida estando aplicada la plena tensión . Este valor se obtiene multiplicando la densidad de corriente nominal por $(\frac{100}{Z})$, y el resultado debe ser menor o igual que D .

El tiempo S es de 4 seg. para un % de impedancia entre el 6% y el 7%

2.2.4 ESFUERZOS DIELECTRICOS

Un transformador en servicio, se vé sometido a sobretensiones de origen interno o sea propias de la red, y a sobretensiones de origen externo, debidas a descargas atmosféricas . Las sobretensiones de origen externo pueden ser de frecuencia industrial, o sea de una frecuencia no muy diferente de 50 ó 60 cps, o pueden ser ondas con un frente relativamente empinado , que corresponde a una frecuencia elevada .

El transformador debe ser diseñado para soportar todas las sobretensiones de origen interno que se puedan producir en una red , y además debe diseñarse para soportar sobretensiones de origen externo hasta un cierto nivel de impulso . Evidentemente el nivel de impulso que se escoja deberá ser suficiente para que las sobretensiones de origen interno de frecuencia elevada , puedan ser soportadas sin problemas . En el eventual caso que la red en que el transformador está en servicio , se viera sometida a sobretensiones de impulsos superiores al nivel de diseño , el exceso de la

onda debería ser descargado a tierra por pararrayos adecuados .

La determinación de las pruebas de laboratorio a las que se debe someter un transformador para reproducir las condiciones de sobretensión que se pueden presentar en servicio , nos servirán para dimensionar el aislamiento .

A su vez los voltajes de prueba han sido estructurados de acuerdo a la experiencia recogida de las unidades ya construidas . Estos valores son en general, iguales para la gran mayoría de los países y tienden a internacionalizarse . Si el transformador fuera a ponerse en servicio en una zona donde las descargas atmosféricas son muy fuertes el usuario de acuerdo a su experiencia podría especificar el nivel de impulso del escalón superior .

PRUEBAS DE LABORATORIO .

Los transformadores se someten a las siguientes pruebas :

- Prueba de tensión inducida, aplicando el doble de la tensión nominal , al doble de la frecuencia

(para evitar que se sature el núcleo) durante un minuto, por el arrollamiento de baja tensión .

- Prueba de tensión aplicada con una fuente independiente , entre cada arrollamiento y el otro, el núcleo y el tanque unidos conjuntamente a tierra . Esta prueba se efectúa para cada arrollamiento por separado .
- Prueba de impulso de cada arrollamiento , impulsando de manera sucesiva cada terminal de salida, con ondas plenas , recortadas y plenas .

Para el transformador escogido las tensiones prueba serán las de la clase 61 kv, ya que donde se vá á ubicar el transformador es una zona donde no hay descargas eléctricas atmosféricas, y no se justifica pasar a la clase 72.5 kv , que podría corresponder por ser 63 kv. la mayor tensión del sistema .

- . Tensión inducida a 120 cps
 - primario : 120 kv
 - secundario : 20 kv
- . Tensión aplicada a 60 cps
 - primario : 115 kv
 - secundario : 28 kv

- . Impulso 1 x 50 microsegundos
 - primario : 300 kv
 - secundario : 95 kv

DISEÑO DEL AISLAMIENTO .

- . Tensión inducida : dimensiona el aislamiento entre espiras , capas ó discos .
Tensión aplicada : dimensiona el aislamiento de cada arrollamiento a tierra y entre el arrollamiento de alta y el de baja .
- . Impulso : dimensiona el aislamiento entre espiras , capas ó discos iniciales y el aislamiento a tierra para que soporten impulso .

Los valores que soportan las diversas combinaciones normales de forro de papel del conductor , espaciadores de prespan ó capas de papel prespan y ductos de aceite, están tabulados y graficados de acuerdo a la experiencia de cada fabricante :

- 1°- De acuerdo a la prueba de tensión aplicada se obtiene el aislamiento de los extremos de cada arrollamiento a la culata, y el

aislamiento entre arrollamientos . En el presente caso para 61 kv es $3 \frac{9}{16}$ " que además sabemos que soporta en impulso 300 kv.-

El aislamiento entre arrollamientos es 1" de aceite distribuida en 3 ductos de $\frac{3}{8}$ " , $\frac{1}{4}$ " y $\frac{3}{8}$ " y $\frac{3}{8}$ " de papel prespan en 2 envueltas cada una de 3 vueltas de $\frac{1}{16}$ " . Este aislamiento además soporta impulso de 300 kv la alta tensión á tierra .

2°- Después se verifica sí en la prueba de tensión inducida , con una distribución lineal de la sobretensión en el arrollamiento el voltaje entre espiras y entre discos está conforme .

$$\text{voltios/espira} = \frac{\text{Tensión de fase}}{\text{N}^\circ \text{ de espiras por fase}}$$

$$\text{voltios entre discos} = V/\text{esp} \cdot \text{esp/disco} \cdot 2.$$

3°- En impulso , la distribución de la onda a lo largo del arrollamiento no es uniforme y por lo' tanto hay que calcularla .

El comportamiento del transformador está principalmente determinado por la capacitancia entre espiras , discos ó capas, y la capacitancia del arrollamiento a tierra. Esto se debe a que el frente de la onda es sumamente empinado lo que corresponde a una frecuencia altísima para la cual la reactancia capacitiva es sumamente reducida .

Si la capacitancia a tierra es mayor que la capacitancia en serie de la bobina, la onda después de haber recorrido las primeras espiras, tenderá a descargar a tierra a través de la reducida reactancia capacitiva . En este caso las primeras espiras se verán sometidas a casi toda la onda de impulso .

Si por lo contrario la capacitancia en serie es elevada , la onda encontrará poca dificultad en entrar al arrollamiento y distribuirse linealmente . Esta situación será deseable .

El procedimiento de cálculo se basa en determinar la relación de las capacitancias a tierra y en serie , y de ésta relación, deducir de curvas obtenidas mediante análisis el porcentaje de la onda que se concentra entre las primeras espiras y el primer disco .

Para efectuar el cálculo de la distribución inicial, se asume que :

- La capacitancia es la misma que a frecuencia industrial
- Que la reactancia inductiva es tan elevada que impedirá el paso de la onda , que se distribuirá por las capacitancias .
- El máximo esfuerzo que aparece en cualquier parte del arrollamiento es menor que el que , aparece en la primera sección .

Es interesante observar que una vez que ha penetrado el frente de la onda en el arrollamiento , y se han cargado las primeras capacitancias a tierra , éstas tenderán a descargarse a través de las inductancias del arrollamiento uniformizando la distribución de voltaje , mientras que el potencial en el terminal es mantenido elevado por la cola de la onda . Este intercambio de energía entre capacitores dá lugar a oscilaciones complejas que pueden hacer que la tensión a tierra de alguna parte del arrollamiento , se eleve por encima del valor que corresponde a una distribución lineal de la onda . Evidentemente cuando mas uniforme sea la distribución inicial de la onda , menores oscilaciones habrá .

CALCULO DE LA DISTRIBUCION DE IMPULSO -

Se calculará :

C_g = capacitancia total a tierra

C_s = capacitancia total del arrollamiento en serie .

Después se deducirá el valor :

$$\alpha = \sqrt{C_g/C_s}$$

cuando menor sea α mas uniforme será la distribución de impulso .

La concentración de la onda de impulso entre las primeras espiras ó discos se calculará aproximadamente como :

$$= \text{Tensión de impulso} \cdot \% \text{ de espiras} \cdot \alpha$$

Este resultado debe compararse con la tensión de impulso que soporta la combinación de aislamiento escogida , valor que debe ser mayor .

Si la porción del arrollamiento considerada es mayor del 5% hay que utilizar la curva de distribución del voltaje en impulso para el α correspondiente .

En nuestro caso, la capacitancia a tierra es en picofaradios

$$C_g = \frac{0.707 \cdot d \cdot L_e}{\frac{e_{B-A}}{K_p} + \frac{t_{B-A}}{K_{1,3}}} \quad (\text{pF})$$

donde :

d = diámetro interior del arrollamiento (pulg)

L_e = longitud efectiva del arrollamiento (pulg)

e_{B-A} = espesor de las envueltas de prespan
entre baja y alta

t_{B-A} = espesor del ducto entre baja y alta

K_p = constante dielectrica del prespan
impregnado de aceite

K = constante dieléctrica para un ducto
3/4 de aceite y 1/4 de prespan
precomprimido .

La capacitancia en serie para bobina de discos conti-
nuos es :

$$C_s = \frac{0.707 \left(\frac{d+D}{2} \right)}{M_s - 1} \left[\frac{(h + 2c)}{c(m_r - 1)} + \frac{4}{3} \cdot \frac{\frac{D-d}{2} + t}{\frac{c}{K_c} + \frac{t}{K}} \right]$$

donde :

D = diámetro exterior del arrollamiento (pulg)

M_s = n° de secciones (discos)

K_c = constante dieléctrica del papel de
forro del conductor

h = ancho del conductor desnudo

c = espesor del forro de papel =
2 . espesor radial del forro

m_r = N° de espiras en sentido radial por disco

t = espesor de los segmentos separadores
entre discos .

donde el primer término dá la capacitancia entre espiras de un mismo disco y el segundo término dá la capacitancia entre discos .

2.2.5

ESFUERZOS MECANICOS

Cuando un conductor por el que circula corriente , se ubica en un campo magnético perpendicular al conductor, se produce una fuerza que tiende a desplazar el conductor alejándolo de la zona donde hay mayor intensidad de campo magnético .

En el caso que existan 2 conductores paralelos por los que circulan corrientes en sentido opuesto , sobre cada conductor actúa el campo magnético del otro conductor produciendo una fuerza que tiende a separarlos . Esto se visualiza facilmente si se aprecia que el espacio entre los conductores paralelos es la zona donde se suman los campos de los conductores y por lo tanto allí se produce la mayor intensidad del campo magnético .

En un transformador en condiciones normales de servicio los esfuerzos mecánicos son sumamente reducidos; pero si el transformador se vé sometido a un cortocircuito franco en los bornes , como las fuerzas de repulsión varían con el cuadrado de la corriente, se pueden llegar a esfuerzos mecánicos considerables .

Las fuerzas que se producen se pueden analizar por los siguientes componentes :

- 1.- Radial, que tiende a expandir el arrollamiento exterior y comprimir el interior
- 2.- Flexión axial, que comprime el arrollamiento .
- 3.- Asimetría axial , que tiende a desplazar axialmente un arrollamiento con respecto al otro .

FUERZA RADIAL DE EXPANSION

Tenderá a expandir la alta tensión y a comprimir la baja tensión . En el primer caso , la sección de cobre correspondiente al total de las espiras será la que tendrá que soportar la fuerza de expansión, sin excederse de un esfuerzo de 4.5 TON/sq.in para alambre blando y de 10 TON/sq.in para alambre semiduro . En el segundo caso se deberá colocar los espaciadores o cuñas entre baja tensión y el núcleo de forma tal, que la superficie soportada sea la suficiente para que las espiras de cobre no se deformen, excediendo el esfuerzo máximo admisible .

El esfuerzo de expansión radial, se calculará con una formula deducida a partir de la ecuación fundamental :

fuerza de repulsión = $k \cdot I^2 \cdot \text{Longitud}$

Esta ecuación se corregirá considerando la máxima corriente asimétrica en un cortocircuito franco en los bornes de salida del transformador estando aplicada la plena tensión :

Fuerza de repulsión = F_R (newtons)

$$F_R = 2 \cdot 10^7 \cdot (n I \text{ pico})^2 \cdot \frac{\text{espira media}}{\text{Longitud efectiva}}$$

$$F_R = 2 \cdot 10^7 \cdot (n I_{\text{eff}} \cdot \sqrt{2})^2 \cdot \frac{T}{L_e}$$

$$= 4 \cdot 10^7 \cdot (n I)^2 \cdot \frac{T}{L_e}$$

Para el caso de cortocircuito asimétrico I se reemplaza por $\frac{IF}{Z} \cdot 100$ siendo F el factor de asimetría de la corriente de cortocircuito y Z el porcentaje de impedancia del transformador .

$$F_R = 4 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{nIF}{Z}\right)^2 \cdot \frac{T}{L_e} \quad (\text{newtons})$$

Pasando F_R a toneladas :

$$F_R = 0.0408 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{nIF}{Z}\right)^2 \cdot \frac{T}{L_e}$$

El esfuerzo de expansión será

$$P_{ER} = \frac{0.0408}{10^5} \cdot \frac{F^2}{Z^2 L_e} \cdot \frac{I^2 \cdot n^2 \cdot T}{2 \cdot S_{cu} \cdot n} \quad \left(\frac{\text{TON}}{\text{pulg}^2} \right)$$

donde se ha considerado como sección transversal que soporta el esfuerzo, 2 veces la sección transversal de cobre del arrollamiento exterior (alta tensión)

$$P_{ER} = \frac{0.0408}{10^5} \cdot \frac{F^2}{Z^2 \cdot L_e} \cdot \frac{I^2}{2} \cdot \left(\frac{n \cdot T}{S_{cu}} \right)$$

$$\text{pero } R_F = 0.021 \cdot \frac{n T}{S_{cu}},$$

donde T está en metros y S_{cu} en mm^2 que pasándolos a pulgadas y pulgadas cuadradas dá :

$$R_F = 0.0825 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{n T}{S_{cu}}$$

de donde :

$$P_{ER} = \frac{0.0408}{10^5} \cdot \frac{10^5}{2 \cdot 0.0825} \cdot \frac{F^2}{Z^2 \cdot L_e} \cdot I^2 R_F$$

$$= 0.246 \cdot \frac{F^2}{Z^2 L_e} \cdot W_{AT} \cdot 10^3$$

$$P_{ER} = 246 \cdot \frac{F^2}{Z^2 L_e} \cdot W_{AT}$$

donde :

W_{AT} = Pérdidas en el cobre (I^2R) por columna
de alta tensión (kw)

F = Factor de asimetría que depende de la
relación X/R

L_e = Longitud efectiva de la alta tensión (pulgadas)

FUERZA RADIAL DE COMPRESION -

Se calcula a partir de la fórmula anterior modificándola para tener en cuenta la disminución del esfuerzo en el alambre de cobre conforme se aumenta la superficie de soporte entre la B.T. y el núcleo .

Evidentemente si la B.T. se pudiera arrollar directamente sobre el tubo de soporte porque la disipación térmica lo permitiera, el alambre no fallaría hasta que se destroza-
ra el tubo .

La fórmula utilizada en el caso de arrollamiento bobinado sobre un tubo de pertinax con espaciadores entre el tubo y la baja tensión es :

$$P_{CR} = \frac{244 F^2 W_{BT}}{L_e \cdot Z^2} \left[1 - \frac{1}{1 + 50 \sin \alpha} \right]$$

donde :

$$P_{CR} = \text{esfuerzo de compresión radial} \left(\frac{\text{TON}}{\text{sq.in}} \right)$$
$$= \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{distancia libre entre espaciadores}}{\text{diámetro interior de la B.T.}} \right)$$

W_{BT} = Pérdidas en el cobre por columna de Baja Tensión (kw)

L_e = Longitud efectiva de la baja tensión (pulg)

FUERZA AXIAL DE FLEXION -

Las líneas flujo de dispersión atraviesan axialmente la bobina se curvan en los extremos y regresan por el núcleo cruzando radialmente la B. T. ó se cierran por el aire cruzando radialmente la A. T. Esto significa que el flujo de dispersión que atraviesa los arrollamientos se puede descomponer en una componente axial y otra radial . El efecto de la componente axial se vió al indicar las fuerzas radiales de expansión y compresión . El efecto de la componente radial se podrá apreciar , si nos damos cuenta que dicha componente radial solo existe en los extremos y no en la parte central del

arrollamiento : Los conductores tenderán a desplazarse a la zona donde hay menor flujo de dispersión radial, es decir hacia el centro del arrollamiento . En otras palabras, el arrollamiento será comprimido axialmente . Este esfuerzo , si la bobina es diseñada simétricamente o sea con arrollamiento de igual longitud efectiva , no es crítico . En el caso de bobinas de discos el esfuerzo es tanto mayor , cuando mayor longitud no soportada exista entre segmentos separadores de discos , ya que los discos de los extremos tenderán a flexionarse en las zonas no soportadas .

Para bobinas de discos la fórmula a utilizarse será :

$$P_{FA} = P_{ER} \cdot l^2 \cdot \frac{\log_e \left[\frac{2.72 \cdot (D_{AT} - d_{BT})}{v} \right]}{\pi \left(\frac{D_{AT} + d_{BT}}{2} \right) \cdot h}$$

donde

P_{FA} = Esfuerzo de flexión axial en los discos
(TON/pulg. cuadradas)

l = distancia libre entre segmentos (pulg.)

v = ancho del arrollamiento en sentido radial,
incluyendo ducto (pulg.)

h = ancho del conductor desnudo (pulg.)

FUERZA DE ASIMETRIA AXIAL -

Aún cuando todo transformador se diseña para que los arrollamientos de B.T. y A.T. queden simétricos en el tap normal, al pasar a otro tap se introducen disimetrías en la distribución de los amperio-vuelta en sentido axial. Es decir, que si subimos desde la parte inferior de la bobina progresando axialmente hacia arriba, la distribución de amperios-vuelta de la B.T. y la A.T. no está compensada sino al centro de la bobina y a los extremos: en los puntos intermedios hay desbalanceo de amperios-vuelta.

Este desbalanceo de amperios-vuelta tenderá a desplazar hacia afuera axialmente el arrollamiento que tiene un espacio central sin espiras.

Es fácil de concebir lo que resulta, si a cada mitad del arrollamiento de B.T. y A.T. le asignamos un "centro de gravedad" de amperios-vuelta.

Cuando estos "centros de gravedad" están a igual altura, la fuerza de repulsión es solo radial; pero si uno de los "centros de gravedad" baja, la fuerza de repulsión tendrá una componente axial que tenderá a desplazar ese arrollamiento hacia abajo, y el otro hacia arriba.

Esta fuerza será proporcional a los amperios-vuelta y al espacio central sin espiras :

$$F_{AA} = 2 \cdot \frac{a}{L} \cdot \left(\frac{nIF}{Z} \right)^2 \cdot 10^{-6} \quad (\text{TON})$$

donde :

F_{AA} = fuerza de asimetría axial (TON)

a = espacio central sin espiras (pulg)

L = longitud del arrollamiento (pulg)

n = N° de espiras por fase

I = corriente por fase

F = factor de asimetría de la corriente de cortocircuito

Z = impedancia del transformador en porcentaje .

Esta fuerza que tiende a desplazar axialmente todo el arrollamiento servirá para calcular los soportes exteriores con los que se sujeta la bobina . La fuerza se dividirá entre el área soportada y nos dará el esfuerzo de compresión al que está sometido el material empleado como sujetador .

2.3 CALCULO DEL NUCLEO -

2.3.1 CARACTERISTICAS FISICAS

En el núcleo se requiere calcular el peso de hierro y las pérdidas . La fórmula a utilizar para calcular el peso , nos vá a permitir a la vez calcular las pérdidas en las columnas , culatas y esquinas con precisión .

- Peso de hierro (kg) =

$$P_{fe} = [(L + h_y) p_1 - 3V] + (D_c p_2 - 4V) + 6V$$

donde :

L = altura de la ventana (cm)

h_y = ancho máximo de la culata (cm)

p_1 = peso en kg por cm.de longitud de las 3 columnas

D_c = distancia entre centros (cm)

p_2 = peso en kg por cm de longitud de las 4 semiculatas

V = peso de una esquina del núcleo (kg)

- Pérdidas en el hierro (vatios) =

$$w_{fe} = \left[(L + h_y) p_1 - 3V \right] \cdot w_1 \\ + (D_c p_2 - 4V) \cdot w_2 \\ + 6V \cdot w_3$$

donde :

w_1 = vatios/kg a la densidad de flujo de la columna

w_2 = vatios/kg a la densidad de flujo de la culata

w_3 = vatios/kg a la densidad de flujo promedio de la columna y culata, corregidos para tener en cuenta el aumento de pérdidas por ir contra el sentido de orientación de la plancha .

Por esquina se entiende el volumen formado por la intersección de las columnas y culatas, donde se produce un giro de 90° del flujo que de las columnas tiene que pasar a las culatas .

En la actualidad el material que se emplea es hierro silicoso orientado , en que la estructura molecular ha sido orientada de forma tal que se minimizen las pérdidas en el sentido del grano . Evidentemente en las esquinas donde el flujo tiene que girar 90° se producirá un aumento considerable de pérdidas , que

son tenidas en cuenta por factores de corrección que dependen de la densidad de flujo promedio de columnas y culatas . Esta corrección también tiene en cuenta el aumento de pérdidas por el punzonado de las planchas para pasar los pernos de ajuste de las esquinas .

- Corriente de excitación (%)

Se calculan a partir de valores experimentales obtenidos de núcleos del mismo tipo, ya que depende no solo del material empleado, de la frecuencia y densidad de flujo , sino también del número y tipo de uniones del núcleo .

Peso columnas . $\frac{va}{kg}$ a su densidad de flujo
+ Peso culatas . $\frac{va}{kg}$ a su densidad de flujo
+ Peso esquinas . $\frac{va}{kg}$ a la densidad de flujo promedio de columnas y culatas .

El resultado dá los volt. amperios (va) de excitación totales, que expresados como porcentaje de la potencial nominal, dan el porcentaje de corriente de vacío .

2.3.2 DISIPACION TERMICA DEL NUCLEO -

Para transformadores de la potencia considerada en el presente caso, el calentamiento del núcleo está por debajo del calentamiento de los arrollamientos y por lo tanto no se calcula normalmente. Una fórmula basada en pruebas experimentales nos permite calcular en forma aproximada la sobreelevación de temperatura en la superficie del núcleo , para cada tipo de núcleo .

$$\begin{array}{l} \text{Sobreelevación} \\ \text{de temperatura } ^\circ\text{C} \end{array} = K \left(\frac{\text{vatios}}{\text{kg}} \right)^{0.75}$$

donde :

K = constante que varía para cada tamaño standard de núcleo .

$$\frac{\text{vatios}}{\text{kg}} = \frac{\text{Pérdidas de columnas}}{\text{Peso de columnas}}$$

2.4 CALCULO DEL TANQUE Y DEL ACEITE

2.4.1 RESISTENCIA MECANICA

El tipo de tanque depende del fabricante, pudiendo ser con aletas , tubos ó radiadores . Para la potencia considerada solo podemos adoptar como soluciones prácticas tubos ó radiadores . La solución de tubos conduce a un diseño mas económico y compacto , pero obliga a tener un mayor peso de despacho . La solución de radiadores si bien mas costosa , permite obtener un peso de despacho menor y además facilita la prueba de los radiadores aisladamente , para asegurarse que no tienen fugas en las soldaduras . En nuestro caso como no hay restricciones de ninguna clase utilizaremos tubos , sobre la base de no excedernos de 4 filas de tubos, que es un límite práctico .

El tanque para ser probado será sometido a una sobrepresión de 5psi sobre la presión del aceite . Además tendrá que soportar vacío , ya que una vez secada la parte activa y llenado el transformador con aceite secado y filtrado , se le aplicará vacío al tanque para degasificar el transformador .

- Esfuerzo

Se deberá por lo tanto calcular el máximo esfuerzo al que se somete el tanque , además de verificar el esfuerzo normal de trabajo :

$$\text{Esfuerzo} = \frac{\beta \cdot p \cdot b^2}{t^2} \quad \left(\frac{\text{lbs}}{\text{pulg}^2} = \text{psi} \right)$$

donde :

p = presión en psi

b = dimensión mas corta de la plancha (pulg)

t = espesor de la plancha (pulg)

β = factor que depende de la condición de apoyo de los rebordes de la plancha (empotramiento , libremente apoyada a una condición intermedia) y de la relación de largo a ancho de la plancha.

Es interesante observar que si los 4 lados están empotrados el esfuerzo será mínimo . Evidentemente en el tanque de un transformador existirá una condición intermedia . Para nuestro análisis consideraremos que un reborde está empotrado si corresponde a una platina de refuerzo o al marco de la tapa ó al ángulo de refuerzo de la base en caso contrario estará libremente soportado .

2.4.2 DISIPACION TERMICA

Se conoce el factor de emisividad para cada distribución de tubos estandarizada, en la que se ha fijado

- Diámetro de los tubos
- Radio de curvatura de los tubos
- Paso vertical entre filas de tubos
- Paso horizontal entre columnas de tubos
- Paso exterior entre filas de tubos y del primer tubo al tanque
- Número de filas .

Una vez conocido el valor del factor de emisividad E expresado en $\frac{\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$ se procede a calcular los cm^2 de superficie de disipación requerida . Dado que todas las superficies del tanque no tienen la misma emisividad , se relacionarán unas con otras con sus correspondientes factores de emisividad .

$$S = \frac{W \cdot E}{\Delta\theta} \quad (\text{cm}^2)$$

donde :

W = pérdidas totales (w)

E = factor de emisividad $(\frac{\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{W})$

$\Delta\theta$ = sobreelevación de
temperatura del aceite ($^\circ\text{C}$)

El factor de emisividad se especifica para una sobreelevación de temperatura standard del aceite de 50°C . Para otras temperaturas se deberá corregir :

$$E = E_{50} \sqrt{\frac{50}{\Delta\theta}}$$

Una vez calculada la superficie requerida, se empieza a tantear con una cierta distribución de tubos asumida, tomando como variable la altura de los tubos que puede modificarse dentro de ciertos límites, haciendo el tanque un poco mas alto de lo mínimo, si fuera necesario .

Antes de empezar a calcular la altura de los tubos es preciso restarle a la superficie requerida, las superficies fijas que no dependen de la altura de los tubos . Estas superficies se denominan "ganancia" y son :

- Tapa
- Cuello del tanque arriba de los tubos
- Curvatura de los tubos

Igualmente habrá que sumar las superficies constantes de pérdida, que corresponden a la superficie perdida por tener que bajar determinados tubos, haciéndolos más cortos que los demás .

Finalmente, calculada la superficie neta, se divide ésta entre el perímetro de los tubos y del tanque (que se le asigna igual E que a los tubos) y el resultado nos dá la altura de los tubos exteriores .

Sucesivos tanteos nos darán una solución cuya altura coincide con la requerida por la parte activa, aisladores y tap .

2.4.3 - CARACTERISTICAS FISICAS

Peso del tanque

Se procederá a calcular el peso de las planchas de hierro de acuerdo a sus espesores y a sus dimensiones totales . A este peso se le añade un 15% para tener en cuenta refuerzos y soldadura . Finalmente se añade el peso de los tubos .

Dotación del aceite

Se obtiene calculando :

$$\begin{aligned} & \text{Volumen del cuerpo del tanque} && (V_1) \\ + & \text{Volumen de los tubos} && (V_2) \\ + & \text{Volumen del conservador} && (V_3) \\ - & \text{Volumen desplazado por la parte activa} && (V_4) \\ = & \text{Dotación de aceite .} \end{aligned}$$

. El volumen del cuerpo del tanque es :

$$V_1 = \frac{\text{Largo} \cdot \text{Ancho} \cdot \text{Altura}}{3980} \quad (\text{gl})$$

donde las dimensiones son en cm .

. El volumen de los tubos es :

$$V_2 = m \text{ de tubo} \cdot \text{gl/m}$$

- . El volumen desplazado por la parte activa se calcula aproximadamente por :

$$V_4 = 0,40 \left(\text{Peso de hierro} + \text{Peso del alambre de cobre forrado} \right) \quad (\text{gl})$$

- . El volumen del conservador estará dado por la siguiente fórmula :

$$V_3 = (V_1 + V_2 - V_4) \cdot 0,063 \quad (\text{gl})$$

El volumen total resultará expresado en galones americanos .

Para obtener el peso se multiplicará por 3.4 kg/gl

Peso total

Se totalizará el peso del transformador asignándole un 18% de peso de aislamiento adicional para la bobina (dato basado en experiencia) y un peso de ferretería que saldrá de una ferretería standarizada (peso aprox. 20% del peso de hierro silicoso

Se totalizará el peso de las bobinas, núcleo y ferretería para obtener el peso de la parte activa .

Aparte se totalizará el peso del tanque , conservador y aisladores para obtener el peso del tanque .

Finalmente se añade el peso del aceite .

3. CALCULO DEL TRANSFORMADOR

3.1 PROPORCIONES OPTIMAS DE PRE-DISEÑO

Asumimos para establecer un pre-diseño :

$$B = 15500 \text{ gauss}$$

$$\Delta = 2.80 \text{ Amp/mm}^2$$

$$F_u = 0.89$$

$$F_c = 0.19$$

$$C_f = 18.00$$

$$C = 65.00$$

Calculamos las proporciones del núcleo :

$$\begin{aligned} a L D_f^2 &= \frac{4 \times 5000 \times 10^8}{15500 \times 2.80 \times 0.89 \times 0.19 \times 60} \\ &= 4.545 \times 10^6 \end{aligned}$$

$$P = \frac{\pi}{4} \times 7.65 \times 0.89 \times 18 = 96.1$$

$$Q = \frac{\pi}{4} \times 8.88 \times 0.19 \times 65 = 86.1$$

$$R = \frac{P}{Q} = \frac{96.1}{86.1} = 1.117$$

De la tabla de valores de diseños existentes se deduce que :

$$m = \frac{a}{D_f} = 0.835 \quad ; \quad a = 0.835 D_f$$

$$1 = \frac{a}{L} = 0.2322 \quad ; \quad L = \frac{0.835 D_f}{0.2322}$$

Sustituyendo estos valores :

$$\begin{aligned} a \cdot L \cdot D_f^2 &= 0.835 D_f \times \frac{0.835 D_f}{0.2322} \times D_f^2 = \\ &= \frac{(0.835)^2 D_f^4}{0.2322} = 4.545 \times 10^6 \end{aligned}$$

$$D_f^4 = 149.5 \times 10^4$$

$$D_f = 35.0 \text{ cm}$$

$$a = 29.2 \text{ cm}$$

$$L = 126.0 \text{ cm}$$

Asumimos el núcleo N35 con las siguientes características :

$$D_f = 346 \text{ mm} - \text{escalones}$$

$$F_u = 0.90$$

$$\text{Sección neta de columna} = 830.1 \text{ cm}^2$$

$$\text{Sección neta de culata} = 992.7 \text{ cm}^2$$

$$\text{voltios/espira a } 10000 \text{ g y } 60 \text{ cps} = 22.12$$

kg/cm por 3 columnas	=	19.08
kg/cm por 4 semiculatas	=	30.40
sección culata/sección columna	=	1.196
kg/esquina	=	217.0
ancho máximo de culata	=	395 mm
ancho de ventana	=	295 mm
altura de ventana	=	1275 mm

Procedemos a calcular el peso de fierro y las pérdidas :

$$P_{fe} = [(L + h_y) p_1 - 3 v] + (D_c p_2 - 4 v) + 6 v$$

$$P_{fe} = (127.5 + 39.5) 19.08 - 3 \times 217 +$$

$$(34.6 + 29.5) 30.40 - 4 \times 217 +$$

$$6 \times 217$$

$$= (3185 - 651) + (1948 - 868) + 1302$$

$$= 2534 + 1080 + 1302 = 4916 \text{ kg}$$

Para obtener las pérdidas calculamos los vatios/kg a las diferentes densidades de flujo para hierro silicoso M-6X de Armco :

columnas	a	15500 gauss	1.61 w/kg
culatas	a	13000 gauss	1.07 w/kg
esquinas	a	14250 gauss	3.23 w/kg

$$\begin{aligned} W_{fe} &= 2534 \times 1.61 = 4080 \\ &1080 \times 1.07 = 1158 \\ &1302 \times 3.23 = 4205 \\ &\hline &9443 \end{aligned}$$

Valor que excede la garantía en 5.0 % Por lo tanto en el diseño final se debe bajar la densidad de flujo a unos 15,000 gauss

Procedemos a calcular el peso de cobre y las pérdidas en el cobre :

$$P_{cu} = \frac{\pi}{4} \times 8.88 \times F_c \times a \times L \times 3 \times (a + 2 D_f) \times 10^{-3}$$

$$P_{cu} = \frac{\pi}{4} \times 8.88 \times 0.19 \times 29.5 \times 127.5 \times 3 \times (29.5 + 69.2) \times 10^{-3}$$

$$P_{cu} = 1480 \text{ kgs}$$

$$W_{cu} = 1480 (2.80 \times 1.53)^2 = 27150 \text{ w}$$

Consideraremos además :

- Pérdidas por corriente
circulatoria aprox. 3% = 800 w

- Pérdidas por flujo de
dispersión = 5000 kva x 8%
= 400 kvar x 5.8 w/kvar = 2300 w

- Pérdidas por la corriente
de B.T. (288.7 Amp) = 30 w

30280 w

Costo del fierro y cobre :

$$4916 \times 18 + 1480 \times 65 = 88488 + 96200 = \text{\$/ } 184,688.--$$

3.2 CALCULO DE LAS BOBINAS

3.2.1 DISTRIBUCION DE LOS ARROLLAMIENTOS

$$\text{voltios/espira} = 22.12 \times \frac{15500}{10000} = 34.25$$

$$N_2 = \frac{10000}{34.25} = 292 \text{ espiras}$$

$$N_1 = 292 \times \frac{60000}{1.732 \times 10.000} = 1012 \text{ espiras}$$

$$\text{tap} + 5\% \quad 1062 \text{ espiras}$$

$$\text{tap} - 5\% \quad 962 \text{ espiras}$$

$$S_{cu1} = \frac{49.1 \text{ Amp}}{2.80 \text{ Amp/mm}^2} = 17.52 \text{ mm}^2$$

$$S_{cu2} = \frac{288.7}{1.732 \times 2.80} = 59.60 \text{ mm}^2$$

Alta tensión

Se tratará de utilizar una sola sección de alambre, con bobinas de 50 espiras a fin de sacar los taps al final o al comienzo de cada disco de 25 espiras . El aislamiento de los extremos es un mínimo de $3 \frac{9}{16}$ " por lado , o sea $7 \frac{1}{8}$ " en total

Se debe dejar espacio para que pase el anillo de ajuste de la parte superior, que es de 1". El de la parte inferior está partido de modo que no cruza la ventana y no quita altura.

Entre los taps centrales se tiene que dejar un mínimo de $5/8$ " que puede soportar 22 kv de prueba de sobretensión a frecuencia industrial y 75 kv de impulso.

Los espaciadores entre discos se tomarán de $3/16$ " y posteriormente se verificará que con esta distancia de aislamiento soporta impulso. El forro del conductor será 0.030" de papel. La bobina a utilizarse es de discos continuos y los espacios no ocupados por los discos son :

$$7 \cdot 1/8 + 1" + 5/8" \times 0.92 =$$

$$= 7 \cdot 1/8 + 1.575 = 8.700" = 221 \text{ mm}$$

$$\text{Altura ocupada por los discos} = 1275 - 221 = 1054 \text{ mm}$$

$$\text{N}^\circ \text{ de discos} = \frac{1054 + 2 \times \frac{3}{16} \times 0.92 \times 25.4}{\text{Ancho del conductor desnudo} + (0.030" \times 0.92 + \frac{3}{16} \times 0.92) \times 25.4}$$

El factor 0.92 se aplica para tener en cuenta el 8% de disminución en el espesor del aislamiento al secarlo

$$\text{N}^\circ \text{ de discos} = \frac{1054 + 9}{a + 5.09} = \frac{1065}{a + 5.09}$$

El ancho de la espira en lo posible debe fluctuar entre 0.020" (5.08 mm) y 0.040" (10.15 mm) a fin de que el alambre sea fácil a trabajar. Igualmente por razón de costo es preferible elegir alambres con espesores arriba de 0.070" (1.78 mm) que son mas baratos .

1er tanteo : 42 discos con 25 espiras por disco

$$S_{cu_1} = 17.52 \text{ mm}^2 = 0.0272 \text{ pulg}^2$$

$$\text{N}^\circ \text{ de discos} = \frac{1062}{25} = 42.6$$

Como el número de discos debe ser par, lo redondeamos a 42, haciendo

$$N_1 = 1050 \text{ espiras}$$

$$N_2 = 304 \text{ espiras}$$

pero B = 15700 gauss, sería excesivo .

$$\text{Además resulta } a = \frac{1065}{42} - 5.09 = 20.3 \text{ mm}$$

que es excesivo .

2° tanteo : 84 discos con 12 ó 13 espiras por disco

Dado que entre taps tenemos 25 ó 26 espiras escogemos 84 discos con 13 espiras por disco, lo que dá un total de 1092 espiras y además entre el tap \pm 5% y el 5% dá 104 espiras

$$a = \frac{1065}{84} - 5.09 = 12.68 - 5.09 = 7.59$$

Escogamos 0.300" (7.62 mm) x 0.095" (2.42 mm) que tiene 0.0280 pulg² (18.05 mm²)

Así tenemos que los taps que corresponden a 26 espiras salen de arriba

Tap + 5 %	:	1092	espiras
Tap + 2.5 %	:	1066	"
Tap normal	:	1040	"
Tap - 2.5 %	:	1014	"
Tap - 5 %	:	988	"

El espesor radial será :

$$(0.095" + 0.033") \times 13 = 1.66" \sim 42 \text{ mm}$$

Recálculo de la altura de A.T.

84 x 0.300"	x 25.4	=	650
84 x 0.030	x 0.92 x 25.4	=	59
82 x 0.1875	x 0.92 x 25.4	=	359
1 x 0.625	x 0.92 x 25.4	=	15
			<hr/>
			1083
(7.125 + 1")	x 25.4		206
			<hr/>
			1289 ~ 1290 mm

Para el tap normal restamos

4 x 0.300	x 25.4	=	30.5
4 x 0.030	x 0.92 x 25.4	=	2.8
4 x 0.1875	x 0.92 x 25.4	=	17.6
1 x 0.625	x 0.92 x 25.4	=	14.6
			<hr/>
			65.5 ~ 66

Longitud efectiva en el tap normal

1290
66
<hr/>
1224 mm
206
<hr/>
1018

Baja Tensión

$$N_2 = 1040 \times \frac{\sqrt{3} \times 10}{60} = 300 \text{ espiras}$$

$$S_{cu_2} = 59.60 \text{ mm}^2 = .0925 \text{ pulg}^2$$

Procederemos igual que con la alta tensión tratando de balancear la bobina para 1018 mm

Utilizaremos bobina de discos continuos con 2 ó 4 conductores, colocando espaciadores de $\frac{1}{8}$ " entre discos y forro de papel de 0.020"

Primer tanteo

Tanteamos con conductor de 0.400" (10.16 mm) x 0.120" (3.05 mm) = 0.0472 pulg² y obtenemos el siguiente número de discos :

$$= \frac{1018 + 2 \times \frac{1}{8} \times 0.92 \times 25.4}{(0.020 + 0.125) \times 0.92 \times 25.4 + 10.16}$$
$$= \frac{1018 + 6}{3.39 + 10.16} = \frac{1024}{13.55} = 75.5$$

que dá menos de 4 espiras por disco y si se toman 75 discos con 4 espiras por disco, ya no queda balanceada la bobina .

Tomamos entonces

$$\begin{array}{rcl} 72 \text{ discos} \times 4 \text{ espiras} & = & 288 \text{ espiras} \\ 4 \text{ discos} \times 3 \text{ espiras} & = & \underline{12} \text{ " } \\ & & 300 \end{array}$$

En esos 4 discos centrales les colocamos aislamiento radial suplementario para alcanzar el ancho de las 4 espiras

La longitud efectiva será :

$$\begin{array}{rcl} 76 \times 0.400" \times 25.4 & = & 772 \\ 76 \times 0.020 \times 0.92 \times 25.4 & = & 35.5 \\ 74 \times 0.125 \times 0.92 \times 25.4 & = & \underline{216.} \\ & & 1023.5 \sim 1024 \end{array}$$

En la bobina de alta tensión se añadirán 6 mm = $\frac{1}{4}"$ colocando 4 espaciadores de $\frac{1}{4}"$ en vez de $\frac{3}{16}"$ en la zona central antes de los taps .

La longitud actual de la B.T. será :

$$\frac{1024}{66} = 2 \frac{13}{16} = 15 \text{ espaciadores } \frac{3}{16}$$

1090 mm

La longitud total de la bobina será :

$$\begin{array}{r} 1090 \\ \underline{206} \\ 1296 \sim 1300 \text{ mm} \end{array}$$

El espesor radial de la B.T. sera

$$2 \times (0.142) \times 4 = 1.14" = 29 \text{ mm}$$

3.2.2 CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS ARROLLAMIENTOS

DE A.T. y B.T.

<u>Parte</u>	<u>Espesor Radial</u>	<u>Diámetro</u>
Tubo de pertinax de 358 mm x 368 x 1280 mm de largo	5	358 <hr/> 10 368
Espaciadores de $1/4''$	6.5	<hr/> 13 381
Espesor de la B. T.	29	<hr/> 58 439
Espesor entre B.T./A.T. es $1\ 1/2''$	38	<hr/> 76 515
Espesor de la A.T.	42	<hr/> 84 599
Aislamiento entre bobinas $1\ 1/2''$	38	<hr/> 76 675

Que resulta mayor que $346 + 295 =$
 $= 641$ mm de pre-diseño .

El factor de ventana resulta :

$$\frac{2 (1092 \times 0.280 \times 645 + 300 \times 2 \times 0.0472 \times 645)}{1300 \times (675 - 346)}$$

$$\frac{2 (19720 + 18280)}{427000} = 17.8 \%$$

Baja Tensión

$$\text{Espira media} = \pi \times 410 = 1.288 \text{ m}$$

$$\text{Longitud} = 1.288 \times 3 \times 300 = 1159/1160 \text{ m}$$

$$\text{Peso} = 8.88 \times 1160 \times 60.95 \times 10^{-3} = 629 \text{ kg}$$

Considerando $7 \frac{1}{2} \%$ por el forro de papel resultan 675 kg. de peso del conductor aislado .

$$\text{Resistencia} = 0.021 \times \frac{1160}{60.95} = 0.400 \text{ ohm}$$

$$I^2R = (167)^2 \times 0.400 = 11,170 \text{ w}$$

$$\text{vatios/kg} = \frac{11,170}{629} = 17.72$$

% de pérdidas por corrientes circulatorias =

$$= \left(\frac{167 \times 300 \times 3.05 \times 0.0563}{1024} \right)^2 \times \frac{1}{17.72} = 3.96 \%$$

$$= 3.96 \% \times 11.170 = 442 \text{ w}$$

Alta Tensión

$$\text{Espira media} = \pi \times .557 = 1,751 \text{ m}$$

$$\text{Longitud} = 1092 \times 3 \times 1.751 = 5745 \text{ m}$$

$$\text{Peso} = 8.88 \times 5745 \times 18.05 \times 10^{-3} = 920 \text{ kg}$$

Considerando 11 % por el forro de papel
resultan 1020 kg.

$$\text{Resistencia} = 0.021 \times \frac{5745}{18.05} = 6.68 \text{ ohm}$$

en el tap normal es 6.36 ohm

$$I^2R = (49.1)^2 \times 6.68 = 16,120 \text{ w}$$

en el tap normal es 15,340 w

y en el tap - 5 % resulta igual ó

$$\text{sea} = (49.1 \times 1.05)^2 \times \frac{6.68}{1.10} \sim 16,120 \text{ w}$$

$$\text{vatios/kg} = \frac{16,120}{920} = 17.53$$

% de pérdidas por corrientes circulatorias

$$= \left(\frac{1042 \times 49.1 \times 2.31 \times 0.0563}{1024} \right)^2 \times \frac{1}{17.53} = 2.30 \%$$

$$= 2.30 \times 15,340 = 353 \text{ w}$$

Pérdidas adicionales

- Por la corriente de B.T. (288.7 A) ,
son iguales a la de pre-diseño = 30 w

- Por flujo de dispersión es

$$5000 \times 6.24 = 312 \text{ kvar}$$

$$312 \text{ kvar} \times 5.8 \text{ w/kvar} = \frac{1810 \text{ w}}{1840 \text{ w}}$$

Pérdidas totales en el cobre en el tap normal :

$$1840 + (11170 + 15340) + (442 + 353) = 29145 \text{ w}$$

Impedancia a 75°C

$$\% X = \frac{60 \times 5000 \times \left(\frac{1288 + 1751}{2} \right) \times \left(38 + \frac{29 + 42}{3} \right)}{1270 \times 3 \times \left(1024 + \frac{2}{3} \times 109 \right) (33.35)^2} = 6.24 \%$$

$$\% R = \frac{11170 + 442 + 15340 + 353}{5000} = 0.546 \%$$

$$\% Z = \sqrt{(6.24)^2 + (0.546)^2} = 6.25 \%$$

3.2.3 DISIPACION TERMICA

Baja Tensión

Calcularemos primero la gradiente de temperatura en la película de aceite, para lo cual obtendremos los vatios/cm². Colocaremos 22 espaciadores de 3/4" de espesor por ducto axial :

$$A_{iv} = 76 \times (0.400" + .020 \times .92) \times 2.54 \times \\ \times (119.8 - 22 \times \frac{3}{4} \times 25.4) = 6340 \text{ cm}^2$$

$$A_{ov} = 76 \times (0.400 + 0.20 \times 0.92) \times 2.54 \\ \times (138 - 22 \times \frac{3}{4} \times 25.4) = 7730$$

$$\frac{2}{3} A_h = \frac{2}{3} \times 128.8 \times 76 \times 2 \times 2.9 = 37800$$

51870 cm²

Calculamos las superficies efectivas

$$A_{iv} \times P_{iv} = 6340 \times \left(3 \times \frac{1''}{4} \right) = 4740$$

$$A_{ov} \times P_{ov} = 7730 \times 1 = 7730$$

$$\frac{2}{3} A_h \times P_h \times P_h^1 = 37800 \times \left(2 \times \frac{1}{8} \times 0.92 \right) \times 0.855 = \frac{7440}{19910 \text{ cm}^2}$$

$$k = \frac{\frac{1}{8} \times 0.92}{1.14''} = 0.101 \text{ de acá } P_h^1 = 0.855$$

La gradiente en el aceite se obtendrá de :

$$\frac{\text{vatios}}{\text{cm}^2} = \frac{11170 + 442}{3 \times 19910} = .1945 \text{ W/cm}^2$$

y de la curva correspondiente resulta una gradiente de 18.4°C

La gradiente de temperatura en el aislamiento es :

$$= 6.45 \times \frac{11,612}{3 \times 51870} \times \frac{0.010''}{0.004''} \sim 1.2$$

Sobreelevación total de temperatura de la baja tensión :

18.4

1.2

19.6°C

Alta Tensión

Se calcula para la peor condición ó sea el tap - 5% donde la corriente es 5% mayor que la nominal

$$A_{iv} = 76 \times (0.300 + 0.030 \times 0.92) \times 25.4 \times \\ \times (161.8 - 22 \times \frac{3}{4} \times 25.4) = 7480$$

$$A_{ov} = 76 \times (0.300 + 0.030 \times 0.92) \times 25.4 \times \\ \times (188) = 11820$$

$$\frac{2}{3} \times A_h = \frac{2}{3} \times 175.1 \times 76 \times 2 \times 4.2 = 75500$$

94800 cm²

Calculamos las superficies efectivas

$$A_{iv} \times P_{iv} = 7480$$

$$A_{ov} = 11820$$

$$\frac{2}{3} A_h \times P_h \times P_h^1 = 75500 \times (2 \times \frac{3}{16} \times 0.92) \times .86 = 22400$$

41700

$$\frac{\frac{3}{16} \times 0.92}{1.65} = 0.1045 \text{ de acá } P_h^1 = 0.86$$

$$\frac{\text{vatios}}{\text{cm}^2} = \frac{16,120 + 353}{3 \times 41700} = 0.1312 \text{ W/cm}^2$$

la gradiente será 15.3°C

Por otro lado, la gradiente de temperatura en el aislamiento es :

$$= 6.45 \times \frac{16,473}{3 \times 94800} \times \frac{0.015}{0.004} = 1.4^\circ\text{C}$$

La gradiente total es para el tap - 5%

$$\begin{array}{r} 15.3 \\ 1.4 \\ \hline 16.7^\circ\text{C} \end{array}$$

Para el tap + 5% las pérdidas son iguales, pero la superficie de disipación es mayor

Calentamiento durante cortocircuito

Alta Tensión

$$D = \sqrt{\frac{25000}{4} \log 10 \left[\frac{\left(\frac{484.5}{309.5}\right)^2 + 0.023}{\left(\frac{339.5}{309.5}\right)^2 + 0.023} \right]}$$

$$D = \sqrt{6250 \log 10 \frac{2.468}{1.225}} = \sqrt{6250 \times 0.304}$$

$$D = \sqrt{1900} = 43.5 \text{ kilo-amp/pulg}^2$$

La densidad de corriente normal para la alta tensión es :

$$D = \frac{49.1}{0.0280} = 1752 \text{ Amp/pulg}^2$$

Si se tiene un cortocircuito franco en los bornes a plena tensión, siendo la impedancia del transformador 6.25 % la corriente podrá aumentar hasta $\frac{100}{6.25} = 16$ veces la corriente nominal, con una

$$D = 1,752 \times 16 = 28.0 \frac{\text{kilo amp}}{\text{pulg.}^2} < 43.5$$

Baja Tensión

Los cálculos son similares con $E = 0.0396$

$$D = 43.3 \text{ k Amp/pulg}^2$$

$$\text{La } D \text{ de diseño es } = \frac{167}{2 \times 0.0472} = 1768 \text{ Amp/pulg}^2$$

En cortocircuito tendremos $1,768 \times 16 = 28.25 \text{ Amp/pulg}^2$
que es menor que $43.3 \text{ k Amp/pulg}^2$

El tiempo aproximado que soportaría termicamente un cortocircuito sería

$$28.2 = \sqrt{\frac{25000}{S} \times 0.304}$$

$$S = \frac{7600}{784} = 9.7 \text{ seg}$$

Que excede ampliamente el tiempo de apertura de cualquier protección .

3.2.4 ESFUERZOS EN EL DIELECTRICO

A frecuencia industrial :

En la prueba de tensión inducida con el doble de la tensión nominal , se producen los siguientes esfuerzos de trabajo :

Alta Tensión -

Entre espiras : 66.70 v < 7,300 v

Entre discos : 66.70 x 26 = 1732 v < 16,600 v

Un forro de 0.030" de papel se puede trabajar hasta 7300 v , durante 1 minuto , y si además hay un espaciador de $\frac{3}{16}$ " se puede llegar a 16600 v

Baja Tensión -

Entre espiras : 66.70 v < 4,900 v

Entre discos : 66.70 x 8 = 534 v < 12,600 v

Un forro de papel de 0.020" soporta 4900 v durante 1 minuto y con un espaciador de $\frac{1}{8}$ " soporta 12,600 v

El aislamiento a tierra a los extremos de la bobina y de alta tensión a baja tensión ya

no se verifica dado que su dimensionamiento y conformación se basa en observaciones experimentales sobre todo bajo condiciones de impulso .

En Impulso

Se procederá a calcular el factor α y el esfuerzo dieléctrico producido en el primer disco .

Alta Tensión

Capacidad a tierra en el tap + 5% que produce la peor condición :

$$C_g = \frac{0.707 \times \frac{515}{25.4} \times \frac{1090}{25.4}}{2 \times \frac{3}{16} + \frac{3}{8} + \frac{1}{4} + \frac{3}{8}} = \frac{0.707 \times 20.25'' \times 42.9''}{0.0833 + 0.333} = 1470 \text{ pF}$$

Capacidad en serie en el tap + 5%

$$C_s = \frac{0.707 \times \left(\frac{515 + 599}{2 \times 25.4} \right)}{(84 - 1)} \left[\frac{4 (0.300'' + 2 \times 0.030'')}{0.030'' (13 - 1)} + \frac{\frac{599 - 515}{2 \times 25.4} + \frac{3}{16} \times 0.92}{\frac{0.030'' \times 0.92}{4} + \frac{3}{16} \times 0.92} \right]$$

$$= 0.187 \left(4.0 + \frac{4}{3} \times \frac{1.652 + 0.173}{0.0069 + 0.0557} \right)$$

$$= 0.187 \times (4.0 + 38.8) = 0.187 \times 42.8 = 8.0 \text{ pF}$$

$$\mathcal{L} = \sqrt{\frac{1470}{8.0}} = \sqrt{183.8} = 13.5$$

Entre la espira 1 y 2 tenemos 0.0915 % de espiras, que multiplicado por \mathcal{L} da 1.23 % de 300 kv, o sea 3.7 kv, que es menor que 31.0 kv que es el esfuerzo de diseño admisible para forro de 0.030"

Entre la espira 1 y la 26 tenemos 1 disco con un porcentaje de espiras sobre el total de

$$\frac{26}{1092} = 2.38 \%$$

Para calcular la distribución de impulso hay que acudir a la curva en la que para $\alpha = 13.5$ se encuentra 26 % de la onda entre el 2.38 % de las espiras . Con 300 kv nos resulta $26 \% \times 300 = 78$ kv tanto para sistemas con neutro a tierra como para sistemas con neutro aislado .

El valor admisible para la resistencia al impulso de un forro de 0.030" y un espaciador de $3/16''$ es 77.5 kv y por lo tanto el diseño es adecuado .

En el caso que no se pudiera haber alcanzado el nivel de impulso requerido se hubiera tenido que pasar a una bobina interfoliada con $6 \frac{1}{2} \times 2$ espiras por disco . Esta bobina nos daría una capacidad en serie considerablemente alta , que en este caso sería 107 pF , con lo que bajaría a

$$\alpha = \sqrt{\frac{1470}{107}} = \sqrt{13.74} \sim 3.70 \%$$

La onda de impulso en este caso se tiene que considerar entre el 2º y 3er disco , o sea que el % de espiras es :

$$\frac{13 \times 3}{1092} = \frac{39}{1029} = 3.80 \%$$

$$300 \text{ kv} \times (3.80 \times 3.70) = 300 \times 14.06\% = 42.1 \text{ kv}$$

$$= 42.1 \text{ kv} < 77.5 \text{ kv}$$

Entre espiras se tendría de la 1 a la 14

$$\frac{13}{1092} = 1.19 \%$$

$$300 \text{ kv} (1.19 \times 3.70) = 300 \times 4.40 = 13.2 \text{ kv} < 31.0 \text{ kv}$$

Baja Tensión

La capacidad a tierra se tomará considerando la capacidad entre el arrollamiento y el núcleo (C_{g1}) sumada a la capacidad entre la baja tensión y la alta tensión (C_{g2})

$$C_{g1} = \frac{0.707 \times \frac{410}{25.4} \times \frac{1024}{25.4}}{\frac{1''}{4} \div 3.0 + \frac{5}{25.4} \div 5.0 + \frac{6}{25.4} \div 3.0} = \frac{0.707 \times 16.15 \times 40.3''}{0.0833 + 0.0394 + 0.0788}$$

$$= \frac{0.707 \times 16.15 \times 40.3}{0.2015} = 2290 \text{ pF}$$

$$C_{g2} = \frac{0.707 \times 16.15 \times 40.3}{0.4166} = 1104 \text{ pF}$$

$$C_g = 2290 + 1104 = 3394 \text{ pF}$$

La capacidad en serie es

$$C_s = \frac{0.707 \times \left(\frac{439 + 381}{2 \times 25.4} \right)}{(76 - 1)} \left[\frac{4 (0.400'' + 2 \times 0.020'')}{0.020'' (4 - 1)} + \right. \\ \left. + \frac{4}{3} \times \frac{\frac{439 - 381}{2 \times 25.4} + \frac{1}{8} \times 0.92}{\frac{0.020'' \times 0.92}{4} + \frac{1}{8} \times 0.92} \right]$$

$$= \frac{0.707 \times 16.12}{75} (29.36 + \frac{1.33 (1,142 + 0.115)}{0.0046 + 0.0371})$$

$$= \frac{0.707}{75} \times 16.12 (29.36 + 40.2) = 10.6 \text{ pF}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{3394}{10.6}} = \sqrt{320} = 17.9 \sim 18$$

El % de espiras es

$$\frac{8}{300} = 2.67 \%$$

y se obtiene de la curva 38% de la onda aplicada que es de 95 kv :

$$0.38 \times 95 = 36.1 \text{ kv} < 51 \text{ kv}$$

Para 0.020" y espaciadores de $\frac{1}{8}$ " la máxima tensión admisible en diseño es 51 kv de impulso .

Entre la 1a. y 2a. espira tenemos :

$$\frac{1}{300} = 0.33\%$$

y multiplicando por α se obtiene ,

$$0.33 \times 17.9 = 5.9 \%$$
 de 95 kv. que resulta 5.7 kv

que es menor que 20 kv que es lo máximo admisible en diseño para forro de 0.020"

3.2.5 ESFUERZOS MECANICOS

Alta Tensión

El esfuerzo de expansión radial será :

$$P_{ER} = \frac{244 \times (1,75)^2 \times \left(\frac{15340}{3}\right)}{\left(\frac{1024}{25.4}\right) \times (6.25)^2} = 2,42 \text{ TONS/pulg}^2$$

donde $F = 1.75$ para $\frac{X}{R} = \frac{6.25}{0.564} = 11.08$

El esfuerzo de flexión axial será :

$$P_{FA} = 2.42 \times 1^2 \times \frac{\log_e \left[2.72 \times \frac{D_{AT} - d_{BT}}{v} \right]}{\pi \left(\frac{D_{AT} + d_{BT}}{2} \right) \times h}$$

donde l se obtiene tomando aproximadamente $\frac{2}{3}$ de la espira media, utilizando 22 segmentos de $1 \frac{1}{8}$ " de ancho por círculo ó sea :

$$\frac{1751 - 22 \times 1.125 \times 25.4}{22} = \frac{1751 - 630}{22}$$
$$= \frac{1121}{22} = 51 \text{ mm} = 2.0"$$

$$P_{FA} = 2.42 \times (2.0)^2 \times \frac{\log_e \left[2.72 \times \frac{599 - 381}{42} \right]}{\pi \times \frac{599 + 381}{2 \times 25.4} \times 0.300''}$$

$$P_{FA} = 2.42 \times 4 \times \frac{\log_e 14.1}{18.14} = \frac{9.68 \times 2.64}{18.14}$$

$$P_{FA} = 1.41 \text{ TONS/pulg}^2$$

El esfuerzo al extremo del arrollamiento de alta tensión será la suma vectorial de los 2 esfuerzos :

$$\sqrt{(2.42)^2 + (1.41)^2} = 2.80 \text{ TONS/pulg}^2 < 4.5$$

Que es menor que 4.5 TON/pulg² que el máximo esfuerzo admisible para cobre recocido .

Baja Tensión

- El esfuerzo de compresión radial sera :

$$P_{CR} = \frac{244 \times (1.75)^2 \times \frac{11.170}{3}}{\frac{1024}{25.4} \times (6.25)^2} \left(1 - \frac{1}{1 + 50 \operatorname{sen} \alpha} \right)$$

donde :

$$\begin{aligned} \operatorname{sen} \alpha &= \operatorname{sen} \left[\frac{\left(\frac{15\pi}{22} - \frac{3}{4} \right)}{15} \right] = \operatorname{sen} \frac{1.39}{15} \\ &= \operatorname{sen} 0.0926 = \operatorname{sen} 0.0926 \times \frac{180}{\pi} \\ &= \operatorname{sen} 5.3^\circ = 0.0925 \end{aligned}$$

Que corresponde a 22 espaciadores entre Baja Tensión y núcleo , cada uno de $\frac{3}{4}$ " de ancho .

$$\begin{aligned} P_{CR} &= 1.76 \left(1 - \frac{1}{1 + 50 \times 0.0925} \right) = 1.76 (1 - 0.178) \\ &= 1.76 \times 0.822 = 1.45 \text{ TON/ pulg}^2 \end{aligned}$$

- El esfuerzo de flexión axial estará dado por la misma fórmula indicada para el arrollamiento de alta tensión, donde l se obtiene tomando aproximadamente $\frac{2}{3}$ de la espira media, utilizando 22 segmentos de $\frac{3}{4}$ " de ancho, por círculo, ó sea :

$$\frac{1288 - 22 \times 0.75 \times 25.4}{22} = \frac{1288 - 420}{22}$$
$$= \frac{868}{22} = 39.4 \text{ mm} = 1.55"$$

$$P_{FA} = 1.76 \times (1.55)^2 \times \frac{\log_e \left(2.72 \times \frac{599 - 381}{29} \right)}{\pi \times \frac{599 + 381}{2} \times 0.400''}$$

$$= 4.23 \times \frac{\log_e 20.45}{24.2} = 4.23 \times \frac{3.015}{24.2}$$

$$P_{FA} = 0.526 \text{ TON/pulg}^2$$

El esfuerzo resultante al extremo del arrollamiento será la suma vectorial de estos 2 esfuerzos :

$$\sqrt{(1.45)^2 + (0.526)^2} = 1.54 \text{ TON/pulg}^2 < 4.5$$

Soportes de los extremos -

La fuerza de asimetría axial para el tap + 5% ,
es en la baja tensión :

$$F_{AA} = 2 \times \frac{a}{L} \times \left(\frac{nIF}{Z} \right)^2 \times 10^6 \quad (\text{TON})$$

$$F_{AA} = 2 \times \frac{66}{1090} \times \left(\frac{300 \times 167 \times 1.05 \times 1.75}{6.25} \right)^2 \times 10^{-6}$$

$$= 25.8 \text{ TONS}$$

sobre 22 segmentos de $\frac{3}{4}$ " de ancho, que se apoyan
sobre el disco de sujeción al tope de la bobina ,
resultará una superficie de apoyo por lado de

$$22 \times \frac{3}{4} \times \left(\frac{29}{25.4} \right) = 18.8 \text{ pulg}^2$$

$$\text{Esfuerzo} = \frac{25.8}{2 \times 18.8} = 0.69 \text{ TON/pulg}^2 < 1.50$$

Siendo el límite recomendable para segmentos de
prespan 1.50 TON/pulg²

3.3 CALCULO DEL NUCLEO

$$P_{fe} = \left[(L + h_y) p_1 - 3 v \right] + (D_c p_2 - 4 v) + 6 v$$

L	=	130.0	p ₁	=	19.08
h _y	=	39.5	p ₂	=	30.40
D _c	=	67.5	v	=	217

$$\begin{aligned} P_{fe} &= \left[(130.0 + 39.5) 19.08 - 3 \times 217 \right] + \\ &\quad (67.5 \times 30.40 - 4 \times 217) + 6 \times 217 \\ &= (169.5 \times 19.08 - 651) + (67.5 \times 30.40 - 868) \\ &\quad + 6 \times 217 \\ &= (3235 - 651) + (2050 - 868) + 1318 \\ &= 2584 + 1182 + 1302 = 5068 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$P_{fe} = 5070 \text{ kg}$$

Para calcular las pérdidas en el fierro recalculamos las densidades de flujo :

Columnas : 15100 gauss con 1.49 w/kg

Culatas : 12600 gauss con 1.00 w/kg

Esquinas : 13850 gauss con 2.94 w/kg

$$2584 \times 1.49 = 3850$$

$$1182 \times 1.00 = 1182$$

$$1302 \times 2.94 = \underline{3830}$$

$$8862 \sim 8870 \text{ w}$$

Corriente de excitación

Columnas : 15100 gauss con 12.1 va/kg

Culatas : 12600 gauss con 4.05 va/kg

Esquinas : 13850 gauss con 6.85 va/kg

$$2584 \text{ kg} \times 12.10 = 31250$$

$$1182 \text{ kg} \times 4.05 = 4850$$

$$1302 \text{ kg} \times 6.85 = \underline{8930}$$

$$47030 \text{ va}$$

$$\% I_o = \frac{47.03}{5000} \times 100 = 0.94 \%$$

Sobreelevación de temperatura

Para el núcleo considerado tenemos :

$$k = 4.5$$

$$\frac{\text{vatios}}{\text{kg}} = \frac{3850}{2584} = 1.49$$

$$^{\circ}\text{C} = 4.5 \times (1.49)^{0.75} = 6.1 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

inferior a los 19.6°C que se sobreeleva
la baja tensión sobre el aceite

3.4 CALCULO DEL TANQUE Y LA DOTACION DE ACEITE

3.4.1 RESISTENCIA MECANICA

El tanque será con tubos soldados a lo largo de todo el perímetro .

Los espesores de las planchas que se usarán de acuerdo a la experiencia existente son :

Fondo : 1"

Lados : $\frac{5}{16}$

Marco : 1"

Tapa : $\frac{1}{2}$

Refuerzos : platina de $\frac{3}{8}$ " x 3"

Los tubos a utilizarse son de 2" ϕ exterior y pared de $\frac{1}{16}$ "

DIMENSIONES INTERIORES

$$\text{Largo} = 2 \times 675 + 599 + 2 \times 155$$

$$= 1350 + 600 + 310 = 2260 \text{ mm} \sim 2270$$

Donde 155 mm es la distancia de aislamiento en aceite de bobina a masa . Se añade

5 mm mas por lado porque los tubos penetran
3 a 5 mm dentro del tanque

$$\begin{aligned}\text{Ancho} &= 599 + (155 + 10 + 26) + (155 + 10 + 55) \\ &= 599 + 191 + 220 = 1010 \sim 1020\end{aligned}$$

Donde en el lado de baja tensión hay que dejar
155 mm de la bobina al conductor de B.T. que
sube, 10 mm que ocupa el conductor y 26 mm
de B.T. al tanque . En el lado de A. T. de la
bobina a los conductores de los taps que suben
hay que dejar 55 mm (adecuados para 150 kv de
impulso), 10 mm para el conductor y 155 mm del
conductor a masa .

$$\begin{aligned}\text{Altura} &= 1300 + 2 \times 395 + 100 + 750 \\ &= 1300 + 790 + 50 + 750 = 2900 \text{ mm}\end{aligned}$$

Donde 1300 mm es la altura de la columna ,
2 x 395 mm la altura de las culatas , unos
100 mm el ho. U de soporte inferior de la
culata y 750 mm la distancia de la culata
a la tapa para ubicar los aisladores de 66 kv
y el tap .

ESFUERZOS EN EL TANQUE

Lo dividiremos en paneles por medio de 3 marcos de platinas horizontales . Verticalmente le pondremos 2 refuerzos en los lados largos y uno en los lados cortos .

Prueba con sobrepresión de 5 psi

Los paneles inferiores del tanque estarán sometidos a una presión en psi de :

$$= 5 \text{ psi} + 0.114 \times \text{altura del aceite en metros}$$

$$= 5 + 1.14 \times 2.90 = 8.3 \text{ psi.}$$

Considerando los 4 rebordes empotrados

para

$$b = \frac{2900}{4} = 725 \text{ mm} = 28.5''$$

$$a = \frac{2270}{3} = 750 \text{ mm}$$

$$\frac{a}{b} = \frac{750}{725} = 1.04$$

$$\beta = 0.325$$

$$\text{Esfuerzo} = \frac{0.325 \times 8.3 \times (28.5)^2}{(5/16)^2} = 22,400 \text{ psi}$$

Menor que 60,000 psi esfuerzo máximo admisible .

Para los costados los paneles son mas chicos y por

lo tanto estarán mas aliviados :

$$a = \frac{2900}{4} = 725 \text{ mm}$$

$$b = \frac{1020}{2} = 510 \text{ mm}$$

Prueba con vacío

Se tendrá que considerar el panel superior que estará prácticamente a pleno vacío :

$$p = 14.7 - 1.14 \times \frac{0.725}{2} = 14.7 - 0.4 = 14.3$$

$$\beta = 0.325$$

$$\text{Esfuerzo} = \frac{0.325 \times 14.3 \times (28.5)^2}{(5/16)^2} = 38700 \text{ psi}$$

que es menor que 60,000 psi

Aún cuando se consideraran 2 lados empotrados y 2 soportados β subiría a 0.43 y el esfuerzo sería 51,000 psi

Es interesante observar que la tapa no llevará esfuerzos .

$$\frac{a}{b} = \frac{2270}{1020} = 2.22$$

$$\beta = 0.500$$

$$\text{Esfuerzo} = \frac{0.500 \times 14.7 \times \left(\frac{1020}{25.4}\right)^2}{(1/2)^2} = 47000 \text{ psi}$$

3.4.2 DISIPACION TERMICA

SOBREELEVACION DE TEMPERATURA

La sobreelevación de temperatura máxima del aceite no debe exceder 50°C, y la promedio de los arrollamientos 60°C . Como la temperatura promedio del aceite es 85% de la máxima , tendremos :

$$60^\circ = \text{Gradiente de los arrollamientos sobre el aceite} + 0.85 \text{ Sobreelevación máxima del aceite}$$

Como para la Baja Tensión , el 1er término es 19.6°C , tenemos :

$$60 = 19.6 + 0.85 \times \Delta\theta$$

$$\Delta\theta = \frac{40.4}{0.85} = 47.5^\circ\text{C}$$

Las pérdidas totales máximas son (tap + 5%)

- I^2R a 75°C	=	27290
- Por corriente circulatoria	=	795
- Adicionales	=	<u>1840</u>
Total en el cobre		29925
- Pérdidas en el ho	=	<u>8870</u>
		38795

Con un 3% de tolerancia, tenemos

Pérdidas totales \sim 40,000 w

DISTRIBUCION DE TUBOS

Con un paso entre tubos de 67 mm, dejando 16 mm del 1er tubo a la esquina del tanque , se pueden ubicar hasta :

$$\begin{aligned} \text{N}^\circ \text{ de tubos por fila} &= \frac{2270 - 2 \times 16 - 51}{67} + 1 \\ &= \frac{2187}{67} + 1 = 32.6 + 1 = 33 \text{ tubos a lo largo} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{N}^\circ \text{ de tubos por fila} &= \frac{1020 - 2 \times 16 - 51}{67} + 1 \\ &= \frac{937}{67} + 1 = 14 + 1 = 15 \text{ tubos a lo ancho} \end{aligned}$$

Con un máximo de 4 filas por lado y una distancia de los tubos inferior al fondo del tanque de 560 mm vamos a empezar a tantear la solución adecuada partiendo de un primer caso con 3 filas de tubos .

PRIMER TANTEO :

3 filas de tubos en todo el perímetro

Superficie de disipación requerida

$$S = \frac{40000 \times E}{47.5}$$

$$\text{donde } E = 1353 \sqrt{\frac{50}{47.5}} = 1388$$

$$S = \frac{40000 \times 1388}{47.5} = 1'169,000$$

Superficies constantes de ganancia :

$$\begin{aligned} \text{Cuello} &= 7.5 \times (227 \times 2 + 102 \times 2) \times \frac{1388}{645} \\ &= 7.5 \times 658 \times \frac{1388}{645} = 10.600 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Tapa} = 227 \times 102 \times \frac{1388}{645} = 49.800 \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{- Tubos} &= (33 \times 3 \times 2) \times 25.7 \times 15.96 \\ &+ (15 \times 3 \times 2) \times 25.7 \times 15.96 \\ &= 288 \times 25.7 \times 15.96 = 118.000 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$178,400 \text{ cm}^2$$

Superficies constantes de pérdida son por :

- Bajar 3 columnas de tubos 75 cm para dejar espacio para la manija del tap :

$$3 \times 3 \times 75 \times 15.96 = 10,780 \text{ cm}^2$$

- Bajar 2 columnas de tubos 30 cm en cada lado, para dejar espacio para los cáncamos :

$$2 \times 2 \times 3 \times 30 \times 15.96 = \frac{5,760 \text{ cm}^2}{16,530 \text{ cm}^2}$$

La diferencia entre ganancia y pérdida es :

$$178,400 - 16,500 = 161,900 \text{ cm}^2$$

La superficie correspondiente a los tubos será :

$$1'169.000 - 161,900 = 1'007,100$$

El perímetro del tanque y de los tubos es :

$$\begin{aligned} & (227 \times 2 + 102 \times 2) + (33 \times 3 \times 2 + 15 \times 3 \times 2) \times 15.96 \\ & = 658 + 288 \times 15.96 = 658 + 4595 = 5253 \text{ cm} \end{aligned}$$

La altura de los tubos sera

$$\frac{1'007.100}{5253} = 192 \text{ cm}$$

El tanque tiene 290 cm con 56 cm de los tubos inferiores al fondo del tanque y 7.5 cm de cuello, o sea neto

$$290 - (56 + 7.5) = 226.5 > 192 \text{ cm}$$

SEGUNDO TANTEO

Con 3 filas de tubos en las caras frontales y
2 en las laterales

$$S = \frac{40,000 \times 1388}{47.5} = 1'169,000$$

Superficies de ganancia

$$\text{Cuello } 7.5 \times \left(454 \times \frac{1388}{645} + 204 \times \frac{1288}{645} \right) = 10,400$$

$$\text{Tapa} = 49,800$$

$$\begin{aligned} \text{Tubos frontales} &= \\ &= 2 \times 3 \times 33 \times 25.7 \times 15.96 = 81,100 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tubos laterales} &= \\ &= 2 \times 2 \times 15 \times 22.2 \times 15.96 \times \frac{1388}{1288} = 22,850 \end{aligned}$$

$$+ 164,150$$

Superficies de pérdida :

$$\text{Por tap} = 3 \times 3 \times 75 \times 15,96 \quad - \quad 10,780$$

$$\text{Por cáncamos} = 2 \times 2 \times 2 \times 30 \times 15.96 \quad - \quad 3,830$$

$$\text{Ganancia - Pérdida} \quad \approx \quad 149,600$$

El perímetro del tanque y tubos será

$$\begin{aligned} & 227 \times 2 + 102 \times 2 \times \frac{1355}{1259} + \\ & + 2 \times 3 \times 33 \times 15.96 + 2 \times 2 \times 15 \times 15.96 \times 1259 \\ & = 454 + 220 + 3160 + 1030 \\ & = 674 + 4190 = 4864 \end{aligned}$$

La altura de los tubos será :

$$\frac{1'169,000 - 149,600}{4864} = 210 \text{ cm}$$

Bajando todas las filas de tubos del tap ,
eliminando 4 en vez de 3, y colocando
14 tubos en los costados tenemos

S	=	1'169,000
Ganancia	=	10,400
		49,800
		76,200
		<u>21,300</u>
		157,700
Pérdida	=	<u>3,800</u>
Neto	=	153,900

El perímetro será :

$$454 + 220 + 2965 + 961 = 4600$$

La altura será :

$$\frac{1'169,000}{4600} - \frac{153,900}{4600} = \frac{1'015,100}{4600} = 221 \text{ cm} \\ \sim 220 \text{ cm}$$

En resumen

Cara frontal	# 1	:	3 x 33	tubos	=	99
Cara frontal	# 2	:	3 x 29	tubos	=	87
Cara lateral	# 1	:	2 x 14	tubos	=	28
Cara lateral	# 2	:	2 x 14	tubos	=	28

Longitud de tubos =

$$(2.2 + 25.7 + 220) \times 186 + (2.2 + 22.2 + 220) \times 56$$

$$= 247.9 \times 186 + 244.4 \times 56 = 461 + 137 = 598 \text{ m}$$

3.4.3 CARACTERISTICAS FISICAS

PESO DEL TANQUE

Fondo 1"	:	$(227 + 2 \times 2.5) \times (102 + 2 \times 20) \times \frac{202}{10^4}$	=	665
Lados $\frac{5}{16}$ "	:	$(227 + 102) \times 2 \times 290 \times \frac{63}{10^4}$	=	1210
Marco 1"	:	$(227 + 102) \times 2 \times 6.5 \times \frac{202}{10^4}$	=	86
Tapa $\frac{1}{2}$ "	:	$(227 + 2 \times 6.5) \times (102 + 2 \times 6.5) \times \frac{101}{10^4}$	=	289
				<hr/>
				2250
		15% de refuerzos y soldadura		<hr/>
				260
				2510
Tubos	:	598 m x 1.94 $\frac{kg}{m}$		<hr/>
				1160
				<hr/>
				3670

DOTACION DE ACEITE

Volumen del tanque en galones

$$= \frac{227 \times 102 \times 290}{3980} = + 1690 \text{ gl}$$

Aceite en los tubos

$$= 598 \text{ m} \times 0.436 \text{ gl/m} = + 250 \text{ gl}$$

Aceite en el tanque conservador

$$(1688 + 250 - 275) \times 0.063 = + 105 \text{ gl}$$

Desplazamiento de la parte activa

$$= 0.40 \left[5070 + (675 + 920) \right]$$
$$= (5070 + 1595) \times 0.40 = - 265 \text{ gl}$$

Volumen de aceite	1690
	250
	105
	<hr/>
	2045
	265
	<hr/>
	1780 galones

Que a 3.4 kgs/gl dan 6050 kgs

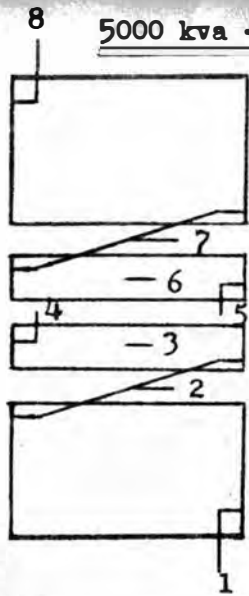
P E S O T O T A L

Peso de cobre forrado	=	1595	
Peso de aislamiento aprox. 18%	=	285	
		<hr/>	1880
Peso del núcleo	=	5070	
Peso de la ferretería	=	900	
		<hr/>	
Parte activa	=	7850	
Peso del tanque	=	3670	
Peso del conservador y tap	=	150	
Peso de aisladores 3 x 81 + 3 x 3.5	=	255	
		<hr/>	11925
Peso del aceite	=	6050	
		<hr/>	17975
			17975 kgs

5000 kva - 3 ϕ - 60/10 kv - 60 cps.

Grupo Yd11

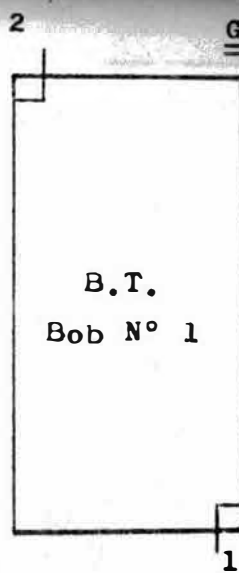
CONEXIONES ELECTRICAS



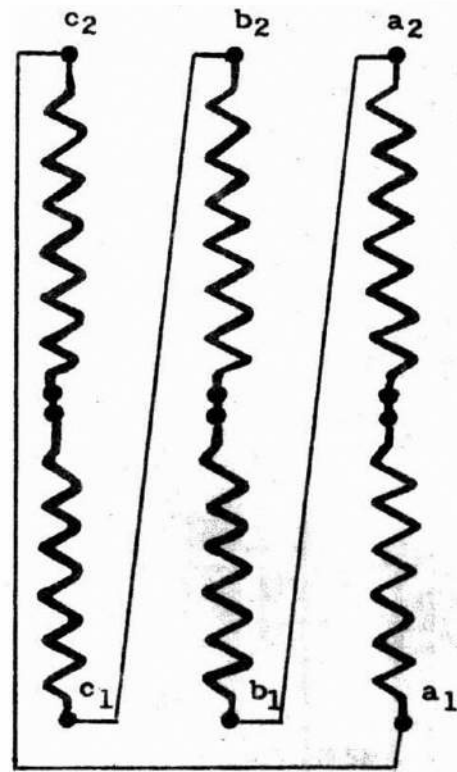
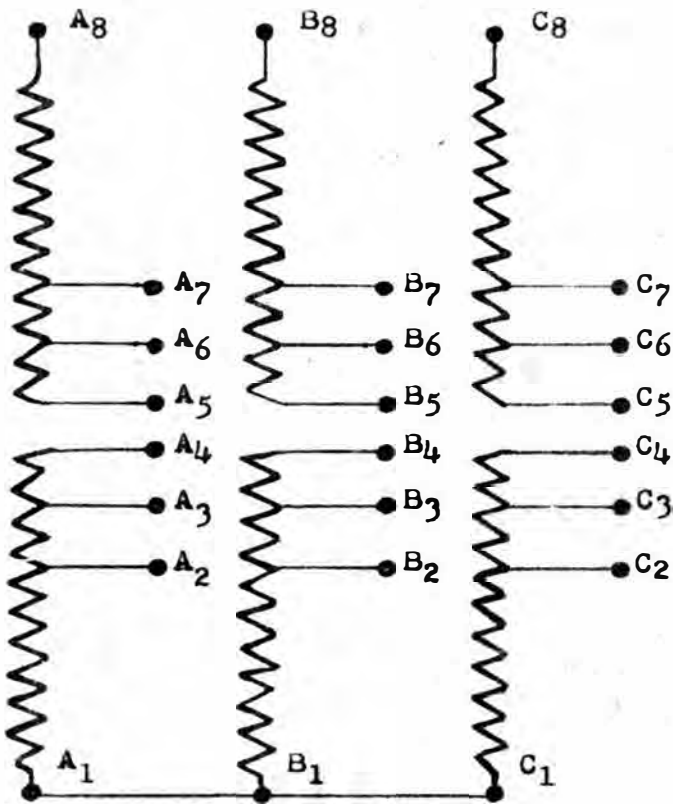
Bob N° 4

Bob N° 3

Bob N° 2



B.T.
Bob N° 1



ALTA TENSION		
% VOLTIOS	POSICION DEL TAP	PUENTES DEL TAP
+ 5 %	5	5 - 4
+ 2.5%	4	4 - 6
N	3	6 - 3
- 2.5%	2	3 - 7
- 5.0%	1	7 - 2

BAJA TENSION	
UNIR LINE	—

B I B L I O G R A F I A

L I B R O S

M. G. SAY., Performance and Design of Alternating Current Machines .

R. LANGLOIS-BERTHELOT., Transformers and Generators for Power Systems.

STILL AND SISKIND., Elements of Electrical Machine Design .

E. OPENSHAW TAYLOR., Power System Transients .

JUAN CORRALES MARTIN., La Escuela del Técnico Electricista - Tomo VII - Teoría, Cálculo y Construcción de Transformadores .

BEAN, CHACKAN, MOORE & WENTZ., Transformers for the Electric Power Industry .

BLUME, BOYAJIAN, CAMILLI, LENNOX, MINNECI , MONTSINGER., Transformer Engineering .