ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR DE 100 KV.

PARA PRUEBAS DE LABORATORIO EN ALTA TENSION.

Tesis previa a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

RAMIRO CEVALLOS ALMEIDA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
BIBLIOTECA
0026 7
E. P. N.

Quito, Julio, 1979

C E R T I F I C O

Que el presente trabajo fue

realizado por el Señor

Ramiro Cevallos Almeida

ING. MENTOR POVEDA
Director de Tesis

A G R A D E C I M I E N T O

Al Doctor Lajos Bajza,
Ingeniero Paul Ayora,
Ingeniero Mentor Poveda.

I N D I C E

Página

DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR DE 100 KV. PARA PRUEBAS DE LABORATORIO EN ALTA TENSION

CAPITULO I GENERALIDADES

1. Finalidades del diseño 1
2. Descripción del tipo de transformador a diseñarse. 1
3. Especificaciones Generales..... 1

CAPITULO II DISEÑO ELECTRICO (PRIMERA ALTERNATIVA)

1. INTRODUCCION..... 4
2. Justificación del núcleo utilizado..... 5
3. Características eléctricas del bobinado..... 10
4. Distribución de los bobinados..... 16
5. Cálculo de la reactancia de dispersión..... 25
6. Cálculo de la reactancia de magnetización..... 49
7. Cálculo de la reactancia capacitiva..... 51
8. Control de pérdidas..... 63
9. Control del aislamiento..... 66
10. Conclusiones..... 82

Página

CAPITULO III DISEÑO ELECTRICO (SEGUNDA ALTERNATIVA)

1. Introducción..... 84

2. Distribución de los bobinados 85

3. Cálculo de la reactancia de dispersión..... 100

4. Cálculo de la reactancia capacitiva..... 103

5. Control de pérdidas..... 113

6. Control de aislamiento 115

7. Control de calentamiento..... 129

8. Diseño del tanque..... 141

CAPITULO IV ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

1. Fabricación de los devanados..... 148

2. Fabricación del tanque y colocación del núcleo en el mismo 154

3. Conexiones y terminales de salida..... 156

4. Secado del transformador y llenado de aceite en el tanque..... 157

5. Conclusiones finales..... 162

REFERENCIAS

C A P I T U L O I

GENERALIDADES

1. FINALIDADES DEL DISEÑO

El presente trabajo de tesis, tiene dos objetivos fundamentales: el primero de los cuales es continuar con un proceso de investigación aplicada, iniciada años atrás en la Facultad de Ingeniería Eléctrica, con el fin de encontrar una teconología adecuada a nuestras posibilidades tanto técnicas como económicas y, en segundo lugar el dotar al Laboratorio de Alta Tensión de un transformador que pueda trabajar en cascada con el ya existente, con el fin de elevar el nivel de voltaje de 100 a 200 KV.

En la actualidad el transformador existente permite trabajar con rangos de voltaje de hasta 100 KV., que de acuerdo con el crecimiento de la industria eléctrica en el país, no puede cumplir con todos los requerimiéntos de la misma.

Tomando en consideración lo antes mencionado, el departamento de Ingeniería Eléctrica ha creído conveniente que este transformador sea construido en el área de máquinas, sien-

do su diseño motivó de la presente tesis.

2. DESCRIPCION DEL TIPO DE TRANSFORMADOR A DISEÑARSE

Existen dos tipos básicos de transformadores que son los acorazados y tipo núcleo, cada uno de los cuales presentan sus ventajas y desventajas frente a un cierto tipo de requerimientos.

Para su selección se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

1 - Técnicos
- Económicos

Tomando en consideración las características mencionadas anteriormente, el tipo más apropiado resulta ser el tipo núcleo por:

- Facilidad de construcción
- Resistencia a los esfuerzos mecánicos
- Económico

La existencia de un núcleo construido anteriormente con el mismo propósito hizo pensar en la posibilidad de hacer

uso del mismo, lo cual disminuiría en gran parte el trabajo de construcción.

La decisión de usar este núcleo se la deja para luego de determinar experimentalmente las características del mismo.

De acuerdo con la característica de que la alimentación de este transformador se lo hará a nivel 100 KV., el tanque deberá ser aislado para 100 o 150 KV. de acuerdo a la conexión utilizada, como se verá más adelante.

3. ESPECIFICACIONES GENERALES

Potencia = 5 KVA.
Voltaje en el primario = 220 voltios
Voltaje en el secundario = 100.000 voltios
Frecuencia = 60 Hz.
Aumento máximo de temperatura = 50°C
Refrigeración por circulación natural de aceite

La eficiencia no se ha considerado como dato de partida ya que el transformador trabajará la mayor parte del tiempo en vacío.

C A P I T U L O II

DISEÑO ELECTRICO (PRIMERA ALTERNATIVA)

1. INTRODUCCION

Para seleccionar un tipo de devanado determinado que es el que básicamente nos determinará el estudio de varias alternativas deben ser considerados los siguientes requerimientos:

- Resistencia dieléctrica adecuada y efectiva contra varios tipos de voltajes.
- Adecuada ventilación de los bobinados
- Adecuada resistencia mecánica
- Costo mínimo.

La construcción debe permitir que salgan en debida forma los terminales y las tomas.

Para esta primera alternativa se utilizará el devanado concéntrico, por considerar que es un arreglo muy sencillo de bobinado, en el cual el bobinado de alto voltaje se coloca sobre el devanado de bajo voltaje, a fin de obtener un

C A P I T U L O II

DISEÑO ELECTRICO (PRIMERA ALTERNATIVA)

1. INTRODUCCION

Para seleccionar un tipo de devanado determinado que es el que básicamente nos determinará el estudio de varias alternativas deben ser considerados los siguientes requerimientos:

- Resistencia dieléctrica adecuada y efectiva contra varios tipos de voltajes.
- Adecuada ventilación de los bobinados
- Adecuada resistencia mecánica
- Costo mínimo.

La construcción debe permitir que salgan en debida forma los terminales y las tomas.

Para esta primera alternativa se utilizará el devanado concéntrico, por considerar que es un arreglo muy sencillo de bobinado, en el cual el bobinado de alto voltaje se coloca sobre el devanado de bajo voltaje, a fin de obtener un

buen acoplamiento entre devanados, esta alternativa presenta además otras ventajas como son: facilidad de aislamiento entre bajo y alto voltaje, facilidad de realizar el devanado por capa y por necesitar de un solo bushing de salida.

En este capítulo se incluirán todos los cálculos y resultados correspondientes a este estudio.

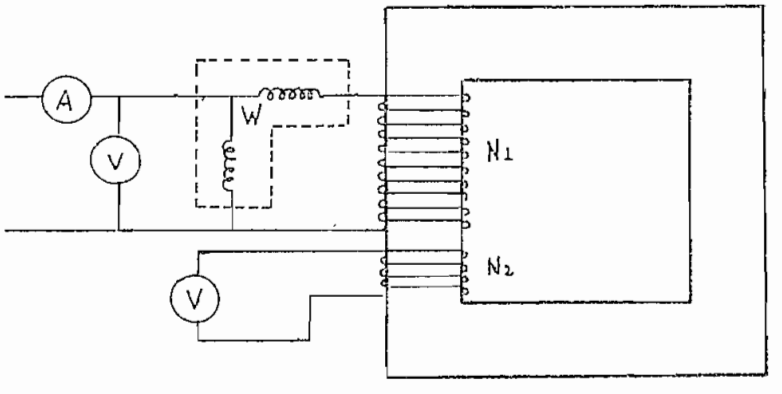
2. JUSTIFICACION DEL NUCLEO UTILIZADO

La posibilidad de usar el núcleo existente, nos llevó a realizar la prueba de circuito abierto para determinar: las características y calidad del hierro, y partiendo de estos datos obtener los valores de densidad de flujo con los cuales se podría trabajar.

Para esto se dispuso de dos arrollamientos sobre una de las columnas del núcleo, siendo estos de 84 y 16 espiras.

El circuito utilizado fue el siguiente:

FIGURA # 1



A Amperímetro
V Voltímetro
W Vatímetro
$N_1 = 84$
$N_2 = 16$

De los valores obtenidos mediante esta prueba, y partiendo de la siguiente igualdad:

$$E = 4.44 \times f \times N \times \emptyset_o \times 10^{-8}$$

donde:

E fuerza electromotriz inducida

f frecuencia

N número de espiras

$\emptyset_o$ flujo magnético

y de que

$$\emptyset_o = B \times A$$

donde

B densidad de flujo

A sección transversal de la columna .

Tenemos que:

$$B = \frac{E}{4.44 \times f \times N \times A \times 10^{-8}}$$

Siendo la sección de la columna igual a 57,22 cm^2, los valores tomados y los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

TABLA Nº 1

V1 (V)	V2 (V.)	I1 (A)	P (W)	$B \times 10^3$ (GAUSS)	VA/KG	W/KG
10	1,8	0,19	1	0;7115	0,03	0,018
20	3,8	0,28	3	1,502	0,1	0,053
30	5,8	0,355	6	2,292	0,19	0,106
40	7,8	0,43	10	3,083	0,31	0,177
50	9,5	0,515	14	3,755	0,46	0,218
60	11,5	0,62	19	4.545	0,66	0,337
70	13,5	0,75	25	5,336	0,93	0,443
80	15,5	0,91	32	6,127	1,29	0,567

90	17	1,15	39,5	6,72	1,84	0,70
100	19	1,56	48	7,51	2,77	0,85
110	20,5	2,1	58,5	8,103	4,1	1,03
120	22,5	2,8	72	8,894	5,96	1,277
130	24	3,8	90	9,487	8,77	1,597
140	25,5	4,9	118	10,08	12,17	2,09

Las curvas correspondientes a esta prueba pueden verse en la figura Nº 2.

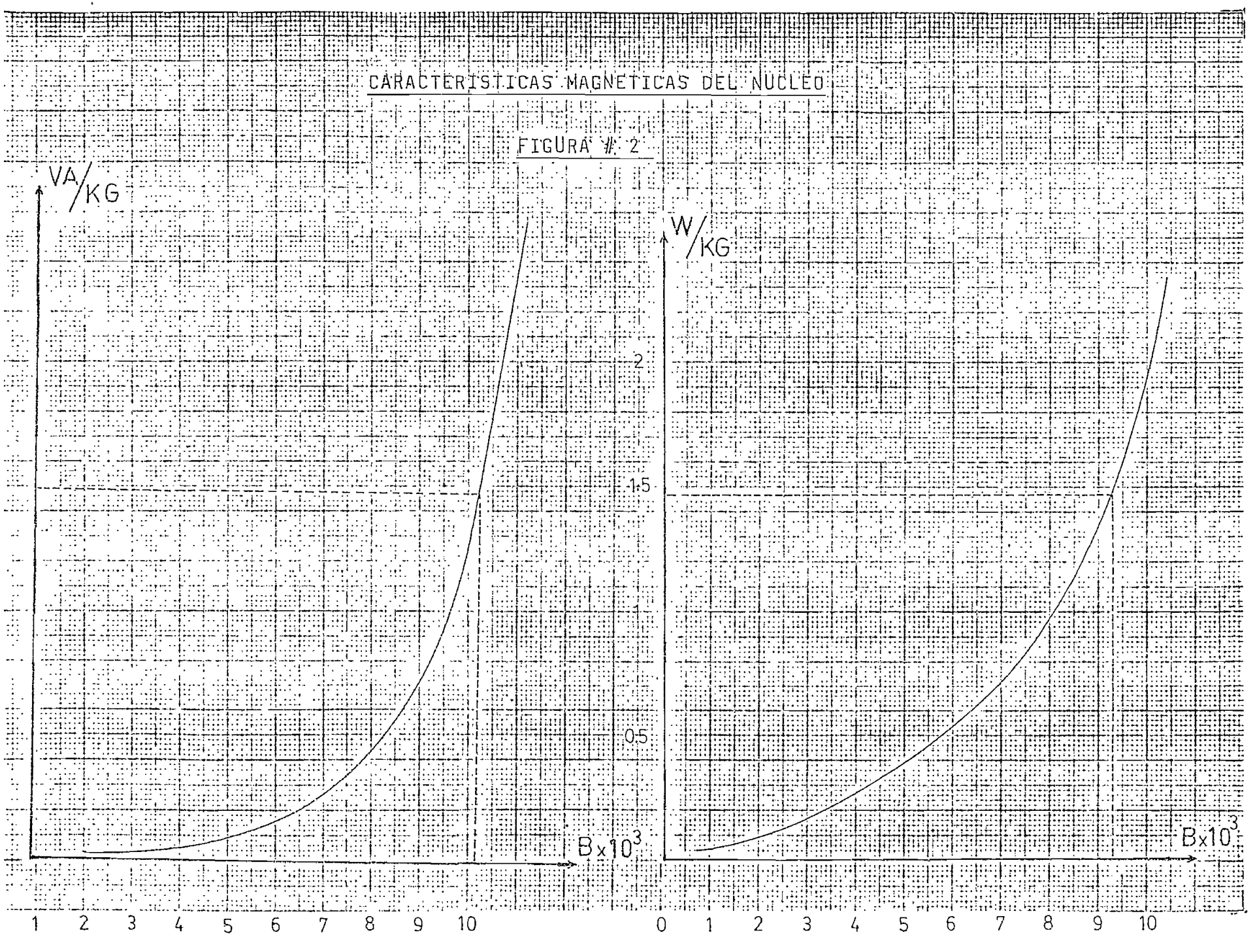
El valor de densidad de flujo con el cual se va a trabajar debe ser escogido de estas curvas tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- El valor que se tome debe estar pasando el codo de la misma y en la parte recta.
- El valor de pérdidas correspondientes no debe ser elevado.

De acuerdo con estas premisas el valor escogido fue el de B = 9,2 K GAUSS, al cual corresponden los valores de 7,4 VA/KG y 1,46 W/KG en pérdidas.

CARACTERISTICAS MAGNETICAS DEL NUCLEO

FIGURA # 2



Este valor de densidad de flujo de acuerdo con la tabla Nº 2 corresponde a un acero de calidad corriente, a pesar de ésto y tomando en consideración, la dificultad que presenta el poder obtener en el mercado acero de gran calidad, se decidió por utilizar este núcleo, teniendo como una gran desventaja que el valor de voltios/espira que se iba a obtener sería bajo, con lo cual el número de espiras sería elevado para el devanado de alta tensión.

Vale anotar que la única limitación que se presenta en el aumento de la densidad de flujo, radica en las pérdidas y en ciertos casos ruidos por efectos de vibraciones mecánicas y magnetrostricción.

Las características de este núcleo pueden verse en la figura Nº 3.

T A B L A Nº 2

Acero de grano orientado	12 - 15 K GAUSS
Acero corriente	8 GAUSS
Mal acero	menor a 8 K GAUSS

3. CARACTERISTICAS ELECTRICAS DEL BOBINADO

Voltaje por Espira

Luego de haber determinado el valor de densidad de flujo con el cual se va a trabajar y conocido la sección de la columna se puede determinar el voltaje por espira que se va a tener:

$$Vt = 4.44 \times f \times B \times A \times 10^{-8}$$

donde:

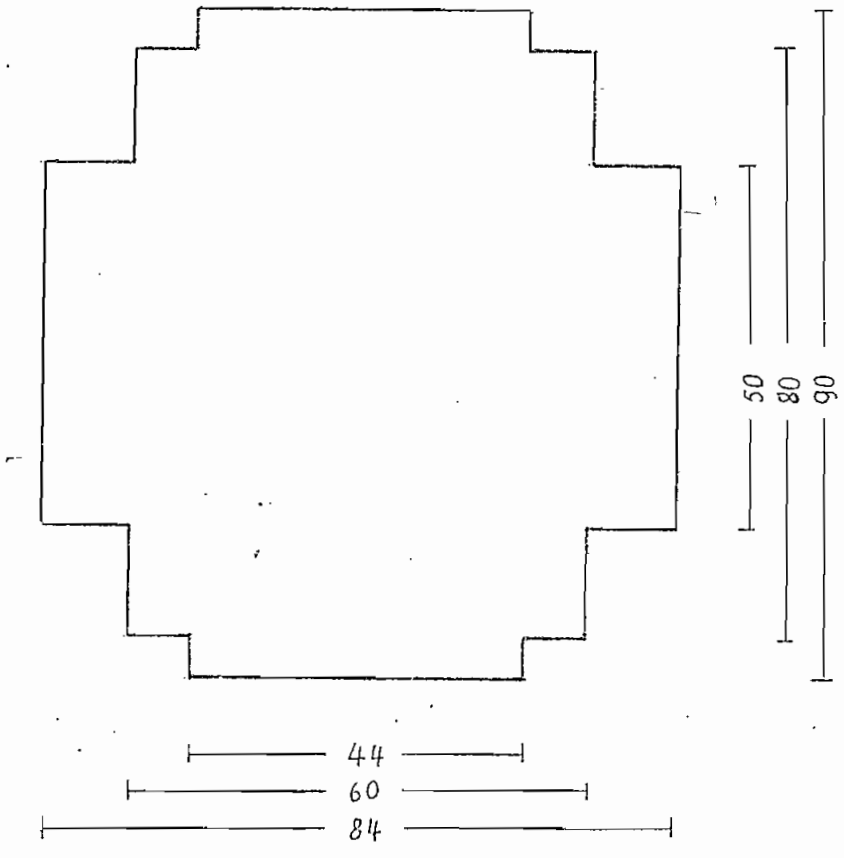
Vt	voltaje por espira	V/espira
B	densidad de flujo	GAUSS
A	sección de la columna	cm^2
f	frecuencia	Hz

$$Vt = 4.44 \times 60 \times 9,2 \times 10^{3} \times 57,22 \times 10^{-8}$$

$$Vt = 1.4 \text{ voltios/espira}$$

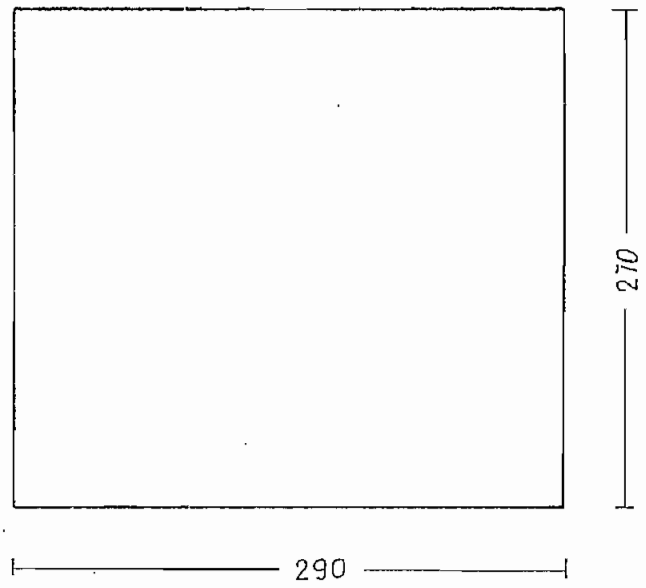
Este valor es igual tanto para el lado primario como para el secundario, si consideramos que las caídas de tensión internas son muy pequeñas.

Sección de la Columna



Sección = 57.22 cm^2

Dimensiones de la Ventana



Características Generales

Peso = 56.36 Kg.

Volumen = 10629 cm.

Tipo de Acero: Corriente

Fig. Nº 3 CARACTERISTICAS DEL NUCLEO

Número de Espiras

$$\text{Nº espiras primarias} = \frac{\text{voltaje en el lado de baja tensión}}{\text{voltaje por espira}}$$

$$\text{Nº espiras primarias} = \frac{220\ V}{1{,}4\ V/esp} = 157{,}14 \text{ espiras}$$

Nº espiras primarias = 158

$$\text{Nº espiras secundarias} = \frac{\text{voltaje en el lado de alta-tensión}}{\text{voltaje por espira}}$$

$$\text{Nº espiras secundaria} = \frac{100.000\ V}{1{,}4\ V/espira} = 71428{,}57 \text{ espira}$$

Nº espiras secundaria = 71429

<u>Corriente de los bobinados</u>

Corriente en el lado primario:

$$I_1 = \frac{KVA}{V_1} \times 10^3$$

$$I_1 = \frac{5\ KVA}{220\ V} \times 10^3 = 22{,}7\ A$$

Corriente en el lado secundario:

$$I_2 = \frac{KVA}{V2} \times 10^3$$

$$I_2 = \frac{5\ KVA}{100.000\ V} \times 10^3 = 0,05\ A$$

Dimensionamiento de los Conductores

Si asumimos un valor de densidad de corriente Δ_1 = $5A/mm^2$

$$A_1 = \frac{I1}{\Delta 1}$$

$$A_1 = \frac{22,7\ A}{5\ A/mm^2} = 4,54\ mm^2$$

$$D1 = 2\sqrt{\frac{A1}{\pi}}$$

$$D1 = 2\sqrt{\frac{4,54}{3,14}} = 2,4\ mm$$

De acuerdo con estas características el conductor que se utilizará es el Nº 10 AWG cuyas características físicas son las siguientes.

diámetro = 2,588 mm.

sección = 5,26 mm^2

Ω /Km = 3,28

Kg/Km = 46,77

diámetro (H) = 2,67 mm.

Asumiendo una densidad de corriente $\Delta_2 = 4A/mm^2$

$$A_2 = \frac{I2}{\Delta_2}$$

$$A_2 = \frac{0.05\ A}{4\ A/mm^2} = 0,0125\ mm^2$$

$$D_2 = 2\sqrt{\frac{A2}{\pi}}$$

$$D_2 = 2\sqrt{\frac{0.0125}{3,1415}} = 0.1261\ mm$$

Por razones mecánicas el conductor Nº 36 AWG correspondiente a las características anteriores, no será utilizado

para el presente diseño siendo el conductor Nº 32 el que lo sustituirá con las características siguientes:

diámetro = 0.203

sección = 0,0324

Ω /Km = 532

Kg/Km = 0,288

diámetro (H) = 0,239

Se debe anotar que $\Delta 1$ es diferente de $\Delta 2$ únicamente por razón de obtener un conductor de sección adecuada, no muy grande para el caso correspondiente a baja tensión, y no muy pequeño para el de alta, para permitir trabajar en el bobinado con mayor facilidad.

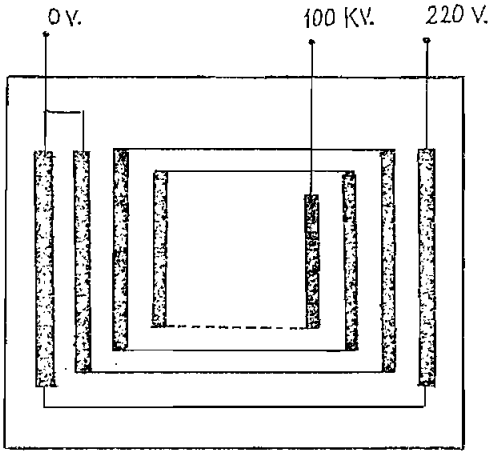
4. DISTRIBUCION DE LOS BOBINADOS

A parte de la clasificación de los bobinados en circulares y rectangulares, los bobinados de los transformadores pueden ser concéntricos o tipo sandwich.

Por la facilidad que presentan los devanados tipo concéntrico, en lo que se refiere al aislamiento, inicialmente se optó por este tipo de distribución.

Una capa de papel aislante es colocado en forma cilíndrica sobre las columnas del núcleo con un espesor de 3 mm. el espacio entre columna y papel sirve para la circulación del aceite. El devanado de bajo voltaje se coloca sobre esta capa, dividido en las dos columnas en un número de 79 espiras sobre cada una, dejando una distancia de seguridad entre bobinado y brazo del núcleo de 25 mm., a continuación se deja un espacio de 4 mm. para circulación de aceite, espacio que se forma con barras de fibra aislante que se coloca en forma axial y con una capa de papel de 2 mm. sobre la cual se coloca el devanado de alto voltaje.

Este devanado fue diseñado de tal forma que el número de espiras por capa fuera disminuyendo paulatinamente a fin de cumplir con las distancias de seguridad entre devanado y brazo del núcleo y es así como se llegó a tener un total de 105 capas, las mismas que están conectadas en serie (un esquema representativo se ilustra en la fig. Nº 4), razón por la cual se tiene un total de 52 interconexiones tanto en la parte superior como en la inferior.



El aislamiento entre capa y capa fue previsto en 2 mm. lo cual da un gran margen de seguridad en lo que a esfuerzos radiales se refiere.

Los resultados de esta distribución se resumen en la tabla Nº 3, y los planos Nº1, 2.

T A B L A Nº 3

CAPA Nº	Nº ESPIRAS	VOLTAJE DE LA CAPA V	V Voltaje	ESPACIO ENTRE BOBINADO Y NUCLEO (mm)	
				Vertical	Horizontal
Capa Nº 1	1572	2200	2200	25	19,79
Capa Nº 2	1572	2200	4400	25	19,79
Capa Nº 3	1542	2158,8	6558,8	27,1	21,93
Capa Nº 4	1512	2116,8	8675,6	29,2	21,93
Capa Nº 5	1482	2074,8	10750,4	31,3	24,07

CAPA Nº	Nº ESPIRAS	VOLTAJE DE LA CAPA V	V Voltaje	ESPACIO ENTRE BOBINADO Y NUCLEO (mm)	
				Vertical	Horizontal
Capa Nº 6	1452	2032,8	12783,2	33,4	24,07
Capa Nº 7	1422	1990,8	14774,0	35,5	26,21
Capa Nº 8	1392	1948,8	16722,8	37,6	26,21
Capa Nº 9	1362	1906,8	18629,6	39,7	28,35
Capa Nº10	1332	1864,8	20494,4	41,8	28,35
Capa Nº11	1302	1822,8	22317,2	43,9	30,49
Capa Nº12	1272	1780,8	24098,0	46	30,49
Capa Nº13	1242	1738,8	25836,8	48,1	32,63
Capa Nº14	1212	1696,8	27533,6	50,2	32,63
Capa Nº15	1182	1654,8	29188,4	52,3	34,77
Capa Nº16	1152	1612,8	30801,2	54,4	34,77
Capa Nº17	1132	1584,8	32286,0	55,8	36,91
Capa Nº18	1112	1556,8	33942,8	57,2	36,91
Capa Nº19	1092	1528,8	35471,6	58,6	39,05
Capa Nº20	1072	1500,8	36972,4	60	39,05
Capa Nº21	1052	1472,8	38445,8	61,4	41,19
Capa Nº22	1032	1444,8	39890	62,8	41,19
Capa Nº23	1012	1416,8	41306,8	64,2	43,33
Capa Nº24	992	1388,8	42695,6	65,6	43,33

CAPA Nº	Nº ESPIRAS	VOLTAJE DE LA CAPA V	V Voltaje	ESPACIO ENTRE BOBINADO Y NUCLEO (mm)	
				Vertical	Horizontal
Capa Nº 25	972	1360,8	44056,4	67,0	45,47
Capa Nº 26	952	1332,8	45389,2	68,4	45,47
Capa Nº 27	932	1304,8	46694,0	69,8	47,61
Capa Nº 28	912	1276,8	47970,8	71,2	47,61
Capa Nº 29	892	1248,8	49219,6	72,6	49,75
Capa Nº 30	872	1220,8	50440,4	74,0	49,75
Capa Nº 31	852	1192,8	51633,2	75,4	51,89
Capa Nº 32	832	1164,8	52798,0	76,8	51,89
Capa Nº 33	822	1150,8	53948,8	77,5	54,03
Capa Nº 34	812	1136,8	55085,6	78,2	54,03
Capa Nº 35	802	1122,8	56208,4	78,9	56,17
Capa Nº 36	792	1108,8	57317,2	79,6	56,17
Capa Nº 37	782	1094,8	58412,0	80,3	58,31
Capa Nº 38	772	1080,8	59492,8	81	58,31
Capa Nº 39	762	1066,8	60559,8	81,7	60,45
Capa Nº 40	752	1052,8	61612,4	82,4	60,45
Capa Nº 41	742	1038,8	62651,2	83,1	62,59
Capa Nº 42	732	1024,8	63676,0	83,8	62,59
Capa Nº 43	722	1010,8	64686,8	84,5	64,73

CAPA Nº	Nº ESPIRAS	VOLTAJE DE LA CAPA V	V Voltaje	ESPACIO ENTRE BOBINADO Y NUCLEO (mm)	
				Vertical	Horizontal
Capa Nº 44	712	996,8	65683,6	85,2	64,73
Capa Nº 45	702	982,8	66666,4	85,9	66,87
Capa Nº 46	692	968,8	67635,2	86,6	66,87
Capa Nº 47	682	954,8	68590,0	87,3	69,01
Capa Nº 48	672	940,8	69530,8	88	69,01
Capa Nº 49	662	926,8	70457,6	88,7	71,15
Capa Nº 50	652	912,8	71370,4	89,4	71,15
Capa Nº 51	642	898,8	72269,2	90,1	73,29
Capa Nº 52	632	884,8	73154,0	90,8	73,29
Capa Nº 53	622	870,8	74024,8	91,5	75,43
Capa Nº 54	612	856,8	74881,6	92,2	75,43
Capa Nº 55	602,	842,8	75724,4	92,9	77,57
Capa Nº 56	592	828,8	76553,2	93,6	77,57
Capa Nº 57	582	814,8	77368,0	94,3	79,71
Capa Nº 58	572	800,8	78168,8	95	81,85
Capa Nº 59	562	786,8	78955,6	95,7	83,99
Capa Nº 60	552	772,8	79728,9	96,4	83,99
Capa Nº 61	542	758,8	80487,2	97,1	86,13
Capa Nº 62	532	744,8	81232	97,8	86,13
Capa Nº 63	522	730,8	81962,8	98,5	88,27

CAPA Nº	Nº ESPIRAS	VOLTAJE DE LA CAPA V	V Voltaje	ESPACIO ENTRE BOBINADO Y NUCLEO (mm)	
				Vertical	Horizontal
Capa Nº 64	512	716,8	82679,6	99,2	88,27
Capa Nº 65	502	702,8	83382,4	99,9	90,41
Capa Nº 66	492	688,8	84071,2	100,6	90,41
Capa Nº 67	482	674,8	84746	101,3	92,55
Capa Nº 68	472	660,8	85406,8	102	92,55
Capa Nº 69	462	646,8	86053,6	102,7	94,69
Capa Nº 70	452	632,8	86686,4	103,4	94,69
Capa Nº 71	442	618,8	87305,2	104,1	96,83
Capa Nº 72	432	604,8	87910	104,8	96,83
Capa Nº 73	422	590,8	88500,8	105,5	98,97
Capa Nº 74	412	576,8	89077,6	106,2	98,97
Capa Nº 75	402	562,8	89640,4	106,9	101,11
Capa Nº 76	392	548,8	90189,2	107,6	101,11
Capa Nº 77	382	534,8	90724,0	108,3	103,25
Capa Nº 78	372	520,8	91244,8	109	103,25
Capa Nº 79	362	506,8	91751,6	109,7	105,39
Capa Nº 80	352	492,8	92244,4	110,4	105,39
Capa Nº 81	342	478,8	92723,2	111,1	107,53
Capa Nº 82	332	464,8	93188	111,8	107,53
Capa Nº 83	322	450,8	93638,8	112,5	109,67

CAPA Nº	Nº ESPIRAS	VOLTAJE DE LA CAPA V.	V Voltaje	ESPACIO ENTRE BOBINADO Y NUCLEO (mm)	
				Vertical	Horizontal
Capa Nº 84	312	436,8	94075,6	113,2	109,67
Capa Nº 85	302	422,8	94498,4	113,9	111,81
Capa Nº 86	292	408,8	94907,2	114,6	111,81
Capa Nº 87	282	394,8	95302	115,3	113,93
Capa Nº 88	272	380,8	95682,8	116	113,95
Capa Nº 89	262	366,8	96049,8	116,7	116,09
Capa Nº 90	252	352,8	96402,4	117,4	116,09
Capa Nº 91	242	338,8	96741,2	118,1	118,23
Capa Nº 92	232	324,8	97066	118,8	118,23
Capa Nº 93	222	310,8	97376,8	119,5	120,37
Capa Nº 94	212	296,8	97673,6	120,2	120,37
Capa Nº 95	202	282,8	97956,4	120,9	122,51
Capa Nº 96	192	268,8	98225,2	121,6	122,51
Capa Nº 97	182	254,8	98480	122,3	124,65
Capa Nº 98	172	240,8	98820,8	123	124,65
Capa Nº 99	162	226,8	98947,6	123,7	126,79
Capa Nº 100	152	212,8	99160,4	124,4	126,79
Capa Nº 101	142	198,8	99359,2	125,1	128,93
Capa Nº 102	132	184,8	99544,0	125,8	128,93

CAPA Nº	Nº ESPIRAS	VOLTAJE DE LA CAPA V	V Voltaje	ESPACIO ENTRE BOBINADO Y NUCLEO (mm)	
				Vertical	Horizontal
Capa Nº 103	122	170,8	99714,8	126,5	131,07
Capa Nº 104	112	156,8	99871,6	127,2	131,07
Capa Nº 105	92	128,8	100000,4	130,0	133,21

VENTAJAS Y DESVENTAJAS QUE PRESENTA ESTA DISTRIBUCION

a) Ventajas:

- Con la presente distribución se necesita de un solo bushing de 100 KV.
- Facilidad de realizar el bobinado por capa
- Facilita el control de reactancia capacitiva y esfuerzos.

b) Desventajas:

- La presencia de 100 KV. entre el tanque y terminales de salida.

- Elevado número de interconexiones
- Dificultad para evaluar la reactancia de dispersión.
- Espacio que ocupa

5. CALCULO DE LA REACTANCIA DE DISPERSION

Es necesario hacer una distinción especial entre flujo de dispersión y flujo común o principal. El flujo común se caracteriza por concatenar con los devanados primario y secundario del transformador, fluye sobre el hierro y sirve de vehículo transmisor de energía.

El de dispersión se caracteriza por hallarse concatenado sólo con los arrollamientos primario o secundario, su recorrido principal es a través del aire y no interviene en la transmisión de energía.

No es preciso llegar a la valoración numérica del flujo de dispersión para calcular su reactancia, que depende de las dimensiones geométricas del circuito magnético donde se asienta dicho flujo, el número de espiras en las bobinas inducidas por el y de la permeabilidad del hierro.

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
BIBLIOTECA
002677
E.P.N.

En lo que respecta al lado de alta tensión, el circuito corresponde a un circuito electromagnético de concatenación prgresiva. El flujo se halla concatenado progresivamente con un número creciente de espiras.

Cada línea de fuerza abraza un número distinto de espiras, desde cero para las líneas que se inician en la superficie exterior de la bobina, hasta el total de N2 espiras abrazadas por las líneas que pasan por el eje.

La expresión de la inductancia de la bobina en un momento determinado cuando la corriente es (i) sería:

$$L = \frac{\int_o^{\psi} d\psi}{i}$$

$$L = \frac{\int_o^{\phi} N d\phi}{i}$$

De acuerdo con la fig Nº 5, N es el número de espiras concatenantes con el tubo cerrado elemental de flujo $d\phi$ establecido en el espacio anular de permeancia infinitesimal $d\Lambda$, i es la corriente que al circular por las espiras da origen al campo magnético.

$$d\phi = (Ni)d\Lambda$$

$$L = \int_0^{\Lambda} N^2 d\Lambda$$

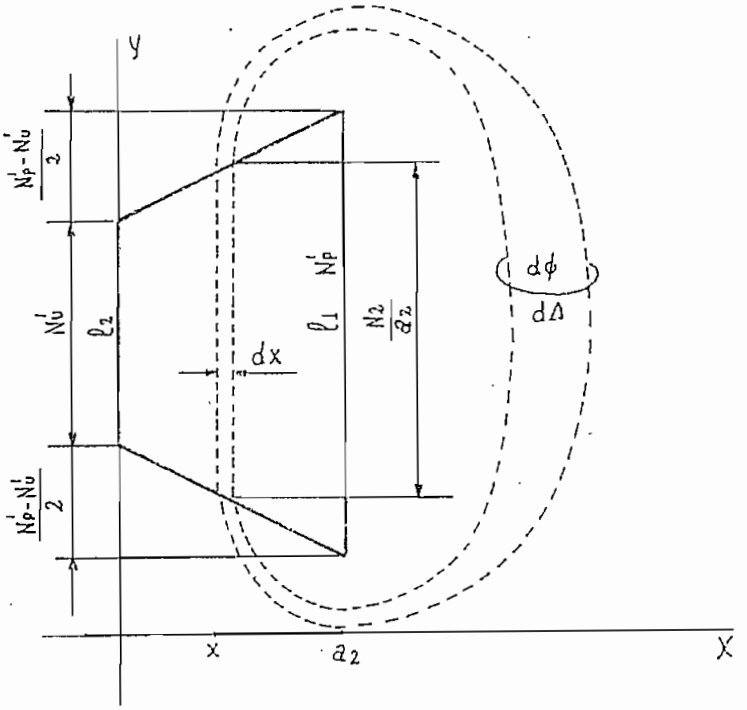


FIGURA # 5

De acuerdo con la fig. Nº 5 puede verse que tanto el número de espiras como la permeancia del cicuito magnético son funciones de la distancia (X). Por lo tanto es necesario encontrar expresiones tanto para N, l, como para Λ que nos determine su valor para cada valor de (X).

Así:

N2 es el número de espiras del devanado de alto vol-

taje, si la distribución fuera uniforme el número de espiras en cualquier zona dX sería:

$$N_x = \frac{N2}{a2} dX$$

El número de espiras para X=0 es Nu´

El número de espiras para X=a2 es Np´

El número de espiras en la zona dX de la fig. Nº 7 es

$$N'(X) = \frac{N^2}{a_2^2} dX - 2\left(\frac{Np' - Nu'}{2}\right)\left(\frac{1}{2} - \frac{X}{a_2^2}\right) dX$$

$$N'(X) = \frac{N^2}{a_2^2} dX - (Np' - Nu')\left(\frac{1}{2} - \frac{X}{a_2^2}\right) dX$$

El número total de espiras de 0 a X será :

$$Nx = \int_0^x N'(X)\, dX = \frac{N_2}{a_2} X - (Np' - Nu')\left(\frac{x}{2} - \frac{x^2}{2a_2}\right)$$

Encontrada una expresión para el número de espiras, es necesario hacer lo propio para A para esto:

$$\Lambda = \mu_0 \frac{A}{l}$$

El área comprendida en el espacio dX y de acuerdo con la figura Nº 6 es:

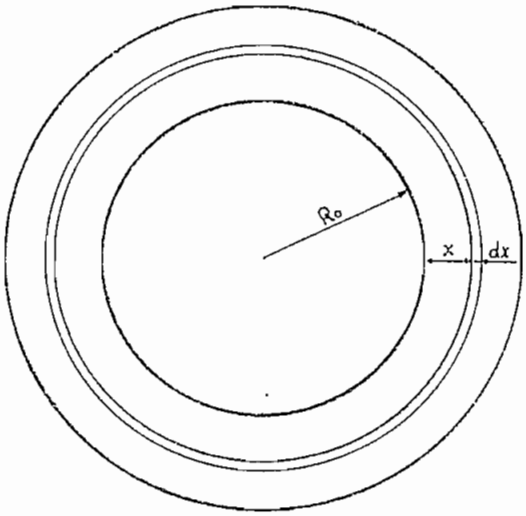


FIGURA # 6

$$dAx = 2(Ro + x)\pi\, dx$$

Nos faltaría encontrar únicamente la expresión que nos determine l=f(X) de la figura Nº 5 encontramos que:

$$lx = l_2 + \frac{(l_1 - l_2)}{a_2} X$$

Agrupando los resultados tenemos que:

$$d.x = \mu_o \frac{dAx}{\phi x}$$

$$d\,x = \mu_o \frac{2(Ro + x)\quad dx}{l_2 + \dfrac{l_1 - l_2}{a2}\,X}$$

$$L_2 = \int_o^{a2} \left[\frac{N2}{a_2}\,X - (Np' - Nu')\left(\frac{x}{2} - \frac{x^2}{2a_2}\right)\right]^2 \mu_o \frac{2(Ro + x)\quad dx}{C_2 + \dfrac{l_d}{a_2}X}$$

$$ld = l_1 - l_2$$

$$\left[\frac{N2}{a2}\,X - (Np' - Nu')\left(\frac{x}{2} - \frac{x^2}{2a_2}\right)\right]^2 = \left[\frac{N2}{a2}\,X - \frac{Np'}{2}\,X + \frac{Np'}{2a_2}\,X^2 + \frac{Nu'}{2}\,X -\right.$$

$$\left. - \frac{Nu'}{2a_2}\,X^2\right]^2 = \left[X\left(\frac{N_2}{a_2} + \frac{Nu'}{2} - \frac{Np'}{2}\right) + X^2\left(\frac{Np'}{2a_2} - \frac{Nu'}{2a_2}\right)\right]^2 =$$

$$= \left[X\left(\frac{2N_2 + a_2Nu' - a_2Np'}{2a_2}\right) + \frac{X^2}{}\left(\frac{Np' - Nu'}{2a_2}\right)\right]^2$$

$$\text{Si } K_1 = \frac{2N_2 + a_2Nu' - a_2Np'}{2a_2} \quad y \quad K_2 = \frac{Np' - Nu'}{2a_2}$$

$$= \left(K_1X + K_2X^2\right)^2 = K_1X^2 + 2K_1K_2X^3 + K_2^2\,X^4$$

$$\mu o \quad \frac{2(Ro + x) \quad dx}{l_2 + \frac{l_d}{a_2} X} \qquad \text{Si} \quad K_3 = 2\pi\mu o$$

$$= \frac{K_3(Ro + x) \; dx}{l_2 + \frac{l_d}{a_2} x} = \frac{a_2 K_3 Rodx}{a_2 l_2 + ldx} + \frac{a_2 K_3 XdX}{a_2 l_2 + ldx}$$

$$\left(K_1^2 \; X^2 + 2K_1 K_2 X^3 + K_2^2 X^4 \right) \left[\frac{a_2 K_3 Rodx}{a_2 l_2 + ldx} + \frac{a_2 K_3 Xdx}{a_2 l_2 + ldX} \right] =$$

$$\frac{K_1{}^2 a_2 \; K_3 RoX^2 dx}{a_2 l_2 + ldx} + \frac{2K_1 K_2 K_3 a_2 R_o X_3 X^3 dx}{a_2 l_2 + l_d x} + \frac{K_2^2 K_3 a_2 R_o X^4 dx}{a_2 l_2 + l_d x}$$

$$+ \frac{K_1^2 \; K_3 \; a_2 \; X^3 \; dx}{a_2 l_2 + l_d x} + \frac{2a_2 \; K_1 K_2 K_3 X_2^4 \; dx}{a_2 l_2 + l_d x} + \frac{a_2 \; K_2^2 \; K_3 \; X^5 \; dx}{a_2 l_2 + l_d x}$$

$$L_2 = \overset{(1)}{\int_o^{a_2} \frac{K_1^2 \; a_2 \; K_3 \; R_o X^2 \; dx}{a_2 l_2 + l_d x}} + \overset{(2)}{\int_o^{a_2} \frac{2K_2 \; K1 \; K_3 \; a_2 \; R_o X^3}{a_2 l_2 + l_d x} dx} +$$

$$\overset{(3)}{\int_o^{a_2} \frac{K_2^2 \; K_3 \; a_2 \; R_o X^4 dx}{a2 l_2 + l_d x}} + \overset{(4)}{\int_0^{a_2} \frac{K_2^1 \; K_3 \; a_2 \; X \quad dx}{a_2 \; l_2 + l_d \; x}} + \overset{(5)}{\int_o \frac{a_2 K_1 \; K_3 X^4 \; dx}{a_2 l_2 + L_d x}}$$

$$+ \frac{a_2 \; K_2^2 \; K_3 \; X^5 \; dx}{a_2 l_2 + l_d \; x} \quad (6)$$

(1)

$K_4 = K_1^2 \; a_2 \; K_3 \; R_o$

$K5 = a_2 l_2$

$K_6 = l_o$

$$\int_o^{a_2} \frac{K_4 \; X^2 \; dx}{K_6 X + K_5} = K_4 \int_o^{a_2} \frac{X^2 \; dx}{X + \frac{K_5}{K_6}}$$

$$- \begin{array}{l} X^2 \\ X^2 - \frac{K_5}{K_6} X \end{array} \quad \begin{array}{l} X + \frac{K_5}{K_6} \\ \hline X - \frac{K_5}{K_6} \end{array} \quad \therefore K_4 \int_o^{a_2} X dx - K_4 \int_o^{a_2} \frac{K_5}{K_6} \; dx +$$

$$\frac{K_5}{K_6} X + \frac{K_5}{K_6}^2$$

$$K_4 \int_o^{a_2} \frac{\frac{K_5}{K_6}^2 \; dx}{X + \frac{K_5}{K_6}} = K_4 \left[\frac{X^2}{2} - \frac{K_5}{K_6} X + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2 \ln\left(X + \frac{K_5}{K_6}\right)\right]_o^{a_2} =$$

$$= K_4 \left[\frac{a_2^2}{2} - \frac{K_5}{K_6} a_2 + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2 \ln\left(a_2 + \frac{K_5}{K_6}\right) - \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2 \ln\left(\frac{K_5}{K_6}\right)\right]$$

(2)

$$K_7 = 2K_1 \; K_2 \; K_3 \; a_2 \; R_o \qquad K_7 \int_o^{a_2} \frac{X^3 \; dx}{X + \frac{K_5}{K_6}}$$

$$X^3 = \left(X + \frac{K_5}{K_6}\right) \left[X^2 - \frac{K_5}{K_6} \cdot X + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2\right] - \frac{\left(\frac{K_5}{K_6}\right)^3}{X + \frac{K_5}{K_6}}$$

$$K_7 \left[\int_o^{a_2} X^2 - \frac{K_5}{K_6} X + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2 - \frac{\left(\frac{K5}{K_6}\right)^3}{X + \frac{K_5}{K_6}} \right. =$$

$$K_7 \left[\frac{X^3}{3} - \frac{K_5}{2K_6} X^2 + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2 X + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^3 \ln\left(X + \frac{K_5}{K_6}\right)\right]_o^{a_2} =$$

$$K_7 \left[\frac{a_2^3}{3} - \frac{K_5}{2K_6} a_2^2 + \frac{K_5}{K_6}^2 a_2 - \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^3 \ln\left(a_2 + \frac{K_5}{K_6}\right) + \right.$$

$$\left. \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^3 \ln\left(\frac{K_5}{K_6}\right) \right]$$

(3)

$$K_8 = K_2^2 \; K_3 \; a_2 \; R_o \qquad K_8 \int_o^{a_2} \frac{X^4 \; dX}{X + \frac{K_5}{K_6}}$$

$$X^4 = \left(X + \frac{K_5}{K_6}\right)\left[X^3 - \frac{K_5}{K_6} X^2 + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2 X - \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^3\right] + \frac{\left(\frac{K_5}{-K_6}\right)^4}{X + \frac{K_5}{K_6}}$$

$$= K_8 \int_o^{a_2} X^3 - \frac{K_5}{K_6} X^2 + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2 X - \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^3 + \frac{\left(\frac{K_5}{K_6}\right)^4}{X + \frac{K_5}{K_6}}$$

$$= K8 \left[\frac{X^4}{4} - \frac{K_5}{3K_6} X^3 + \frac{1}{2}\left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2 X^2 - \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^3 X + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^4 \right.$$

$$\left. \ln\left(X + \frac{K_5}{K_6}\right)\right]_o^{a_2}$$

$$= K_8 \left[\frac{a_2^4}{4} - \frac{K_5}{3K_6} a_2^3 + \frac{a_2^2}{2}\left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2 - \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^3 a^2 + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^4 \right.$$

$$\left. \ln\left(a^2 + \frac{K_5}{K_6}\right) - \left(\frac{K5}{K_6}\right)^4 \ln\left(\frac{K_5}{K_6}\right)\right]$$

(4)

$$K_9 = K_1^2 \; a_2 \; K_3 \qquad K_9 \int_0^{a_2} \frac{X^3 \, dx}{X + \frac{K_5}{K_6}}$$

$$K_9 \left[\frac{a_2^3}{3} - \frac{K_5}{2K_6} a_2^2 + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2 a_2 - \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^3 \ln\left(a_2 + \frac{K_5}{K_6}\right) + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^3 \ln\left(\frac{K_5}{K_6}\right)\right]$$

(5)

$$K_{10} = 2a_2 \; K_1 \; K_2 \; K_3 \qquad K_{10} \int_0^{a_2} \frac{X^4 \, dx}{X + \frac{K_5}{K_6}}$$

$$K_{10} \left[\frac{a_2^4}{4} - \frac{K_5}{3K_6} a^3{}_2 + \frac{1}{2}\left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2 a_2^2 - \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^3 a_2 + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^4 \ln\left(a_2 + \frac{K_5}{K_6}\right) - \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^4 \ln\left(\frac{K_5}{K_6}\right)\right]$$

(6)

(6)

$$K_{11} = a_2 K_2^2 K_3 \qquad K_{11} \int_0^{a_2} \frac{X^5 \, dx}{X + \frac{K_5}{K_6}}$$

$$X^5 = \left(X + \frac{K_5}{K_6}\right)\left[X^4 - \frac{K_5}{K_6} X^3 + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2 X^2 - \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^3 X + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^4\right] - \frac{\left(\frac{K_5}{K_6}\right)^5}{X + \frac{K_5}{K_6}}$$

$$K_{11} \int_0^{a_2} X^4 - \frac{K_5}{K_6} X^3 + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2 X^2 - \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^3 X + \frac{K_5}{K_6} - \frac{\left(\frac{K_5}{K_6}\right)^5}{X + \frac{K_5}{K_6}}$$

$$K_{11}\left[\frac{X^5}{5} - \frac{K_5}{4K_6} X^4 + \frac{1}{3}\left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2 X^3 - \frac{1}{2}\left(\frac{K_5}{K_6}\right)^3 X^2 + \frac{K_5}{K_6} X - \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^5 \ln\left(X + \frac{K_5}{K_6}\right)\right]_0^{a_2}$$

$$K_{11}\left[\frac{a_2^5}{5} - \frac{K_5}{4K_6} a_2^4 + \frac{a_2^3}{3}\left(\frac{K_5}{K_6}\right)^2 - \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^3 \frac{a_2^2}{2} + \frac{K_5}{K_6} a_2 - \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^5 \ln\left(a_2 + \frac{K_5}{K_6}\right) + \left(\frac{K_5}{K_6}\right)^5 \ln\left(\frac{K_5}{K_6}\right)\right]$$

DETERMINACION DE LAS CONSTANTES

$$K_4 = K_1^2 \; a_2 \; K_3 \; R_o$$

$$K_4 = \left(\frac{2N_2 + a_2 Nu' - a_2 Np'}{2a_2} \right)^2 \quad a_2 \quad 2\pi \mu_o \; R_o = \frac{\mu_o R_o \pi}{2a_2}$$

$$\left(2N_2 + a_2 \; Nu' - a_2 \; Np' \right)^2$$

$$K_5 = a_2 \; 1_2$$

$$K_6 = 1_1 - 1_2 \qquad \frac{K_5}{K_6} = \frac{a_2 \; 1_2}{1_2 - 1_1}$$

$$K_7 = 2K_1 \; K_2 \; K_3 \; a_2 \; R_o$$

$$K_7 = 2 \left(\frac{2N_2 + a_2 \; Nu' - a_2 \; Np'}{2a_2} \right) \left(\frac{Np' - Nu'}{2a_2} \right) \quad 2\pi \mu_0 \; a_2 \; R_o$$

$$K_7 = \frac{\pi \mu_o R_o}{a_2} \quad (2N_2 + a_2 \; Nu' - a_2 \; Np') \quad (Np' - Nu')$$

$$K_8 = K_2^2 \; K_3 \; a_2 \; R_o = \left(\frac{Np' - Nu'}{2 \; a_2} \right)^2 \; 2\pi \mu_o \; a_2 \; R_o = \frac{\mu_o \; R_o \pi}{2a_2} \left(Np' - Nu' \right)^2$$

$$K_9 = K_1^2 \quad K_3 \; a_2 = \left(\frac{2N_2 + a_2 \; Nu' - a_2 \; Np'}{2 \; a_2} \right)^2 \quad 2\mu_o \; a_2 \pi$$

$$K_9 = \frac{\pi \mu_o}{2a_2} \left(2N_2 + a_2 \, Nu' - a_2 \, Np' \right)$$

$$K_{10} = 2K_1 \, K_2 \, K_3 \, a_2$$

$$K_{10} = \frac{\pi \mu_o}{a_2} \left(2N_2 + a_2 \, Nu' - a_2 \, Np' \right) \left(Np' - Nu' \right)$$

$$K_{11} = K_2^2 \, K_3 \, a_2 = \left(\frac{Np' - Nu'}{2a_2} \right)^2 \quad 2\mu_o \, a_2 \pi$$

$$K_{11} = \frac{\pi \mu_o}{2a_2} \left(Np' - Nu' \right)^2$$

Entonces:

(1)

$$\frac{\pi \mu_o R_o}{2} \left(2N_2 + a_2 Nu' - a_2 Np' \right)^2 \left[\frac{a_2}{2} - \frac{a_2 l_2}{l_1 l_2} + a_2 \left(\frac{l_2}{l_1 - l_2} \right)^2 \right.$$

$$\left. \ln \left(\frac{a_2 l_1}{l_1 - l_2} \right) - a_2 \left(\frac{l_2}{l_1 - l_2} \right) \ln \left(\frac{a_2 l_2}{l_1 - l_2} \right) \right]$$

(2)

$$\pi\mu_o R_o \left(2N_2 + a_2 Nu' - a_2 Np'\right)\left(Np' - Nu'\right)\left[\frac{a_2^2}{3} - \frac{a_2^2\, l_2}{2(l_1-l_2)}\right.$$

$$\left. + \left(\frac{a_2 l_2}{(l_1 - l_2)}\right)^2 - \frac{a_2^2\, l_2^3}{(l_1-L_2)^3} \ln\left(\frac{a_2 l_1}{(l_1-l_2)}\right) + \frac{a_2^2\, l_2^3}{(l_1-l_2)^3} \ln\left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)\right]$$

(3)

$$\frac{\pi\mu_o R_o}{2} \left(Np' - Nu'\right)^2 \left[\frac{a_2^3}{4} - \frac{a_2^3}{3}\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right) + \frac{a_2}{2}\left(\frac{a_2 l_2}{(l_1-l_2)}\right)^2\right.$$

$$\left. - \left(\frac{a_1 l_2}{l_1-l_2}\right)^3 + \frac{a_2^3\, l_2^4}{(l_1-l_2)^4} \ln\left(\frac{a_2 l_1}{(l_1-l_2)}\right) - \frac{a_2^3\, l_2^4}{(l_1-l_2)^4} \ln\left(\frac{a_2\, l_2}{l_1-l_2}\right)\right]$$

(4)

$$\frac{\pi\mu_o}{2}\left(2N_2 + a_2 Nu' - a_2 Np'\right)\left[\frac{a_2^2}{3} - \frac{a_2}{2}\left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right) + \left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)^2\right.$$

$$\left. - \frac{a_2^2\, l_2^3}{(l_1-l_2)^3} \ln\left(\frac{a_2 l_1}{l_1-l_2}\right) + \frac{a_2^2\, l_2^3}{(l_1-l_2)^3} \ln\left(\frac{a_2\, l_2}{l_1 - l_2}\right)\right]$$

(5)

$$\pi\mu_o\ (2N_2 + a_2Nu' - a_2Np')\ (Np' - Nu')\left[\frac{a_2^3}{4} - \frac{a_2^2}{3}\left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)\right.$$

$$+ \frac{a_2}{2}\left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)^2 - \left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)^3 + \frac{a_2^3\ l_2^4}{(l_1-l_2)^4}\ \ln\left(\frac{a_2 l_1}{l_1-l_2}\right) - \frac{a_2^3\ l_2^4}{(l_1-l_2)^4}$$

$$\left.\ln\left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)\right]$$

(6)

$$\frac{\pi\mu_o}{2}(Np' - Nu')^2\left[\frac{a_2^4}{5} - \frac{a_2^3}{4}\left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right) + \frac{a_2^2}{3}\left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)^2 - \frac{a_2}{2}\left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)^3\right.$$

$$\left. + \left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)^4 - \frac{a_2^4\ l_2^5}{(l_1-l_2)^5}\ \ln\left(\frac{a_2 l_1}{l_1-l_2}\right) + \frac{a_2^4\ l_2^5}{(l_1-l_2)^5}\ \ln\left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)\right]$$

Agrupando:

1-4

$$\frac{\pi\mu_o}{2}\ (2N_2 + a_2Nu' - a_2Np')^2\left[a_2R_o\left[\frac{1}{2} - \frac{l_2}{l_1-l_2} + \left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^2\right.\right.$$

$$\ln\left(\frac{a_2 l_1}{l_1-l_2}\right)+\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^2 \ln\left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)\Bigg]+ a_2^2\left[\frac{1}{3}-\frac{l_2}{2(l_1-l_2)}+\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^2\right.$$

$$\left.-\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^3 \ln\left(\frac{a_2 l_1}{l_1-l_2}\right)+\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^3 \ln\left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)\right]\Bigg]$$

2-5

$$\pi\mu_o(2N_2 + a_2Nu' - a_2Np')\ (Np' - Nu')\ \Bigg[a_2^2R_o\left[\frac{1}{3}-\frac{l_2}{2(l_1-l_2}+\right.$$

$$\left.+\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^2-\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^3 \ln\left(\frac{a_2 l_1}{l_1-l_2}\right)+\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^3 \ln\left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)\right]+$$

$$+ a_2^3\left[\frac{1}{4}-\frac{l_2}{3(l_1-l_2)}+\frac{1}{2}\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^2-\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^3+\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^4 \ln\left(\frac{a_2 l_1}{l_1-l_2}\right)\right.$$

$$\left.-\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^4 \ln\left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)\right]\Bigg]$$

3-6

$$\frac{\pi\mu_o}{2}\ (Np' - Nu')^2\ \Bigg[a_2^3\ R_o\left[\frac{1}{4}-\frac{l_2}{3(l_1-l_2)}+\frac{1}{2}\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^2-\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^3+\right.$$

$$+\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^4 \ln\left(\frac{a_2 l_1}{l_1-l_2}\right)-\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^4 \ln\left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)\Bigg]+ a_2^4\left[\frac{1}{5}-\frac{l_2}{4(l_1-l_2)}+\right.$$

$$+\frac{1}{3}\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^2-\frac{1}{2}\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^3+\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^4-\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^5 \ln\left(\frac{a_2 l_1}{l_1-l_2}\right)+$$

$$\left.+\left(\frac{l_2}{l_1-l_2}\right)^5 \ln\left(\frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}\right)\right]\Bigg]$$

Sí:

$A = \pi \mu o$

$B = (2N_2 + a_2 Nu' - a_2 Np')$.

$C = (Np' - Nu')$

$$D = \frac{l_2}{l_1-l_2}$$

$$E = \frac{a_2 l_1}{l_1-l_2}$$

$$F = \frac{a_2 l_2}{l_1-l_2}$$

Reemplazando tenemos el siguiente valor de L_2

$$L_2 = \frac{A}{2} B^2 \left[a_2 R_o \left[\left(\frac{1}{2} - D + D^2 \ln E - D^2 \ln F \right) \right] + \left[a_2^2 \left[\left(\frac{1}{3} - \frac{D}{2} + \right.\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.\left. D^2 - D^3 \ln E + D^3 \ln F \right) \right] \right] \right] \quad (1)$$

$$+ ABC \left[a_2^2 R_o \left[\left(\frac{1}{3} - \frac{D}{2} + D^2 - D^3 \ln E + D^3 \mathrm{Ln} F \right) \right] + \left[a_2^3 \left[\frac{1}{4} - \frac{D}{3} + \frac{D^2}{2} \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. - D^3 + D^4 \ln E - D^4 \ln F \right) \right] \right] \right] \quad (2)$$

$$+ \frac{A}{2} C^2 \left| a_2^3 R_o \left| \left(\frac{1}{4} - \frac{D}{3} + \frac{D^2}{2} - D^3 + D^4 \ln E - D^4 \ln F \right) \right. \right. \left[+ \left[a_2^4 \left(\frac{1}{5} - \frac{D}{4} + \right.\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. + \frac{D^2}{3} - \frac{D^3}{2} + D^4 - D^5 \ln E + D^5 \ln F \right) \right] \right] \quad (3)$$

$$A = \pi \mu_o = \pi (4 \times 10^{-7}) = 39,48 \times 10^{-7}$$

$$B = (2N_2 + a_2 Nu' - a_2 Np') = 2(35715) + 0,11342\ (92-1572)$$

$$= 71.262,14$$

$$C = (Np' - Nu') = (1572-92) = 1480$$

$$D = \frac{l_2}{l_1 - l_2} = \frac{12,88 \times 10^{-3}}{220.08 \times 10^{3} - 12,88 \times 10^{-3}} = 0,062162$$

$$E = \frac{a_2 l_1}{l_1 - l_2} = \frac{0,11342 \times 220,08 \times 10^{-3}}{220,08 \times 10^{-3} - 12,88 \times 10^{-3}} = 0,12047$$

$$F = \frac{a_2 l_2}{l_1 - l_2} = \frac{0,11342 \times 12,88 \times 10^{-3}}{220,08 \times 10^{-3} - 12,88 \times 10^{-3}} = 0,00705$$

$$\frac{AB^2}{2} = 10024,55$$

$$a_2 R_o = 0,11342 \times 0,056 = 0,006352$$

$$\frac{1}{2} - D + D^2 \ln E - D^2 \ln F = 0,4488$$

$$a_2^2 = 0,012864$$

$$\frac{1}{3} - \frac{D}{2} + D^2 - D^3 \ln E + D^3 \ln F = 0,305434$$

(1)

10024,55 0,006352 (0,4488) + 0,012864 (0,305434)
= 67,9652

(2)

$ABC = 416,39$

$a_2^3 = 0,001459$

$a_2^2 R_o = 0,00072$

$\frac{1}{4} - \frac{D}{3} + \frac{D^2}{2} - D^3 + D^4 \ln E - D^4 \ln F = 0,231013$

$416,39 \quad 0,00072 \ (0,305434) + 0,001459 \ (0,231013) =$

$= 0,231913$

(3)

$\frac{AC^2}{2} = 8,647699$

$a_2^4 = 0,000165$

$a_2^3 R_o = 0,000082$

$$\frac{1}{5} - \frac{D}{4} + \frac{D^2}{2} - \frac{D^3}{2} + D^4 - D^5 \ln E + D^5 \ln F = 0{,}185639$$

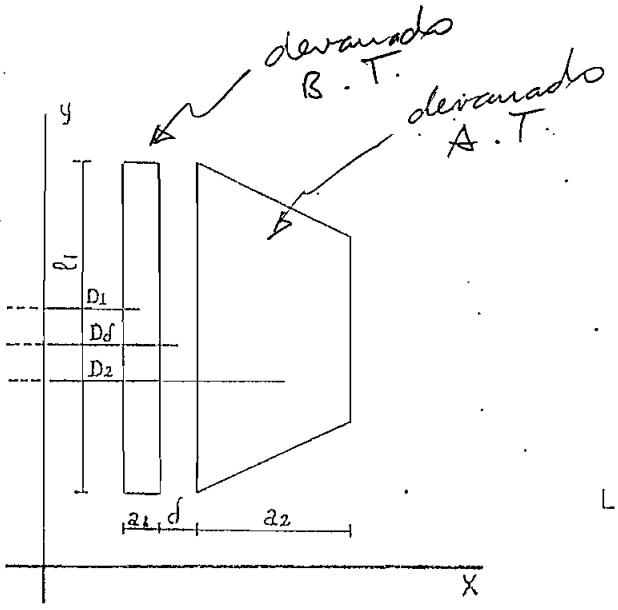
8,647699 0,000082 (0,231913) + 0,000165 (0,185639) =

= 0,000429

L_2 = (1) + (2) + (3) = 68,197542 Henrios.

Se ha determinado el valor de la inductancia de dispersión correspondiente al lado de alta tensión, a continuación determinaremos el valor correspondiente al de baja tensión y al del aislamiento principal.

De acuerdo con la fig. Nº 7 se desprende que:



$$L_1 = N^2 \frac{a_1}{3} \mu_0 \frac{D_1 \pi}{l_1}$$

$$L_\delta = N^2 \mu_0 \frac{D_\delta \pi \delta}{l_1}$$

$$L \text{ dispersión} = 2(L_1 + L_2 + L_\delta)$$

FIGURA # 7

$$L_1 = (35715)^2 \frac{1.563 \times 10^{-3}}{3} \times 4 \times 10^{-7} \times \frac{\times 54 \times 10^{-3}}{220 \times 10^{-3}} = 0,6$$

$$L = (35715)^2 \times 4 \times 10^{-7} \times \frac{6 \times 10^{-3} \times \times 57 \times 10^{-3}}{220 \times 10^{-3}} = 7,77$$

L dispersión = 2 ($L_2 + L_1 + L$)

L dispersión = 2 (0,6 + 68,197542 + 7,77) = 153,14 H

X dispersión = $2\pi f$ L disp = 57732,79 (Para N= N_2)

Si tomamos N= N_1 tenemos el siguiente valor:

B= 2(80) + 0,11342 (92-1572) = -7,86

$\frac{AB^2}{2}$ = 0,000244

(1)

0,000244 0,006352 (0,4488) + 0,012864 (o,305434) =
= $1,6542 \times 10^{-6}$

ABC = -o,o45926

(2)

$$-0{,}045926 \quad 0{,}00072\ (0{,}305434) + 0{,}001459\ (0{,}231013) =$$
$$= 2{,}5579 \times 10^{-7}$$

$$L_2 = 0{,}4304 \times 10^{-3}$$

$$L_1 = 0{,}000003$$

$$L = 0{,}000039$$

$$L \text{ dispersión} = 2(L_1 + L_2 + L) = 0{,}9448 \times 10^{-3}$$

$$X \text{ dispersión} = 2 \cdot \text{Ldisp} = 0{,}356181$$

Una forma de determinar que el valor de reactancia de dispersión está dentro de rangos normales, es evaluar la caída de tensión producida por la misma, valor que debe ser menor que un 12%.

$$e\% = \frac{X \text{ dispersión} \times I \text{ nominal}}{V \text{ nominal}}$$

$$e\% = \frac{0{,}356181 \times 22{,}7}{220} \times 100$$

$\varepsilon\% = 3,66$

6. CALCULO DE LA REACTANCIA DE MAGNETIZACION

La excitación total requerida para establecer un campo magnético en el recorrido de una línea de fuerza completa es igual a la integral de línea del campo a lo largo del circuito cerrado de dicha línea.

$$\Theta_\mu = \int_l H\,dl.$$

Si H está expresado en Amp-vuelta/cm. y 1 en cm., Θ_μ estará en Amp-vuelta. En los circuitos magnéticos constituidos, como en el caso de las máquinas por distintas trayectorias magnéticas, la integral puede constituirse por

$$\Theta_\mu = \sum H l \qquad \Theta_\mu = F_{mm}$$

A los efectos de esta suma dividiremos el camino de las líneas de fuerza en varios trayectos independientes, dentro de cada uno de los cuales la inducción puede considerarse constante, o reducirse, al menos, a un valor medio equivalente, para que el campo también sea constante.

Las trayectorias características que deben distinguirse en un transformador son:

- Las columnas
- los brazos

En el presente caso puede simplificarse aún más este cálculo, ya que es conocido los volt-amperios necesarios para alcanzar una cierta densidad de flujo 9.2 KGAUSS para nuestro caso, habiendo sido determinado este valor a partir de la prueba de circuito abierto.

Volt-Amperios de magnetización = 7.4 VA/Kg x 56.36 Kg
= 417.06 VA.

La corriente de magnetización en consecuencia será igual a:

$$I_o = \frac{\text{VA magnetización}}{\text{V nominal}}$$

$$I_o = \frac{417.06 \text{ VA}}{10^5 \text{ V}} = 4{,}17 \times 10^{-3} \text{ A}$$

~~Siendo~~ la reactancia de magnetización igual a:

$$X_o = \frac{\text{V Nominal}}{I_o}$$

$$X_o = \frac{10^5 \ V}{4,17 \times 10^{-3} \ A} = 23,98 \times 10^6$$

? Revisar ~~O mili~~

7. CALCULO DE LA REACTANCIA CAPACITIVA

Cuando el terminal de un transformador es cargado repentinamente por un voltaje de impulso, la inductancia del devanado evita que la carga aplicada fluya inmediatamente al mismo y si no fuera por la capacidad electrostática de los elementos del devanado, quedaría cargado el terminal por un tiempo relativamente largo, antes de que pudiera fluir mucha carga al otro extremo del devanado.

Sin embargo la existencia de capacitancias electrostáticas entre elementos del devanado permite que parte de la carga pase a través de otras partes del mismo.

La capacidad electrostática entre dos electrodos depende del material que llena al espacio entre ellos. Por ejemplo, si este espacio es llenado con papel en vez de aceite, la capacidad se aumentará aproximadamente al doble.

La mejor forma de solucionar este problema es conseguir que las capacitancias a tierra sean tan bajas como sea posible con respecto a las capacitancias distribuidas entre capas de bobinados.

Existe además otro factor que debe ser considerado que es el de la capacitancia total del sistema, ya que puede presentarse el caso de que ésta resulte ser demasiada elevada lo cual puede ser causa que la rama paralelo del circuito equivalente llegue a ser demasiado pequeña, lo cual traería como consecuencia que en el peor de los casos el transformador no pueda funcionar debido a que el sistema capacivo absorbería toda la potencia de entrada.

Evaluación de la capacitancia total:

Para su evaluación consideraremos que el sistema formado por las diferentes capas, es un sistema de placas paralelas donde:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$$

Para determinar la reactancia capacitiva total no se resolverá el circuito equivalente del sistema por resultar demasiado complicado y por lo tantosedeterminará la potencia consumida por todos los elementos de esta red capacitiva y a partir de ésto se determinará una reactancia capacitiva equivalente.

$$\text{Potencia (consumida)}_i = \frac{\Delta V_i^2}{X_{ci}}$$

$$\text{Potencia total} = \sum_{i=1}^{n} Pi$$

$$\text{Icapacitiva} = \frac{\text{Potencia total}}{\text{Voltaje nominal}}$$

$$X\ \text{cap} = \frac{\text{Voltaje nominal}}{\text{corriente capacitiva}}$$

Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Que datos se consideró para calcular estos valores. Que ecuaciones utilizó para obtener los resultados en la tabla N° 4

TABLA Nº 4

	CAPAS Nº	C Faradios	Xc Ω	Voltaje entre capas V	Potencia Consumida VA
1.	1 - 3	$1,72 \times 10^{-9}$	$1,54 \times 10^{6}$	4358,8	12,34
2.	3 - 5	$1,7 \times 10^{-9}$	$1,56 \times 10^{6}$	4196,6	11,26
3.	5 - 7	$1,674 \times 10^{-9}$	$1,58 \times 10^{6}$	4023,6	10,25
4.	7 - 9	$1,646 \times 10^{-9}$	$1,611 \times 10^{6}$	3855,6	99,23
5.	9 -11	$1,614 \times 10^{-9}$	$1,643 \times 10^{6}$	3687,6	8,28
6.	11-13	$1,578 \times 10^{-9}$	$1,68 \times 10^{6}$	3519,6	7,37
7.	13-15	$1,539 \times 10^{-9}$	$1,723 \times 10^{6}$	3351,6	6,52
8.	15-17	$1,509 \times 10^{-9}$	$1,757 \times 10^{6}$	3097,6	5,46
9.	17-19	$1,49 \times 10^{-9}$	$1,78 \times 10^{6}$	3185,6	5,7
10.	19-21	$1,468 \times 10^{-9}$	$1,806 \times 10^{6}$	2974,6	4,9
11.	21-23	$1,44 \times 10^{-9}$	$1,837 \times 10^{6}$	2861,6	4,46
12.	23-25	$1,416 \times 10^{-9}$	$1,872 \times 10^{6}$	2749,6	4,04
13.	25-27	$1,387 \times 10^{-9}$	$1,911 \times 10^{6}$	2637,6	3,64
14.	27-29	$1,356 \times 10^{-9}$	$1,956 \times 10^{6}$	2525,6	3,26

	CAPAS Nº	C F	Xc Ω	Voltaje entre capas V	Potencia Consumida VA
15.	29-31	$1,321 \times 10^{-9}$	$2,02 \times 10^{6}$	2413,6	2,91
16.	31-33	$1,3 \times 10^{-9}$	$2,039 \times 10^{6}$	2315,6	2,63
17.	33-35	$1,294 \times 10^{-9}$	$2,049 \times 10^{6}$	2259,6	2,49
18.	35-37	$1,286 \times 10^{-9}$	$2,06 \times 10^{6}$	2203,6	2,36
19.	37-39	$1,277 \times 10^{-9}$	$2,07 \times 10^{6}$	2147,6	2,23
20.	39-41	$1,266 \times 10^{-9}$	$2,094 \times 10^{6}$	2091,6	2,09
21.	41-43	$1,254 \times 10^{-9}$	$2,113 \times 10^{6}$	2035,6	1,96
22.	43-45	$1,242 \times 10^{-9}$	$2,135 \times 10^{6}$	1979,6	1,84
23.	45-47	$1,228 \times 10^{-9}$	$2,16 \times 10^{6}$	1923,6	1,71
24.	47-49	$1,212 \times 10^{-9}$	$2,188 \times 10^{6}$	1867,6	1,59
25.	49-51	$1,195 \times 10^{-9}$	$2,218 \times 10^{6}$	1811,6	1,48
26.	51-53	$1,178 \times 10^{-9}$	$2,251 \times 10^{6}$	1755,6	1,37
27.	53-55	$1,158 \times 10^{-9}$	$2,289 \times 10^{6}$	1700,6	1,26
28.	55-57	$1,138 \times 10^{-9}$	$2,33 \times 10^{6}$	1643,6	1,16
29.	57-59	$1,116 \times 10^{-9}$	$2,375 \times 10^{6}$	1587,6	1,06
30.	50-61	$1,094 \times 10^{-9}$	$2,424 \times 10^{6}$	1531,6	0,97

	CAPAS Nº	C F	Xc Ω	Voltaje entre capas V	Potencia Consumida VA
31.	61-63	$1,07 \times 10^{-9}$	$2,479 \times 10^{6}$	1475,6	0,88
32.	63-65	$1,044 \times 10^{-9}$	$2,54 \times 10^{6}$	1419,6	0,77
33.	65-67	$1,018 \times 10^{-9}$	$2,60 \times 10^{6}$	1363,6	0,71
34.	67-69	$1,990 \times 10^{-9}$	$2,679 \times 10^{6}$	1307,6	0,64
35.	69-71	960×10^{-12}	$2,763 \times 10^{6}$	1251,6	0,57
36.	71-73	930×10^{-12}	$2,851 \times 10^{6}$	1195,6	0,50
37.	73-75	896×10^{-12}	$2,957 \times 10^{6}$	1139,6	0,44
38.	75-77	866×10^{-12}	$3,063 \times 10^{6}$	1083,6	0,38
39.	77-79	832×10^{-12}	$3,188 \times 10^{6}$	1027,6	0,33
40.	79-81	796×10^{-12}	$3,332 \times 10^{6}$	971,6	0,28
41.	81-83	760×10^{-12}	$3,49 \times 10^{6}$	915,6	0,24
42.	85-85	720×10^{-12}	$3,68 \times 10^{6}$	859,6	0,20
43.	85-87	680×10^{-12}	$3,90 \times 10^{6}$	803,6	0,17
44.	87-89	$642,8 \times 10^{-12}$	$4,12 \times 10^{6}$	747,6	0,14
45.	89-91	$601,2 \times 10^{-12}$	$4,412 \times 10^{6}$	691,6	0,11
46.	91-93	$558,4 \times 10^{-12}$	$4,75 \times 10^{6}$	635,6	0,09

	CAPAS Nº	C Faradios	Xc Ω	Voltaje entre capas V	Potencia Consumida VA
47.	93-95	$514,8 \times 10^{-12}$	$5,152 \times 10^{6}$	579,6	0,07
48.	95-97	$469,6 \times 10^{-12}$	$5,648 \times 10^{6}$	523,6	0,05
49.	97-99	$422,8 \times 10^{-12}$	$6,273 \times 10^{6}$	467,6	0,03
50.	99-101	375×10^{-12}	$7,072 \times 10^{6}$	411,6	0,02
51.	101-103	326×10^{-12}	$8,13 \times 10^{6}$	355,6	0,015
52.	103-105	$248,7 \times 10^{-12}$	$10,666 \times 10^{6}$	285,6	0,01

	CAPAS Nº	C Faradios	Xc Ω	Voltaje entre capas V	Potencia Consumida VA
1.	2 - 4	$1,686 \times 10^{-9}$	$1,572 \times 10^{6}$	4275,6	11,61
2.	4 - 6	$1,644 \times 10^{-9}$	$1,593 \times 10^{6}$	4107,6	10,59
3.	6 - 8	$1,636 \times 10^{-9}$	$1,621 \times 10^{6}$	3939,6	9,57
4.	8 -10	$1,61 \times 10^{-9}$	$1,647 \times 10^{6}$	3771,6	8,64
5.	10-12	$1,577 \times 10^{-9}$	$1,68 \times 10^{6}$	3603,6	7,73
6.	12-14	$1,54 \times 10^{-9}$	$1,722 \times 10^{6}$	3435,6	6,85
7.	14-16	$1,5 \times 10^{-9}$	$1,768 \times 10^{6}$	3267,6	6,04
8.	16-18	$1,482 \times 10^{-9}$	$1,789 \times 10^{6}$	3141,6	5,52
9.	18-20	$1,462 \times 10^{-9}$	$1,813 \times 10^{6}$	3029,6	5,06
10.	20-22	$1,44 \times 10^{-9}$	$1,842 \times 10^{6}$	2917,6	4,62
11.	22-24	$1,415 \times 10^{-9}$	$1,874 \times 10^{6}$	2805,6	4,2
12.	24-26	$1,387 \times 10^{-9}$	$1,911 \times 10^{6}$	2693,6	3,8
13.	26-28	$1,358 \times 10^{-9}$	$1,953 \times 10^{6}$	2580,6	3,41
14.	28-30	$1,325 \times 10^{-9}$	$2,001 \times 10^{6}$	2469,6	3,05
15.	30-32	$1,290 \times 10^{-9}$	$2,054 \times 10^{6}$	2357,6	2,71
16,	32-34	$1,284 \times 10^{-9}$	$2,064 \times 10^{6}$	2287,6	2,54

	CAPAS Nº	C Faradios	Xc Ω	Voltaje entre capas V	Potencia Consumida VA
17.	34-36	$1,278 \times 10^{-9}$	$2,075 \times 10^{6}$	2231,6	2,40
18.	36-38	$1,269 \times 10^{-9}$	$2,089 \times 10^{6}$	2175,6	2,27
19.	38-40	$1,26 \times 10^{-9}$	$2,105 \times 10^{6}$	2119,6	2,13
20.	40-42	$1,249 \times 10^{-9}$	$2,122 \times 10^{6}$	2063,6	2,01
21.	42-44	$1,237 \times 10^{-9}$	$2,143 \times 10^{6}$	2007,6	1,88
22.	44-46	$1,224 \times 10^{-9}$	$2,166 \times 10^{6}$	1951,6	1,76
23.	46-48	$1,209 \times 10^{-9}$	$2,192 \times 10^{6}$	1895,6	1,64
24.	48-50	$1,194 \times 10^{-9}$	$2,221 \times 10^{6}$	1839,6	1,52
25.	50-52	$1,177 \times 10^{-9}$	$2,253 \times 10^{6}$	1783,6	1,41
26.	52-54	$1,158 \times 10^{-9}$	$2,289 \times 10^{6}$	1727,6	1,30
27.	54-56	$1,139 \times 10^{-9}$	$2,327 \times 10^{6}$	1671,6	1,20
28.	56-58	$1,118 \times 10^{-9}$	$2,37 \times 10^{6}$	1615,6	1,10
29.	58-60	$1,096 \times 10^{-9}$	$2,418 \times 10^{6}$	1559,6	1.01
30.	60-62	$1,073 \times 10^{-9}$	$2,47 \times 10^{6}$	1503,6	0,92
31.	62-64	$1,049 \times 10^{-9}$	$2,528 \times 10^{6}$	1447,6	0,83
32.	64-66	$1,023 \times 10^{-9}$	$2,591 \times 10^{6}$	1391,6	0,75

	CAPAS Nº	C Faradios	Xc Ω	Voltaje entre capas V	Potencia Consumida VA
33.	66-68	996×10^{-12}	$2,662 \times 10^{6}$	1335,6	0,67
34.	68-70	968×10^{-12}	$2,739 \times 10^{6}$	1279,6	0,6
35.	70-72	939×10^{-12}	$2,824 \times 10^{6}$	1233,6	0,53
36.	72-74	908×10^{-12}	$2,92 \times 10^{6}$	1167,6	0,47
37.	74-76	876×10^{-12}	$3,026 \times 10^{6}$	1111,6	0,41
38.	76-78	843×10^{-12}	$3,145 \times 10^{6}$	1055,6	0,35
39,	78-80	808×10^{-12}	$3,279 \times 10^{6}$	999,6	0,30
40.	80-82	773×10^{-12}	$3,430 \times 10^{6}$	943,6	0,26
41.	82-84	736×10^{-12}	$3,602 \times 10^{6}$	887,6	0,22
42.	84-86	698×10^{-12}	$3,798 \times 10^{6}$	831,6	0,18
43,	86-88	$658,8 \times 10^{-12}$	$4,026 \times 10^{6}$	775,6	0,15
44.	88-90	$616,8 \times 10^{-12}$	$4,300 \times 10^{6}$	719,6	0,12
45.	90-92	$526,4 \times 10^{-12}$	$4,601 \times 10^{6}$	663,6	0,10
46.	92-94	$533,2 \times 10^{-12}$	$4,974 \times 10^{6}$	607,6	0,07
47.	94-96	$488,8 \times 10^{-12}$	$5,426 \times 10^{6}$	551,6	0,06
48.	96-98	$443,2 \times 10^{-12}$	$5,985 \times 10^{6}$	495,6	0,04

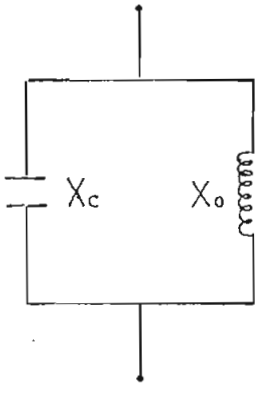
	CAPAS Nº	C F radios	Xc Ω	Voltaje entre capas V	Potencia Consumida VA
49.	98-100	$396,4 \times 10^{-12}$	$6,691 \times 10^{6}$	439,6	0,03
50.	100-102	$348,6 \times 10^{-12}$	$7,609 \times 10^{6}$	384,8	0,02
51.	102-104	$299,28 \times 10^{-12}$	$8,863 \times 10^{6}$	327,6	0,01

Para comprobar que el valor de la reactancia capacitiva no presenta el peligro se mencionó anteriormente, se procederá a encontrar una reactancia equivalente entre las reactancias de magnetización y capacitiva.

Potencia total = 233,53 w

$$I \text{ capacitiva} = \frac{233{,}53 \text{ w}}{10^5 \text{ V}} = 2{,}33 \times 10^{-3} \text{ A}$$

$$X \text{ cap} = \frac{10^5 \text{ V}}{2{,}33 \times 10^{-2} \text{ A}} = 42{,}82 \times 10^6 \ \Omega$$



$$X \text{ equivalente} = \frac{JXc \cdot JXo}{JXo + JXc}$$

$$X \text{ equivalente} = \frac{(-J\ 42{,}82 \times 10^6)\ (J\ 23{,}98 \times 10^6)}{J\ 23{,}98 \times 10^6 - J\ 54{,}44 \times 10^6}$$

23.98
31.46

$$X \text{ equivalente} = J\ 54{,}44 \times 10^6$$

Como se puede ver, el valor de la reactancia equivalente es un valor mayor que el de la reactancia de magnetiza-

ción lo cual permite operar el transformador sin ningún problema, en lo referente a este aspecto.

8. CONTROL DE PERDIDAS

Las pérdidas que se producen en los transformadores son fuente de calentamientos que elevan la temperatura de sus diversos elementos como son: devanados, aislantes y constituyen por lo general la causa limitadora de la potencia que podría obtenerse.

De acuerdo con la naturaleza de las mismas y por su localización se les puede dividir en:

- Pérdidas en el hierro
- Pérdidas en el cobre
- Pérdidas adicionales

Pérdidas en el hierro

Estas pérdidas son debidas a las variaciones de flujo y pueden subdividirse en pérdidas por histéresis y pérdidas por corriente de Foucault. Tanto unas como otras se hallan afectadas por la concentración autoinductiva del flujo y por la distribución

irregular de la inducción sobre cada sección plana del circuito magnético.

En ausencia de las características principales del tipo de material del núcleo estas pérdidas no serán evaluadas con las fórmulas tradicionales, sino que se hará uso de los datos obtenidos en la prueba de circuito abierto.

Peso del núcleo = 56.36 Kg.

Para obtener la densidad de flujo con la cual se está diseñando este transformador (9.2 KGauss) es necesario suministrar una potencia de 1.46 W/Kg. para la magnetización del hierro.

Partiendo de estas consideraciones tenemos:

Pérdidas en el hierro = P hierro/Kg. x peso del núcleo

= 1.46 W/Kg. x 56,26 Kg.

= 82,29 W.

<u>Pérdidas en el cobre</u>

- Pérdidas en el devanado de baja tensión:

Conductor Nº 10

Resistencia / Km. = 4.09 Ω/ Km. (valor calculado a $75^{o}C$)

Radio promedio de una espira = 6.0 cm.

Longitud promedio por espira = 37.69 cm.

Resistencia total del devanado = r/ Km. x Lp x N_1

$$Rt = 4.09\ \Omega/\ Km \times 37,69\ \frac{cm}{esp} \times \frac{1\ Km}{10^5\ cm} \times 158\ esp.$$

$= 0,244\ \Omega$

Corriente a circular = 22.7 A.

Pérdidas I^2 R = $(22,7)^2 \times (o,244) = 125,73$ W

- Pérdidas en el devanado de alta tensión

Conductor Nº 35

Resistencia / Km. = 663.57 Ω /Km.

(valor calculado a 75° C).

Radio promedio de una espira = 17.32 cm.

Longitud promedio por espira = 108.79 cm.

Resistencia total del devanado = 51,565 KΩ

$$Rt = 663,57\ \Omega/Km \times 108,79\ cm \times \frac{1\ Km}{10^5\ cm} \times 71420\ esp = 51,56$$

Corriente a circular = 0.05 A.

Pérdidas I^2 R = $(o,o5)^2\ (51,655 \times 10^3) = 129,13$ w

Pérdidas totales

$P_{totales} = P_{Fe} + P_{cm1} + P_{cm2}$

$Pt = 82,25 + 125,73 + 129,13 = 337,11$ Watt

9. CONTROL DEL AISLAMIENTO

El aislamiento debe ser diseñado para soportar varios tipos de voltaje:

- Voltajes normales de funcionamiento
- Voltajes de fallas del sistema
- Sobrecargas repentinas de conmutación
- Voltajes de descargas atmosféricas
- Voltajes de prueba

De entre estos voltajes el transformador que nos ocupa debe tener un aislamiento adecuado para soportar: voltajes normales de operación y voltajes de prueba.

Hablando en términos generales, los materiales aislantes poseen mucha más resistencia de la que puede usarse, porque es practicamente imposible diseñar estructuras de aislamiento que sometan a éste a una tensión uniforme. Las concentraciones locales de tensión, más bien que los valores medios de la

misma, son las que vencen la resistencia dieléctrica de las estructuras aislantes y estas concentraciones locales están determinadas por la configuración de la estructura.

Control de aislamiento para voltajes normales de funcionamiento.

De acuerdo a la distribución de los bobinados y al sistema de aislamiento adoptado tenemos que el campo eléctrico del conjunto resulta ser complicado y para su estudio se necesita de un programa digital o de un modelo que pueda ser estudiado en el laboratorio.

Es por esta razón que primeramente se hace un análisis más sencillo del mismo, en cuanto a esfuerzos radiales y tangenciales se refiere, para luego de lo cual si los mismos están dentro de rangos permisibles pasar a hacer un estudio más detenido del mismo.

Esfuerzos Tangenciales

Es el esfuerzo que se presenta en el sentido axial sobre el papel y para su determinación se considerará el voltaje más elevado de cada capa y la distancia entre este punto

CALCULO DE ESFUERZOS RADIALES Y TANGENCIALES

Columna Nº 1	Columna Nº 2	Voltaje V	Distancia Vertical mm	Esfuerzo Tangencial Kv/cm
Capa Nº 1		2200	25	0,88
	Capa Nº 2	4400	25	1,76
Capa Nº 3		6558,8	29,2	2,25
	Capa Nº 4	8675,6	31,3	2,77
Capa Nº 5		10750,4	33,4	3,22
	Capa Nº 6	12783,2	35,5	3,60
Capa Nº 7		14774,0	37,6	3,93
	Capa Nº 8	16722,8	39,7	4,21
Capa Nº 9		18629,6	41,8	4,46
	Capa Nº 10	20494,4	43,9	4,67
Capa Nº 11		22317,2	46	4,85
	Capa Nº 12	24098,0	48,1	5,01
Capa Nº 13		25836,8	50,2	5,15
	Capa Nº 14	27533,6	52,3	5,26

Columna Nº 1	Columna Nº 2	Voltaje V	Distancia Vertical mm	Esfuerzo Tangencial Kv/cm
Capa Nº 15		29188,4	54,4	5,37
	Capa Nº 16	30801,2	55,8	5,52
Capa Nº 17		32286	57,2	5,644
	Capa Nº 18	33942,8	58,6	5,792
Capa Nº 19		35471,6	60	5,912
	Capa Nº 20	36972,4	61,4	6,021
Capa Nº 21		38445,8	62,8	6,122
	Capa Nº 22	39890	64,2	6,213
Capa Nº 23		41306,8	65,6	6,296
	Capa Nº 24	42695,6	67	6,372
Capa Nº 25		44056,4	68,4	6,44
	Capa Nº 26	45389,2	69,8	6,502
Capa Nº 27		46694	71,2	6,558
	Capa Nº 28	47970,8	72,6	6,607
Capa Nº 29		49219,6	74	6,651
	Capa Nº 30	50440,4	75,4	6,689

Columna Nº 1	Columna Nº 2	Voltaje V	Distancia Vertical mm	Esfuerzo Tangencial Kv/cm
Capa Nº 31		51633,2	76,8	6,723
	Capa Nº 32	52798,	77,5	6,812
Capa Nº 33		53948,8	78,2	6,898
	Capa Nº 34	55085,6	78,9	6,981
Capa Nº 35		56208,4	79,6	7,061
	Capa Nº 36	57317,2	80,3	7,137
Capa Nº 37		58412	81	7,211
	Capa Nº 38	59452,8	81,7	7,281
Capa Nº 39		60559,8	82,4	7,349
	Capa Nº 40	61612,4	83,1	7,414
Capa Nº 41		62651,2	83,8	7,476
	Capa Nº 42	63676	84,5	7,535
Capa Nº 43		64686,8	85,2	7,592
	Capa Nº 44	65683,6	85,9	7,646
Capa Nº 45		66666,4	86,6	7,698
	Capa Nº 46	67635,2	87,3	7,747
Capa Nº 47		68590	88	7,794

Columna Nº 1	Columna Nº 2	Voltaje V	Distancia Vertical mm	Esfuerzo Tangencial Kv / cm
Capa Nº	Capa Nº 48	69530,8	88,7	7,838
Capa Nº 49		70457,6	89,4	7,881
	Capa Nº 50	71370,4	90,1	7,921
Capa Nº 51		72269,2	90,8	7,959
	Capa Nº 52	73154	91,5	7,994
Capa Nº 53		74024,8	92,2	8,028
	Capa Nº 54	74881,6	92,9	8,060
Capa Nº 55		75724,4	93,6	8,0902
	Capa Nº 56	76553,2	94,3	8,118
Capa Nº 57		77368	95	8,144
	Capa Nº 58	78168,8	95,7	8,168
Capa Nº 59		78955,6	96,4	8,190
	Capa Nº 60	79728,4	97,1	8,21
Capa Nº 61		80487,2	97,8	8,229
	Capa Nº 62	80487,2	97,8	8,225
Capa Nº 63		81232	98,5	8,246
	Capa Nº 64	81962,8	99,2	8,262

Columna Nº 1	Columna Nº 2	Voltaje V	Distancia Vertical mm	Esfuerzo Tangencial Kv / cm
Capa Nº 65		83382,4	100,6	8,288
	Capa Nº 66	84071,2	101,3	8,299
Capa Nº 67		84746	102	8,308
	Capa Nº 68	85406,8	102,7	8,316
Capa Nº 69		86053,6	103,4	8,322
	Capa Nº 70	86686,4	104,1	8,327
Capa Nº 71		87305,2	104,8	8,330
	Capa Nº 72	87910	105,5	8,332
Capa Nº 73		88500,8	106,2	8,333
	Capa Nº 74	89077,6	106,9	8,3327
Capa Nº 75		89640,4	107,6	8,330
	Capa Nº 76	90189,2	108,3	8,327
Capa Nº 76		90724	109	8,323
	Capa Nº 78	91244,8	109,7	8,317
Capa Nº 79		91751,6	110,4	8,310
	Capa Nº 80	92244,4	111,1	8,302

Columna Nº 1	Columna Nº 2	Voltaje V	Distancia Vertical mm	Esfuerzo Tangencial Kv/cm
Capa Nº 81		92723,2	111,8	8,293
	Capa Nº 82	93188	112,5	8,283
Capa Nº 83		93638,8	113,2	8,271
	Capa Nº 84	94075,6	113,9	8,259
Capa Nº 85		94498,4	114,6	8,245
	Capa Nº 86	94907,2	115,3	8,231
Capa Nº 87		95302	116	8,215
	Capa Nº 88	95682,8	116,7	8,199
Capa Nº 89		96049,8	117,4	8,181
	Capa Nº 90	96402,4	118,1	8,162
Capa Nº 91		96741,2	118,8	8,143
	Capa Nº 92	97066	119,5	8,122
Capa Nº 93		97376,8	120,2	8,101
	Capa Nº 94	97673,6	120,9	8,078
Capa Nº 95		97956,4	121,6	8,055
	Capa Nº 96	98225,2	122,3	8,031

Columna Nº 1	Columna Nº 2	Voltaje V	Distancia Vertical mm	Esfuerzo Tangencial Kv/cm
Capa Nº 97		98480	123	8,006
	Capa Nº 98	98720,8	123,7	7,98
Capa Nº 99		98947,6	124,4	7,953
	Capa Nº 100	99160,4	125,1	7,926
Capa Nº 101		99359,2	125,8	7,898
	Capa Nº 102	99544	126,5	7,869
Capa Nº 103		99714,8	127,2	7,839
	Capa Nº 104	99871,6	130	7,682
Capa Nº 105		100000,4	130,7	7,651

Esfuerzos Radiales

Es el esfuerzo que se presenta sobre el papel en el sentido radial y para su determinación se tomará en cuenta la máxima diferencia de potencial existente entre capa y capa y el espesor de papel existente también entre capa y capa (que para todos los casos será de 2 mm.).

$$E_R = \frac{V}{d} \quad [KV/cm]$$

Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

TABLA Nº. 6

Capas Nº	Voltaje entre capas V	Esfuerzo Radial Kv/cm
1 - 3	4358,8	21,794
3 - 5	4196,6	20,983
5 - 7	4023,6	20,118
7 - 9	3855,6	19,278
9 - 11	3687,6	18,438
11 - 13	3519,6	17,598
13 - 15	3351,6	16,758
15 - 17	3097,6	15,488
17 - 19	3185,6	15928
19 - 21	2974,6	14,873
21 - 23	2861,6	14,308
23 - 25	2749,6	13,748
25 - 27	2637,6	13,188
27 - 29	2525,6	12,628
29 - 31	2413,6	12,068
31 - 33	2315,6	11,578
33 - 35	2259,6	11,298
35 - 37	2203,6	11,018
37 - 39	2147,6	10,738
39 - 41	2091,6	10,458
41 - 43	2035,6	10,178
43 - 45	1979,6	9,868

Capas Nº	Voltaje entre capas V	Esfuerzo Radial Kv/cm
45 - 47	1923,6	9,618
47 - 49	1867,6	9,338
49 - 51	1811,6	9,058
51 - 53	1755,6	8,778
53 - 55	1700,6	8,503
55 - 57	1643,6	8,218
57 - 59	1587,6	7,938
59 - 61	1531,6	7,658
61 - 63	1475,6	7,378
63 - 65	1419,6	7,098
65 - 67	1363,6	6,818
67 - 69	1307,6	6,538
69 - 71	1251,6	6,258
71 - 73	1195,6	5,978
73 - 75	1139,6	5,698
75 - 77	1083,6	5,418
77 - 79	1027,6	5,138
79 - 81	971,6	4,588
81 - 83	915,6	4,578
83 - 85	859,6	4,298
85 - 87	803,6	4,018
87 - 89	747,6	3,738
89 - 91	691,6	3,458

Capas Nº	Voltaje entre capas V	Esfuerzo Radial Kv/cm
91 - 93	635,6	3,178
93 - 95	579,6	2,898
95 - 97	523,6	2,618
97 - 99	467,6	2,338
99 - 101	411,6	2,058
101 - 103	355,6	1,678
103 - 105	285,6	1,428
2 - 4	425,6	21,378
4 - 6	4107,6	20,538
6 - 8	3939,6	19,698
8 - 10	3771,6	18,858
10 - 12	3603,6	18,018
12 - 14	3435,6	17,178
14 - 16	3267,6	16,338
16 - 18	3141,6	15,708
18 - 20	3029,6	15,148
20 - 22	2917,6	14,588
22 - 24	2805,6	14,028
24 - 26	2693,6	13,468
26 - 28	2580,6	12,903
28 - 30	2469,6	12,348

Capas Nº	Voltaje entre capas V	Esfuerzo Radial Kv/cm
30 - 32	2357,6	11,788
32 - 34	2287,6	11,438
34 - 36	2231,6	11,158
36 - 38	2175,6	10,878
38 - 40	2119,6	10,598
40 - 42	2063,6	10,318
42 - 44	2007,6	10,038
44 - 46	1951,6	9,758
46 - 48	1895,6	9,478
48 - 50	1839,6	9,198
50 - 52	1783,6	8,918
52 - 54	1727,6	8,638
54 - 56	1671,6	8,358
56 - 58	1615,6	8,078
58 - 60	1559,6	7,798
60 - 62	1503,6	7,518
62 - 64	1447,6	7,238
64 - 66	1391,6	6,958
66 - 68	1335,6	6,678
68 - 70	1279,6	6,398
70 - 72	1233,6	6,168
72 - 74	1167,6	5,838

Capas Nº	Voltaje entre capas V	Esfuerzo Radial Kv/cm
74 - 76	1111,6	5,558
76 - 78	1055,6	5,278
78 - 80	999,6	4,998
80 - 82	943,6	4,718
82 - 84	887,6	4,438
84 - 86	831,6	4,158
86 - 88	775,6	3,878
88 - 90	719,6	3,598
90 - 92	663,6	3,318
92 - 94	607,6	3,038
94 - 96	551,6	2,758
96 - 98	495,6	2,428
98 - 100	439,6	2,198
100 - 102	384,6	1,923
102 - 104	327,6	1,638

Valores aceptados para este tipo de esfuerzos son: esfuerzo radial = 20 KV/cm. esfuerzo tangencial = 5 KV/cm. pudiendo ser mayor el esfuerzo radial, si la calidad del papel en cuanto a esfuerzos dieléctricos lo permite.

De acuerdo con esto y considerando que los esfuerzos tangenciales sobrapasan y en mucho este valor límite se pensó modificar esta alternativa y para esto fue necesario hacer un análisis de los resultados obtenidos.

10. CONCLUSIONES

La distribución de bobinados adoptada presenta sus ventajas y desventajas ya enunciadas anteriormente siendo necesario ahora hacer un análisis de las mismas.

La utilización de un solo bushing presenta su ventaja en el aspecto económico, por la disminución del costo del transformador. El bobinado por capa puede ser realizado con relativa facilidad, sin considerar el diámetro del alambre que se utilizará, ya que cada capa se colocará sobre una de papel aislante de 2mm. y se bobinará hasta cumplir con el número total de espiras por capa y este proceso se repetirá hasta alcanzar el número total de capas.

En cuanto a las desventajas se tiene que la presencia de 100 KV. entre tanque y terminal de salida y el elevado número de interconexiones hace necesario disponer de una tecnología adecuada para realizar el aislamiento en las mejores condiciones, factor que en la actualidad no se la puede solucionar, con las facilidades que disponemos.

Los resultados obtenidos en lo que a los parámetros del circuito equivalente se refiere puede verse, que los mismos se encuentran dentro de rangos aceptables.

El control de aislamiento pone de manifiesto otro de los problemas que esta alternativa presenta ya que los valores de esfuerzos tangenciales son muy elevados.

Pesando estas características tanto positivas como negativas que presenta la distribución estudiada se llegó a la conclusión de que ésta debía ser rechazada considerando principalmente, y como factor de peso para esta decisión el alto número de interconexiones que debían ser realizadas.

C A P I T U L O III

DISEÑO ELECTRICO (SEGUNDA ALTERNATIVA)

1. INTRODUCCION

Luego de la experiencia adquirida en el estudio de la primera alternativa y teniendo mayores elementos de juicio acerca de los principales problemas presentados, se inició un nuevo estudio teniendo como punto de partida las siguientes consideraciones:

- Para evitar el elevado número de interconexiones y, consecuentemente, los problemas del aislamiento, se decidió dividir al devanado de alta tensión en dos grupos, cada uno de los cuales nos proporcionaría un voltaje de 50 KV.

- Como consecuencia de lo anterior, el tanque y el núcleo trabajarán a un nivel de 150 KV. con lo cual se elimina el problema de tener 100 KV. entre tanque y terminal de salida.

- Para disminuir los esfuerzos tangenciales, el papel utilizado para el aislamiento entre capas será doblado so-

bre cada paquete de bobinados de tal forma de aumentar la distancia de fuga y que los mayores esfuerzos que se presenten sobre el papel en sentido axial sean normales al mismo y no tangenciales.

Se debe indicar además que para el estudio de esta segunda alternativa no se incluirán los puntos 2, 3 y 6 de la anterior por ser invariantes con respecto al cambio de la distribución de bobinados.

2. DISTRIBUCION DE LOS BOBINADOS

Esta distribución puede esquematizarse en la figura Nº 7.

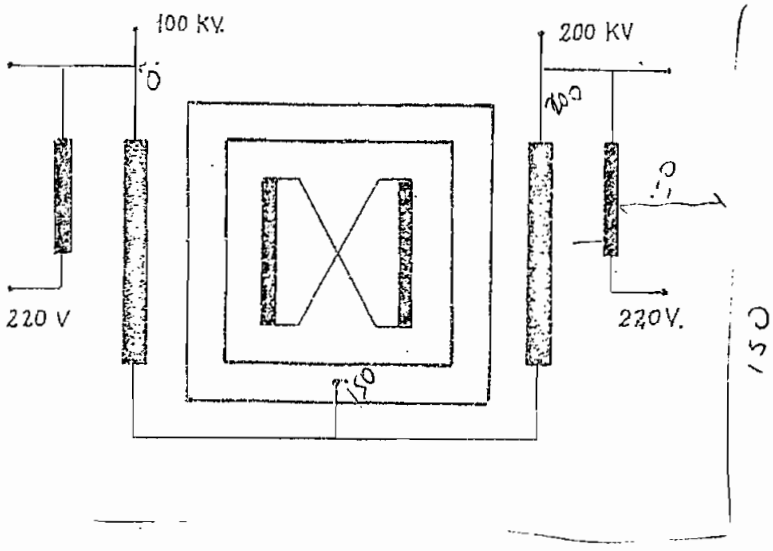


FIGURA Nº 7

Teniendo como ventajas:

a) La presencia de sólo 50 KV. entre masa y terminales de salida.

b) La posibilidad de tener tres terminales de baja tensión.

Y como desventajas:

a) La necesidad de dos bushings de 50 KV.

b) La necesidad de un devanado terciario.

DEVANADO TERCIARIO

Este devanado cumple con la función de eliminar el flujo producido por una excitación desequilibrada, lo cual es causa para que el punto de referencia tienda a defasarse de su punto original.

Cuando un devanado está mal distribuido como es el caso de la figura Nº 8,

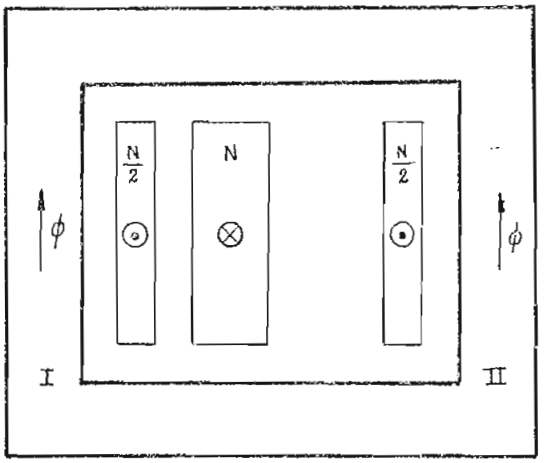


FIGURA # 8

Se tiene que:

$$\sum \Theta = 0$$

$$\frac{N}{2} + \frac{N}{2}\ \overline{I}_2 + N\ \overline{I}_1 = 0$$

$$\Theta_I = \frac{N}{2}\ \overline{I}_2 + N\overline{I}_1 = \frac{N}{2}\ \overline{I}_1$$

$$\Theta_{II} = \frac{N}{2}\ \overline{I}_2$$

Donde

$\sum \Theta$: Excitación total

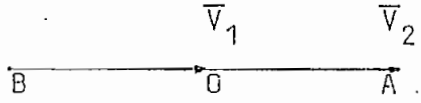
Θ_I: Excitación correspondiente a la columna I

Θ_{II}: Excitación correspondiente a la columna II

Si

$\Theta_I = 0$

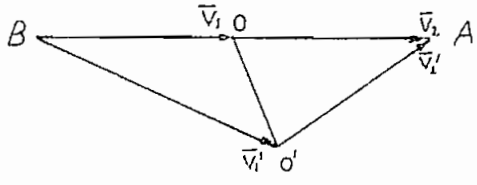
$\Theta_{II} = 0$ $\qquad \overline{V}_T = \overline{V}_1 + \overline{V}_2$



Pero como

$\Theta_I = \frac{N}{2} \overline{I}_1$

$\Theta_{II} = \frac{N}{2} \overline{I}_2$ $\qquad \overline{V}_T = \overline{V}_1' + \overline{V}_2'$



Como puede apreciarse en los diagramas fasoriales, esta mala distribución produce una excitación desequilibrada la cual es causa de que el punto O se desfase al punto O', ocasionando la presencia de un sobrevoltaje de estado estable sobre uno de los devanados; para corregir este problema se utiliza el devanado terciario.

Este devanado debe ser colocado como se indica en la Figura Nº 9.

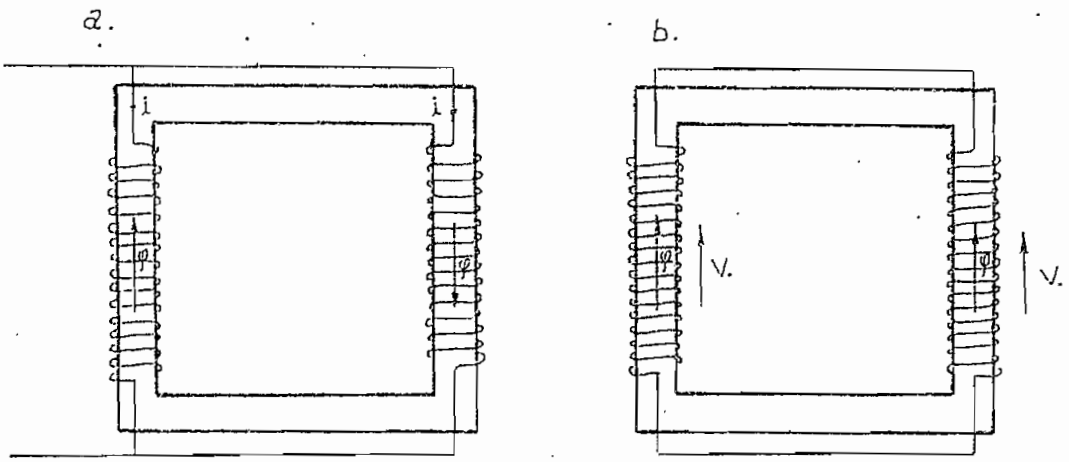


FIGURA Nº 9

Para el caso a cuando el devanado trabaja con el flujo principal su comportamiento es similar a los otros devanados de baja tensión.

Y en el caso de que exista excitación desequilibrada éste se encarga de eliminarlo mediante la creación de voltajes en oposición como puede apreciarse en el caso b.

Luego de haber justificado la presencia de este devanado pasamos a dar las características generales del mismo y como va a estar conectado.

Cada grupo de espiras colocadas sobre las columnas del núcleo debe estar en la posibilidad de soportar el voltaje total del devanado de baja tensión y la mitad de la corriente total del mismo.

Razón por la cual el número de espiras en cada columna debe ser de 158.

mitad de corriente en B.T

SECCION

$$A_3 = \frac{I_3}{\Delta_3}$$

?

$$A_3 = \frac{11.35\ A}{5A/mm^2} = 2,27\ mm^2$$

? → la misma densidad de flujo de B.T

$$D_3 = 2\sqrt{\frac{A_3}{\pi}}$$

$$D_3 = 2\sqrt{\frac{2,27}{3.14}} = 1.7\ mm$$

Estas características corresponden a un conductor # 13 AWG de las siguientes características:

- diámetro 1.83 mm.
- Sección 2.63 mm.
- Ω/Km 6.53
- Kg/Km 23.4
- Diámetro H 1.9 mm.

A continuación de este devanado se dejará un espacio de 4 mm. para circulación de aceite, el cual se formará con una capa de papel aislante de 2.5 mm. y por barras de fibra aislante. Sobre esta capa de papel se colocará el devanado secundario.

DEVANADO SECUNDARIO

Este devanado está formado por dos grupos de bobinados de 50 KV. por las razones mencionadas anteriormente y se encuentra conectado como se indica en la Figura Nº 7.

Para la distribución de este bobinado se tomó en cuenta las siguientes premisas:

- Que el espacio ocupado por el devanado sea el mínimo.
- Que los esfuerzos, tanto radiales como tangenciales, sean lo más bajos posibles.

Para cumplir con lo expuesto anteriormente el aislamiento debe ser diseñado en tal forma que éste se incremente a medida que la diferencia de potencial entre dos capas vaya aumentando, como consecuencia de lo anterior se debe establecer el valor de la máxima diferencia de potencial a la cual

se puede someter a una hoja de papel de 0.1 mm., con lo cual el espacio ocupado por el devanado se reduce al mínimo, así como los esfuerzos radiales se limitaban a un valor máximo.

Como se indicó al comienzo de este capítulo, para disminuir los esfuerzos en sentido axial, el papel utilizado para aislar las capas de bobinados debe ser doblado, para esto se dividió al grupo de 50 KV. en paquetes de tal forma que la distancia entre bobinados y núcleo fuera incrementándose de paquete a paquete.

Tomando en consideración que la distribución depende de varios factores sobre los cuales se tiene poder de decisión, se pensó en un programa digital que nos permitiera encontrar diferentes distribuciones variando estos factores, y luego hacer una selección de las mismas tomando en consideración las premisas anotadas anteriormente.

PROGRAMA DIGITAL

El presente programa digital a pesar de sus limitaciones constituyó una herramienta de mucha utilidad en la determinación de la distribución que cumpliera con las características mencionadas anteriormente.

Básicamente realiza un proceso repetitivo al variar determinados parámetros que influyen directamente en la distribución de los bobinados, los cuales son: distancia de seguridad entre el primer paquete y el brazo del núcleo, la máxima diferencia de potencial a la que se puede someter a una hoja del papel aislante, y el voltaje por paquete que se desea obtener.

El programa en sí nos permite determinar las siguientes características por paquete:

- Longitud del paquete
- Número de espiras por capa
- Voltaje por capa
- Número de capas de papel necesarias para cumplir con el aislamiento entre capas de bobinados.
- Número de capas de papel necesarias para alcanzar el voltaje preestablecido por paquete.
- El espesor que presenta el papel al ser doblado en sentido axial.
- El espesor del disco utilizado para la sujeción del papel doblado.
- Radio del paquete.
- Distancia vertical entre bobinado y brazo del núcleo.

- Y finalmente, el número de espiras necesarias para satisfacer la máxima diferencia de potencial adoptada.

Además, nos determina el voltaje de cada capa del paquete así como los esfuerzos que se presentan sobre el papel y aceite en sentido axial.

LISTA DE VARIABLES

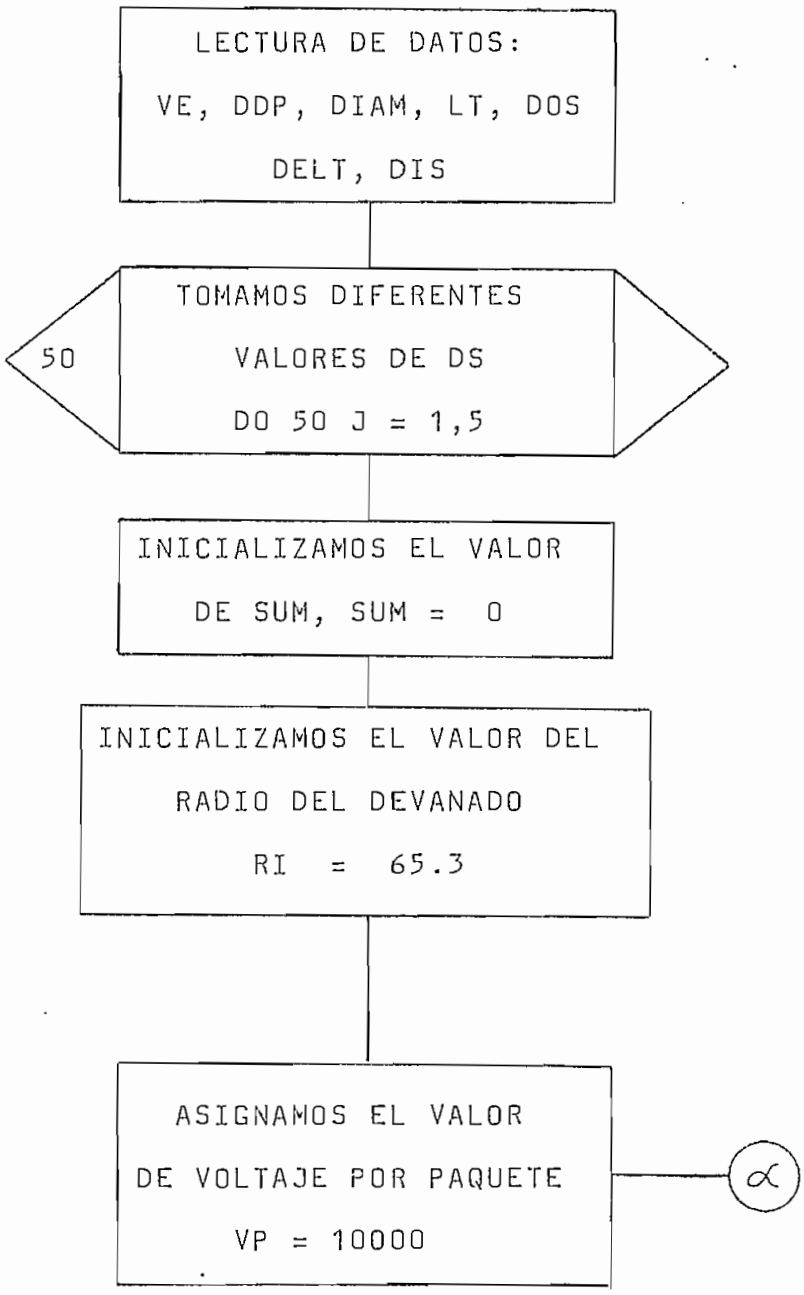
DS	Distancia de seguridad
DELT	Espesor del papel doblado
DIS	Espesor del disco
VE	Voltaje por espira
DDP	Máxima diferencia de potencial
DIAM	Sección del conductor utilizado
LT	Longitud vertical de la ventana
SUM	Valor inicial de voltaje por paquete
RI	Radio inicial del devanado de alto voltaje
VP	Voltaje por paquete
DVA	Distancia vertical de aceite
LD	Longitud disponible para realizar el bobinado

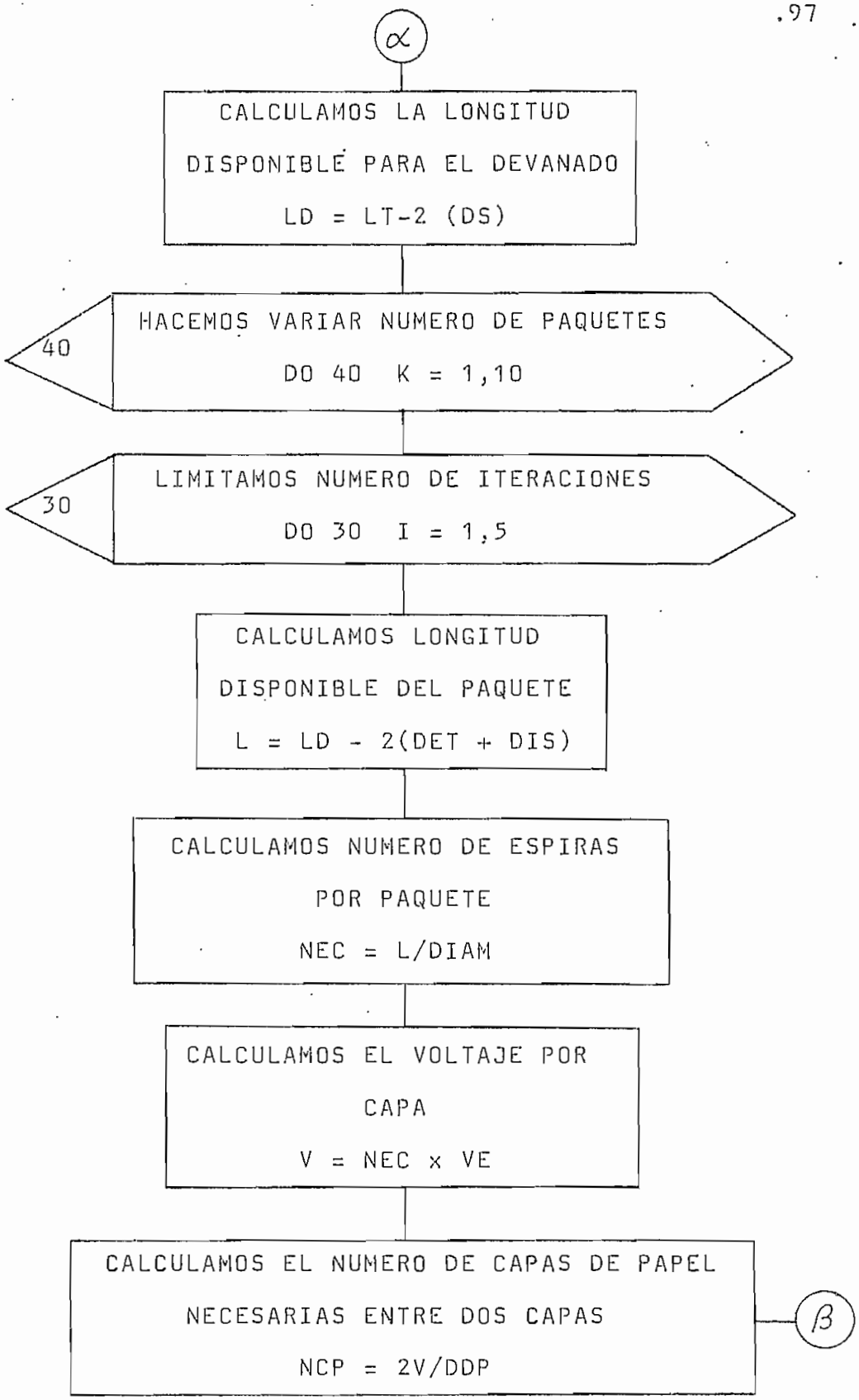
DV	Distancia vertical entre devanado y brazo
L	Longitud por paquete
NEC	Número de espiras por capa
V	Voltaje por capa
NCP	Número de capas de papel entre dos capas de bobinados.
KP	Variable auxiliar
NCPP	Variable auxiliar
DDPP	Variable auxiliar
NE	Número de espiras para satisfacer la máxima diferencia de potencial
NCB	Número de capas de bobinados por paquete
NC	Variable auxiliar
DELTA	Variable auxiliar
FAC	Factor que es función del número de capas de bobinados y que nos determina el espesor del papel doblado
R	Radio del paquete
SCV	Sumatorio de voltaje por capa
DVP	Espesor total de papel doblado
ENA	Esfuerzo normal sobre el aceite
ENP	Esfuerzo normal sobre el papel

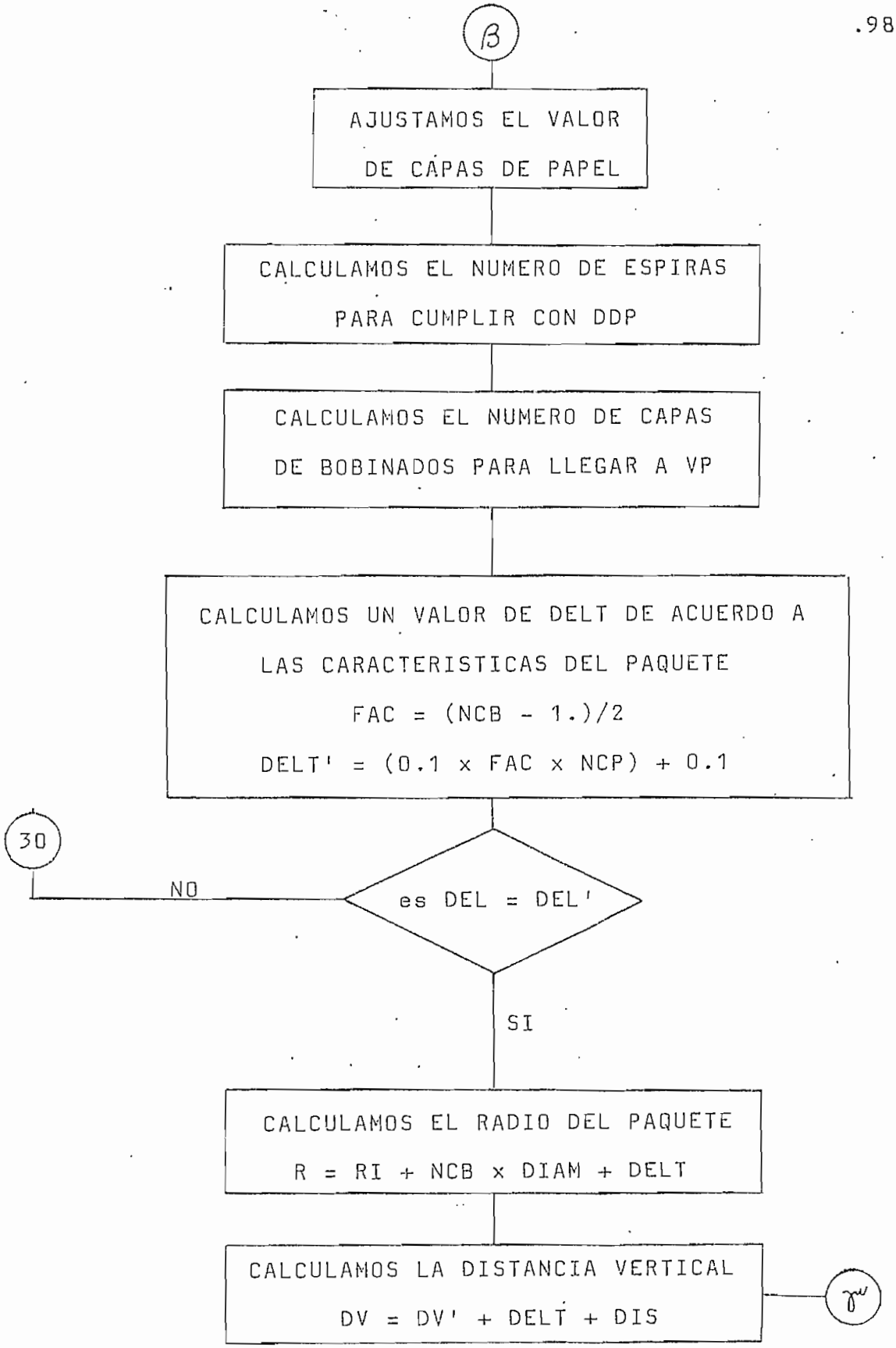
A continuación se presentarán: el diafragma de flujo

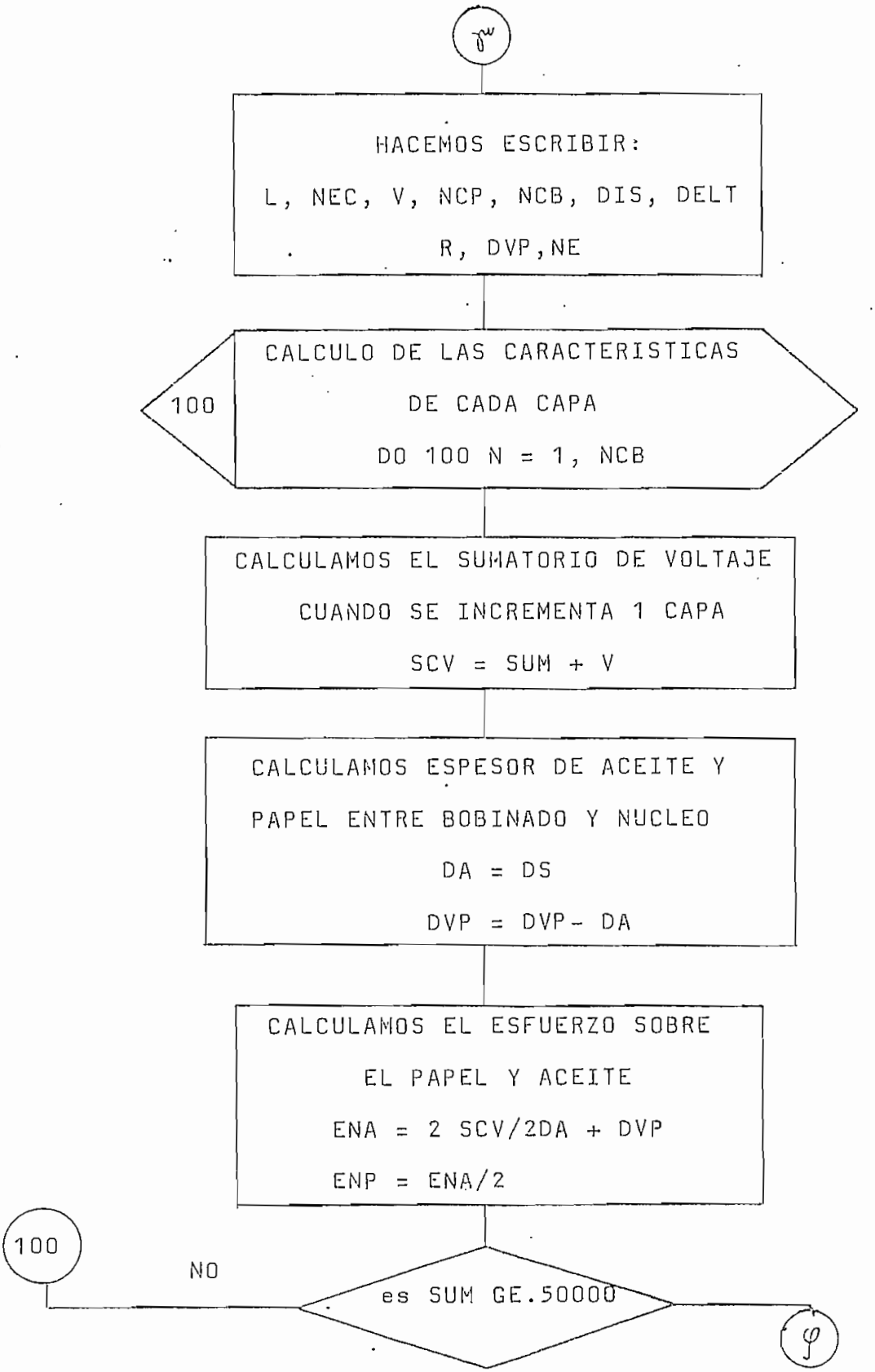
y, el programa con los resultados definitivos de la distribución de bobinados adoptada se incluirá en el apéndice A.

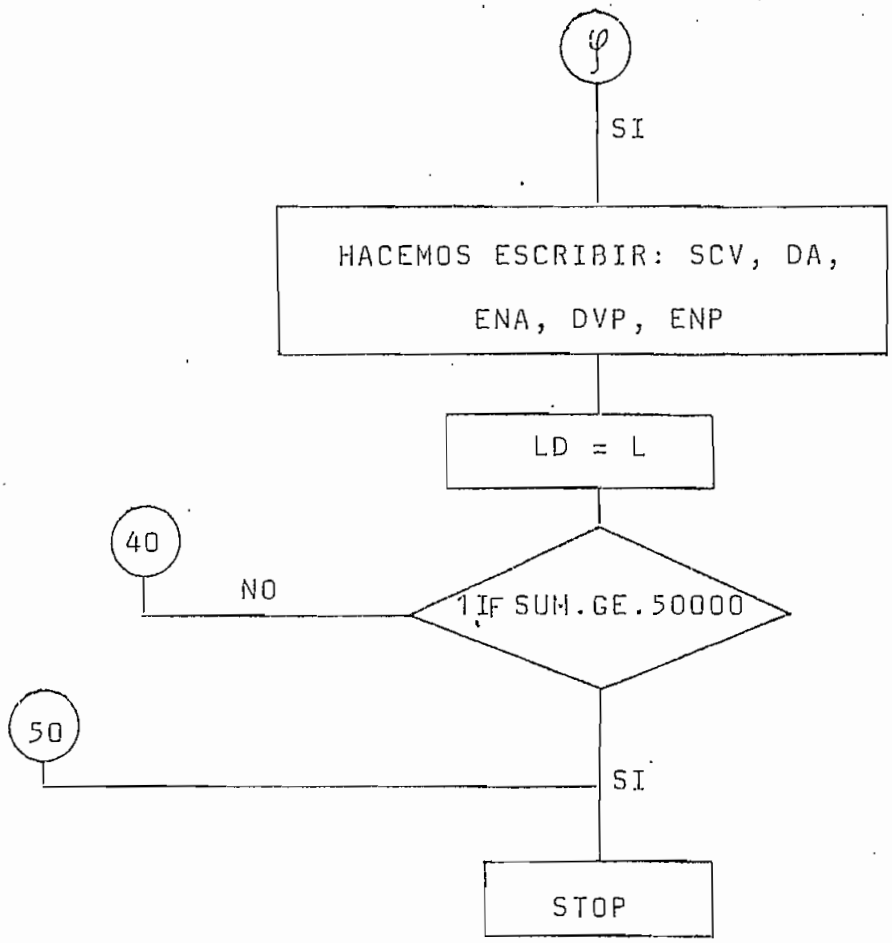
DIAGRAMA DE FLUJO




α
CALCULAMOS LA LONGITUD
DISPONIBLE PARA EL DEVANADO
LD = LT-2 (DS)
40
HACEMOS VARIAR NUMERO DE PAQUETES
DO 40 K = 1,10
30
LIMITAMOS NUMERO DE ITERACIONES
DO 30 I = 1,5
CALCULAMOS LONGITUD
DISPONIBLE DEL PAQUETE
L = LD - 2(DET + DIS)
CALCULAMOS NUMERO DE ESPIRAS
POR PAQUETE
NEC = L/DIAM
CALCULAMOS EL VOLTAJE POR
CAPA
V = NEC x VE
CALCULAMOS EL NUMERO DE CAPAS DE PAPEL
NECESARIAS ENTRE DOS CAPAS
NCP = 2V/DDP
β


β
AJUSTAMOS EL VALOR
DE CAPAS DE PAPEL
CALCULAMOS EL NUMERO DE ESPIRAS
PARA CUMPLIR CON DDP
CALCULAMOS EL NUMERO DE CAPAS
DE BOBINADOS PARA LLEGAR A VP
CALCULAMOS UN VALOR DE DELT DE ACUERDO A
LAS CARACTERISTICAS DEL PAQUETE
FAC = (NCB - 1.)/2
DELT' = (0.1 x FAC x NCP) + 0.1
30
NO
es DEL = DEL'
SI
CALCULAMOS EL RADIO DEL PAQUETE
R = RI + NCB x DIAM + DELT
CALCULAMOS LA DISTANCIA VERTICAL
DV = DV' + DELT + DIS
γ


γ
HACEMOS ESCRIBIR:
L, NEC, V, NCP, NCB, DIS, DELT
R, DVP,NE
100
CALCULO DE LAS CARACTERISTICAS
DE CADA CAPA
DO 100 N = 1, NCB
CALCULAMOS EL SUMATORIO DE VOLTAJE
CUANDO SE INCREMENTA 1 CAPA
SCV = SUM + V
CALCULAMOS ESPESOR DE ACEITE Y
PAPEL ENTRE BOBINADO Y NUCLEO
DA = DS
DVP = DVP- DA
CALCULAMOS EL ESFUERZO SOBRE
EL PAPEL Y ACEITE
ENA = 2 SCV/2DA + DVP
ENP = ENA/2
100
NO
es SUM GE.50000
φ



3. CALCULO DE LA REACTANCIA DE DISPERSION

Por ser la distribución de los bobinados diferente a la primera alternativa la evaluación de este parámetro se la realizará en forma también diferente.

De acuerdo con la Figura 10 tenemos que:

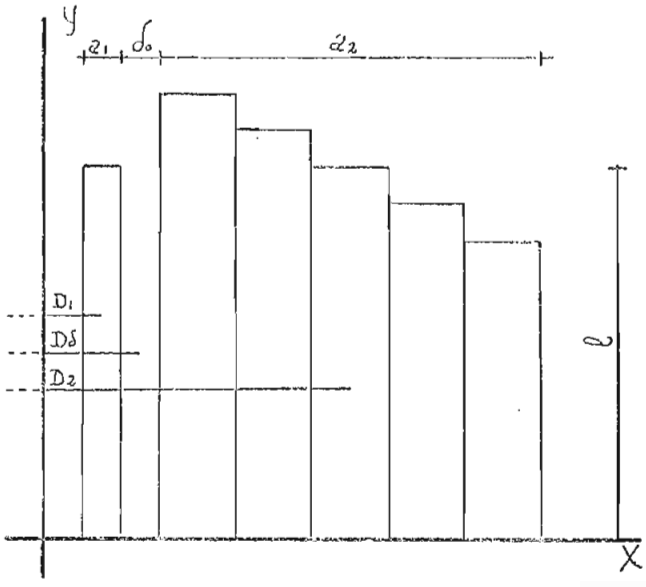


FIGURA Nº 10

que representan cada una de las letras que se utilizan en el gráfico indicado.

$$L = \frac{\int_0^{\psi} d\psi}{i} = \frac{\int_0^{\phi} n \, d\phi}{i}$$

$$d\phi = n i d\Lambda$$

$$L = \frac{\int_0^{\Lambda} n^2 i \, d\Lambda}{i} = \int_0^{\Lambda} n^2 d\Lambda$$

$$d\Lambda = \mu_0 \frac{ds}{l}$$

$$L = \frac{\mu_0}{l} \int_0^{a} n^2 2\pi R x dx$$

$$L = \frac{\mu_0}{l} \int_0^{a} \frac{N^2}{a^2} X^2 \; 2\pi R x dx$$

$$L = \frac{2\pi R x \; N^2}{a^2 l} \int_0^{a} X^2 dX$$

$$L = \frac{2\pi R x N^2}{a^2 \; l} \cdot \left[\frac{1}{3} \; x^3 \right] \Bigg|_o^a$$

$$L = \frac{2\pi R x N^2}{a^2 \; l} \left[\frac{a^3}{3} \right]$$

$$L = \frac{N^2 2\pi R x}{l} \left[\frac{a}{3} \right]$$

Por consiguiente:

$$LT = \frac{2\pi \mu_o N^2}{l} \left[\delta_o R \delta + R_1 \frac{a_1}{3} + R_2 \frac{a_2}{3} \right]$$

Reemplazando valores tenemos:

$$LT = \frac{2 \times 4 \times 10^{-10} \times (158)^2}{196,6} \left[6,5 \times 62,05 + 56,4 \times \frac{4,8}{3} + 87,91 \times \frac{45,22}{3} \right]$$

$$LT = 1.82 \times 10^{-3} \; H$$

$$XD = 2\pi f \; LT = 0,687 \; \Omega$$

La caída de tensión debido a esta reactancia es:

$$\varepsilon\% = \frac{X_D \; I_N}{V_N} \times 100$$

$$\varepsilon\% = \frac{0,687 \times 22,7}{220} \times 100 = 6,99\%$$

De acuerdo a lo expuesto en el capítulo anterior esta caída de tensión está dentro de rangos permisibles, con lo cual el valor de reactancia de dispersión es aceptable.

4. CALCULO DE LA REACTANCIA CAPACITIVA

Para la presente evaluación no se utilizará el método visto en el anterior capítulo, por resultar demasiada larga la evaluación.

En el presente caso se utilizará la definición de energía almacenada en un capacitor.

Donde

$$W = \frac{1}{2}\int_{v} \bar{E}\,\bar{D}\,dv = \frac{1}{2}\int \varepsilon E^2 dv = \frac{\varepsilon}{2}\int_a \int_l E^2 dA dl$$

$$Wi = \frac{\varepsilon}{2} E_i^2 v_i$$

$$W\ total = \sum_{i=1}^{n} Wi$$

$$W\ total = \frac{1}{2}\ C\ equivalente.\ \ V\ nominal$$

Debido a que la geometría del bobinado varía de paquete a paquete, la evaluación de la energía se la realizará

por paquete. Por característica propia de la distribución por paquete bastará con evaluar la energía almacenada entre dos capas del mismo y este valor multiplicar por un factor K que depende del número de capas del paquete.

Paquete # 1

Voltaje por capa (V)				V por Grupo (V)			d.
Capa # 1		Capa # 2		Max.		Min.	(mm.)
1	134.54	20	2690,9	1-20	2690.9	2421.82	1
2	269.08	19	2556,36	2-19	2421.82	2152,74	0.9
3	403.62	18	2421,82	3-18	2152.74	1883,66	0.8
4	538.26	17	2287,28	4-17	1883,66	1614,48	0.7
5	672.80	16	2152,74	5-16	1614,48	1345,4	0.6
6	807.34	15	2018,2	6-15	1345,4	1076,32	0.5
7	941.88	14	1883,66	7-14	1076,32	807,34	0.4
8	1076.42	13	1749,12	8-13	807,34	538,16	0.3
9	1210.96	12	1614,58	9-12	538,16	269,08	0.2
10	1345,5	11	1480,04	10-11	269,08	0	0.1

$$E = \frac{\Delta V}{d}$$

$$Wi = \varepsilon_o \, \varepsilon_r \, E^2 medio \times A \times l$$

$$E^2 medio = \frac{1}{3}\left(E^2 max - E^2 min\right) + E^2 min$$

?

$$A = 2\pi \, R_{medio} \times \Delta r$$

$$\Delta r = d.$$

$$\varepsilon_o = 8.852 \times 10^{-14} \ \frac{F}{cm}$$

$$\varepsilon_r = 4 \quad \text{(papel)}$$

	Esfuerzo Dieléctrico (KV/cm)		Esfuerzo al Cuadrado		Energía Almacenada
	Max.	Min.	Max.	Min.	F/KV^2
1-20	26,909	24,2182	724	586,5	$2,10 \times 10^{-9}$
2-19	26,909	23,919	724	572,1	$1,86 \times 10^{-9}$
3-18	26,909	23,545	724	554,3	$1,61 \times 10^{-9}$
4-17	26,909	23,064	724	531,9	$1,394 \times 10^{-9}$
5-16	26,909	22,423	724	502,7	$1,162 \times 10^{-9}$
6-15	26,909	21,526	724	463,3	$0,935 \times 10^{-9}$
7-14	26,909	20,181	724	407,2	$0,695 \times 10^{-9}$
8-13	26,909	17,938	724	321,7	$0,46 \times 10^{-9}$
9-12	26,909	13,454	724	181	$0,247 \times 10^{-9}$
10-11	26,909	0	724	0	$0,0802 \times 10^{-9}$

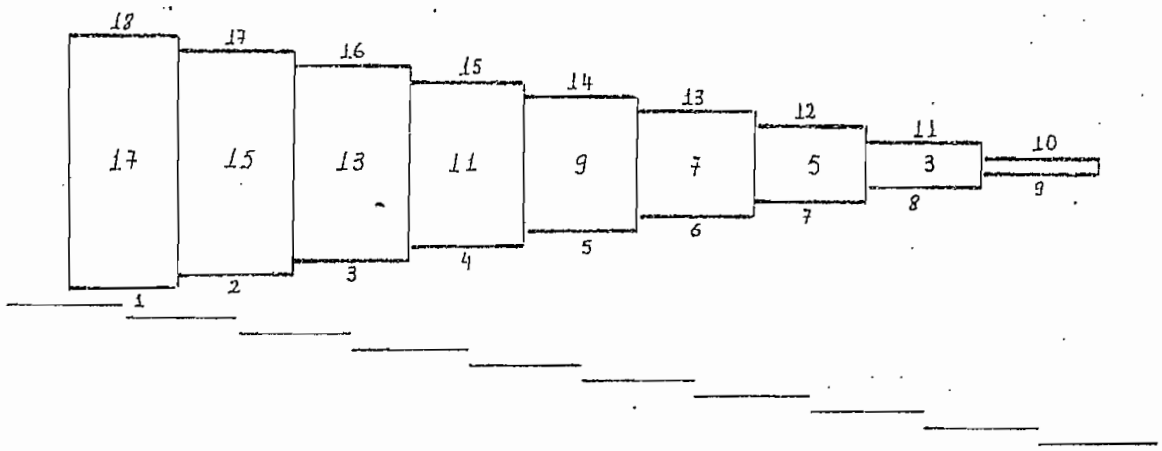
$$W_{1-2} = 10.543 \times 10^{-9} \quad KV^2 - F$$

Voltaje por Capa (V)				V por Grupo (V)			d
Capa # 2		Capa # 3		Max.		Min.	(mm)
20	2690,9	21	2825,44	20-21	269,09	0	0,1
19	2556,6	22	2959,98	19-22	538,16	269,09	0,3
18	2421,82	23	3094,52	18-23	807,24	538,16	0,5
17	2287,28	24	3229,06	17-24	1076,32	807,24	0,7
16	2152,74	25	3363,6	16-25	1345,4	1076,32	0,9
15	2018,2	26	3498,14	15-26	1614,48	1345,4	1,1
14	1883,66	27	3632,68	14-27	1883,16	1614,48	1,3
13	1749,12	28	3767,22	13-28	2152,64	1883,16	1,5
12	1616,58	29	3901,76	12-29	2421,72	2152,64	1,7
11	1480,04	30	4036,3	11-30	2690,8	2421,72	1,9

Esfuerzo Dieléctrico (KV/cm)			Esfuerzo al Cuadrado		Energía Almacenada
Max.		Min.	Max.	Min.	F/KV^2
20-21	26,909	0	724	0	$0,085 \times 10^{-9}$
19-22	17,938	8,969	321,7	80,44	$0,157 \times 10^{-9}$
18-23	16,144	10,7632	260,6	115,8	$0,296 \times 10^{-9}$
17-24	15,376	11,532	236,4	132,9	$0,407 \times 10^{-9}$
16-25	14,948	11,959	223,4	143	$0,524 \times 10^{-9}$
15-26	14,677	12,23	215,4	149,5	$0,667 \times 10^{-9}$
14-27	14,488	12,419	209,9	154,2	$0,78 \times 10^{-9}$
13-28	14,350	12,557	205,9	157,6	$0,873 \times 10^{-9}$
12-29	14,425	12,662	202,9	160,3	$1,032 \times 10^{-9}$
11-30	14,162	12,745	200,5	162,4	$1,10 \times 10^{-9}$

$$W_{2-3} = 5,921 \times 10^{-9} \quad KV^2 - F$$

Paquete # 2

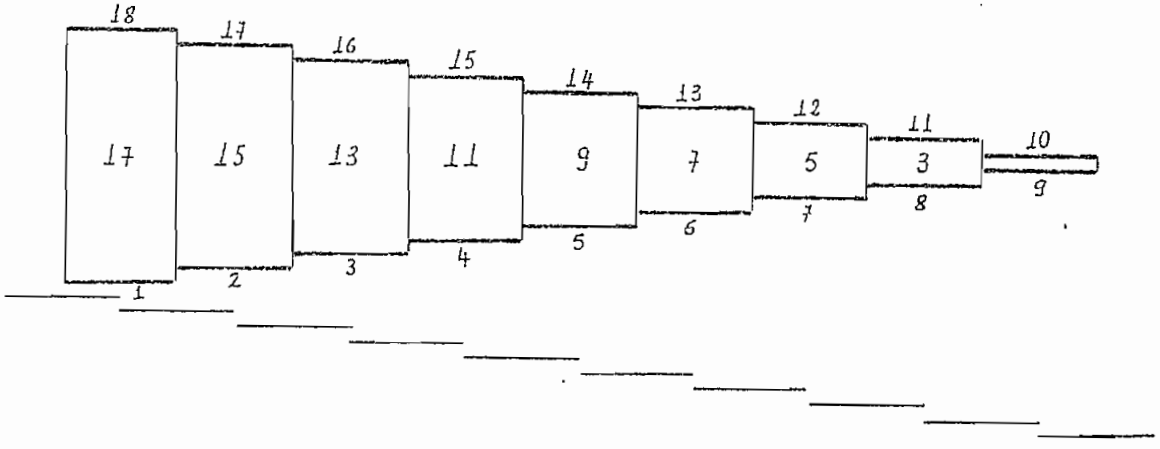


Voltaje por Capa (V)				V por Grupo (V)			d
Capa # 1		Capa # 2		Max.		Min.	(mm)
1	10901,94	18	13260,79	1-18	2497,6	2220,09	1,7
2	11040,70	17	13122,03	2-17	2220,09	1942,57	1,5
3	11179,45	16	12983,27	3-16	1942,57	1665,07	1,3
4	11318,21	15	12844,52	4-15	1665,07	1387,55	1,1
5	11456,96	14	12705,76	5-14	1387,55	1110,05	0,9
6	11595,72	13	12567,01	6-13	1110,05	832,53	0,7
7	11734,47	12	12428,25	7-12	832.53	555,03	0,5
8	11873,23	11	12289,5	8-11	555,03	277,51	0,3
9	12011,99	10	12150,74	9-10	277,51	0	0,1

Esfuerzo Dieléctrico (KV/cm)			Esfuerzo al Cuadrado		Energía Almacenada
	Max.	Min.	Max.	Min.	F/KV^2
1-18	14,68	13,05	215,5	170,54	$1,32 \times 10^{-9}$
2-17	14,80	12,95	219,05	167,71	$1,16 \times 10^{-9}$
3-16	14,94	12,80	223,28	164,05	$1,003 \times 10^{-9}$
4-15	15,13	12,61	229,12	159,11	$0,996 \times 10^{-9}$
5-14	15,41	12,33	237,69	152,12	$0,834 \times 10^{-9}$
6-13	15,86	11,89	251,67	141,45	$0,523 \times 10^{-9}$
7-12	16.65	11,1	277,24	123,22	$0,366 \times 10^{-9}$
8-11	18,50	9,25	342,28	85,56	$0,215 \times 10^{-9}$
9-10	27,75	0	770,06	0	$0,107 \times 10^{-9}$

$$W_{1-2} = 6,524 \times 10^{-9} \quad KV^2 - F$$

Paquete # 3

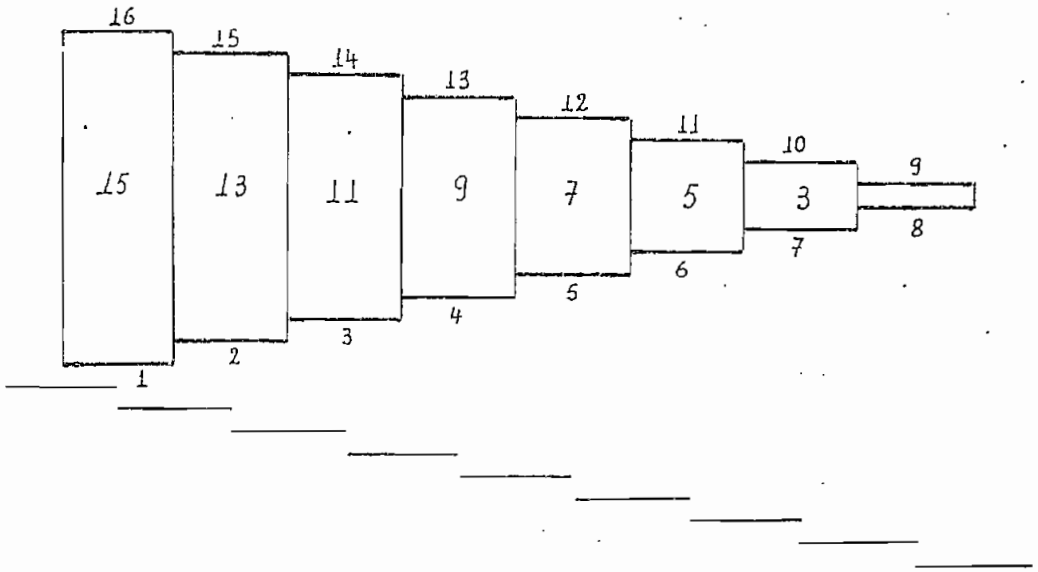


Voltaje por Capa (V)				V por Grupo (V)			d
Capa # 1		Capa # 2		Max.		Min.	(mm)
1	22130,22	18	24303,96	1-18	2301,6	2045,87	1,7
2	22258,09	17	24176,09	2-17	2045,87	1790,13	1,5
3	22385,96	16	24048,22	3-16	1790,13	1534,4	1,3
4	22513,82	15	23920,36	4-15	1534,4	1278,67	1,1
5	22641,69	14	23792,49	5-14	1278,67	1022,93	0,9
6	22769,56	13	23664,62	6-13	1022,93	767,2	0,7
7	22897,42	12	23536,76	7-12	767,2	511,47	0,5
8	23025,29	11	23408,89	8-11	511,47	255,73	0,3
9	23153,16	10	23281,02	9-10	255,73	0	0,1

Esfuerzo Dieléctrico (KV/cm)			Esfuerzo al Cuadrado		Energía Almacenada
	Max.	Min.	Max.	Min.	$F - KV^2$
1-18	13,538	12,034	183,299	144,829	$1,26 \times 10^{-9}$
2-17	13,633	11,93	185,867	142,40	$1,107 \times 10^{-9}$
3-16	13,769	11,8	189,591	139,24	$0,807 \times 10^{-9}$
4-15	13,945	11,62	194,475	135,10	$0,655 \times 10^{-9}$
5-14	14,206	11,365	201,829	129,18	$0,505 \times 10^{-9}$
6-13	14,613	10,96	213,548	120,121	$0,498 \times 10^{-9}$
7-12	15,344	10,229	235,438	104,64	$0,348 \times 10^{-9}$
8-11	17,049	8,524	290.668	72,66	$0,205 \times 10^{-9}$
9-10	25,573	0	653,825	0	$0,102 \times 10^{-9}$

$$W_{1-2} = 5,487 \times 10^{-9}$$

Paquete # 4

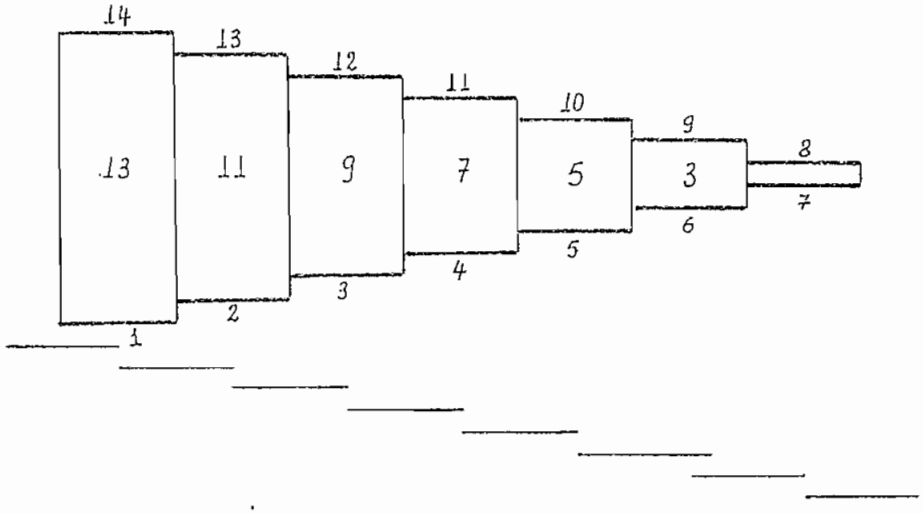


Voltaje por Capa (V)				V por Grupo (V)			d
Capa # 1		Capa # 2		Max.		Min.	(mm)
1	32491,31	16	34467,945	1-16	2108,04	1844,85	1,5
2	32623,09	15	34366,165	2-15	1844,85	1581,3	1,3
3	32754,86	14	34204.39	3-14	1581,3	1317,75	1,1
4	32886,64	13	34072,61	4-13	1317,75	1054,16	0,9
5	33018,41	12	33940,8	5-12	1054,16	790,65	0,7
6	33150,19	11	33809,06	6-11	790,65	527,1	0,5
7	33281,96	10	33677,29	7-10	527,1	263,54	0,3
8	33413,7	9	33545,5	8-9	263,54	0	0,1

	Esfuerzo Dieléctrico KV/cm		Esfuerzo al Cuadrado		Energía Almacenada
	Max.	Min.	Max.	Min.	F - KV^2
1-16	14,05	12,29	197,49	151,26	$1,303 \times 10^{-9}$
2-15	14,19	12,16	201,32	147,9	$1,123 \times 10^{-9}$
3-14	14,37	11,97	206,65	143,5	$0,944 \times 10^{-9}$
4-13	14,64	11,71	214,37	137,19	$0,764 \times 10^{-9}$
5-12	15,05	11,29	226,78	127,57	$0,586 \times 10^{-9}$
6-11	15,81	10,54	250,05	111,13	$0,410 \times 10^{-9}$
7-10	17,57	8,78	308,7	77,17	$0,241 \times 10^{-9}$
8-9	26,35	0	694,3	0	$0,120 \times 10^{-9}$

$W_{1-2} = 5,491 \quad F - KV^2$

Paquete # 5



Voltaje por Capa (V)				V por Grupo (V)			d
Capa # 1		Capa # 2		Max.		Min.	(mm)
1	43040,93	14	44853,13	1-14	1951,6	1672,8	1,3
2	43180,33	13	44713,73	2-13	1672,8	1394	1,1
3	43319,73	12	44574,93	3-12	1394	1115,2	0,9
4	43459,13	11	44434,93	4-11	1115,2	836,4	0,7
5	43598,53	10	44295,53	5-10	836,4	557,6	0,5
6	43737,93	9	44156,13	6-9	557.6	278,8	0,3
7	43877,33	8	44016,73	7-8	278,8	0	0,1

Esfuerzo Dieléctrico KV/cm			Esfuerzo al Cuadrado		Energía Almacenada
	Max.	Min.	Max.	Min.	$KV^2 - F$
1-14	15,01	12,86	225,36	165,57	$1,368 \times 10^{-9}$
2-13	15,20	12,67	231,26	160,59	$1,149 \times 10^{-9}$
3-12	15,48	12,39	239,9	153,53	$0,93 \times 10^{-9}$
4-11	15,93	11,94	253,81	142,76	$0,713 \times 10^{-9}$
5-10	16,72	11,15	279,82	124,36	$0,499 \times 10^{-9}$
7-8	27,88	0	777,29	0	$0,146 \times 10^{-9}$

$$W_{1-2} = 5,098 \quad KV^2 - F$$

$$W \text{ total} = 2 \quad 10.593+6(5,921)+ \frac{5,92+6,524}{2} + 7(6,524) + \frac{5,487+6,524}{2}$$

$$+ 7(5,487) + \frac{6,968+5,491}{2} + 8(5,491) + \frac{5,491+5,098}{2}$$

$$+ 6(5,098) \quad \times 10^{-9}$$

$$W_{total} = 456{,}845 \times 10^{-9}$$

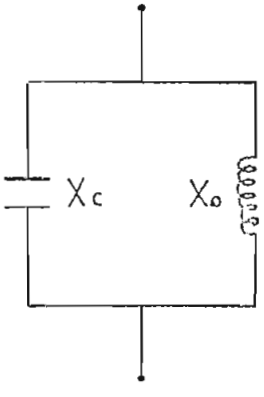
$$W_{total} = CV^2$$

$$C_{equivalente} = \frac{Wtotal}{V^2} = \frac{456{,}845 \times 10^{-9}}{10^4} = 456{,}845 \times 10$$

$$Xc = \frac{1}{2\pi f c} = \frac{1 \times 10^{13}}{2\pi \times 60 \times 456.845}$$

$$\cancel{C}X_c = 58.063 \times 10^6 \ \Omega$$

COMPROBACION DE QUE EL VALOR ES PERMISIBLE:



$$Xequi. = \frac{jX_c \times jX_m}{jX_c + jX_m}$$

$$Xequi. = 42{,}29 \times 10^6 \ \Omega$$

De acuerdo a lo mencionado en el capítulo anterior, el valor es correcto.

5. CONTROL DE PERDIDAS

- Pérdidas en el devanado terciario

Conductor # 13 AWG

Resistencia por kilómetro = 11.74 Ω/Km

Radio promedio de una espira = 5.64 cm.

Longitud promedio de una espira = 35.43 cm.

Resistencia total del devanado = 11.74 Ω/Km x

$$35{,}43 \frac{cm}{esp} \times \frac{1Km}{10^5 cm} \times 316 \text{ esp} = 1{,}3156 \Omega$$

Corriente a circular = 11.35 Amp.

Pérdidas $I^2R = (11.35)^2 \times 1.31 = 168.75$ W

- Pérdidas en el devanado secundario

Conductor # 32 AWG

Resistencia por kilómetro = 663,57 Ω/Km

Radio promedio de una espira = 8,79 cm.

Longitud promedio de una espira = 55.23 cm.

Resistencia total del devanado = 663,57 Ω/Km x

$$55{,}23 \frac{cm}{esp} \times \frac{1Km}{10^5 cm} \times 71430 \text{ esp} = 26{,}17 \text{ K}\Omega$$

Corriente a circular = 0.05 Amp.

Pérdidas $I^2R = (0.05)^2 \times 26{,}17 \times 10^2 = 65{,}44$ W

- Pérdidas en el devanado primario

Conductor # 10 AWG

Resistencia por kilómetro = 4.09 Ω /Km

Radio promedio de una espira = 11.6 cm.

Longitud promedio de una espira = 72.88 cm.

Resistencia total del devanado = 409 Ω /Km x

$$72{,}88 \frac{cm}{esp} \times \frac{1Km}{10^5\ cm} \times 158\ esp = 0{,}47\Omega$$

Corriente a circular = 22.7 Amp.

Pérdidas $I^2R = (22{,}7)^2 \times 0{,}47 = 242{,}7$ W.

Las pérdidas correspondientes al hierro son las mismas evaluadas en el Capítulo II, por lo cual no se realiza este cálculo nuevamente.

Pérdidas totales = 559.18 W.

6. CONTROL DE AISLAMIENTO

Este estudio se desarrollará en forma similar al realizado para la alternativa # 1, razón por la cual se iniciará con un análisis de los esfuerzos promedios que se presentan sobre el papel y aceite, tanto en sentido radial como axial.

ESFUERZOS RADIALES

Para el estudio únicamente se realizará el cálculo de los esfuerzos que se presentan entre dos capas de cada pa-

Paquete # 1

Voltaje por Capa (V)				AV por Grupo (V)			d	(KV/cm)	
Capa # 1		Capa # 2		Max.		Min.	(mm)	Max.	Min.
1	134,54	20	2690,9	1-20	2690,9	2421,82	1	26,909	24,21
2	269,08	19	2556,36	2-19	2421,82	2152,74	0,9	26,909	23,91
3	403,62	18	2421,82	3-18	2152,74	1883,66	0,8	26,909	23,54
4	538,26	17	2287,28	4-17	1883,66	1614,48	0,7	26,909	23,06
5	672,8	16	2152,74	5-16	1614,48	1345,4	0,6	26,909	22,42
6	807,34	15	2018,2	6-15	1345,4	1076,32	0,5	26,909	21,52
7	941,88	14	1883,6	7-14	1076,32	807,24	0.4	26.909	20,18
8	1076,42	13	1749,12	8-13	807,24	538,16	0.3	26,909	17,93
9	1210,5	12	1614,58	9-12	538,16	269,8	0,2	26,909	13,45
10	1345,5	11	1480,04	10-11	269,08	0	0,1	26,909	0

Voltaje por Capa (V)				V por Grupo (V)			d	(KV/cm)	
Capa # 2		Capa # 3		Max.		Min.	(mm)	Max.	Min.
11	1480,04	20	4036,3	11-30	2690,8	2421,72	1,9	14,162	12,745
12	1614,58	29	3901,76	12-29	2421,72	2152,64	1,7	14,425	12,662
13	1749,12	28	3767,22	13-28	2152,64	1883,16	1,5	14,350	12,557
14	1883,66	27	3632,68	14-27	1883,16	1614,48	1,3	14,488	12,419
15	2018,2	26	3498,14	15-26	1614,48	1345,4	1,1	14,677	12,23
16	2152,74	25	3363,6	16-25	1345,4	1076,32	0,9	14,948	11,959
17	2287,28	24	3229,06	17-24	1076,32	807,24	0,7	15,376	11,532
18	2421,82	23	3094,52	18-23	807,24	538,16	0,5	16,144	10,76
19	2556,6	22	2959,98	19-22	538,16	269,09	0,3	17,938	8,969
20	2690,9	21	2825,44	20-21	269,09	0	0,1	26,909	0

Paquete # 2

Voltaje por Capa (V)				V por Grupo (V)			d	(KV/cm)	
Capa # 1		Capa # 2		Max.		Min.	(mm)	Max.	Min.
1	10901,14	18	13260,79	1-18	2497,6	2220,09	1,7	14,68	13,05
2	11040,70	17	13122,03	2-17	2220,09	1942,57	1,5	14,80	12,95
3	11179,45	16	12983,27	3-16	1942,57	1665,07	1,3	14,94	12,80
4	11318,21	15	12844,52	4-15	1665,07	1387,55	1,1	15,13	12,61
5	11456,96	14	12705,76	5-14	1387,55	1110,05	0,9	15,41	12,33
6	11595,72	13	12567,01	6-13	1110,05	832,53	0,7	15,86	11,89
7	11734,47	12	12428,25	7-12	832,53	555,03	0,5	16,65	11,1
8	11873,23	11	12289,5	8-11	555,03	277,51	0,3	18,50	9,25
9	12011,99	10	12150,74	9-10	277,51	0	0,1	27,95	0

Paquete # 3

Voltaje por Capa (V)				V por Grupo (V)			d	(KV/cm)	
Capa # 1		Capa # 2		Max.		Min.	(mm)	Max.	Min.
1	22130,22	18	24303,96	1-18	2301,6	2045,87	1,7	13,53	12,034
2	22258,09	17	24176,09	2-17	2045,87	1790,13	1,5	13,63	11,93
3	22385,96	16	24048,22	3-16	1790,13	1534,4	1,3	13,76	11,8
4	22513,82	15	23920,26	4-15	1534,4	1278,67	1,1	13,94	11,62
5	22641,69	14	23792,49	5-14	1278,67	1022,93	0,9	14,20	11,365
6	22769,56	13	23664,64	6-13	1022,93	767,2	0,7	14,61	10,96
7	22897,42	12	23536,76	7-12	767,2	511,47	0,5	15,34	10,229
8	23025,29	11	23408,89	8-11	511,47	255,73	0,3	17,05	8,524
9	23153,16	10	23281,02	9-10	255,73	0	0,1	25,573	0

Paquete # 4

Voltaje por Capa (V)				V por Grupo (V)			d	(KV/cm)	
Capa # 1		Capa # 2		Max.		Min.	(mm)	Max.	Min.
1	32491,31	16	34467,94	1-16	2108,4	1844,85	1,5	14,05	12,29
2	32623,09	15	34336,16	2-15	1844,85	1581,3	1,3	14,19	12,16
3	32754,86	14	34204,39	3-14	1581,3	1317,75	1,1	14,37	11,97
4	32886,64	13	34072,61	4-13	1317,75	1054,16	0,9	14,64	11,71
5	33018,41	12	33940,8	5-12	1054,16	790,65	0,7	15,05	11,29
6	33150,19	11	33809,06	6-11	790,65	527,1	0,5	15,81	10,54
7	33281,96	10	33677,29	7-10	527,1	263,54	0,3	17,57	8,78
8	33413,7	9	23545,5	8-9	263,54	0	0,1	26,35	0

Paquete # 5

Voltaje por Capa (V)				V por Grupo (V)			d	(KV/cm)	
Capa # 1		Capa # 2		Max.		Min.	(mm)	Max.	Min.
1	43040,93	14	44853,13	1-14	1951,6	1672,8	1,3	15,01	12,86
2	43180,33	13	44713,73	2-13	1672,8	1394	1,1	15,20	12,67
3	43319,73	12	44574,33	3-12	1394	1115,2	0,9	15,48	12,39
4	43459,13	11	44434,93	4-11	1115,2	836,4	0,7	15,93	11,94
5	43598,53	10	44295,53	5-10	836.4	557,6	0,5	16,72	11,15
6	43737,93	9	44156,13	6-9	557,6	278,8	0,3	18,58	9,29
7	43877,33	8	44016,73	7-8	278,8	0	0,1	27,88	0

Los resultados de los esfuerzos que se presentan en sentido axial tanto sobre el papel como sobre el aceite, pueden verse en los resultados correspondientes al programa digital.

Se presentarán además los resultados correspondientes a los esfuerzos tangenciales que se presentan entre terminales de paquetes consecutivos y de éstos con respecto al brazo del núcleo.

V Capa #		V Capa #		V (V)		d (mm)	(KV/cm)
7	9419,79	16	20753,57	7-16	11333,78	98	1,156
16	20753,57	25	31208,74	16-25	10455,17	98	1,066
25	31208.74	35	41847,33	25-35	10638,59	97	1,096
35	41847,33	42	49732,11	35,42	7884,78	96	0,82
8	10763,19	17	22002,36	8-17	11239,17	98	1,146
17	22002,36	26	32359,54	17-26	10357,18	98	1,056
26	32259,54	36	42901,53	26-36	10541,99	97	1,086
36	42901,53	43	50000	36-43	7098,47	96	0,739
7	9419,79	R	---		9419,79	190	0,495
8	10763,19	R	---		10763,19	190	0,566
16	20753,57	R	---		20753,57	270	0,768
17	22002,36	R	---		22002,36	270	0,814
25	31208,74	R	---		31208.74	350	0,891
26	32359,54	R	---		32359,54	350	0,924
35	41847,33	R	---		41847,33	410	1,02
36	42901,53	R	---		42901,53	410	1,046
42	49732,11	R	---		49732,11	478	1,04
43	50000	R	---		50000	478	1,046

Luego de haber determinado que los valores promedio de los esfuerzos que se presentan en el papel y acéite, en sentido radial y axial están dentro de rangos permisibles, se pasó a realizar un estudio del campo en un modelo bidimensional debe señalarse que un programa digital permite realizar un análisis más detallado del campo eléctrico, y esto no fue posible realizarlo por no disponer del mismo.

El modelo consiste básicamente en establecer una correlación entre permitividad y conductividad, para lo cual se utiliza papel semiconductor y pintura de plata, simulándoños éstos, el material aislante y las partes activas respectivamente.

Para esto debe ser realizado un dibujo en corte y a escala del elemento en estudio, en la cual las partes activas deben ser pintadas con plata, y cuando existe más de un medio aislante este cambio de medio debe ser simulado de acuerdo a la relación de permitividades que existe entre éstos, utilizando dos, tres o más papeles según sea el caso.

Nuestro modelo puede observarse en la figura # 11, en la cual se ha representado únicamente la cuarta parte de la vista en corte del transformador a escala 3:1 .

El estudio consiste en dibujar las líneas equipotenciales del 10%, 20%, 30%, 40% y 50% correspondientes al cuadrante en estudio y de esta manera determinar primeramente si existe concentraciones de líneas en algún sitio y de acuerdo a la relación.

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta d}$$

Determinar valores del campo eléctrico.

Vale indicar que muchos problemas relacionados con campos eléctricos son simplificados haciendo uso de las líneas equipotenciales.

Una línea equipotencial es aquella en la cual el voltaje es el mismo en cualquier lugar de ésta, si dos puntos cualquiera de esta línea tienen el mismo potencial quiere decir que entre éstos existe una diferencia de potencial cero, lo cual implica que el campo eléctrico a lo largo de la línea tangencial a cualquier punto es cero, por lo cual el campo eléctrico debe ser siempre perpendicular a la línea equipotencial.

De acuerdo con las líneas equipotenciales obtenidas y que pueden apreciarse en la fig. #11, los valores de campo

eléctrico para los puntos indicados son:

- Punto A

$\Delta V = 10\%$

$\Delta X = 15$ mm

$$E = \frac{V}{X} = \frac{10 \text{ KV}}{0,5 \text{ cm}} = 20 \text{ KV/cm.}$$

- Punto B

$\Delta V = 10\%$

$\Delta X = 9$ mm

$$E = \frac{10 \text{ KV}}{0.3 \text{ cm}} = 33,3 \text{ KV/cm.}$$

- Punto C

$\Delta V = 10\%$

$\Delta X = 1.8$ mm

$$E = \frac{10 \text{ KV}}{0,6 \text{ cm}} \quad 16,66 \text{ KV/cm.}$$

- Punto D

$\Delta V = 10\%$

$\Delta X = 24$ mm

$$E = \frac{10 \text{ KV}}{0,8 \text{ cm}} = 12,5 \text{ KV/cm.}$$

- Punto E

$\Delta V = 10\%$

$\Delta X = 36$ mm

$$E = \frac{10 \text{ KV}}{1,2 \text{ cm}} = 8,33 \text{ KV/cm.}$$

- Punto F

$\Delta V = 10\%$

$\Delta X = 30$ mm

$$E = \frac{10 \text{ KV}}{1 \text{ cm}} = 10 \text{ KV/cm.}$$

Fig. # 11 ?

- Punto G

$\Delta V = 10\%$

$\Delta X = 33$ mm

$$E = \frac{10 \text{ KV}}{1,1 \text{ cm}} = 9,09 \text{ KV/cm.}$$

- Punto H

$\Delta V = 10\%$

$\Delta X = 37,8$ mm

$$E = \frac{10 \text{ KV}}{1,26 \text{ cm}} = 7,93 \text{ KV/cm.}$$

- Punto I

$\Delta V = 10\%$

$\Delta X = 33$ mm

$$E = \frac{10 \text{ KV}}{1,1 \text{ cm}} = 9,09 \text{ KV/cm.}$$

- Punto J

$\Delta V = 10\%$

$\Delta X = 36$ mm

$$E = \frac{10 \text{ KV}}{1,2 \text{ cm}} = 8,33 \text{ KV/cm.}$$

- Punto L

$\Delta V = 10\%$

$\Delta X = 42$ mm

$$E = \frac{10 \text{ KV}}{1,4 \text{ cm}} = 7,2 \text{ KV/cm}$$

- Punto M

$\Delta V = 10\%$

$\Delta X = 42$ mm

$$E = \frac{10 \text{ KV}}{1,4 \text{ cm}} = 7,2 \text{ KV/cm.}$$

- Punto N

$\Delta V = 10\%$

$\Delta X = 27$ mm

$$E = \frac{10 \text{ KV}}{0,9 \text{ cm}} = 11,1 \text{ KV/cm}$$

De acuerdo a la figura # 11, las líneas equipotenciales correspondientes a la forma de electrodo adoptado y a la distribución de bobinados no presentan ninguna concentración, y de acuerdo a los valores de campo eléctrico calculados se tiene que los puntos en los cuales éste es más elevado corresponden al A y B.

Vale anotar que con las formas que tenía el electrodo anteriormente se alcanzaba valores de 50 KV/cm y más, con los cuales no se podía trabajar. De acuerdo con las características del papel que se va a utilizar los valores encontrados de esfuerzos están dentro de límites permitidos.

Debe indicarse que en la realidad las líneas equipotenciales diferirán un tanto de las encontradas especialmente en las zonas, o, p, q, r debido a que el modelo esquematiza únicamente una línea que representa un potencial determinado del bobinado, pero en la realidad se tendrá un conjunto de conductores los cuales harán que las líneas equipotenciales se desplacen en sentido vertical, para empalmarse en los puntos

x, y, z, u lo cual favorecerá en lo que respecta al esfuerzo que se tiene al momento en el punto B.

7. CONTROL DE CALENTAMIENTO

El sobrecalentamiento estacionario que se presenta en un objeto homogéneo en el cual las pérdidas internas son conocidas, depende de un factor denominado factor de transferencia de calor (h), el cual nos determina la diferencia de temperatura necesaria entre el objeto y el medio ambiente para que exista una transferencia de calor.

Para el presente estudio se considerará al transformador como un objeto homogeneo, y se lo enfocará hacia la determinación del factor h el cual depende de las características y modalidades de refrigeración utilizada.

La transferencia de calor del transformador al medio ambiente se la realiza en tres formas diferentes: conducción, radiación, y convección.

La cantidad de calor transferida por conducción es mínima, debido a que las superficies del transformador solo están en contacto con el aire cuya capacidad de conducción es des-

preciable.

El factor de conducción de calor del aire con presión normal y 20° C es $\lambda = 0.025\ w/C^{o}dm$. Para transferir la cantidad de calor de 1 W/dm^2 se necesita de una diferencia de temperatura de 400° C.

La ecuación utilizada para determinar este valor es la siguiente:

$$\Delta t = \frac{P \times l}{A \times \lambda}$$

donde:

p pérdidas en (W)

Δt diferencia de temperatura entre las superficies en consideración.

l longitud del canal de conducción del calor (dm.)

A sección del canal de conducción $(dm)^2$

λ factor de conducción del aceite el factor de conducción del calor.

Para el caso del aceite el factor de conducción de calor es 6,5 veces superior al correspondiente al aire, para este caso la diferencia de temperatura necesaria sería de 62°C

Considerando que estos valores son demasiado grandes esta forma de transferencia de calor no debe ser considerada.

Radiación.

Según la ley de Stefan Boltzmann el calor desprendido por radiación por unidad de la superficie y por unidad de tiempo es:

$$Q_{rad.} = hrad \times \varepsilon \times (T_1^4 - T_2^4)$$

donde:

$hrad = 5,77 \times 10^{-10}$ W/dm^2 $^oK^4$

T_1 = temperatura absoluta del transformador

T_2 = temperatura absoluta del ambiente

ε = es un factor que depende de la calidad y color de la superficie.radiante. Para cuerpos negros $\varepsilon = 1$, para cuerpos con pintura de aluminio $\varepsilon = 0,55$

Si $T_1 - T_2$ no es muy grande se puede escribir que:

$$T_1^4 - T_2^4 = (T_1 - T_2)(T_1^3 + T_1^2 T_2 + T_1 T_2^2 + T_3^2)$$

$$(T_1 - T_2) \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right)^3$$

Reescribiendo la ecuación original se tiene que:

$$h \text{ rad.} = 19{,}6 \times 10^{-6} \quad \frac{W}{dm^2 \ {}^oK^4} \quad \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right)^3$$

En la cual: $\varepsilon = 0{,}85$

hr corresponde al factor de radiación, el cual como puede verse en la ecuación varía con la tercera potencia del valor promedio de la temperatura absoluta del transformador y ambiente.

Suponiendo que:

$T_2 = 20^o$ C $\qquad 293^o$ K

$T_1 = 60^o$ C $\qquad 333^o$ K

Y considerando además que estos valores no varían significativamente en la práctica podemos considerar a este factor como constante, siendo su valor igual a:

$$h \text{ rad} = 6 \times 10^{-2} \quad W/dm^2 \ {}^o C$$

Por lo tanto el calor transferido por radiación 1 seg. y por una superficie de 1 dm. es:

$$q_{rad} = 6 \times 10^{-2} \frac{W}{dm^2 \, {}^{o}C} (T_1 - T_2)$$

A continuación se darán algunos valores para diferentes $T_1 - T_2$.

$T_1 - T_2$	q_{rad}
40° C	2,4 w/dm^2
50° C	3 w / dm^2
75° C	4,5 w/dm^2

Convección

Es bastante difícil encontrar valores confiables para el factor de convección debido a que este depende de varios factores de difícil identificación y valoración. (características de gas ambiental, temperatura de la superficie).

De acuerdo con la naturaleza de convección la temperatura de la superficie no es la misma en todas partes, Si

el flujo de gas es natural por el efecto de chimenea el flujo es laminar, en caso de flujo por ventilación artificial el flujo es turbulento, y en los dos casos el factor de convección es totalmente diferente./

En base de experimentos, para el caso del flujo laminar y para temperaturas que ocurren en la práctica se puede aceptar el siguiente valor:

$$h_{\text{convección}} = 2{,}35 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{\gamma_{\text{aire}}}{Kg/m^3}} \sqrt[4]{\frac{\Delta t}{^oC}} \left[\frac{W}{dm^2\ ^oC}\right]$$

γ_{aire} peso específico del aire

Δt sobrecalentamiento de la superficie que entrega calor.

Si $\gamma_{\text{aire}} = 1{,}2\ Kg/m^2$ tenemos que:

Δt (^oC)	h convección ($W/dm^2\ ^oC$)
40	$6{,}5 \times 10^{-2}$
50	$6{,}9 \times 10^{-2}$
75	$7{,}6 \times 10^{-2}$

Como $q_{convección} = h_{convecc.} \times \Delta t$, tenemos que la cantidad de calor transferida por convección a través de una superficie de 1 dm^2 y en el tiempo de 1 seg.

Δt °C	$q_{convección}$ (W/dm^2)
40	2,6
50	3,45
75	5,7

De acuerdo con esto puede considerarse útil cualquier superficie que está en contacto con el flujo de aire, según las experiencias puede tomarse en cuenta superficies horizontales como por ejemplo tapas de tanques.

Como consecuencia de lo expuesto anteriormente la cantidad de calor transferida por radiación y convección debido a refrigeración natural es:

$$q_{total} = q_{radiación} + q_{convección}$$

Δt (°C)	q_{total} (W/dm^2)
40	5
50	6,45
75	10,2

Convección en el aceite

En el aceite se tiene que:

$$h \text{ convección} = 45 \sqrt[4]{\frac{\Delta t}{^{o}C}}\ 10^{-2} \qquad \left[W/dm^2\ \ ^{o}C\right]$$

Δt diferencia de temperatura entre las superficies que entrega calor y el aceite.

En la práctica Δt varía entre 10 y 20°C por lo tanto:

Δt (°C)	h convección (W/dm² °C)
10	80×10^{-2}
15	88×10^{-2}
20	95×10^{-2}

Debido a la cantidad de calor transferida por radiación es despreciable para este caso, se tiene que la cantidad de calor transferida por convección es la total y es igual a:

Δt °C	q_{total} (W/dm²
10	8
15	13,2
20	19

Dado que en un cuerpo activo determinado puede ser evaluado la cantidad de calor transferido por unidad de área la temperatura que se presenta sobre el mismo puede ser calculada.

$$\Delta t = \left(q \frac{10^2}{45} \right)^{4/5} \qquad (^oC)$$

- Caída de temperatura en la superficie del devanado de Alto Voltaje.

  Pérdidas resistivas en un devanado de alto voltaje = 32,71 W

  Area en la superficie del devanado = 1156,89 cm^2

$$\text{disipación} = \frac{32,71 \ W}{1156,89 \ cm^2} = 0,02828 \ W/cm^2$$

Y aplicando la última fórmula:

$$\Delta t = \left(\frac{10^2}{45} q \right)^{4/5} \qquad \text{donde } q = 2,828 \ W/dm^2$$

Tenemos: $\Delta t = 4,35^o \ C$

- Temperatura máxima dentro del devanado de Alto Voltaje.

Pérdidas resistivas = 32,71 W

Area media del devanado = 920,22 cm^2

$$\text{disipación} = \frac{32,71 \ W}{920,22 \ cm^2} = 0,0355 \ W/cm^2$$

$q = 3,55 \ W/dm^2$

$\Delta t = 5,219^o \ C$

Temperatura máxima en el devanado = $(33 + 5,219)^oC$ = $38,219^o \ C$

- Caída de temperatura en el devanado de bajo voltaje

  Pérdidas resistivas = 121,35 W

  Area en la superficie del devanado = 1255,149 cm^2

$$\text{disipación} = \frac{121,35 \ W}{1255,149 \ cm^2} = 0,0965 \ w/cm^2$$

$q = 9,65 \ w/dm^2$

$\Delta t = 11,61^o \ C$

- Caída de temperatura en la superficie del devanado treciario.

  Pérdidas resistivas = 84,32 W

Area en la superficie del devanado = 726,34 cm^2.

$$\text{Disipación} = \frac{84,32}{726,34\ cm^2} = 0,116\ w/cm^2$$

$$q = 11,6\ w/cm^2$$

$$\Delta t = 13,45^o\ C$$

- Caída de temperatura en la superficie del Núcleo.

  Pérdidas en el hierro = 82,29

  Area de refrigeración: consideraremos en este caso el área de mayor temperatura en el núcleo, esto es la superficie formada por el apilamiento de las láminas.

  Area de refrigeración = 2620 cm^2.

$$\text{Disipación} = \frac{82,29\ W}{2620\ cm^2} = 0,03139\ w/cm^2$$

$$q = 3,139\ w/dm^2$$

$$\Delta t = 4,73^o\ C$$

- Temperatura máxima en el núcleo

  De acuerdo al punto anterior tenemos que:

$$q = 3{,}139 \ w/dm^2$$

Para el caso de un sólido se debe considerar la siguiente fórmula:

$$\Delta t = \frac{q \times \Delta}{\lambda}$$

donde:

Δ espesor del núcleo

λ coeficiente de refrigeración $w/dm^2 \ ^oC$

Para el caso del acero $\lambda = 1{,}8 \ w/dm^2 \ ^oC$

$\Delta = 0{,}9 \ dm$

Por tanto:

$$\Delta t = \frac{3{,}13 \times 0{,}9}{1{,}8} = 1{,}5695^o \ C$$

Temperatura máxima en el núcleo $= 32 + 1{,}5695 =$

$= 33{,}5695^o \ C$

8. DISEÑO DEL TANQUE

Cuando un transformador de baja potencia de salida es sumergido en aceite se produce la circulación natural del mismo debido a su contacto con las superficies calientes de los devanados y núcleo, que provocan un flujo descendente del aceite en las cercanías de las paredes del tanque, transportando el calor hacia el lugar donde el efecto de la refrigeración del aire circundante al tanque mantenga la temperatura dentro de límites requeridos. Es conveniente dejar una cámara de aire suficiente entre la tapa y el aceite para permitir que éste comprima o dilate el aire encerrado. La superficie a ser considerada para la refrigeración es el área total vertical más la mitad del área de la tapa.

De acuerdo con lo mencionado en el estudio de sobrecalentamiento el factor de transmisión de calor considerando radiación y convección para un incremento de temperatura de $50^{o}C$ es: $q_t = 6,45\ w/dm^2$

Con lo cual y conociendo las pérdidas totales a disiparse tenemos:

$$w\ totales = 559,18\ w$$

$$S = \frac{W \text{ totales}}{q} = \frac{559,18 \text{ w}}{6,45 \ \frac{\text{w}}{\text{dm}^2}} = 8669,45 \text{ cm}^2$$

Siendo ésta, la mínima área que deba tener el tanque para que no se produzcan sobretemperaturas mayores a 50°C.

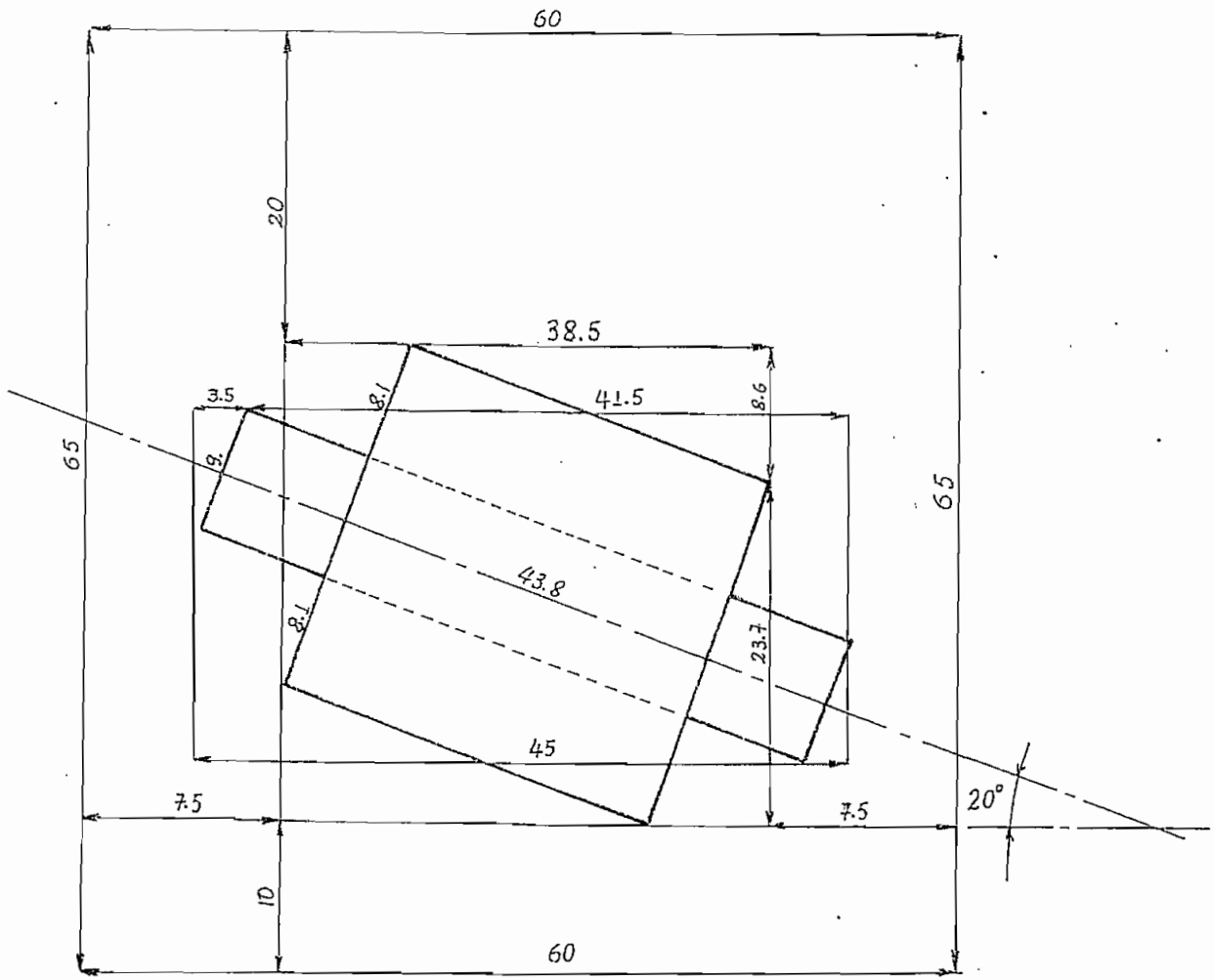
Tomando en cuenta la disposición física del conjunto núcleo devanados las dimensiones son las siguientes.

Por no haber encontrado en el mercado bushings que cumplan con las características básicas como son:

a) Voltaje nominal = 50.000 V.

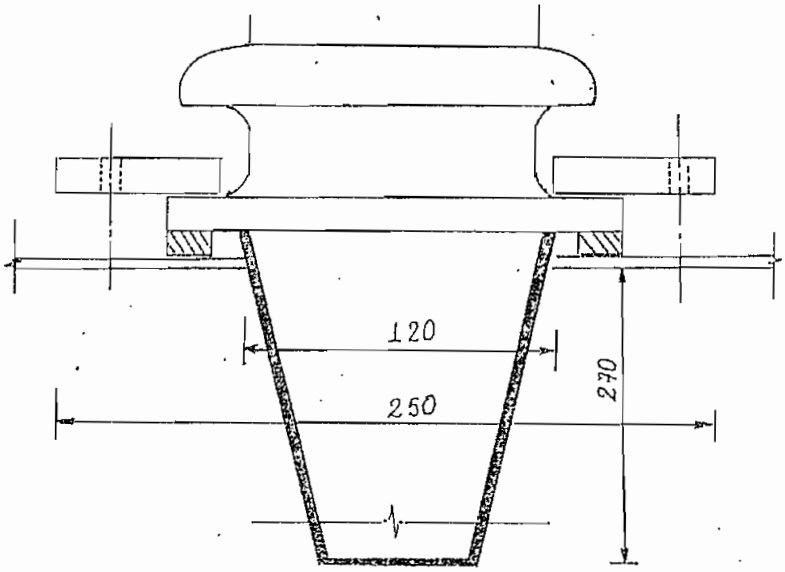
b) Para trabajar en interiores

Fue necesario imponerse las dimensiones, en base de la experiencia, las cuales se indican a continuación:



DIMENSIONES MINIMAS DEL TANQUE EN BASE DE LA UBICACION FISICA DE LA ESTRUCTURA

FIGURA # 12



Las mismas que deberán ser modificadas si es necesario en base de los datos reales, siendo el propósito de este punto dejar sentado la base del diseño del tanque.

De acuerdo con la figura # 12 tenemos que:

Altura del tanque = 65 cm.

Diámetro del tanque = 90 cm.

Se debe señalar que se ha tomado como distancia mínima entre devanados y tanque 50 mm., siendo necesario dejar en la parte inferior una distancia de 100 mm. como previsión de la capa de sedimentos que inevitablemente se forma en el fondo del tanque de transformadores sumergidos en aceite.

Los bushings en número de dos serán colocados en la

cara lateral del tanque y soportados sobre tubos en la forma que se indica en el plano correspondiente.

Debido a que el tanque trabajará a un nivel de voltaje de 150 KV. los perfiles de éste deberán ser redondeados en lo posible, para reducir al mínimo el efecto corona que puede presentarse, y deberá ser colocado sobre soportes aislantes que cumplan con el nivel de voltaje y los requerimientos mecánicos. Por no haber dispuesto de ningún tipo de información sobre estos soportes aislantes en el presente trabajo no se incluye la forma como se acoplarán tanque y soportes.

El espesor de la plancha de acero será de 3 mm. tomando en consideración para determinar este valor la presión que ejercerá el aceite sobre el tanque en el caso de una falla interna.

- Peso aproximado del tanque, incluyendo la cubierta.

Pt . Vt x densidad de la plancha

δacero = 7,8 Kg/dm^3

Vt = espesor (área lateral + área de la tapa y fondo)x acero.

Pt = 72,77 Kg.

- Determinación del volumen y peso del aceite.

Volumen del tanque hasta nivel de aceite . 318 dm^3

$$\text{Volumen del núcleo} = \frac{56,36 \text{ Kg}}{7,65 \text{ Kg/dm}^3} = 7,36 \text{ dm}^3$$

$$\text{Volumen de los devanados} = \frac{22,3 \text{ Kg}}{8,9 \text{ Kg/dm}^3} = 2,5 \text{ dm}^3$$

Volumen del aceite = 308,2 dm^3

δaceite = 0,898 Kg/dm^3

Peso aceite = 276,78 Kg.

- Peso aproximado del transformador sin incluir el peso de los bushings.

Peso núcleo = 56,36 Kg.

Peso del devanado = 22,3 Kg.

Peso del tanque = 72,77 Kg.

Peso del aceite = 276,78 Kg.

Peso total = 428,21 Kg.

Determinación del radio mínimo para que no se produzca corona:

Tomaremos como modelo para el cálculo al transformador en funcionamiento, en estas condiciones nos imponemos como distancia mínima entre tanque y conductores de cualquier circuito d= 1 m.

En base a esto y considerando un valor de esfuerzo dieléctrico de E = 20 KV/cm. Tenemos:

$$Vc = Ec \; \delta \; m \; r \; \ln \left(\frac{d}{r}\right)$$

Vc	voltaje de iniciación de corona
Ec	gradiente disruptiva del aire
δ	densidad del aire
m	factor de rugosidad
r	radio del conductor
d	distancia entre conductores

$$\delta = 0{,}386 \times \frac{b}{273 + t^{o}C}$$

$$\log 76 - \frac{h}{28336} \qquad \text{para } h = 2800 \text{ m.}$$

$b = 10$

$$\delta = 0{,}386 \times \frac{376{,}18}{272 + 20}$$

$b = 376{,}18$

$\delta = 0{,}495$

$m = 1$

$$150 \text{ KV} = 20 \frac{\text{KV}}{\text{cm}} \times 0{,}495 \times r \ln \frac{100}{r}$$

$$15{,}15 = r \ln \frac{100}{r}$$

Resolviendo la ecuación el valor de r debe ser mayor o igual a:

$r = 5{,}1$ cm.

Valor a tomar $r = 6$ cm.

C A P I T U L O IV

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

1. FABRICACION DE LOS DEVANADOS

Como se indicó en el punto correspondiente a la distribución de los bobinados, el devanado terciario es el que se colocará junto al núcleo para lo cual es necesario construir un molde de dimensiones iguales a la columna del transformador, el mismo que puede ser de madera formado por dos piezas en forma de cuña como se indica en la fig. # 13, de forma que en todos los lados conserve las dimensiones de la columna, estará sujeto por pernos accesibles que permitan una fácil maniobrabilidad.

Sobre el molde se procede a colocar barras de fibra aislante de dimensiones (270 x 9 x 9) mm. las cuales en número de 12 formarán el espacio para la circulación del aceite, éstas podrán estar repartidas en grupos de tres por cada lado cuidando de dejar el espacio suficiente para la circulación del aceite en especial en las esquinas, por experiencia anterior se recomienda que en las esquinas se coloque láminas de papel aislante de igual espesor que las barras y con la curvatura

conveniente, de modo de garantizar una separación uniforme entre devanados, sobre éstas se colocará una capa de papel de 3 mm.

El devanado terciario estará formado por dos capas de conductores aisladas entre sí por una capa de papel aislante de 1 mm., se deberá dejar un espacio de 36,7 mm. entre el brazo y devanado, sobre la segunda capa de bobinas se colocará otra capa de papel de 1 mm. únicamente con fines mecánicos.

A continuación de este devanado se colocará nuevamente las barras de fibra aislante para formar un nuevo espacio de circulación de aceite, las dimensiones de las barras serán de (270 x 5 x 4) mm. la forma de colocárlas será similar a lo indicado anteriormente, sobre estas barras se colocará una capa de papel de 2,5 mm.

Las láminas de papel que conforman estas capas deben ser pegadas con resina resistente al calor y aceite.

Sobre esta capa de papel se colocará el devanado de alta tensión el cual estará repartido en la forma que se indica en los resultados del programa.

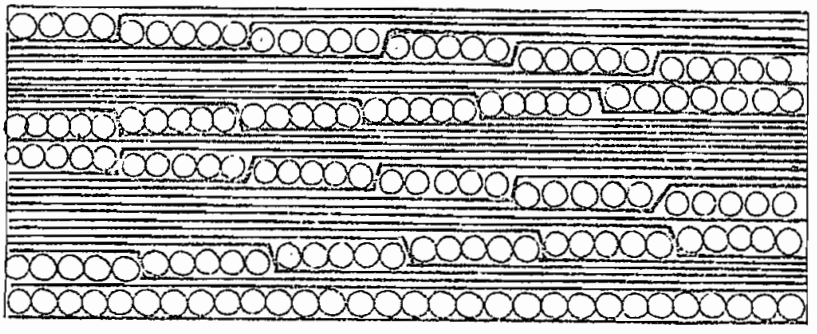
Forma de interpretación de los resultados: Si por ejemplo se ha obtenido los siguientes resultados en lo referente a las características del paquete.

Número de espiras por capa	30
Número de capas ~~por~~ de papel	12
Número de capas de bobinas	5
Número de espiras dado por la diferencia de potencial	10

Por tratarse de interpretar los resultados en lo que se refiere a la parte constructiva, no es necesario especificar más características del paquete.

ESQUEMA REPRESENTATIVO DE LA DISTRIBUCION DEL BOBINADO DE ALTA TENSION

FIGURA # 14



De acuerdo al gráfico puede darse cuenta que a medida que se incrementa un número determinado de espiras se coloca una nueva capa de papel, en esta parte debe ponerse mucho cuidado, en especial en el número de espiras de grupo por capa, debido a que la división del número total de espiras por capa por el número de grupos, el resultado no es un número exacto y se halla redondeado al número menor inmediato.

El número de grupos por capa es igual a la mitad del número de capas de papel, se indica esto ya que en los resultados del programa no se halla especificado este dato en forma explícita.

En consecuencia el producto de grupos por capa el número de espiras por grupo no corresponde al número total de espiras por capa, esta diferencia de espiras deben ser colocadas en los grupos intermedios y no en los de los extremos debido a que el esfuerzo dieléctrico que se tiene en estos puntos es elevado y no es conveniente incrementarlo más.

Se recomienda que para el :

Paquete # 1. La diferencia de espiras es de 1 por lo tanto esta espira deberá ser colocada en cualquiera de los grupos intermedios 5 o 6 si es posible.

Paquete # 2. En este paquete debe procederse en forma similar al anterior.

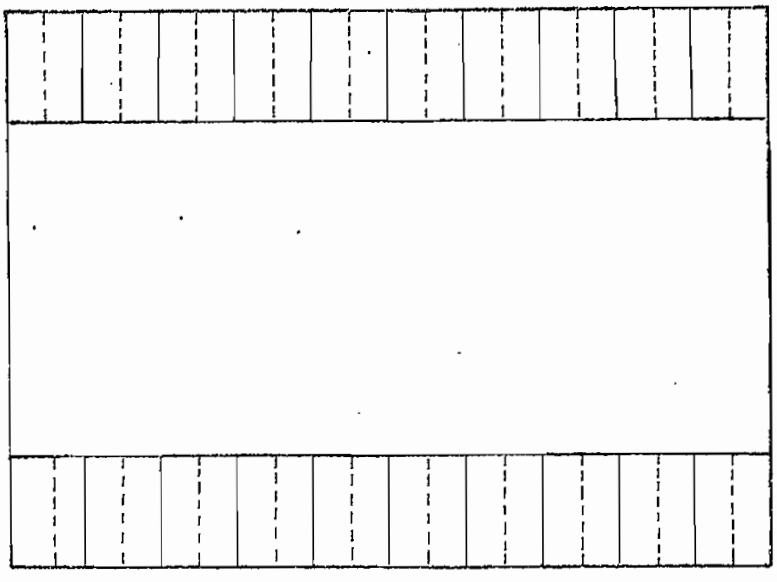
Paquete # 3. La diferencia es de tres espiras las cuales deben ser colocadas una por grupo en los grupos del medio 4-5-6 si es posible.

Paquete # 4. En este paquete debe procederse en forma similar al paquete 1 y 2.

Paquete # 5. En este paquete se tiene una diferencia de 4 espiras las cuales deben ser colocadas en lo posible en los grupos 3-4-5-6.

En éste debe tenerse cuidado en la última capa ya que ésta tendrá únicamente 192 espiras por lo tanto dos grupos en la capa.

Para proceder a doblar el papel este deberá ser cortado como se indica



A continuación de este devanado se colocará el de baja tensión el mismo que tendrá unión galvánica con el devanado de alta, en otras palabras este devanado trabajará al nivel de voltaje de alta tensión.

El mismo estará conformado por tres capas de bobinas las cuales estarán aisladas entre sí por una capa de papel de 1 mm., sobre este devanado se colocará una superficie equipotencial de la cual se hablará más adelante.

Las características generales de los devandos y sus dimensiones pueden aprecirse en los planos # 3-4.

Para evitar desplazamientos axiales de los bibinados se colocará cuñas de papel en las esquinas de la ventana.

2. FABRICACION DEL TANQUE Y COLOCACION DEL NUCLEO EN EL MISMO

El tanque es de acero del espesor indicado en el punto correspondiente al diseño.

Los tubos sobre los cuales se asientan los bushings deberán ser recubiertos interiormente por otro de material aislante, el mismo que deberá entrar en el tanque recubriendo el terminal con el propósito de evitar disrupción.

En la construcción se debe tratar de conseguir las curvaturas indicadas anteriormente, si no es posible conseguirlo de una sola pieza se deberá proceder a soldar las piezas necesarias para conseguir esta curvatura.

En las paredes del tanque se deben practicar los orificios para la unión tanque-tubos soportes de los bushings, las empaquetaduras podrán ser de acrilo nitrilo.

Todas las características: dimensiones y forma pue-

den verse en el plano #5.

La sujeción de la estructura del transformador al tanque, debe garantizar la imposibilidad de producir movimientos verticales, giratorios u oscilatorios que pueden afectar las conexiones de los devanados en los terminales del tanque.

Esta estructura se colocará en forma inclinada para permitir una mejor circulación del aceite por los espacios destinados para este fin, el ángulo de inclinación será de 20° con respecto al plano horizontal para permitir esta ubicación se colocarán pletinas cuyas dimensiones se indican en el plano # 7 y la forma en que la estructura quedará en el tanque puede verse en los planos # 6.

La sujeción será por medio de pernos para lo cual se dispondrán pletinas en el núcleo las cuales se colocarán en la parte correspondiente a los pernos de sujeción de las láminas. Todas estas pletinas deberán ser soldadas al tanque y núcleo respectivamente.

En lo que se refiere a la sujeción de la tapa al tanque, ésta se la hará por medio de un solo perno cuya cabeza debe ser redondeada para evitar corona, y éste se sujetará a una pieza colocada en el tanque para este propósito, la misma

que estará sujeta al tanque por medio de dos pletinas soldadas al mismo y para sujetar se utilizará pasadores como puede verse en el plano # 7.

3. CONEXIONES Y TERMINALES DE SALIDA

Las conexiones que se realizarán pueden verse en el siguiente diagrama:

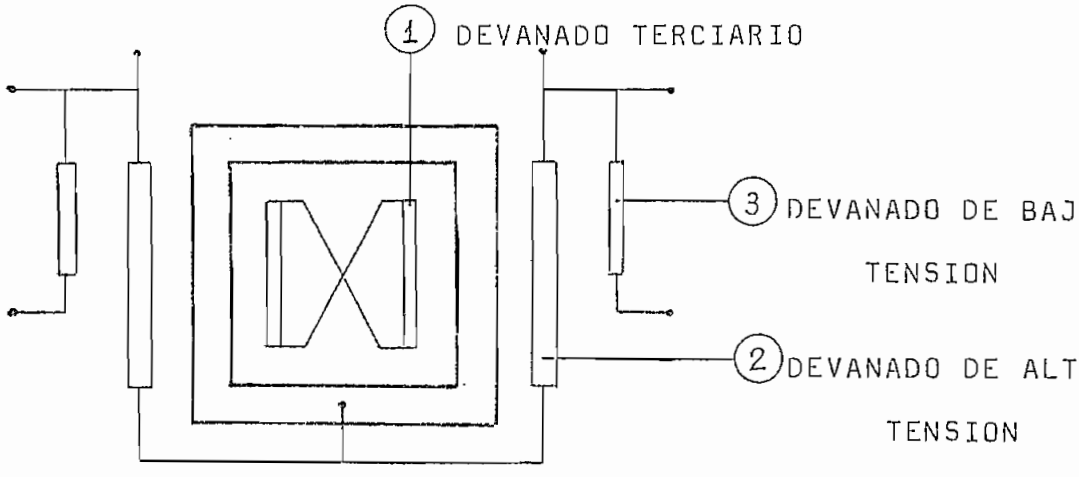


FIGURA Nº 16

El objetivo de esta disposición es eliminar la excitación desequilibrada de lo cual se habló anteriormente.

La imposibilidad de usar conectores por falta de equipo, hace que por experiencia anterior se recomiende que las mismas se las realicen introduciendo los terminales en tubos de cobre y rellenándolos de suelda.

Para la salida de los terminales de los devanados correspondientes se la realizará a través de tubos aislantes.

Una superficie equipotencial será colocada sobre el devanado de baja tensión con el propósito de conseguir una mejor distribución del campo eléctrico la forma del mismo y sus dimensiones pueden verse en la fig. # 15 el potencial de esta superficie será el correspondiente al devanado de alta tensión de la columna en la cual se halle ubicado, y podrá ser construida en tres partes: un cilindro y dos tronco de conos y luego se procederá a soldarlas.

4. SECADO DEL TRANSFORMADOR Y LLENADO DE ACEITE EN EL TANQUE

Aún cuando el papel esté tratado o impregnado, puede absorver humedad si el aire o el aceite circundante lo contiene.

Se ha encontrado que pequeñas cantidades de humedad

en papel ~~dentro~~ bajo aceite del papel acelerar la deterioración a temperaturas elevadas.

Lo mencionado anteriormente pone de manifiesto la importancia de eliminar la humedad del papel y del cartón en baño de aceite. El secado del papel depende de relativamente pocos factores: temperatura, tiempo, espesor de las piezas aislantes y la tensión de vapor de la humedad de la atmósfera circundante. El secado puede efectuarse mediante varias combinaciones diferentes de estos factores.

a) Temperatura

La temperatura debe ser tan alta como sea posible, sin que se llegue a la ruptura química del aislamiento. Si se controlan con presición el tiempo y la temperatura, como es posible en una fábrica, puede usarse una temperatura de hasta 120°C para aislamiento seco nuevo. El papel impregnado en aceite no debe exceder de 90°C. Puesto que la superficie aceitosa del aislamiento impregnado en aceite se oxida con cierta rapidez, los productos de la oxidación pueden elevar permanentemente el factor de potencia del aislamiento, si éste se calienta demasiado.

La fuente primaria de calor puede ser vapor, gas, o calentadores eléctricos. El calor puede ser transmitido al aislamiento calentando el aceite, en un transformador de baño de aceite, haciendo circular aire caliente por la cuba, después de retirar el aceite, calentando separadamente las bobinas en un horno, o haciendo circular una corriente por los devanados.

- Calentamiento mediante circulación de aire por la cuba.

Es necesario montar conductos e inyectores adecuados para inyectar aire al transformador por la parte inferior o superior. Con la superficie de calefacción a unos 150°C, unos 200 pies de aire producirán a una temperatura del aire de unos 110°C. Es particularmente efectivo el aire comprimido de un compresor común, si es posible hacerlo pasar por una trampa antes de calentar, para eliminar el agua que generalmente está presente en las líneas de aire comprimido. Los calentadores eléctricos son generalmente los más convenientes, pero es posible usar serpentines o calentadores de gas, si se tiene cuidado de evitar que penetren en la corriente de aire fugas de vapor o productos de la combustión.

- Calentamiento haciendo circular una corriente en los devanados.

Este método se aplica con aceite en el tanque. Uno de los devanados se pone en cortocircuito y se hace circular una corriente de plena carga en el otro devanado. Generalmente no es seguro usar más del 125% de la corriente de plena carga, si han de evitarse puntos calientes en el devanado.

- Calentamiento haciendo circular aceite caliente.

El método de calentamiento haciendo circular una corriente tiene la desventaja de que todo el aceite deber ser desaguado, antes de que el transformador puede seguir siendo secado mediante la aplicación de vacío, lo que a su vez significa que debe haber disponibles medios de almacenamiento del aceite. Esto puede evitarse calentando el aceite en un compartimiento separado, haciendo entrar el aceite caliente por la parte superior del núcleo y las bobinas, extrayéndolo por la parte inferior y de allí bombeándolo de regreso al calentador Debe suministrarse aproximadamente la misma cantidad de calor (1 vatio por pulgada cuadrada de superficie expuesta, para una elevación de temperatura de 100°C).

El calor acelerará la eliminación de la humedad, pero el solo calor no es suficiente. Deben suministrarse medios para reducir la tensión parcial de vapor de la humedad. Esto

puede hacerse aplicando vacío o secando el aire, si se usa aire para calefacción. El secado del aire puede hacerse comprimiéndolo, enfriándolo y eliminando con trampa la humedad condensada, o haciendo circular el aire por un secador.

- Llenando al vacío de aceite en el transformador.

El principal objetivo de llenar transformadores al vacío es el de eliminar el aire del aislamiento. Las pequeñas burbujas de aire indiscutiblemente tienen mucho menos resistencia dieléctrica que el aceite e inevitablemente provocan una falla, si están situadas en un punto de alta tensión. Son causa de especial dificultad dentro de las vueltas y capas de una bobina donde rápidamente se alojan. Las burbujas situadas en las vueltas y las capas pueden no ser descubiertas por pruebas de 60 ciclos, a causa de que el esfuerzo de vuelta y de capa a capa puede no ser suficientemente alto para causar ruptura, pero pueden fallar durante la prueba de impulso.

Un buen vacío es esencial, si ha de ser efectivo el llenado al vacío. Si la presión residual es de 7,5 mm. o un centésimo de presión atmosférica, cualesquiera burbujas remanentes de aire contendrán un centésimo del aire que contendrían a la presión atmosférica.

Cuando se retira el vacío, se contraen a un centésimo de su volumen al vacío, pero, sorprendentemente, un centésimo de su volumen representa una reducción en su diámetro hasta quedar en un quinto del anterior.

En consecuencia, aún con una presión residual de 7,5 mm., las burbujas remanentes pueden tener un tamaño apreciable. El vacío retira una gran cantidad de aire del aceite, a medida que entra en la cuba, de manera que ésta disuelve más rápidamente las pequeñas burbujas de aire. La experiencia indica que un vacío de 7,5 mm., es enteramente satisfactoria para el llenado de aceite.

5. CONCLUSIONES FINALES

Luego de haber concluido con el diseño completo a excepción hecha del tanque por no haber contado con la información suficiente en lo que se refiere a catálogos, y la no existencia en el mercado de los bushings y soportes aislantes, es conveniente reflexionar sobre el trabajo realizado.

Se debe indicar que inicialmente se comenzó trabajando como una tesis conjunta la cual constaba de diseño y construcción del transformador y, por razones de fuerza mayor no

fue posible continuar con este lineamiento y resultó necesario limitar esta tesis únicamente al diseño por considerar que todo el trabajo resultaba demasiado extenso para una sola tesis.

Una limitación muy grande constituyó la existencia de un núcleo construido anteriormente, aunque si bien éste tenía el mismo propósito las dimensiones de la ventana llegaron a causar problemas en lo referente al aislamiento, pero la dificultad de conseguir en el mercado acero de buena calidad nos llevó a utilizar el núcleo existente, a pesar de conocer de partida las bajas características magnéticas, lo cual implicaba que por trabajar con una densidad de flujo demasiada baja el número de espiras sea elevado en lo que al devanado de alta tensión se refiere, si tomamos en consideración la sección del conductor a ser utilizada en este devanado y el alto múmero de espiras la construcción presentará un grado de dificultad muy alto.

En este trabajo puede verse la necesidad de un programa digital que permita optimizar todos los cálculos realizados para determinar el diseño, que si bien al ser realizados manualmente se han determinado valores que están dentro de rangos permisibles, no necesariamente se han determinado los valores óptimos. Siendo ésta la principal razón que llevó a imple-

mentar un pequeño programa que determina la distribución del devanado de alta tensión, programa en el cual se pone de manifiesto la utilidad de una herramienta de esta naturaleza.

Uno de los mayores problemas que se tuvo que afrontar constituyó el aislamiento, siendo posible pensar que un aumento en las dimensiones de las capas aislantes eliminaría este problema, si bien se disminuyen los esfuerzos se podría llegar a que esto sea causa de serios problemas en los valores de reactancia capacitiva e inductiva.

En lo que a la forma de la superficie equipotencial se refiere se puede pensar que no es la más adecuada por la dificultad de construcción, pero si tomamos en cuenta que ésta fue la única con la cual el campo no presentaba concentraciones y como consecuencia corona no quedó otra alternativa que adoptar esta forma.

Finalizado el trabajo se vio la necesidad de contar con otros espacios para circulación de aceite, los cuales se hallan indicados únicamente en los planos correspondientes a la distribución de los bobinados, los mismos que fueron colocados a cada lado del tercer paquete del devanado de alta tensión.

OQUÍ

R E F E R E N C I A S

1. ALVAREZ RAMIRO
Diseño y Construcción de un transformador monofásico de distribución.
Tesis, Julio, 1978.

2. BEAN RICHARD
Transformadores para la industria eléctrica, Ediciones Continental, 1963.

3. CAMARENA PEDRO
Transformadores eléctricos industriales, Edición Continental, 1963.

4. CORRALES JUAN MARTIN
Cálculo Industrial de máquinas eléctricas, Ediciones Danae, 1968.
Tomos I y II.

5. CORRALES JUAN MARTIN
Teoría, Cálculo y Construcción de Transformadores, La Escuela del Técnico Electricista, Editorial Labor.

6. HARPER ENRIQUEZ
Técnica de las Altas Tensiones, Jimuso, 1968, Tomo II

7. JORDAN EDWARD
Electromagnetic waves and radiating systems, Prentice hall electrical engineering series.

8. KRAUS JOHN
Electromagnetismo, Editorial Ateneo, 1960

9. KNOWLTON A
Manual Standard del Ingeniero Electricista, Editorial Labor, 1967

10. LANGSDORF A.
Teoría de las Máquinas de corriente alterna, Ediciones Rebosan, 1977.

11. RODRIGUEZ ROQUE
Cálculo y diseño de un transformador monofásico de distribución, Tesis, Marzo, 1976.

12. ROSSLYN
Transformadores, 1952

13. ROTH ARNOLD
Técnica de la Alta Tensión, Editorial Labor, 1966.

14. SAY M. G.
The perfomance and Design of Alternating current Transformers
Mc. Graw - Hill, 1968.

15. SECHERON
Bulletin, Sumary Nº 31, 1962.

16. SIEMENS (BY RICHARD ELSNER)
The new Extra-hight-tensión test-plant, 1954

17. SINGER FRANCISCO
Transformadores, Editorial hispano Americana.

18. STILL AND SISKIND
Elements of electrical machine design, Mc Graw-Hill International Student Edition.

19. VAN NVYS
Interleaved Hight-Voltage Transformers evindings, Westinghouse Electrical Corporation, IEEE, Pas -97, Nº 5, Sep/Oct. 1978.

20. WESTING HOUSE

Maintenance Hints, Westing house electrical corporation

21. WESTING HOUSE

Transmission and Distribution Equipment digest, Catalog 50.000, Septiembre 1978.

22. Copiados del Seminario de diseño de máquinas eléctricas dictado por el Dr. LAJOS BAJZA.

A P E N D I C E A

PROGRAMA DIGITAL PARA EL CALCULO DE LA DISTRIBUCION DE LOS BOBINADOS DEL LADO DE ALTA TENSION DE UN TRANSFORMADOR DE PRUEBAS, Y LOS RESULTADOS CORRESPONDIENTES.

```
DOS FORTRAN IV 360N-FO-479 7-8

 OPTIONS IN EFFECT

 LIST   MAP

 NOSOURCE

DOS FORTRAN IV 360N-FO-479 7-8          MAINDRV          DATE   06/07/73      TIME    08.00.22      PAGE 0001

                C      DIMENSION  DEVALLOS
0001                   DIMENSION DS(10),DELT(10),D(S(10),NEC(10),L(10),V(10),NCP(10),NCPP
                      *(10),FAC(10),NF(10),DDPP(10),SCV(20),DV(10),DA(20),ENA(20)
0002                   DIMENSION NCB(10),R(10),DVP(20),ENP(20)
0003                   REAL L,LD,LT
0004                   REAL(1,33)VS,CPP,DIAM,SUM,LT
0005              35   FORMAT(5X,F6.2,F6.2,F6.4,F6.2,F6.2)
0006                   READ(1,2)(DELT(J),J=1,10)
0007                   READ(1,2)(DELT(J),J=1,10)
0008                   READ(1,2)(D(S(J),J=1,10)
0009              43   FORMAT(10F8.4)
0010                   WRITE(2,55)
0011              55   FORMAT(1H1,/,41X,'PROGRAMA DIGITAL PARA EL CALCULO DE LA',/,41X,'
                      DISTRIBUCION DE LOS DEVANADOS DEL LADO',/,41X,'DE ALTA TENSION DE
                      C UN TRANSFORMADOR DE',/,51X,'PRUEBAS DE 130 KV.',////)
                C     C ENTRAMOS A TOMAR DIFERENTES VALORES DE DISTANCIA DE SEGURIDAD
0012                   DO 50 J=1,1
0013                   DIAM=.3
0014                   VP=100.
0015                   DVA=DS(J)
0016                   WRITE(2,99)
0017              99   FORMAT(//////)
0018                   WRITE(2,44)DS(J)
0019              44   FORMAT(1X,10X,'DISTANCIA DE SEGURIDAD=',F6.2)
                C     C CALCULAMOS LA DISTANCIA DISPONIBLE
0021                   LD=LT-2.*DS(J)
                C     C HACEMOS VARIAR NUMERO DE PAQUETES
0022                   DO 40 K=1,10
0023                   N(K)=DS(J)
                C     C LIMITE DEL NUMERO DE ITERACIONES
0024                   DO 30 I=1,5
                C     C CALCULAMOS LA LONGITUD DISPONIBLE DEL PAQUETE
0025                   L(K)=LD-2.*(DELT(I)+D(S(K)))
                C     C CALCULAMOS EL NUMERO DE ESPIRAS POR CAPA
0026                   NEC(K)=L(K)/DIAM
                C     C CALCULAMOS EL VOLTAJE POR CAPA
0027                   V(K)=NEC(K)*VS
                C     C CALCULAMOS EL NUMERO DE CAPAS DE PAPEL NECESARIAS PARA SATISFACER
                C     C LA MAXIMA DIFERENCIA DE POTENCIAL ENTRE DOS CAPAS
0028                   NCP(K)=V(K)*2.1/DDP
                C     C  C ASIGNAMOS EL VALOR DE CAPAS DE PAPEL
0029                   NCP(K)=NCP(K)/2
0030                   NCPP(K)=NCP(K)
0031                   IF(NCPP(K).EQ.NCPP(K))GO TO 20
0032              20   NCPP(K)=NCP(K)+1
0033                   NCP(K)=NCP(K)+1
0034              30   CONTINUE
                C     C CALCULAMOS EL NUMERO DE ESPIRAS NECESARIAS PARA CUMPLIR CON LA DI-
                C     C STANCIA DE SEGURIDAD DADA POR EL NUMERO DE CAPAS DE PAPEL
0035              15   DDPP(K)=(2.*V(K))/NCP(K)
```

```
      [illegible]
C     CALCULAMOS EL NUMERO DE CAPAS DE BOBINAS NECESARIAS PARA SATISFA -
C     CER EL CIERTO VALOR DE VOLTAJE PRESTABLECIDO DEL PAQUETE
      IF([illegible].GT.[illegible]) GO TO 23
      NCP(K)=VP/V(K)
      WRITE(6,[illegible])
      GO TO 61
   23 WRITE(6,[illegible])
      NCP(K)=VP/V(K)
   61 NPC(K)=NCP(K)+1
      NC=NCP(K)
C     C CALCULAMOS UN NUEVO VALOR DE DELTA DE ACUERDO A LAS CARACTERISTI -
C     C CAS FISICAS DEL PAQUETE
      WRITE(6,[illegible])
      WRITE(6,[illegible])
      WRITE(6,[illegible])
      DELT(K)=(0.1*NCP(K)*RAD(K))+0.1
      IF(DELT(K).EQ.DELT(1))GO TO 25
   30 CONTINUE
C     C CALCULAMOS EL RADIO DEL PAQUETE
   25 R(K)=DI+NCP(K)*DIAM+DELTA
      WRITE(6,[illegible])
C     CALCULAMOS LA DISTANCIA VERTICAL ENTRE DEVANADO Y NUCLEO
      DV(K)=DV(K)+DELTA+DIS(K)
      DV(K)=DV(K)
   27 WRITE(6,76)K,L(K),NPC(K),V(K),NCP(K),NC,DIS(K),DELTA,R(K),DV(K),NF
      [illegible]
   76 FORMAT(////,1X,13X,'PAQUETE #',I2,//,10X,'LONGITUD DEL PAQUETE =',
     *[illegible],1X,'NUMERO DE BOBINAS POR CAPA=',I4,//,13X,'VOLTAJE
     * POR CAPA=',F8.2,'V',//,10X,'NUMERO DE CAPAS DE PAPEL=',I3,//,10X,
```

```
      [illegible]
      *NUMERO DE CAPAS DE BOBINAS=',I2,//,10X,'ESPESOR DEL DISCO=',F4.2,
      *'MM',//,10X,'ESPESOR DEL PAPEL=',F5.2,'MM',//,10X,'RADIO DEL NUCLEO
      *=',F4.2,'MM',//,10X,'DISTANCIA VERTICAL =',F6.2,'MM',//,10X,'NU
      *MERO DE BOBINAS DADO POR LA DIFERENCIA DE POTENCIAL =',I3,/////)
C     C CALCULAMOS LAS CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE LAS CAPAS TENIENDO CO
C     C MO LIMITE DE CAPAS POR PAQUETE EL ESFUERZO TANGENCIAL
      DO 133 N=1,NC
      SCV(N)=SCV(N)+V(K)
      WRITE(6,[illegible])
      WRITE(6,[illegible])
      DVP(N)=DV(K)-DV(N)
      PDA(N)=2.*SCV(N)/(100.*(2.*DA(K)+DVP(K)))
      WRITE(6,[illegible])
      IF(DVP.GE.[illegible])GO TO 130
   13 WRITE(6,[illegible])
  130 WRITE(6,[illegible])
   13 FORMAT(///,1X,10X,'CAPA #',5X,'SUMATORIO DEL',5X,'ESPESOR DEL',5X,'E
      *SPESOR DEL NUCLEO',5X,'ESPESOR DEL',5X,'ESFUERZO NORMAL',/,20X,'VOLTAJ
      *E',9X,'ACEITE',8X,'DEL ACEITE',10X,'PAPEL',11X,'DEL PAPEL',/,27X,'
      *(V)',12X,'(MM)',11X,'(KV/CM)',12X,'(MM)',13X,'(KV/CM)',//)
      DO 33 I=1,NC
   33 WRITE(6,10)I,SCV(I),DA(K),ENA(I),DVP(K),ENP(I)
   10 FORMAT(/,1X,13X,I3,9X,F8.2,9X,F5.2,12X,F8.2,13X,F5.2,13X,F6.2)
      GO TO 50
   61 WRITE(6,[illegible])
   50 CONTINUE
      STOP
      END
```

VOLTAJE POR CAPA= 1250.80V

NUMERO DE CAPAS DE PAPEL= 18

NUMERO DE CAPAS DE BOBINAS= 9

ESPESOR DEL DISCO=1.30MM

ESPESOR DEL PAPEL= 7.30MM

RADIO DEL PAQUETE = 93.76MM

DISTANCIA VERTICAL = 28.40MM

NUMERO DE ESPIRAS DADO POR LA DIFERENCIA DE POTENCIAL = 90

CAPA #	SUMATORIO DE VOLTAJE (V)	ESPESOR DE ACEITE (MM)	ESFUERZO NORMAL DEL ACEITE (KV/CM)	ESPESOR DE PAPEL (MM)	ESFUERZO NORMAL DEL PAPEL (KV/CM)
1	12011.99	10.00	6.36	18.40	3.14
2	13260.79	10.00	6.91	18.40	3.45
3	14509.58	10.00	7.56	18.40	3.78
4	15758.38	10.00	8.21	18.40	4.10
5	17007.18	10.00	8.85	18.40	4.43
6	18255.97	10.00	9.51	18.40	4.75
7	19504.77	10.00	10.16	18.40	5.08
8	20753.57	10.00	10.81	18.40	5.40
9	22002.36	10.00	11.46	18.40	5.73

PAQUETE # 3

LONGITUD DEL PAQUETE =196.60MM.

NUMERO DE ESPIRAS POR CAPA= 800

VOLTAJE POR CAPA= 1150.80V

NUMERO DE CAPAS DE PAPEL= 18

NUMERO DE CAPAS DE BOBINAS= 9

ESPESOR DEL DISCO=1.30MM

ESPESOR DEL PAPEL= 7.30MM

RADIO DEL PAQUETE = 93.21MM

DISTANCIA VERTICAL = 26.70MM

NUMERO DE ESPIRAS DADO POR LA DIFERENCIA DE POTENCIAL = 91

CAPA #	SUMATORIO DE VOLTAJE (V)	ESPESOR DE ACEITE (MM)	ESFUERZO NORMAL DEL ACEITE (KV/CM)	ESPESOR DE PAPEL (MM)	ESFUERZO NORMAL DEL PAPEL (KV/CM)
1	23153.16	10.00	9.69	26.70	4.84
2	24304.96	10.00	10.41	26.70	5.20
3	25454.75	10.00	10.93	26.70	5.45

89390

5	27[illegible]6.35	10.00	11.[illegible]	[illegible]	[illegible]
6	24807.14	10.00	12.39	25.70	6.19
7	30067.94	10.00	12.97	26.70	6.44
8	31208.74	10.00	13.37	26.72	6.52
9	33365.64	10.00	13.96	[illegible].70	[illegible]

PAQUETE # 4

LONGITUD DEL PAQUETE =180.20MM.

NUMERO DE ESPIRAS POR CAPA= 753

VOLTAJE POR CAPA= 1034.20V

NUMERO DE CAPAS DE PAPEL= 16

NUMERO DE CAPAS DE BOBINAS=10

ESPESOR DEL DISCO=1.00MM

ESPESOR DEL PAPEL= 2.70MM

RADIO DEL PAQUETE =102.90MM

DISTANCIA VERTICAL = 85.00MM

NUMERO DE ESPIRAS DADO POR LA DIFERENCIA DE POTENCIAL = 94

CAPA	FUERZA DE ACEITE (V)	ESPESOR DE ACEITE (MM)	ESFUERZO NORMAL DEL ACEITE (KV/CM)	ESPESOR DE PAPEL (MM)	ESFUERZO NORMAL DEL PAPEL (KV/CM)
1	33413.73	10.00	12.15	35.00	5.[illegible]
2	34467.53	10.00	12.53	35.00	5.[illegible]
3	3[illegible].13	10.00	12.[illegible]	35.00	5.46
4	36576.33	10.00	13.30	35.00	5.65
5	37630.53	10.00	13.68	35.00	5.[illegible]
6	[illegible].73	10.00	14.07	35.00	5.[illegible]
7	39730.53	10.00	14.45	35.00	5.[illegible]
8	40793.13	10.00	14.83	35.00	5.92
9	41847.33	10.00	15.23	35.00	6.61
10	42901.53	10.00	15.[illegible]	35.00	6.[illegible]

PAQUETE # 5

LONGITUD DEL PAQUETE =166.60MM.

NUMERO DE ESPIRAS POR CAPA= 657

VOLTAJE POR CAPA= 975.60V

NUMERO DE CAPAS DE PAPEL= 14

NUMERO DE CAPAS DE BOBINAS= 8

ESPESOR DEL DISCO=1.00MM

ESPESOR DEL PAPEL= 5.70MM

RADIO DEL PAQUETE =110.52MM

DISTANCIA VERTICAL = 51.70MM

NUMERO DE ESPIRAS DADO POR LA DIFERENCIA DE POTENCIAL = 10

CAPA #	SUMATORIO DE VOLTAJE (V)	ESPESOR DE ACEITE (MM)	ESFUERZO NORMAL DEL ACEITE (KV/CM)	ESPESOR DE CAPA (MM)	ESFUERZO NORMAL DEL PAPEL (KV/CM)
1	43477.32	10.00	14.22	41.70	7.11
2	44053.12	10.00	14.34	41.70	7.17
3	45828.92	10.00	14.86	41.70	7.43
4	46804.71	10.00	15.17	41.70	7.59
5	47780.51	10.00	15.49	41.70	7.74
6	48756.31	10.00	15.80	41.70	7.90
7	49732.11	10.00	16.12	41.70	8.06
8	50707.90	10.00	16.44	41.70	8.22