



10
27-2017

UNIVERSIDAD PANAMERICANA

ESCUELA DE INGENIERIA
CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA U.N.A.M.

**PROGRAMA DE COMPUTO EN LENGUAJE PASCAL PARA
EL DISEÑO ELECTRICO DEL TRANSFORMADOR
TRIFASICO DE POTENCIA DE
18/24/30 MVA. 115-13.8 KV**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA AREA MECANICA

P R E S E N T A N:

LUIS ALFREDO GONZALEZ PIÑA

JOSE GABRIEL E. CASTILLO BARRERA

MEXICO, D. F.

TEJIS CON
FALLA DE ORIGEN

1990



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

CAPITULO I.- INTRODUCCION.	1
CAPITULO II.- TEORIA Y ASPECTOS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA ENFOCADOS AL DISEÑO.	
2.1.-DEFINICION DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA.	3
2.2.-CLASIFICACION DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.	3
2.3.-PARTES PRINCIPALES.	5
2.4.-PROPIEDADES MAGNETICAS DE LOS MATERIALES.	8
2.5.-MATERIALES MAGNETICOS PARA TRANSFORMADORES.	17
2.6.-MATERIALES AISLANTES.	20
2.7.-PAPELES PARA USO ELECTRICO.	21
2.8.-RESISTENCIA AL CALOR DEL PAPEL.	22
2.9.-ACEITE PARA TRANSFORMADORES.	23
2.9.1.-ENVEJECIMIENTO.	24
2.10.-MATERIALES CONDUCTORES.	26
2.10.1.-COMPARACION DE PROPIEDADES FISICAS ENTRE ALUMINIO Y COBRE.	28
CAPITULO III.-NUCLEOS Y BOBINAS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.	
3.1.-NUCLEO. GENERALIDADES.	30
3.2.-TIPOS DE NUCLEOS.	30
3.3.-ENLACE DE LAMINACIONES.	34

3.4.-SUJECION O AFIANZAMIENTO.	36
3.5.-BOBINAS O DEVANADOS.	37
3.6.-AISLAMIENTOS.	39
3.7.-TIPOS DE DEVANADOS.	39

CAPITULO IV.- METODO TRADICIONAL DE DISEÑO ELECTRICO DEL TRANSFORMADOR.

4.1.-METODO ITERATIVO O DE AJUSTES SUCESIVOS.	42
4.2.-CALCULO DE VOLTAJES Y CORRIENTES.	43
4.3.-CALCULO DEL NUMERO DE ESPIRAS EN LOS DEVANADOS. .	46
4.4.-CALCULO DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL NUCLEO. ...	48
4.5.-CALCULO DE LAS DIMENSIONES DE LOS DEVANADOS.	53
4.5.1.-CALCULO DE LA SECCION TRANSVERSAL DE CONDUCTORES.	56
4.5.2.-CALCULO DE LAS DIMENSIONES AXIALES.	60
4.5.3.-CALCULO DE LAS DIMENSIONES RADIALES.	62
4.6.-SELECCION DE AISLAMIENTOS MAYORES EN EL CALCULO RADIAL DE LOS DEVANADOS.	63
4.7.-CALCULO DE LAS DIMENSIONES DEL NUCLEO.	68
4.8.-CALCULO DE LA LONGITUD DE LOS CONDUCTORES.	68
4.9.-CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LOS CONDUCTORES. ...	69
4.10.-CALCULO DEL PESO DE LOS CONDUCTORES.	70
4.11.-CALCULO DE LAS PERDIDAS DE EXCITACION.	71
4.12.-CALCULO DE LAS PERDIDAS DE CARGA.	74
4.13.-CALCULO DE LA CORRIENTE DE EXCITACION.	78

4.14. -CALCULO DE LA RESISTENCIA EQUIVALENTE EXPRESADA EN POR CIENTO Y EN POR UNIDAD.	80
4.15. -CALCULO DE LA REACTANCIA EXPRESADA EN POR CIENTO.	81
4.16. -CALCULO DE LA IMPEDANCIA.	82
4.17. -CALCULO DE LA EFICIENCIA.	83
4.18. -CALCULO DE LA REGULACION.	84

**CAPITULO V.-CONSIDERACIONES DE CORTO CIRCUITO EN EL
DISEÑO ELECTRICO DE TRANSFORMADORES.**

5.1. -GENERALIDADES.	85
5.2. -CALCULO DE LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO.	86
5.3. -ESFUERZOS ELECTRODINAMICOS DE CORTO CIRCUITO EN EL TRANSFORMADOR.	90
5.3.1. -CALCULO DE LOS ESFUERZOS RADIALES.	90
5.3.2. -CALCULO DE LOS ESFUERZOS AXIALES.	94

**CAPITULO VI.-CONSIDERACIONES DE OPTIMIZACION EN EL
DISEÑO ELECTRICO DE TRANSFORMADORES.**

6.1. -RELACION OPTIMA ENTRE EL VOLT/ESPIRA Y LA SECCION TRANSVERSAL DEL NUCLEO.	96
6.2. -EFECTO DE LAS PERDIDAS Y LA IMPEDANCIA EN LA ECONOMIA DEL TRANSFORMADOR.	
6.2.1. -EFECTO DE LAS PERDIDAS EN VACIO.	98
6.2.2. -EFECTO DE LAS PERDIDAS DE CARGA.	99
6.2.3. -EFECTO DE LA IMPEDANCIA.	101

CAPITULO VII.-IMPLEMENTACION DEL METODO TRADICIONAL DE	
DISEÑO ELECTRICO DEL TRANSFORMADOR POR COMPUTADORA.	
7.1. -PROCEDIMIENTO NUM. 1: CARACTERISTICAS DEL TRANSFOR-	
MADOR, RESTRICCIONES Y PARAMETROS INICIALES.	105
7.2. -PROCEDIMIENTO NUM. 2: CALCULO DE VOLTAJES Y	
CORPIENTES POR BOBINA.	107
7.3. -PROCEDIMIENTO NUM. 3: CALCULO DE DISTANCIAS	
DIELECTRICAS EN BOBINAS.	107
7.4. -PROCEDIMIENTO NUM. 4: CALCULO DEL VOLT/ESPIRA	
INICIAL Y EL NUMERO DE ESPIRAS POR BOBINA.	109
7.5. -PROCEDIMIENTO NUM. 5: DENSIDAD DE FLUJO Y CALCULO	
DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL NUCLEO.	112
7.6. -PROCEDIMIENTO NUM. 6: DENSIDAD DE CORRIENTE Y	
SELECCION DE LOS CONDUCTORES DE LAS BOBINAS.	112
7.7. -PROCEDIMIENTO NUM. 7: CALCULO AXIAL DE LAS BOBINAS.	115
7.8. -PROCEDIMIENTO NUM. 8: CALCULO RADIAL DE LAS BOBINAS.	118
7.9. -PROCEDIMIENTO NUM. 9: CALCULO DE LAS DIMENSIONES Y	
PESO DEL NUCLEO.	120
7.10. -PROCEDIMIENTO NUM. 10: CALCULO DE LAS PERDIDAS EN	
EL NUCLEO Y LA CORRIENTE DE EXCITACION.	120
7.11. -PROCEDIMIENTO NUM. 11: CALCULO DE LONGITUDES,	
PESOS Y RESISTENCIA DE CONDUCTORES.	123
7.12. -PROCEDIMIENTO NUM. 12: CALCULO DE LAS PERDIDAS EN	
LA CARGA.	123
7.13. -PROCEDIMIENTO NUM. 13 : CALCULO DEL PORCENTAJE DE	
IMPEDANCIA.	124

7.14. -PROCEDIMIENTO NUM. 14: CALCULO DEL PORCENTAJE DE EFICIENCIA Y REGULACION.	125
7.15. -PROCEDIMIENTO NUM. 15: CALCULO DEL COSTO DE LOS MATERIALES.	125
7.16. -PROCEDIMIENTO NUM. 16: CALCULO DE LAS CARACTERISTICAS DE CORTO CIRCUITO.	126
7.17. -PROCEDIMIENTO NUM. 17: IMPRESION DEL DISEÑO ELECTRICO DEL TRANSFORMADOR DE 10/24/30 MVA, 115-13.8 KV.	127
CONCLUSIONES.	129
BIBLIOGRAFIA.	132
APENDICE I.-RESULTADOS Y LISTADO DEL PROGRAMA EN LENGUAJE PASCAL PARA DEL DISEÑO ELECTRICO DEL TRANSFORMADOR TRIFASICO DE 10/24/30 MVA, 115-13.8 KV.	135

CAPITULO I

INTRODUCCION

I.-INTRODUCCION.

Los transformadores de potencia tienen una importancia fundamental dentro del Sector Eléctrico Nacional, debido a que realizan la función de llevar la tensión generada a niveles adecuados para permitir su transporte a grandes distancias, en donde se encuentran los centros de distribución y consumo.

Sus principios de operación son conocidos desde hace muchos años, pero la tecnología de diseño ha estado limitada principalmente por el desarrollo de materiales adecuados a las características de funcionamiento y construcción.

El diseño de un transformador debe conjuntar una alta confiabilidad, un costo razonable y el tiempo de elaboración no debe ser excesivo.

Los fabricantes de grandes transformadores deben cumplir con las especificaciones que les permitan competir favorablemente, por lo que necesitan de nuevas herramientas, confiables y precisas, que tomen en cuenta los adelantos existentes en la tecnología de manufactura y materiales, para así poder optimizar el diseño del transformador.

En este trabajo se muestra el desarrollo de un programa para computadora personal en lenguaje Pascal, que permite obtener los principales parámetros de diseño eléctrico (núcleo y bobinas) en base a datos variables de entrada, que incluyen las especificaciones del cliente y las normas industriales para una clase particular de transformadores

trifasicos con devanados contínuos y helicoidales que abarcan el rango de potencias de 18 MVA con enfriamiento OA (aceite y aire), 24 MVA para enfriamiento FA (aire forzado) y FA también hasta 30 MVA.

Se incluye una breve explicación de algunas modificaciones en la fabricación que mejoran las técnicas implementadas hace ya varios años, con otro tipo de materiales, que ya no son adecuadas actualmente.

El programa en computadora tiene un formato de captura de datos muy sencillo, lo mismo que la presentación impresa de resultados.

El desarrollo se basa directamente de las ecuaciones fundamentales del transformador: unas parten de las leyes básicas del electromagnetismo y otras son el resultado de estudios de Manufactura y de la experiencia de los diversos productores.

Las normas industriales utilizadas en los archivos del programa dan a este un enfoque práctico: en ningún momento se trata de optimizar un diseño agregando dificultades en su fabricación que al final de cuentas elevarían los costos finales.

CAPITULO II

TEORIA Y ASPECTOS DE
TRANSFORMADORES DE
POTENCIA

ENFOCADOS AL
DISEÑO

2.-TEORIA Y ASPECTOS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA ENFOCADOS AL DISEÑO.

2.1.-DEFINICION DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA.

Es un dispositivo estático que funciona con excitaciones variables en el tiempo y que tiene las siguientes características:

- a).- Transfiere energía de un circuito a otro.
- b).- Realiza la transferencia de energía por medio de una inducción electromagnética.
- c).- Los circuitos de transferencia están acoplados magnéticamente y aislados eléctricamente.
- d).- La transferencia de energía se realiza a frecuencia constante.
- e).- Generalmente la transferencia se realiza con cambio de voltaje.

2.2.-CLASIFICACION DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

a).-SEGUN EL TIPO DE EQUIPO.

1.- Transformador.

Cuenta con devanados primarios y secundarios.

2.- Autotransformador.

Cuenta con una derivación en la misma bobina. Generalmente se emplea cuando las relaciones de voltaje son de 2 o menos (Por la transferencia de potencia menor es antieconómico mayor relación).

b). -SEGUN EL NUMERO DE FASES.

1. - Monofásico.

2. - Trifásico.

c). -SEGUN EL TIPO DE ENFRIAMIENTO.

1. - Tipo OA.

Enfriamiento a base de aceite y aire. El transformador se encuentra dentro de un recipiente (tanque) que contiene aceite. El aceite desempeña la función de refrigerante, pero también debe ser un buen aislante.

El calor se transmite del transformador al aceite, del aceite al tanque, y el tanque lo disipa por contacto con el aire.

Para aumentar el área de disipación de calor, se aumenta la superficie de radiación de los transformadores, para lo cual se hacen los tanques corrugados o con tubos radiadores.

2. - Tipo OA/FA.

Este tipo es básicamente un transformador tipo OA de mayor capacidad (más de 10000 KVA) que tiene más pérdidas y requiere mayor disipación de calor, para lo cual al transformador OA se añaden ventiladores para que exista circulación de aire y disipe el calor con más facilidad.

3. - Tipo FOA.

Este transformador es básicamente un OA con adición de bombas externas para la circulación del aceite.

El aceite se extrae del transformador de la parte superior y

se introduce por la parte inferior. Al extraerse se pone en contacto con el aire frío o con cualquier otro medio (agua) extrayendo el calor.

Este dispositivo de enfriamiento sólo tiene lugar cuando existen sobrecargas en el transformador.

4.- Tipo FOW.

Este transformador está enfriado por aceite y agua que circula en serpentines o en tubos concéntricos a los de aceite. El calor del aceite se transmite al agua, y ella se encarga de disiparlo.

2.3.- PARTES PRINCIPALES.

Las partes principales de un transformador se muestran en las figuras 2.1, 2.2 y 2.3.

- 1.-TANQUE.
- 2.-TUBOS RADIADORES.
- 3.-NUCLEO (CIRCUITO MAGNETICO).
- 4.-DEVANADOS.
- 5.-RELE DE PROTECCION BUCHMOLZ.
- 6.-TANQUE CONSERVADOR (8 A 10% DEL VOLUMEN DEL TANQUE).
- 7.-INDICADOR DEL ACEITE.
- 8.-TUBO DE ESCAPE EN CASO DE EXPLOSION.
- 9, 10.-BOQUILLAS O AISLADORES DE POTENCIA.
- 11.-TERMOMETRO.
- 12.-CONEXION DE LOS TUBOS RADIADORES AL TANQUE.
- 13.-TORNILLOS OPRESORES PARA DAR RIGIDEZ AL NUCLEO.
- 14.-BASE DE VOLAR.
- 15.-REFRIGERANTE.

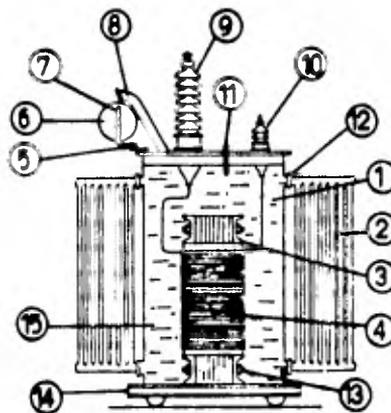
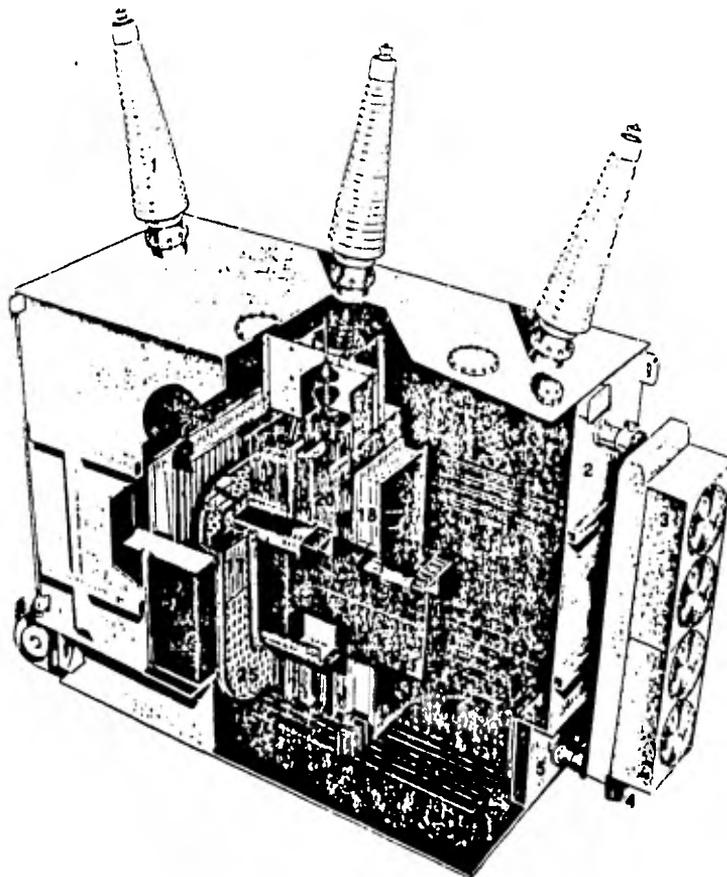


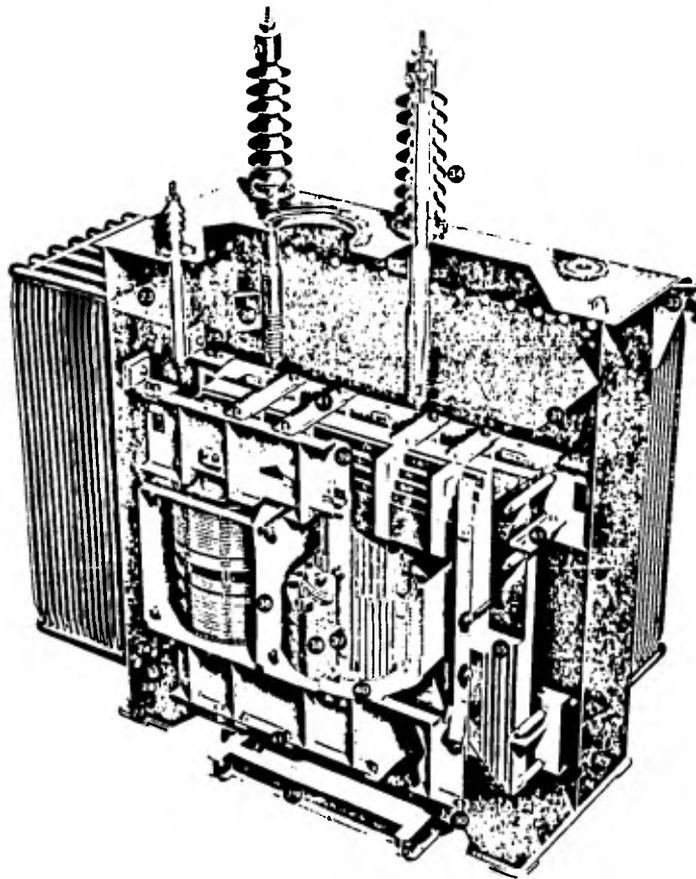
FIG. 2.1.-PARTES ESENCIALES DEL TRANSFORMADOR.



- 1.-BOQUILLA DE ALTA TENSION.
- 2.-TANQUE SUPERIOR.
- 3.-ENFRIADOR DE ACEITE.
- 4.-BOMBA PARA CIRCULACION DE ACEITE.
- 5.-TANQUE INFERIOR.
- 6.-MECANISMO DE OPERACION DEL CAMBIADOR DE DERIVACIONES
- 17.-BOBINA TIPO GALLETA.

- 18.-SISTEMA DE ACUÑAMIENTO ENTRE FASES.
- 19.-GRUPO DE BOBINAS DE BAJA TENSION.
- 20.-GRUPO DE BOBINAS DE ALTA TENSION.
- 21.-CAMBIADOR DE DERIVACIONES
- 24.-BLINDAJE DE TANQUE.
- 25.-ROLDANAS AISLANTES.

FIG. 2. 2. -ENSAMBLE INTERNO DE UN TRANSFORMADOR TIPO ACORAZADO.



23. -FLUJO DE ACEITE HACIA
 LOS RADIADORES.
 24. -FLUJO DE ACEITE FRIO
 HACIA LOS RADIADORES.
 25. -PLACAS DE SUJECION.
 26. 28. -REFUERZOS.
 27. -APOYOS PARA LEVANTA-
 MIENTO CON EQ. HIDRAULICO
 29. -BASE VIGA "I".
 30. -PERNO CENTRADOR.
 31. -NIVEL DE ACEITE.
 32. -GANCHOS PARA LEVANTA-
 MIENTO DE LA UNIDAD.

33. -BOQUILLA TIPO CONDENSADOR.
 34. -DUCTO DE ACEITE ENTRE CON-
 DENSADOR Y PORCELANA.
 35. -NUCLEO.
 36. -BARRERAS AISLANTES ENTRE
 FASES.
 37. -BOBINA DE BAJA TENSION.
 38. -BOBINA DE ALTA TENSION.
 39. -PLACA SEGURO.
 40. -ANILLO DE PRESION.
 41. -SOPORTES MECANICOS DEL
 NUCLEO.

FIG. 2.3. -ENSAMBLE INTERNO DE UN TRANSFORMADOR TIPO COLUMNA.

2.4. -PROPIEDADES MAGNETICAS DE LOS MATERIALES.

a). -TIPOS DE MAGNETISMO.

Se tienen tres tipos principales de magnetismo: el diamagnetismo, el paramagnetismo y el ferromagnetismo. El diamagnetismo está caracterizado por la repulsión de los polos magnéticos y por la dispersión de las líneas de fuerza magnética. El diamagnetismo se observa en elementos o compuestos en los que la estructura electrónica no presenta órbitas parcialmente llenas. Las tendencias diamagnéticas aumentan al incrementarse el número atómico. Es sin embargo, un efecto débil, relativamente independiente de la temperatura y casi siempre opacado por las tendencias paramagnéticas y ferromagnéticas más fuertes.

El paramagnetismo tiene como resultado una atracción débil de los polos magnéticos y cierta tendencia a concentrar líneas magnéticas de fuerza.

El ferromagnetismo es el tipo más importante de magnetismo, desde el punto de vista de la Ingeniería. Se caracteriza por la fuerte atracción hacia los polos magnéticos y la enorme concentración de líneas de fuerza magnética. Al aplicar inducción a un material ferromagnético, los polos magnéticos pueden ser permanentes, y para otro tipo de material, la intensidad inducida de los polos puede eliminarse rápidamente, por lo que se denota como temporal.

A temperatura ambiente, el ferromagnetismo lo encontramos principalmente en 4 metales puros: Hierro, Níquel, Cobalto y Gadolinio. Estos elementos tienen órbitas electrónicas enlazadas y parcialmente llenas y satisfacen los requisitos de espaciamento atómico que son esenciales para la existencia del ferromagnetismo.

En la condición no magnetizada, pequeñas regiones de material ferromagnético tienen alineados los bordes de todos sus imanes atómicos. Estas regiones, a veces de tamaño microscópico, son conocidas como dominios magnéticos. Aunque hay una alineación de bordes en cada dominio magnético y cada uno representa una saturación, estos están orientados al azar, por lo que la magnetización neta es nula. (fig. 2.4).

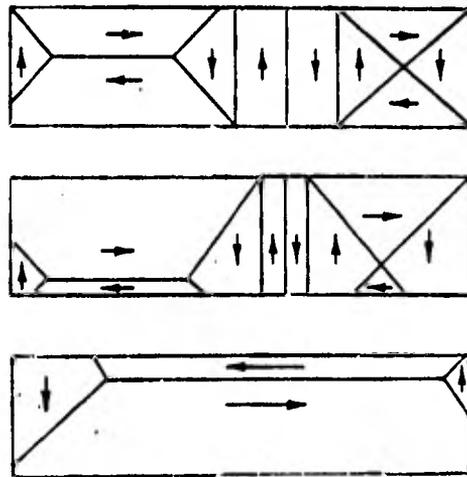


FIG. 2.4. -ORIENTACION DE MATERIALES FERROMAGNETICOS.

Cuando una fuerza magnetizante se aplica al imán, los dominios más favorablemente orientados respecto al campo, se desarrollan a expensas de los menos orientados. Esto sucede mediante el movimiento de las paredes del dominio, en tal forma que se reduzca a un mínimo la energía del sistema. Este proceso es similar al crecimiento de cristales a costa de otros, en el proceso de recocido de metales trabajados en frío.

Si la fuerza magnetizante se hace bastante fuerte, en el cristal quedará finalmente solo un dominio, que está alineado al campo externo. Si la fuerza magnetizante aumenta en dirección inversa, se formará un nuevo dominio, orientado favorablemente. El movimiento de las paredes de dominio, y la formación de otros nuevos, son reacciones irreversibles. Parte de la energía magnética imbuida al imán se convierte en calor y se considera como pérdida. Esto se denomina histéresis.

En todos los cristales ferromagnéticos existen ciertas direcciones en las que es más fácil inducir la imantación con una fuerza dada, que en otros sentidos.

Por ejemplo, el hierro se imanta más fácilmente en una dirección paralela a la orilla del cubo de su estructura cristalina, conocida como $\langle 100 \rangle$. Se imanta con menos facilidad en otras direcciones, tales como la paralela a la cara diagonal (dirección $\langle 110 \rangle$) o la diagonal del cubo ($\langle 111 \rangle$). (fig. 2.5).

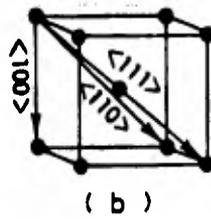
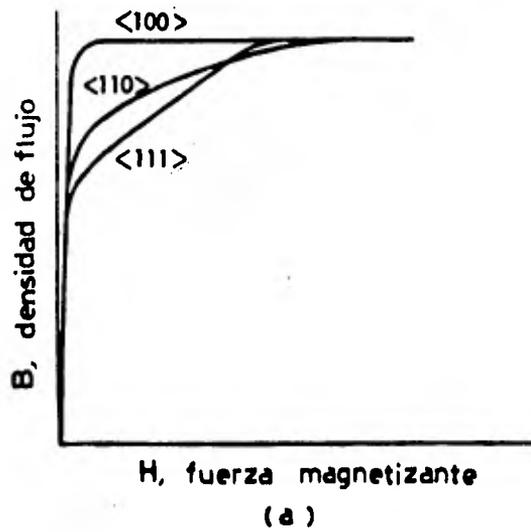


FIG. 2.5.-(a) REPRESENTACION GRAFICA DE LA IMANTACION DEL HIERRO (CURVA DENSIDAD DE FLUJO VS. FUERZA MAGNETIZANTE). (b) DIRECCIONES DE IMANTACION EN LA ESTRUCTURA CUBICA.

Los dominios de un cristal único de hierro no imantado, están alineados paralelamente a la dirección fácil $\langle 100 \rangle$.

b). -CICLO DE HISTERESIS Y CURVA DE PERMEABILIDAD.

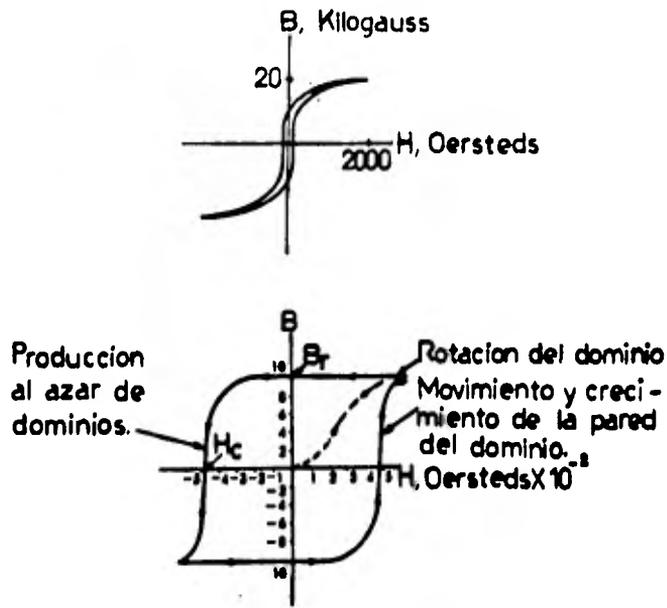


FIG. 2.6.(a) y (b). -CICLOS DE HISTERESIS.

La fuerza con la que se desarrollan los polos magnéticos en un material ferromagnético depende del material utilizado y la fuerza magnetizadora. Esta última es el resultado del número de vueltas del conductor por unidad de longitud de núcleo y de la corriente suministrada. La fuerza magnetizante se incrementa, reduce o invierte, incrementando, reduciendo o invirtiendo, respectivamente, la corriente. La fuerza del imán producida en esta forma se denomina densidad de flujo magnético. Si un material magnético se somete a una fuerza magnética creciente, la

densidad de flujo magnético aumenta. Esto se debe al movimiento de pared y al crecimiento de los dominios. Finalmente, la densidad de flujo magnético se acerca al valor límite, más allá del cual no tiene ningún efecto incrementar la fuerza magnetizante. En este punto se produce la rotación de dominio y todos los imanes atómicos se alinean con la fuerza magnetizante. El valor limitador de la densidad de flujo corresponde al de saturación. Si la fuerza magnetizante se reduce ahora en dirección de cero, la densidad de flujo magnético descenderá a un valor conocido como magnetismo remanente o remanencia (B_r). La inversión de la fuerza magnética al valor H_c , es un factor necesario para eliminar el magnetismo residual, y se conoce como fuerza coercitiva. En este punto, los dominios se distribuyen nuevamente al azar en el material y no se tiene una densidad neta de flujo magnético. Finalmente, se producirá una saturación inversa, y el ciclo de magnetización puede completarse.

La superficie encerrada representa la energía magnética que se ha convertido en térmica y que no puede recuperarse en su forma magnética. La energía irrecuperable se denomina pérdida de histéresis, y el ciclo se conoce como ciclo de histéresis. Los materiales magnéticos que tienen grandes pérdidas de histéresis se denominan imanes permanentes o duros, y aquellos cuyas pérdidas de histéresis son pequeñas, se llaman imanes temporales o suaves.

La permeabilidad de un material magnético se designa mediante el símbolo μ , cuyo valor es la relación B/H . Cambia a diferentes valores de densidad de flujo y constituye un índice de la densidad de flujo producida por una fuerza magnetizante dada. La gráfica $B-\mu$ se denomina curva de permeabilidad (fig. 2.7)

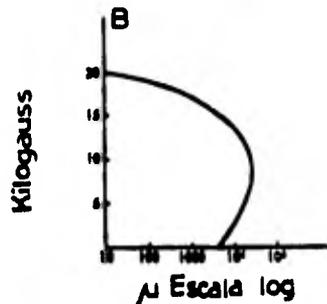
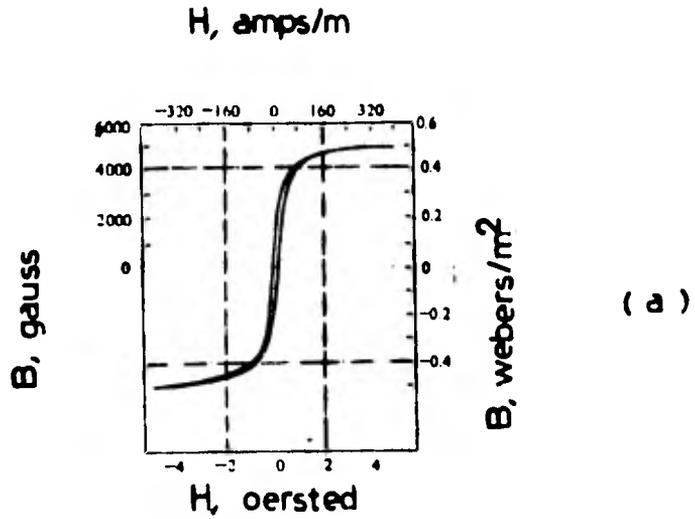


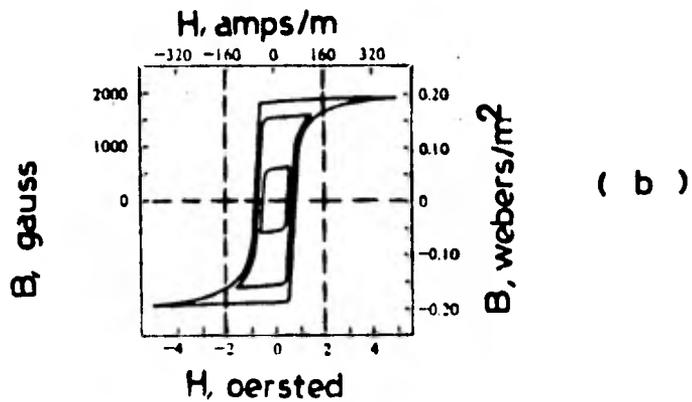
FIG. 2.7. -CURVA DE PERMEABILIDAD.

La curva de permeabilidad puede construirse tomando como base la curva inicial de magnetización. Manifiesta la respuesta inicial a la fuerza magnetizante y la densidad de flujo a la que la respuesta alcanza su mayor grado.

Puesto que la permeabilidad es muy pequeña a altos valores de densidad de flujo y varía a lo largo de un amplio rango de valores, μ se representa trazando una gráfica generalmente en escalas logarítmicas. Los valores de μ , tanto inicial μ_0 , como máximo, μ_{max} , son útiles para comparar la calidad de los materiales magnéticos, ya que son muy sensibles a los esfuerzos y a la pureza.

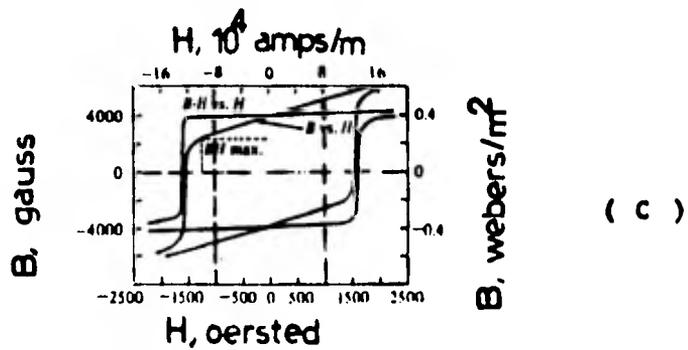


(a)



(b)

FIG. 2.8. (a). -CICLO DE HISTERESIS PARA EL NUCLEO DE UN TRANSFORMADOR. (b) CICLO DE HISTERESIS CUADRADO.



(c)

FIG. 2.8. (c). -CURVA DE HISTERESIS DE UN IMAN PERMANENTE CON UN VALOR ALTO DE FLUJO MAGNETICO.

La curva B-H varía con diversos materiales magnéticos por lo que existen varios tipos de curvas con diversos usos: En la curva para el núcleo de un transformador hay únicamente una pequeña área encerrada por el ciclo de histéresis, fig. 2.8 (a).

Esta representa el trabajo por ciclo. Está relacionada con la pérdida de potencia y se mantiene tan pequeña como es posible. Por contraste, en la unidad de memoria queremos magnetizar fácilmente a un valor regular de B y entonces retener la mayoría de su densidad de flujo cuando se corta la potencia, de modo que ésta puede utilizarse como "memoria" para accionar los controles cuando se requiere nuevamente. Para esto se desea tener un ciclo cuadrado de manera que aún con un campo inverso todavía se obtiene un flujo fuerte para "lectura", fig. 2.8 (b).

En el imán permanente, la "potencia" del imán está relacionada con el producto BH. Observamos que en esta gráfica el eje horizontal, la intensidad de campo, está muchas veces más comprimida que en las otras dos, lo cual refleja el alto valor de H necesario para producir un imán permanente con un alto valor de B, fig. 2.8 (c).

2.5. -MATERIALES MAGNETICOS PARA TRANSFORMADORES.

Sólo las aleaciones de hierro-silicio de alta pureza son utilizadas en los transformadores de potencia en éstos momentos en forma comercial. Antes de la Segunda Guerra Mundial, estas aleaciones eran producidas en forma de laminaciones de 0.35 mm de espesor desde planchas por laminado sucesivo calentando al rojo, seguido por un tratamiento térmico a cerca de 900°C. Las hojas eran dobladas entre las sucesivas laminaciones para conservar la medida manejable, de modo que el laminado final sería hecho sobre un paquete de 8 láminas. Este proceso requería que el contenido de silicio estuviera limitado a 4.5%, para evitar un grado de fragilidad intrabajable, y ésto producía laminaciones en las que los cristales constituyentes eran casi orientados al azar.

Las propiedades magnéticas de cristales individuales de hierro-silicio varían con la dirección de magnetización. Un proceso de laminado en frío y alta temperatura de acabado térmico la cual induce a un número substancial de cristales a alinearse ellos mismos a la dirección relativa de laminación. Las figs. 2.9(a), 2.9(b) y 2.10 ilustran el alineamiento.

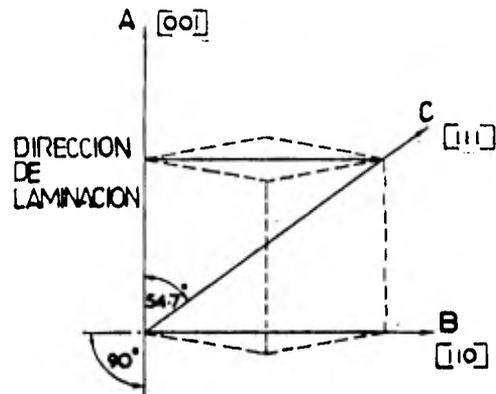


FIG. 2.9. (ca). -ORIENTACION EN LA DIRECCION DE LAMINACION.

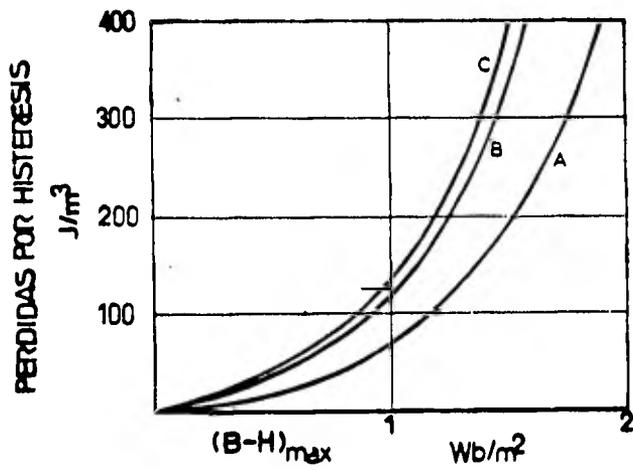


FIG. 2.9. -(cb) REPRESENTACION DE LAS PERDIDAS POR HISTERESIS EN LAS DIRECCIONES DE LAMINACION.

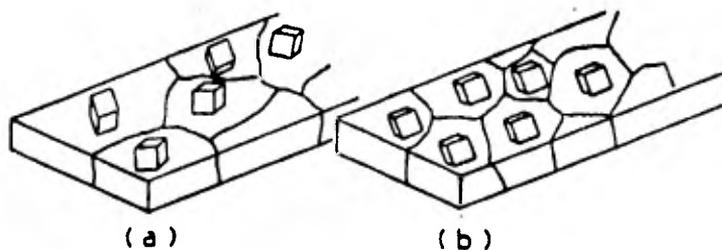


FIG. 2.10.-ORIENTACION EN HOJAS LAMINADAS. (a)AL AZAR. (b)ORIENTACION PREFERENTE EN LA QUE LA DIRECCION IDEAL DE MAGNETIZACION ES PARALELA A LA DIRECCION DE LAMINADO.

La orientación a lo largo de la dirección de laminación representa una mejora considerable sobre el material orientado al azar.

El proceso de reducción en frío limita el contenido máximo de silicio a cerca del 3% lo cual sube significativamente la intensidad de saturación y reduce la resistividad. No obstante, el efecto principal es que la densidad de flujo que opera en el núcleo puede incrementarse y todavía no obstante da una reducción substancial en las pérdidas del núcleo sobre el material no orientado laminado en caliente. El laminado en frío también da una superficie final más lisa y de ese modo mejora el factor de espacio.

Casi todos los núcleos de los transformadores de potencia están ahora contruidos de hierro al silicio orientado laminado en frío, aunque es substancialmente más caro que el viejo material debido al método de manufactura más elaborado. Es normalmente suministrado con un espesor de

0.3 a 0.28 mm para compensar la resistividad más baja y también reducir las pérdidas totales adicionales.

2.8. -MATERIALES AISLANTES.

Con la reducción en la pérdida por histéresis de los materiales magnéticos con los años, ha llegado a ser más importante el hecho de que las pérdidas por corrientes Eddy sean mantenidas a un mínimo añadiendo un aislamiento adecuado entre las laminaciones del núcleo. Como los transformadores de potencia han incrementado su tamaño, la carga impuesta sobre su aislamiento interlaminar ha llegado a ser más pesada; voltajes más altos son inducidos como un resultado de secciones transversales más grandes, y las áreas de aislamiento esforzadas por estos voltajes son más grandes. Además, el efecto limitante debido a restricciones en transporte en unidades de grandes dimensiones ha forzado a los diseñadores a ensayar y mejorar factores de espacio del núcleo reduciendo el espesor del aislamiento. El único factor mitigante ha sido el mejoramiento de la superficie final que resulta del uso de material de núcleo rolado en frío, el cual hace practicable el uso de capas más delgadas de aislamiento.

Con hierro al silicio laminado en frío con grano orientado, se proporciona algún grado de superficie aislante por la aplicación de magnesia durante el proceso de

manufactura. Esto es necesario para evitar que vueltas adyacentes de los enrollamientos se fundan entre si durante el proceso de tratamiento térmico a alta temperatura. Es usual para formar una capa suplementaria de aislamiento tratar el hierro con fosfatos ácidos antes del tratamiento final. Con tal de que se tomen precauciones durante el cortado de las laminaciones para minimizar la producción de imperfecciones, este aislamiento de fosfato por si sólo puede ser satisfactorio para núcleos hasta capacidades de cerca de 30 MVA.

2.7. -PAPELES PARA USO ELECTRICO.

Los papeles y cartones eléctricos se usan principalmente para fines de aislamiento como: dieléctricos para condensadores, para envolver cables y como aislante en capas de conductores. Con frecuencia van impregnados con sustancias diversas que aumentan su capacidad dieléctrica.

Los papeles aislantes se fabrican con pasta Kraft cruda o a base de pasta de trapos. Entre los cartones se emplea el Pressboard aislante y la fibra vulcanizada.

A estos papeles se les exige una gran regularidad en el espesor, o sea en la densidad, una buena resistencia a la tracción, al rasgado, permeabilidad al aire, resistencia al calor, resistencia al envejecimiento, a la adecuada absorción de aceite, etc.

Las características eléctricas son muy exigentes, según el empleo: la capacitancia, resistencia aislante, voltaje de ionización y de perforación, rigidez dieléctrica, resistividad, inducción específica, etc.

El Pressboard se emplea en la industria eléctrica como aislante en la construcción de transformadores, motores, etc. Debe ser duro, compacto, fuertemente encolado y exento de ácidos, nudos, partículas metálicas y demás impurezas que puedan influir en su poder dieléctrico.

2.8. -RESISTENCIA AL CALOR DEL PAPEL.

Determinados papeles están sometidos durante su uso a elevadas temperaturas dentro del transformador. Las fibras del papel sufren un cambio tanto en sus propiedades de resistencia mecánica como en sus propiedades químicas. Un ensayo de la resistencia de un papel a alta temperatura es además, instructivo para realizar el envejecimiento "artificial", el cual nos da la aptitud de envejecimiento.

Los cambios producidos por efecto del calor, sobre el material fibroso, son imputables por un lado al "secado" del mismo, y por otro, a los procesos químicos de degradación.

El grado de transformación depende de:

a).- La constitución del papel. Los papeles a base de trapos son más resistentes al calor que los obtenidos con pastas de madera.

b).- Proceso de lejiado. Las pastas obtenidas por métodos alcalinos son mejores que las obtenidas por medios ácidos.

c).- La presencia de sustancias ácidas que favorecen la degradación, por hidrólisis aumentada por la temperatura.

d).- Una sobrecocción y también un blanqueo enérgico, influyen en la sensibilidad al calor.

e).- La temperatura, el tiempo que actúa ésta y de la humedad. El calentamiento entre 120-130°C produce una decoagulación de las fibras.

2.0. -ACEITE PARA TRANSFORMADORES.

La función del aceite es doble, actúa como aislante y como agente refrigerante (por convección). Su bajo índice dieléctrico relativo (2.4) motiva que tienda a rebajar los gradientes de tensión de los aislantes sólidos con los que trabaja en serie.

Los aceites para transformadores son de naturaleza mineral. Proceden de la destilación fraccionada de petróleo, a la que sigue un proceso de refinación.

La composición química depende de la procedencia. Básicamente se trata de una mezcla compleja de hidrocarburos. Por lo expuesto, se comprende que resulte difícil, y que carezca de valor práctico, su análisis

químico. Ciertamente, y según proporciones de unas y otras moléculas, se habla de bases parafínicas.

La rigidez dieléctrica de los aceites usados es del orden de los 200kV/cm. Pequeñas cantidades de agua o de impurezas, hacen descender aquel valor a una décima parte y aún a menos. De ahí la importancia de su vigilancia y conservación.

El azufre disuelto es inconveniente, pues ataca al cobre, recubriéndolo de una capa negruzca aislante (contactos eventuales, por ejemplo, en reguladores de tensión, adquieren resistencias de contacto crecidas que implican calentamientos inadmisibles). Tras el proceso de refinación, el aceite tiene menos del 0.2% de azufre.

2.9.1. -ENVEJECIMIENTO.

El aceite presenta un proceso de envejecimiento. Significa que, con el tiempo, se altera, se oxida, forma productos ácidos y puede llegar a crear lodos.

Contribuyen varios factores, siendo los más importantes:

- a).- El aire (oxígeno).
- b).- Temperaturas (sobrecargas, calentamientos locales, etc.).
- c).- Luz y radiaciones ultravioleta (las muestras de

aceite se guardarán en botellas opacas de plástico, totalmente llenas).

Con el envejecimiento, el aceite empeora en cuanto a características aislantes y refrigerantes, llegando a resultar inservible. Para alargar el proceso, modernamente se emplean, en ocasiones, productos químicos inhibidores ("topanol", "paranox", "parabar", etc.).

Si el transformador opera sin cargas anormales o aumentos de temperatura excesivos, podemos esperar una vida larga sin tropiezos. Esto es particularmente cierto en las unidades con tanques cerrados. Los mayores enemigos son la humedad, calor, acción química y cargas pico continuas.

El probar muestras del líquido a intervalos regulares es el mejor método para determinar en que condición se encuentra el transformador y determinar el mantenimiento a emplear.

La oxidación del aceite mineral forma lodo, la parte insoluble de éste se posará y pegará al tanque, al núcleo y a las bobinas. Cuando aumenta, la circulación del aceite se entorpece y la temperatura del embobinado aumenta. Al mismo tiempo, la naturaleza ácida del aceite oxidado causa que la tensión de ruptura disminuya rápidamente.

Las decisiones profundas para el mantenimiento deben basarse en muchos factores y en tantos datos que sea práctico obtener. Las pruebas de aceite establecerán la

calidad y condición del líquido, pero no indican necesariamente si tiene algo débil o hay problema con el aislamiento sólido del transformador.

El "askarel" tiene una densidad mayor a 1.0, por tanto, la toma de muestras para comprobar la humedad, hay que efectuarla en la parte superior del transformador, contrariamente a lo que ocurre con el aceite. Es gran disolvente de barnices, resinas, aceites, pinturas, grasas, etc. Por consiguiente, la previsión del uso de este dieléctrico, implica la construcción especial del transformador, evitándose el empleo de los mencionados productos. No se mezclará "askarel" con aceite.

Los transformadores con "askarel" son más costosos Caprox. 20% que a base de aceite, también más pesados.

El arco eléctrico, además de gasificarlo, descompone al "askarel", originando productos nocivos, si bien no explosivos, por lo que hay que tener locales ventilados.

2.10. -MATERIALES CONDUCTORES.

Un conductor de electricidad puede ser cualquier substancia o material, la cual permite un paso continuo de corriente eléctrica cuando está sujeto a una diferencia de potencial eléctrico.

Todas las substancias poseen algún grado de conductividad eléctrica, siendo los metales los mejores

conductores. Para su empleo en máquinas eléctricas, el cobre y el aluminio son los metales que tienen una amplia aplicación aunque para casos especiales también se usan aleaciones como bronce y algunos materiales compuestos.

Los circuitos eléctricos en general poseen 4 propiedades eléctricas fundamentales: Resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia de dispersión. Las dos primeras se relacionan como características propias del conductor y las dos últimas dependen en parte de las dimensiones del mismo y del efecto de otros cuerpos conductores y en parte por las propiedades dieléctricas de los materiales usados con propósito de aislamiento.

La inductancia es función del campo magnético establecido por la corriente que circula en el conductor, pero este campo como un todo se divide en dos partes siendo éstas una interna y otra externa al conductor. Esta característica está íntimamente ligada a las propiedades magnéticas del circuito.

La resistencia es una propiedad intrínseca del conductor y tanto ésta como la inductancia interna, cambian en valores efectivos cuando la corriente cambia con gran rapidez.

En las bobinas de un transformador, los conductores se ven sujetos a esfuerzos mecánicos, consecuentemente su peso, su resistencia a la tensión y propiedades elásticas

requieren considerarse en los cálculos de diseño.

Los materiales conductores también se ven afectados por los cambios de temperatura ya sea durante los tratamientos térmicos, durante el proceso de manufactura o fabricación en productos terminados o durante la operación de los equipos en el campo.

Aún cuando el cobre presenta una baja resistencia específica, su tendencia de costo ha provocado un incremento en el uso del aluminio, especialmente en transformadores de distribución y pequeña potencia tipo seco y sumergidos en líquido aislante. Unidades hasta de 12 MVA muestran un excelente registro de servicio.

2.10.1.-COMPARACION DE PROPIEDADES FISICAS ENTRE ALUMINIO Y COBRE.

De la Tabla 2.11 se observa una mayor conductividad en el cobre. En transformadores de potencia se emplea este material por su superior resistencia mecánica. Esto es un factor extremadamente importante debido a que los devanados se someten a esfuerzos considerables en la condición de corto circuito. El aluminio no soporta estas cargas con el método de manufactura tradicional.

También el cobre disipa mejor el calor por unidad de superficie, lo que también es muy importante en transformadores de elevada potencia.

PROPIEDAD	ALUMINIO	COBRE
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA A 20°C RECOCIDO (%).	62	100
PESO A 20°C (KG/DM ³).	2.70	8.91
CALOR ESPECIFICO (CAL/GR).	0.21	0.092
PUNTO DE FUSION (°C).	660	1083
CONDUCTIVIDAD TERMICA A 20°C (CAL/CM ²).	0.87	0.941
RESISTENCIA MECANICA RECOCIDA (KG/CM ²).	914	2250

TABLA 2.11. -COMPARACION DE PROPIEDADES FISICAS ENTRE ALUMINIO Y COBRE.

CAPITULO III

**NUCLEOS Y BOBINAS
DE
TRANSFORMADORES DE
POTENCIA**

3. -NUCLEOS Y BOBINAS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

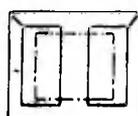
3.1. -NUCLEO. GENERALIDADES.

Todos los núcleos actuales para transformadores de potencia retienen los parámetros esenciales de diseño desarrollados hace más de 90 años: todos se construyen de laminaciones lisas de hierro.

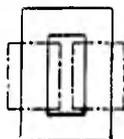
No obstante, con el paso de los años, se han mejorado las propiedades magnéticas del hierro, en base a diversos métodos de manufactura para producir el material básico y las laminaciones individuales. Junto con esto, se aprovechan estas características para introducir muchos cambios en el diseño.

3.2. -TIPOS DE NUCLEOS.

La figura 3.1 resume en forma diagramática los tipos más usuales de núcleos: los tipos a), b) y c) aplicados a transformadores monofásicos y los d) y e) para trifásicos. El más común es el trifásico de tres columnas de la fig. d). Otros tipos trifásicos son sólo usados en circunstancias especiales, puesto que, generalmente hablando, el tipo de tres columnas da la masa mínima y la más baja pérdida de hierro.



(a)



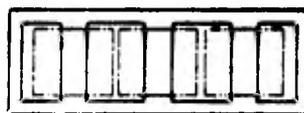
(b)



(c)



(d)



(e)

FIG. 3.1.-TIPOS DE NUCLEOS. (a),(b) y (c) PARA TRANSFORMADORES MONOFASICOS. (d) y (e) PARA TRANSFORMADORES TRIFASICOS.

Quando estaba en uso el material de núcleo tipo no-orientado laminado en caliente, era práctica común fabricar el área de la sección transversal del enlace más grande que la de las columnas incrementando sus anchos de lámina, y por tanto su altura vertical. Los cambios de sección transversal en las conexiones entre columnas y uniones eran aptos para causar flujo de transferencia de

escalón a escalón a través del plano de las laminaciones, incrementando así las pérdidas por corrientes Eddy.

Con el advenimiento de material para núcleos de grano orientado laminado en frío la un tanto dudosa ganancia que se lograba incrementando la sección transversal de la unión era enteramente rebasada en valor por el gran costo del material extra requerido. Además, la conductividad aumentada del material del núcleo elevaba la magnitud de cualquier pérdida por corriente Eddy debida a flujo transversal. Por estas razones, es ahora práctica normal en núcleos trifásicos de 3 columnas fabricar la sección transversal de la unión con anchos de lámina exactamente igual a la de las columnas.

Para transformadores de potencia trifásicos muy grandes, el tipo de 5 columnas o tipo acorazado (e) es el comúnmente adoptado, dado que este tipo reduce la longitud de la unión y así la altura total del transformador. Esto es particularmente útil si se especifica transportación por ferrocarril, debido a las restricciones considerables en las alturas de túneles y puentes durante el trayecto.

Para compensar esto, la longitud a lo largo es incrementada marcadamente por la presencia de las columnas no devanadas. Otra ventaja es que el enfriamiento de las

uniones es ampliamente mejorado sin el adiconamiento de ductos especiales. Donde el diámetro del círculo del núcleo está sobre 750 mm, también se permite que los anchos de la lámina de la columna sean divididos en dos con un ducto central sin complicación excesiva de los enlaces con la unión. Esto de nuevo mejora el enfriamiento de la columna y evita cualquier limitación del diámetro del círculo del núcleo por los anchos de material laminado y enrollado.

La densidad de flujo en las diversas partes del núcleo tipo acorazado o de 5 columnas depende de las reluctancias relativas de las distintas rutas en el hierro, así dificulta la determinación de sus áreas relativas transversales correctas. Las columnas no devanadas ofrecen una ruta fácil para flujos de tercera armónica, con lo que hay una gran cantidad de distorsión armónica en los flujos en este tipo de núcleo a diferencia de la menor distorsión en el tipo columna (de tres columnas). Esto de nuevo hace difícil evaluar las proporciones correctas. La experiencia ha mostrado, sin embargo, que si la porción principal de la unión ocupa cerca del 50% de la sección transversal de la columna devanada y si la columna no devanada abarca entre el 40 y 50% de ella, entonces la densidad de flujo en las diversas partes será substancialmente igual, y se obtiene una pérdida razonablemente baja en el hierro.

3.3. -ENLACE DE LAMINACIONES.

La mayoría de los núcleos de los transformadores de potencia están contruidos de laminaciones colocadas en planos, y debe ser hecha alguna clase de enlace entre las láminas de las columnas y aquellas del yugo que están situadas en ángulos rectos una con otra. Si es tomado el cuidado correcto para minimizar las aberturas de aire resultantes y para prevenir vibración, hay una pequeña razón de porque los enlaces a tope no serían empleadas: hay complicaciones de manufactura en el afilamiento de las caras del enlace en núcleos grandes. Por tanto la mayoría de los núcleos son ensamblados con alguna clase de uniones entrelazadas entre columnas y yugos, formado por una disposición alternativa de diferentes longitudes de laminación. Las tres formas más comunes de uso corriente se muestran en la fig. 3.2.

El de la fig. 3.2(a) requiere sólo laminaciones planas rectangulares y fue usado universalmente, para material de grano orientado se incurre en una pérdida extra donde el flujo cruza las láminas en el enlace en otras direcciones que no son paralelas a la dirección de laminación.

Para obtener el máximo beneficio del material de grano orientado laminado en frío, es necesario diseñar alguna clase de enlace en diagonal, como en las fig. 3.2(b) y 3.2(c).

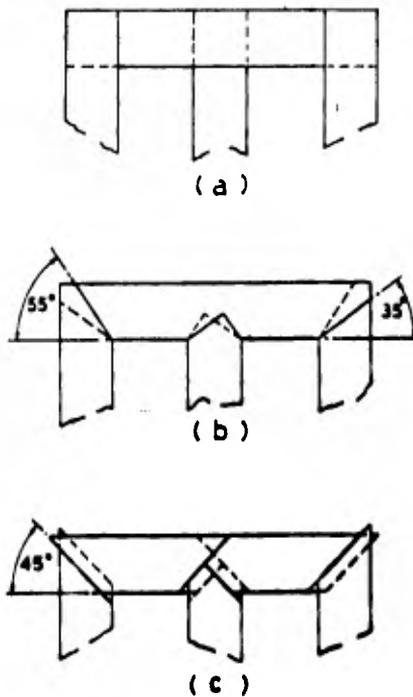


FIG. 3.2.-ENLACE DE LAMINACIONES: (a) CUADRADO. (b) ENLACE A 35° Y 55°. (c) ENLACE A 45°

Con cualquier clase de enlace intercalado es importante minimizar las aberturas entre las láminas entrelazadas; de otro modo la transferencia de flujo lateral en láminas adyacentes causarán pérdida extra de corrientes Eddy en el hierro. Este factor también limita el número de láminas idénticas que pueden ser apiladas juntas antes del siguiente escalonamiento.

3.4. -SUJECION O AFIANZAMIENTO.

Cuando los núcleos de transformadores de potencia eran contruidos de material no orientado laminado en caliente, era práctica universal sujetar las columnas y yugos de las medidas más grandes juntos por medio de pernos pasando a través de agujeros hechos en las laminaciones. Este arreglo, aunque da excelente sujeción, sufre de varias desventajas:

a).-Los agujeros son fuentes potenciales de fallas en el núcleo.

b).-O el aislamiento del agujero tiene que ser de material costoso resistente a la temperatura o deben proporcionarse aberturas transversales de enfriamiento.

c).-Los agujeros de los pernos y las aberturas de enfriamiento (cualquiera de las dos) causan aumentos locales en la densidad de flujo y pérdidas en el hierro.

d).-La perforación de agujeros y aberturas complica el corte del núcleo.

e).-La reducción desigual de sección en las láminas con que está hecha la sección del núcleo causa flujo transversal entre pilas en la dirección de cada perno y resulta en pérdidas extra por corrientes Eddy.

f).-El espacio tomado por la cabeza del perno, aislamiento y lámina de refuerzo (si se usa) hace difícil lograr las áreas de las secciones transversales óptimas.

La tendencia ha sido reducir el número de pernos y su medida con el uso de acero de alta resistencia a la tensión, eliminar aberturas de enfriamiento con el uso de nuevas formas de tubo aislante de alta temperatura pero haciendo núcleos sin ningún perno que pase a través de la sección de hierro activo. Esto ha sido complementado con el desarrollo de bandas de fibra de vidrio de alta resistencia aplicadas a la periferia de la sección del núcleo.

3.5.-BOBINAS O DEVANADOS.

Los devanados de un transformador tienen varias funciones importantes que deben cumplir:

a).-Conducir corriente eléctrica.

b).-Los devanados deben tener un aislamiento entre vueltas, secciones, capas, entre otras bobinas y a tierra. Este aislamiento debe ser capaz de resistir los voltajes de prueba, los voltajes de operación y también los voltajes de impulso y maniobra, los cuales se presentan en servicio por descargas atmosféricas o por operaciones de apertura y cierre de interruptores.

c).-Los devanados presentan una resistencia eléctrica al paso de la corriente y se calientan cuando a través de ellos fluye una corriente. Deben disipar el calor generado con una elevación de temperatura limitada a un valor que no dañará los materiales aislantes.

d).-Los devanados al llevar una corriente, establecen un campo magnético, el cual causa pérdidas por corrientes de eddy en los conductores de las bobinas. Si existe más de una trayectoria paralela de corriente, es posible que también circulen corrientes parásitas en esos circuitos. Los devanados deben diseñarse con conductores trenzados y transposiciones estableciendo el mejor comportamiento entre pérdidas y costo de materiales y mano de obra.

e).-Los devanados al resistir las corrientes de corto circuito, establecen un poderoso campo magnético, la interacción de estas dos variables da como resultado la presencia de esfuerzos mecánicos. Los devanados deben diseñarse para soportar estas fuerzas hasta que opere el equipo de protección. Esto significa que las bobinas no deben presentar distorsión, así mismo que se mantenga la integridad de los aislamientos, que la reactancia de dispersión no cambie significativamente y que las bobinas y sus soportes conserven suficiente rigidez para subsiguientes cortos circuitos.

3.6. -AISLAMIENTOS.

Dentro de un devanado el aislamiento debe ser arreglado no sólo para suministrar suficiente resistencia mecánica y eléctrica para prevenir averías bajo cualquier condición probable que encuentren en servicio, sino también debe permitir la adecuada circulación del medio de enfriamiento de modo que ninguna parte del devanado reciba excesivo calor. Han sido desarrollados varios arreglos de devanados para satisfacer estos requerimientos. Lo común de todos ellos son los espaciadores para mantener ductos, ya sean horizontales o verticales.

Los aislamientos mayores son los que se encuentran entre devanados o de devanados a tierra. Este muchas veces consiste de la misma placa o cartón especial empleada para aislamiento dentro del devanado. En muchos casos, sin embargo, se requiere de mayor resistencia mecánica. Los cilindros son envueltos de papel y son cubiertos de resina sintética.

3.7. -TIPOS DE DEVANADOS.

El tipo de devanado diseñado depende de sus requerimientos de corriente y voltaje. A esto no sigue, sin embargo, que hay un diseño único en el que se encuentran todos los requerimientos. Hay por supuesto, un traslape

entre los rangos cubiertos por varios diseños, pero además los factores externos pueden tener una influencia considerable. Obviamente las facilidades de manufactura deben ser tomadas en cuenta, y el entrenamiento y experiencia del fabricante no deben despreciarse.

Ciertas formas de devanados pueden estar cubiertas por patentes que, aún cuando pudieran obtenerse licencias de manufactura, afectarían las decisiones económicas y por tanto, la elección del devanado.

A continuación se analizará la construcción de los tipos de devanados empleados en este trabajo:

a).-TIPO HELICOIDAL.

Estas bobinas se devanan en forma de hélice de diámetro constante, ya sea directamente sobre un cilindro aislante o sobre espaciadores verticales, los cuales proporcionan un ducto de enfriamiento axial. Estos ductos son mantenidos por espaciadores radiales de cartón aislante precomprimido. El devanado puede tener más de una capa conectada en serie, ya que las conexiones en paralelo resultan en altas corrientes circulantes. Además este tipo de bobina utiliza varios conductores los cuales se requieren transponer para mantener bajas las pérdidas de Eddy. Existen diferentes tipos de transposiciones que dependen de la tecnología desarrollada. Ver fig. 4.5.b)-Bobina tipo helicoidal (Helitran).

b). -BOBINA TIPO DISCO O CONTINUA.

Mientras las bobinas tipo helicoidal tienen una vuelta por sección, las tipo disco tienen dos o más vueltas por sección. Estas bobinas se construyen devanando un conjunto de vueltas, una sobre otra como una galleta tipo de canto, sin cortar los conductores se invierte esta sección colocando el traslape entre secciones en la parte interna y las guías de salida en la parte externa. La segunda sección se devana de adentro hacia afuera y así permanece, las demás secciones se devanan en esta secuencia alternadamente, manteniendo los ductos entre ellas por espaciadores radiales de cartón precomprimido.

En este tipo de bobinas se han desarrollado diferentes tipos de construcciones especiales con pantallas electrostáticas e interconexiones, siempre con idea de mejorar la distribución de tensión al impulso. Ver fig. 4.4. a) y 4.4. b). Bobina tipo disco o continua.

CAPITULO IV

**METODO
TRADICIONAL
DE
DISEÑO
ELECTRICO
DEL
TRANSFORMADOR**

4.-METODO TRADICIONAL DE DISEÑO ELECTRICO DEL TRANSFORMADOR.

4.1.-METODO ITERATIVO O DE AJUSTES SUCESIVOS.

El método iterativo o de ajustes sucesivos es el más comúnmente utilizado en el diseño eléctrico de transformadores. El punto de partida del diseño es aquél en el que se establecen las especificaciones requeridas en el diseño, que son las siguientes:

- a) Capacidad nominal, en KVA.
- b) Tensión en los devanados de alta y baja tensión, en Volts.
- c) Conexión en los devanados de alta y de baja tensión.
- d) Número de fases.
- e) Frecuencia, en ciclos/segundo o Hertz.
- f) Número de derivaciones arriba y abajo de la tensión nominal en el devanado de alta tensión.
- g) Valor de las derivaciones (% de la tensión nominal).
- h) Límites de aumento en la temperatura en los devanados.
- i) Impedancia.
- j) Corriente de excitación.
- k) Pérdidas de excitación o pérdidas sin carga, en Watts.
- l) Pérdidas totales (Pérdidas de carga más pérdidas de excitación), en Watts.
- m) Altura de operación sobre el nivel del mar, en metros.

En el siguiente paso, tomando como base los datos establecidos en el punto anterior, se estiman las variables

de diseño para iniciar el cálculo, dichas variables son las siguientes:

- a) Densidades de corriente máximas en ambos devanados.
- b) Densidad de flujo máxima en el núcleo.
- c) Volts/espira iniciales en los devanados.
- d) Factor de apilamiento o de laminación del acero eléctrico.
- e) Factor de destrucción o factor de pérdidas en el núcleo.
- f) Nivel básico de aislamiento al impulso en los devanados de alta y baja tensión.

Los valores de estas variables varían dentro de ciertos límites establecidos en base a la experiencia del diseñador o en algunos casos se toman de un diseño similar que sirve como referencia.

4.2. -CALCULO DE VOLTAJES Y CORRIENTES.

a). -DEVANADO DE ALTA TENSION (A.T.).

Para el devanado de A.T., por lo general se toma un número determinado de derivaciones arriba y abajo de las espiras nominales, este número no necesariamente es el mismo, pero para cada uno se toma un porcentaje especificado tomando como base la tensión nominal en el devanado de A.T.

Si no se especifica de otra manera, la Norma Oficial Mexicana J-284-1988, establece que se deben usar cuatro derivaciones de 2.5% cada una, dos arriba y dos abajo de

la tensión nominal del devanado de A.T.

Los valores de tensión que podrán aplicarse al devanado de A.T., para este caso en específico, en base a la tensión nominal (V_L) son los siguientes:

$$\begin{aligned}
 T_L(1) &= V_L \approx 1.050 \\
 T_L(2) &= V_L \approx 1.025 \\
 T_L(3) &= V_L \approx 1.000 \quad (\text{Posición nominal}) \quad \dots\dots(1) \\
 T_L(4) &= V_L \approx 0.975 \\
 T_L(5) &= V_L \approx 0.950
 \end{aligned}$$

Donde: V_L = Tensión nominal de línea del devanado de A.T.

1. -CONEXION DELTA.

Las tensiones en las derivaciones no cambian, por ser iguales las tensiones de línea y de fase: $T_L(i) = T_F(i)$.

Donde el subíndice " i " toma los valores: 1,2,3,4 y 5.

Las corrientes de línea en cada derivación se calculan del modo siguiente:

$$I_L(i) = \frac{KVA \times 1000}{\sqrt{3} \times T_L(i)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

Las corrientes de fase en cada derivación se calculan del modo siguiente:

$$I_F(i) = \frac{I_L(i)}{\sqrt{3}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

2.-CONEXION ESTRELLA.

Las corrientes de línea y de fase son las mismas, lo que varía es la tensión de fase que se calcula del modo siguiente:

$$T_{F(C1)} = \frac{T_{L(C1)}}{\sqrt{3}} \quad \dots\dots\dots(C 4)$$

b).-DEVANADO DE BAJA TENSION (B.T.).

1.-CONEXION DELTA.

La tensión de línea es igual a la tensión de fase, por tanto:

$$T_{2L} = T_{2F} = T_2$$

La corriente de línea se calcula como sigue:

$$I_{2L} = \frac{KVA \times 1000}{\sqrt{3} \times T_{2L}} \quad \dots\dots\dots(C 5)$$

La corriente de fase se calcula como sigue:

$$I_{2F} = \frac{I_{2L}}{\sqrt{3}} \quad \dots\dots\dots(C 6)$$

2.-CONEXION ESTRELLA.

La corriente de línea es igual a la de fase, por tanto:

$$I_{2L} = I_{2F} = I_2$$

La tensión de fase se calcula a partir de la tensión de línea del modo siguiente:

$$T_{2F} = \frac{T_{2L}}{\sqrt{3}} \quad \text{.....(7)}$$

Por lo general, sólo el devanado de A.T. lleva derivaciones, no obstante el devanado de B.T. también puede llevar derivaciones, en cuyo caso se procederá de igual manera que en el devanado de A.T. para el cálculo de las derivaciones en el devanado de B.T.

4.3. -CALCULO DEL NUMERO DE ESPIRAS EN LOS DEVANADOS.

La determinación inicial del número de espiras o vueltas en los devanados de un transformador puede efectuarse por cualquiera de las dos formas siguientes:

- a) A partir de algún diseño similar disponible.
- b) Mediante la determinación empírica de la relación:
 $V_1 = \text{VOLTS/VUELTA.}$

En este caso puede emplearse la fórmula siguiente:

$$V_1 = 0.06 \sqrt{f \text{ KVA}} \quad \text{.....(8)}$$

Donde:

f= Frecuencia de operación en Hz.

KVA= Kilovoltamperes del transformador.

a). -DEVANADO DE ALTA TENSION (A.T.).

Dado que el devanado de A.T. por lo general tiene derivaciones arriba y abajo de las espiras nominales, debemos ajustar el número de espiras del devanado en función de las variaciones en el devanado de B.T.

El número de espiras para cada posición se calcula con la ecuación siguiente:

$$N(i) = \frac{T_p(i)}{V_t} \dots\dots\dots (9)$$

Donde:

$T_p(i)$ = Tensión de fase para la posición " i ".

b). -DEVANADO DE BAJA TENSION (B.T.).

El número de espiras para el devanado de B.T. se calcula con la ecuación siguiente:

$$N_s = \frac{T_{2F}}{V_t} \dots\dots\dots (10)$$

Donde: T_{2F} = Tensión de fase del devanado de B.T.

El número de espiras se redondea al entero por lo que es necesario recalcular V_t .

4.4-CALCULO DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL NUCLEO.

Para calcular la sección transversal del núcleo (A), es necesario definir la densidad de flujo (B), el valor de trabajo de B varía generalmente entre 15000 y 17500 Gauss, dependiendo de las pérdidas en vacío y la corriente de excitación requeridas, así como del tipo de acero eléctrico empleado en el núcleo.

La variable A se despeja de la ecuación de inducción electromagnética de Faraday del modo siguiente:

$$E = 4.44 \pi f N B A \times 10^{-8} \quad \dots\dots\dots (11)$$

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

$$V_i = 4.44 \pi f B A \times 10^{-8} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$A = \frac{V_i}{4.44 \pi f B \times 10^{-8}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

Usando el sistema c.g.s. se tiene que:

E= Fuerza electromotriz inducida (f.e.m.), en volts.

f= Frecuencia de operación, en Hertz.

N= Número de vueltas en el devanado correspondiente.

B= Densidad de flujo magnético, en Gauss.

A= Sección transversal del núcleo, en cm².

V_i = Volt/espira.

El área calculada con la ecuación anterior corresponde al área neta, sin embargo, se considera que el área real tiene una superficie geométrica mayor, debido al recubrimiento aislante de la laminación, por lo tanto el área geométrica se obtiene del modo siguiente:

$$A_g = A/F_1 \quad \dots\dots\dots(14)$$

Donde:

F_1 = Factor de laminación, el cual representa una medida de compacticidad de un núcleo de acero eléctrico.

El factor de laminación se define como la relación del volumen sólido equivalente, calculado en base al peso y densidad del acero y el volumen verdadero de laminaciones compactadas, calculado en base a sus dimensiones.

Contando con el área geométrica (A_g), de la sección transversal se puede despejar el diámetro (D) de la columna del núcleo de la fórmula siguiente:

$$A_g = F_{cs} \left[\frac{\pi D^2}{4} \right] \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$D = \sqrt{(4A_g) / (\pi F_{cs})} \quad \dots\dots\dots(16)$$

Donde:

$\pi = 3.141516$.

F_{cs} = Factor de Espacio, el cual representa la relación del área geométrica del núcleo al área del círculo que lo

circunscribe, como se muestra en la sección transversal del núcleo cruciforme con cinco escalones de la figura 4.1.

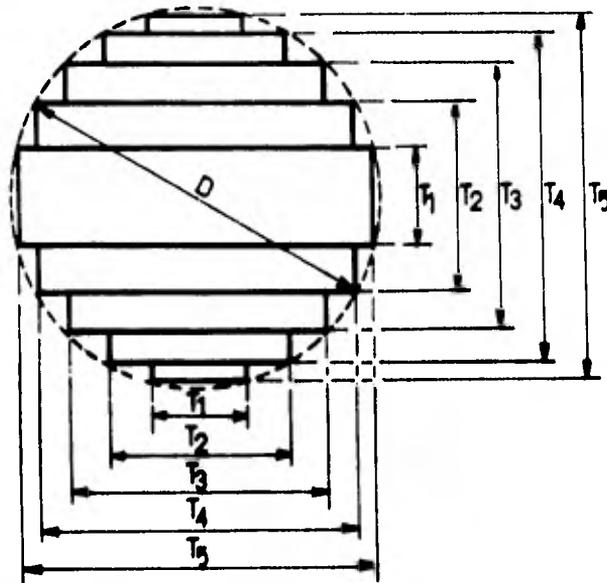


FIG. 4.1. -SECCION TRANSVERSAL DE NUCLEO TIPO CIRCULAR CON ESCALONAMIENTOS.

Para obtener las dimensiones del ancho de las láminas y el espesor de los escalones, que nos proporcionen la máxima área neta de la columna del núcleo, existen tablas que muestran la variación del ancho de las laminaciones y el espesor de los escalones, representados en la unidad del diámetro del círculo que circunscribe la columna del núcleo, contra la variación del número de escalones y su respectivo

porcentaje del factor de espacio (F_{ca}), como aparece en la Tabla 4.2.

TABLA 4.2. -VARIACION DEL ANCHO DE LAS LAMINACIONES Y EL ESPESOR DE LOS ESCALONES PARA UN NUCLEO TIPO CIRCULAR.

No. de escalones	%	ANCHO DE LAS LAMINACIONES								
		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
3	85.1	0.908	0.707	0.424	-	-	-	-	-	-
5	90.8	0.949	0.846	0.707	0.534	0.314	-	-	-	-
7	93.4	0.967	0.901	0.814	0.707	0.581	0.434	0.254	-	-
9	94.8	0.976	0.929	0.868	0.796	0.707	0.605	0.497	0.370	0.216

En la figura 4.3 se muestra una gráfica con la variación del porcentaje del factor de espacio (F_{ca}), contra el número de escalones entre 3 y 9.

De la curva se puede observar que con un número de escalones igual a 9, el factor de espacio es prácticamente el 95%, por tanto resulta injustificable un número mayor de escalones.

Por otra parte la mayoría de los diseñadores de transformadores, trabajan con una serie de secciones transversales de diámetro fijo en el núcleo, y el número de escalones es seleccionado por facilidad de manufactura, en

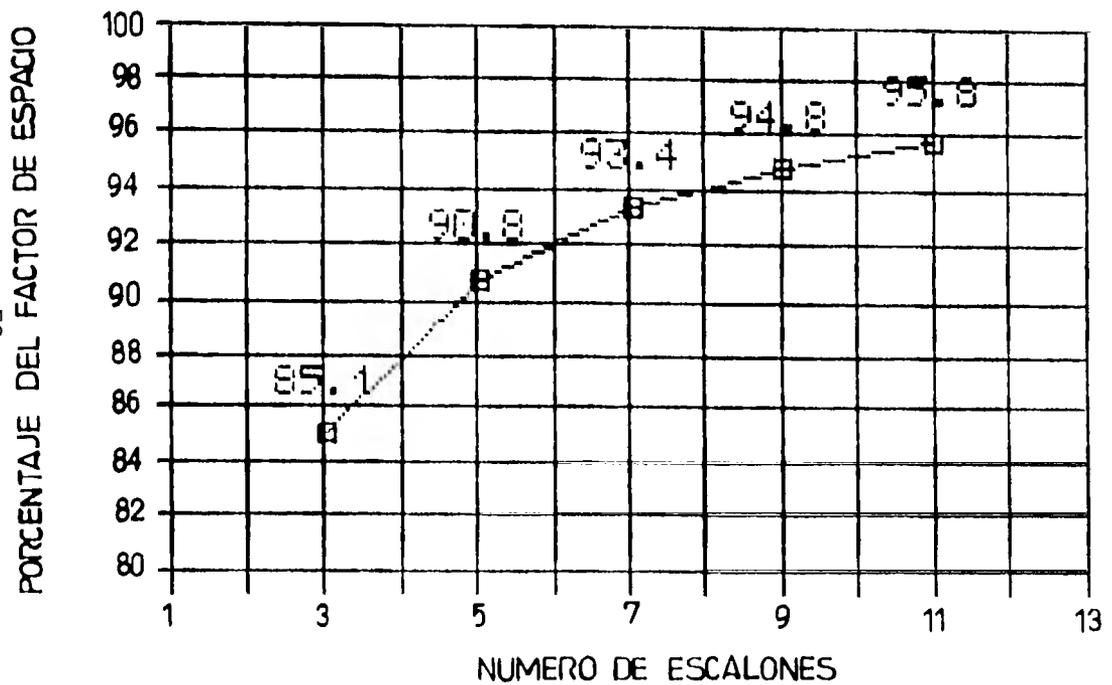


FIG. 4.3.- GRAFICA CON LA VARIACION DE LA SECCION TRANSVERSAL DE UN NUCLEO ESCALONADO DE ACUERDO AL NUMERO DE ESCALONES EMPLEADO.

otras palabras, es usual desviarse ligeramente de las dimensiones óptimas y trabajar con una serie de anchos de lámina y espesores de escalones estandarizados, de modo que puedan ser usados en un diferente número de tamaños de núcleos circulares.

Para evitar el cálculo de núcleos circulares cada vez que se diseña un transformador, generalmente se cuenta con un determinado número de núcleos estándar, en los cuales la sección transversal se incrementa en pasos del 5 al 10%.

4.5. -CALCULO DE LAS DIMENSIONES DE LOS DEVANADOS.

El tipo de bobinas que se usarán en el diseño del transformador de 18/24/30 MVA, 115-13.8 KV, son bobinas redondas concéntricas. Este tipo de devanados son coaxiales y se ensamblan uno en el interior de otro. Pueden clasificarse como devanados de capa, devanados de disco y devanados en espiral. Para alta tensión usamos devanados de disco tipo continuos y para baja tensión usamos devanados en espiral o helitran. Su aplicación se determina de acuerdo a las características del transformador en sus valores de corriente, voltaje, y niveles básicos de aislamiento al impulso (NBAI).

Los devanados de disco tipo continuo consisten de un número determinado de columnas o apilamiento de secciones, espaciadas mediante separadores radiales, que forman ductos

de enfriamiento, como se muestra en la figura 4.4.a. Cada disco o sección se enrolla usando una o más soleras de cobre rectangular aisladas transpuestas, figura 4.4.b: La vuelta interior se soporta sobre tiras de aislamiento llamadas espaciadores o separadores verticales, las cuales van pegadas al cilindro del devanado, como se muestra en la figura 4.5.a.

Los devanados en espiral o helitran presentan un grupo de soleras rectangulares conectadas en paralelo y las vueltas son separadas por medio de espaciadores radiales, figura 4.5.b. Estas bobinas se devanan sobre un tubo aislante y espaciadores verticales, figura 4.5.a. Cada vuelta en espiral es una capa donde su altura se considera la altura de la bobina.

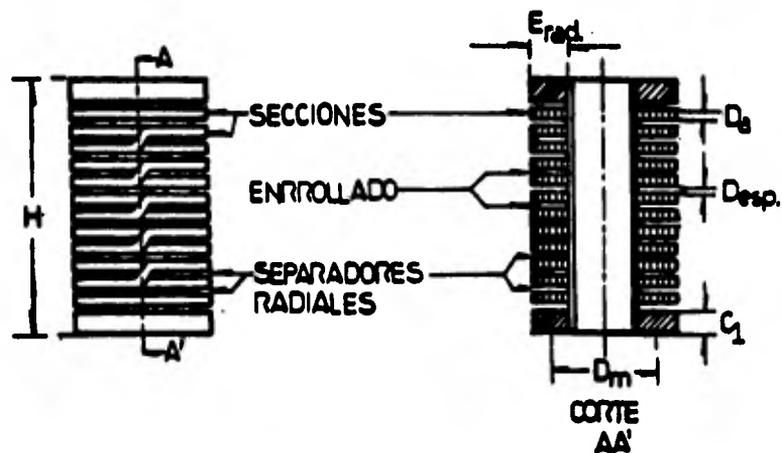


FIG. 4.4. a)DEVANADOS DE DISCO TIPO CONTINUO.

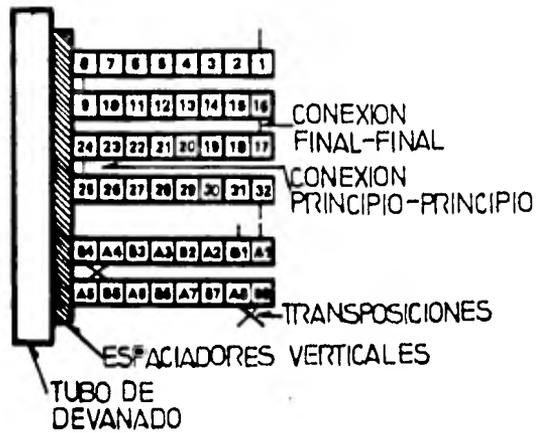


FIG. 4. 4. b) TRANSPOSICION DE CONDUCTORES EN UN DEVANADO DE DISCO TIPO CONTINUO.

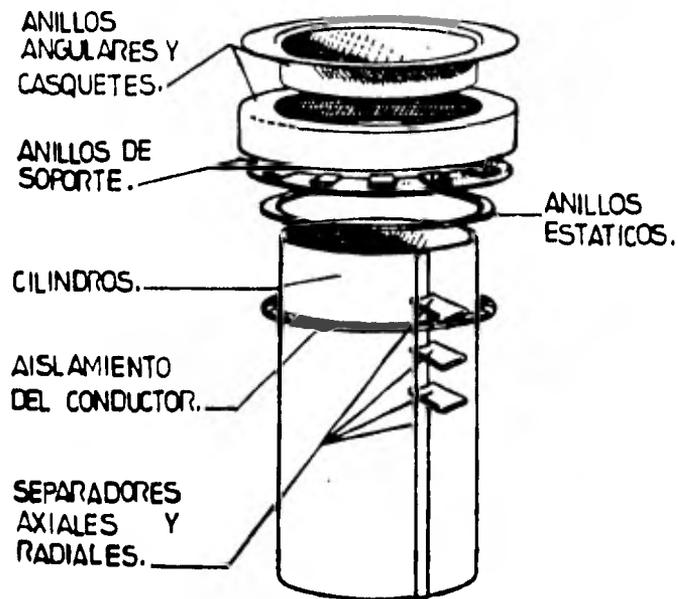


FIG. 4. 5. a) AISLAMIENTOS EN DEVANADOS Y COLLARINES.

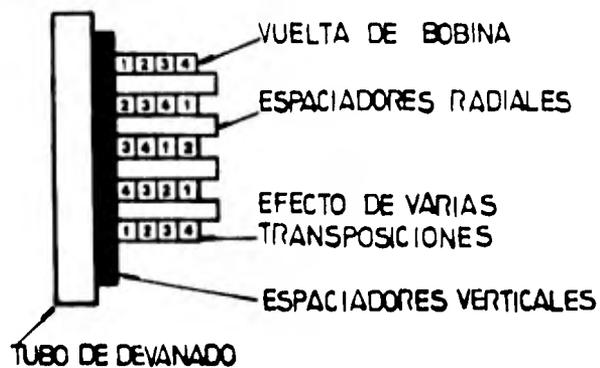


FIG. 4.5. b) DEVANADOS EN ESPIRAL O HELITRAN.

4.5.1.-CALCULO DE LA SECCION TRANSVERSAL DE LOS CONDUCTORES.

Una vez calculadas las corrientes por fase, es necesario determinar las densidades de corriente de los devanados para calcular el Area de la sección transversal de los conductores. Los valores de las densidades de corriente, en cada devanado, son seleccionados en base a las pérdidas de carga requeridas.

Por tanto, el área de los conductores para ambos devanados se calcula como sigue:

$$S = \frac{I_f}{J} \dots\dots\dots (17)$$

Donde: S = Área requerida del conductor, en mm².

I_f = Corriente de fase del devanado, en amperes.

J = Densidad de corriente seleccionada, en A/mm².

El área requerida del conductor se busca en la Tabla 4.6 de áreas para medidas convencionales del alambre magneto rectangular usada por algunos fabricantes de equipo eléctrico, seleccionando el conductor que tenga el área más cercana y que la relación del espesor:ancho sea de por lo menos 1:3, para disminuir las pérdidas por corrientes inducidas.

Una vez seleccionado el conductor se recalcula la densidad de corriente como sigue:

$$J' = \frac{I_f}{S'} \dots\dots\dots (18)$$

Donde: J' = Densidad de corriente definitiva en A/mm².

S' = Área del conductor seleccionado en mm².

Cuando la corriente anterior es relativamente grande, es necesario utilizar dos o más conductores en paralelo, en

ESPEJOR	ANCHO		4	3	2	1	1/0	2/0	3/0	4/0	5/0	6/0	7/0
	[mm]	[pulg]											
	[mm]	[pulg]	0.204	0.229	0.258	0.289	0.325	0.365	0.410	0.460	0.519	0.583	0.655
16	1.29	0.051						11.64	13.13	14.77			
15	1.45	0.057						12.97	14.62	16.46			
14	1.63	0.064						14.50	16.35	18.42			
13	1.83	0.072			11.26	12.70	14.37	16.23	18.32	20.64			
12	2.05	0.081			12.94	14.56	16.44	18.53	20.88	23.49			
11	2.30	0.091			14.60	16.42	18.50	21.08	23.53	26.46			
10	2.59	0.102			16.44	18.47	20.84	23.47	26.50	29.72			
9	2.91	0.114			18.43	20.71	23.36	26.30	29.61	33.29	37.63	42.34	47.63
8	3.26	0.129	16.43	18.51	20.93	23.51	26.50	29.83	33.58	37.74	42.65	47.98	53.97
7	3.66	0.144	18.41	20.73	23.42	26.30	29.65	33.36	37.55	42.19	47.67	53.62	60.31
6	4.11	0.162	20.78	23.39	26.42	29.66	33.42	37.60	42.31	47.53	53.70	60.39	67.91
5	4.62	0.182						41.63	46.92	52.79	59.72		

TABLA 4.6.- AREAS [mm²] PARA MEDIDAS CONVENCIONALES DE ALAMBRE MAGNETO RECTANGULAR USADAS POR ALGUNOS FABRICANTES DE EQUIPO ELECTRICO.

CLASE DE AISLAMIENTO	PRUEBAS DIELECTRICAS		AISLAM. DEL DEV. A LA COLUM. DEL NUC.		AISLAMIENTO ENTRE DEVANADOS		AISLAMIENTO DEL DEVANADO AL YUGO		AISLAMIENTO ENTRE FASES		CLARO DE DEVANADO
	IMPULSO (NBAT) (cresta)	POTENCIAL APLICADO r.c.a.	DUCTO	ESP. CARTON	DUCTO	ESP. CARTON	COLLARIN	DUCTO	DUCTO	ESP. CARTON	TANQUE
[KV]	[KV]	[KV]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1.2	45	10	8	2	5	2	10	1.5	1.7	1	15
2.5	60	15	8	2	5	2	12	2	4.7	1	20
5.0	75	19	8	2	5	2	15	2	5	1.5	25
8.7	95	26	8	2.5	10	2.5	18	2.5	6	2	28
15.0	110	34	10	3	15	3	22	3	8	2.5	30
25.0	150	50	12	4	20	3.5	35	4	10	3	40
34.5	200	70	14	4.5	25	4	40	4.5	13	4.5	50
46.0	250	95	16	5	30	4.5	45	5	23	5	60
69.0	350	140	18	5.5	40	5	50	5.5	36	5.5	70
115.0	550	230	20	6	45	6	60	6	48	6	80

TABLA 4.7.-DISTANCIAS DIELECTRICAS MINIMAS PARA AISLAMIENTOS MAYORES.

este caso, la densidad de corriente se calcula del modo siguiente:

$$J' = \frac{I_p}{mMS'} \quad \dots\dots\dots(19)$$

Donde: m = Número de conductores en paralelo.

4.5.2. -CALCULO DE LAS DIMENSIONES AXIALES.

El procedimiento para el cálculo de las dimensiones de los devanados es similar debido a la semejanza de su estructura geométrica, ya que la diferencia radica principalmente, en el número de conductores en paralelo empleado, así como el devanado y la transposición de los mismos, por lo que la secuencia de cálculo será enfocada para ambos devanados.

Para el cálculo de las dimensiones axiales de los devanados se toma en cuenta que la altura de los dos devanados debe ser la misma y se calcula la altura de la ventana del núcleo como punto de partida, de donde se obtienen las ecuaciones siguientes:

$$H_1 = H_2 = H \quad \dots\dots\dots(20)$$

$$H_v = H + 2mC_1 \quad \dots\dots\dots(21)$$

Donde: H_v = Altura inicial de la ventana del núcleo, en mm.

H_1 = Altura del devanado de A.T., en mm.

H_2 = Altura del devanado de B.T., en mm.

H = Altura de los devanados, en mm.

C_1 = Altura mínima del collarín, en mm.

La altura del collarín se obtiene de la Tabla 4.7 de distancias dieléctricas, en base al nivel básico de aislamiento al impulso (NBAII), que corresponda al devanado de alta y baja tensión.

Despejando H se obtiene la siguiente expresión:

$$H = H_V - 2 \cdot C_1 \quad \dots\dots\dots (22)$$

Donde H se obtiene de la figura 4.4.a) del modo siguiente:

$$H = E_c \cdot D_a + (E_c - 1) \cdot D_{esp} \quad \dots\dots\dots (23)$$

De la ecuación anterior despejando E_c se obtiene la expresión siguiente:

$$E_c = \frac{H + D_{esp}}{D_a + D_{esp}} \quad \dots\dots\dots (24)$$

Donde:

E_c = Número de secciones o vueltas del devanado.

D_a = Ancho del alambre rectangular aislado, se obtiene

de la Tabla 4.10 de características del alambre magneto rectangular.

D_{esp} = Espaciador radial o ducto entre secciones, fig.4.4.a

4.5.3. -CALCULO DE LAS DIMENSIONES RADIALES.

El número de espiras para cada sección o vuelta en ambos devanados, se obtiene de la ecuación siguiente:

$$N_E = \frac{N_n}{E_c} \quad \dots\dots\dots(25)$$

Donde: N_n = Número de espiras nominales del devanado correspondiente.

El número de espiras por sección calculado con la ecuación anterior se redondea al entero por lo que es necesario recalcular el número de secciones, la altura efectiva del devanado H y el collarín C_1 de la siguiente manera:

$$E'_c = \frac{N_n}{N'_E} \quad \dots\dots\dots(26)$$

$$H' = E'_c D_a + (E'_c - 1) D_{esp} \quad \dots\dots\dots(27)$$

$$C'_1 = \frac{H_v - H'}{2} \quad \dots\dots\dots(28)$$

Donde:

N'_E = Número de espiras por sección redondeado al entero.

E'_C = Número efectivo de secciones del devanado.

H' = Altura efectiva del devanado.

C'_i = Altura efectiva del collarín.

El espesor radial o corona en ambos devanados se calcula del modo siguiente:

$$E_{red} = N'_E \cdot m \cdot D_0 \quad \dots\dots\dots (29)$$

Donde:

N'_E = Número de espiras por sección redondeado al entero.

m = Número de conductores en paralelo .

D_0 = Espesor del alambre rectangular aislado, se obtiene de la Tabla 4.10 de características del alambre magneto rectangular.

4.6. -SELECCION DE AISLAMIENTOS MAYORES EN EL CALCULO RADIAL DE LOS DEVANADOS.

Una vez que se ha calculado la dimensión axial de los devanados y se ha definido el arreglo de los mismos, se procede a la selección de aislamientos mayores en el cálculo radial de los devanados.

Los diámetros interior y exterior del devanado de B.T. (B_i y B_e respectivamente), así como los diámetros interior y exterior del devanado de A.T. (B_i y B_e respectivamente), que se muestran en la figura 4.8, se calculan del modo siguiente:

$$B_1 = D + 2 * (d_1 + d_2) \dots\dots\dots (34)$$

$$B_2 = B_1 + 2 * E_{bt} \dots\dots\dots (35)$$

$$B_3 = B_2 + 2 * (d_3 + d_4) \dots\dots\dots (36)$$

$$B_4 = B_3 + 2 * E_{at} \dots\dots\dots (37)$$

Donde:

D= Diámetro de la columna del núcleo, en mm.

d₁ = Espesor ducto de ventilación, en mm.

d₂ = Espesor tubo aislante de cartón, en mm.

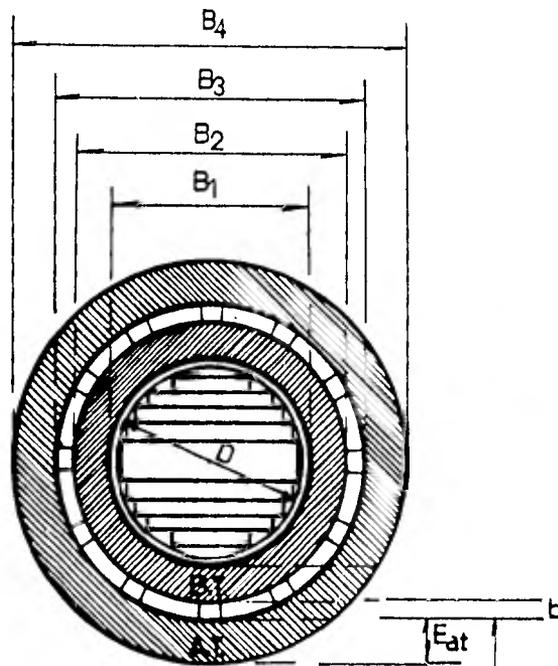
d₃ = Espesor ducto de ventilación en el espacio
alta-baja, en mm.

d₄ = Espesor tubo aislante en el espacio alta-baja,
en mm.

E_{at} = Espesor radial del devanado de A.T., en mm. mm.

E_{bt} = Espesor radial del devanado de B.T., en mm.

Los valores de d₁, d₂, d₃ y d₄ se obtienen de la Tabla 4.7 de distancias mínimas para aislamientos mayores, de acuerdo al nivel básico de aislamiento al impulso (NBAI), que corresponda a los devanados de alta y baja tensión.



(B.T.) DEVANADO DE BAJA TENSION.

(A.T.) DEVANADO DE ALTA TENSION.

(b) DUCTO DE ENFRIAMIENTO O
ESPACIO ALTA-BAJA.

FIGURA 4.8. - VISTA DE PLANTA DE LOS DEVANADOS CIRCULARES.

4.7. -CALCULO DE LAS DIMENSIONES DEL NUCLEO.

Después de calcular las dimensiones de los devanados se procede al cálculo de las dimensiones del núcleo.

Para el caso de devanados circulares, las dimensiones del ancho y la altura de la ventana del núcleo se calculan del modo siguiente:

$$A_v = (B_\phi - D) + d_\phi \quad \text{.....(38)}$$

Donde:

A_v = Ancho de la ventana del núcleo, en mm.

B_ϕ = Diámetro exterior del devanado de A.T., en mm.

D = Diámetro de la columna del núcleo, en mm.

d_ϕ = Aislamiento entre fases, en mm.

$$H_v = H + 2 * C_\phi \quad \text{Ecuación (21.)}$$

Donde:

H_v = Altura de la ventana del núcleo, en mm.

H = Altura total de los devanados, en mm.

C_ϕ = Altura del collarín, en mm.

Las dimensiones del ancho y la altura totales del núcleo se calculan del modo siguiente:

$$A_n = 2 * A_v + 3 * D \quad \text{.....(39)}$$

$$H_n = H_v + 2 * A_y \quad \text{.....(40)}$$

Donde:

A_n = Ancho total del núcleo, en mm.

H_n = Altura total del núcleo, en mm.

A_y = Altura del yugo, en mm.

Las ecuaciones anteriores se obtienen a partir de la figura 4.9., donde se muestra un núcleo de tres columnas.

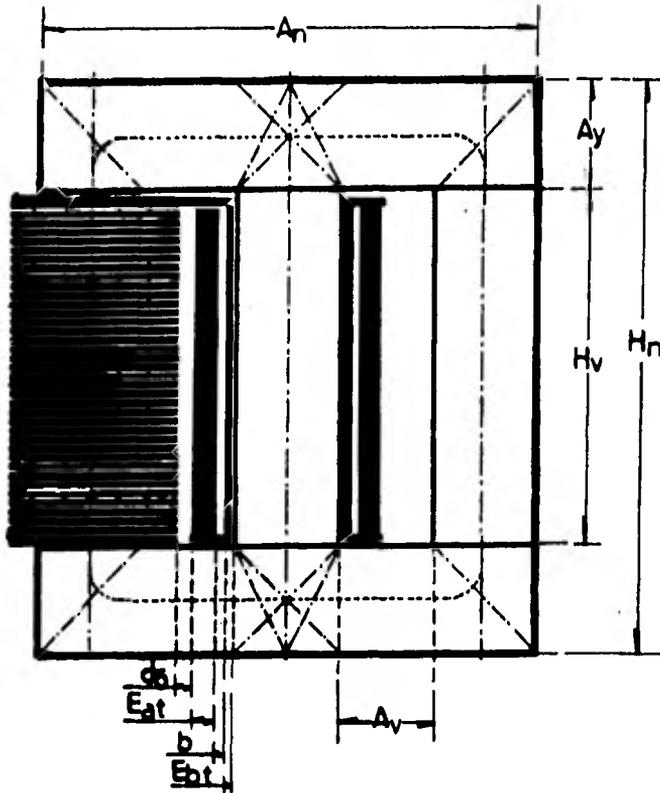


FIG. 4.9. -DIMENSIONES DE UN NUCLEO DE TRES COLUMNAS .

4.8. -CALCULO DE LA LONGITUD DE LOS CONDUCTORES.

La longitud del conductor que forma un devanado se calcula mediante el producto de la vuelta promedio del conductor y el número de espiras nominales del devanado correspondiente, de la siguiente manera:

a). -DEVANADO DE ALTA TENSION (A.T.).

$$L_{at} = V_{me} \cdot N_1 \quad \dots\dots\dots (41)$$

Donde:

L_{at} = Longitud del conductor del devanado de A.T., en m.

V_{me} = Vuelta media del devanado de A.T., en m.

$$V_{me} = \pi \cdot (B_4 - E_{at}) \quad \dots\dots\dots (42)$$

B_4 = Diámetro exterior del devanado de A.T., en m.

E_{at} = Espesor radial del devanado de A.T., en m.

N_1 = Número de espiras nominales del devanado de A.T.

b). -DEVANADO DE BAJA TENSION (B.T.).

$$L_{bt} = V_{mi} \cdot N_2 \quad \dots\dots\dots (43)$$

Donde:

L_{bt} = Longitud del conductor del devanado de B.T., en m.

V_{mi} = Vuelta media del devanado de B.T., en m.

$$V_{mi} = \pi \cdot (B_2 - E_{bt}) \quad \dots\dots\dots (44)$$

B_2 = Diámetro exterior del devanado de B.T., en m.

E_{bt} = Espesor radial del devanado de B.T., en m.

N_2 = Número de espiras nominales del devanado de B.T.

4.9. -CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LOS CONDUCTORES.

La resistencia se obtiene al multiplicar la longitud del conductor y la resistencia del conductor en por unidad de longitud, que se obtiene de la Tabla 4.10 de características de conductores de alambre magneto rectangular con aislamiento de papel.

Normalmente la resistencia se calcula a la temperatura de referencia, 75 u 85°C, aunque en tablas en ocasiones se encuentran los datos a diferente temperatura, en este caso, la corrección de resistencia por temperatura para el cobre, se determina por la ecuación siguiente:

$$R_{T_2} = \left(\frac{234.5 + T_2}{234.5 + T_1} \right) R_{T_1} \quad \dots\dots\dots (45)$$

Donde:

R_{T_1} = Resistencia a la temperatura T_1 .

R_{T_2} = Resistencia a la temperatura T_2 .

T_1, T_2 = Temperaturas expresadas en grados centigrados.

TABLA 4.10. -CARACTERISTICAS DEL ALAMBRE MAGNETO RECTANGULAR CON AISLAMIENTO DE PAPEL.

DIMENSIONES DESNUDO		DIMENSIONES CON AISLAMIENTO		SUPERFICIE DEL COBRE EN mm ²	POR 100 METROS		
ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	ANCHO (mm)		ONMS	PESO EN KG.	
					A 75 ° C	DESNUDO	AISLADO
2.588	6.544	3.024	6.940	16.44	0.126	14.80	15.30
2.305	7.350	2.726	7.886	16.42	0.135	14.80	15.21
2.052	8.251	2.492	8.640	16.44	0.126	14.80	15.30
1.828	9.266	2.248	9.613	16.23	0.119	14.87	15.30
1.628	10.404	2.076	10.750	16.35	0.110	14.87	15.29
1.449	11.680	2.074	11.980	16.46	0.023	14.79	15.17
2.906	6.544	3.342	6.985	18.43	0.113	16.80	17.00
2.588	7.350	3.037	7.738	18.47	0.115	16.70	17.12
2.305	8.251	2.746	8.640	18.50	0.112	16.80	17.00
2.052	9.266	2.516	9.640	18.53	0.112	16.80	17.00
1.828	10.404	2.269	10.760	18.32	0.091	16.74	17.22
1.628	11.680	2.061	12.040	18.42	0.078	16.75	17.24
1.828	11.680	2.271	12.050	20.64	0.066	16.84	19.39
2.052	10.404	2.530	10.740	20.88	0.073	16.85	19.24
2.305	9.266	2.756	9.650	21.08	0.101	16.86	19.20
2.588	8.251	3.052	8.650	20.84	0.099	16.80	19.20
2.052	11.680	2.560	11.950	23.49	0.040	21.22	21.66
2.305	10.404	2.770	10.700	23.53	0.087	21.20	21.60
2.588	9.266	3.070	9.707	23.47	0.077	21.14	21.62
2.906	8.251	3.413	8.700	23.36	0.089	21.20	21.60

4.10. -CALCULO DEL PESO DE LOS CONDUCTORES.

El peso del conductor se obtiene del producto de la longitud del conductor y del peso por unidad de longitud, este último se obtiene de la Tabla 4.10 de características de los conductores de alambre magneto rectangular con aislamiento de papel.

a). -DEVANADO DE ALTA TENSION (A.T.).

$$G_{at} = 3M(L_{at} \cdot w_{g_{at}})$$

.....(46)

Donde:

G_{at} = Peso de los conductores de los devanados de A.T., en Kg

L_{at} = Longitud del conductor del devanado de A.T., en m.

g_{at} = Peso del conductor por unidad de longitud, en Kg/m.

b). -DEVANADO DE BAJA TENSION (B.T.).

$$G_{bt} = 3 * (L_{bt} * g_{bt}) \quad \dots\dots\dots (47)$$

Donde:

G_{bt} = Peso de los conductores de los devanados de B.T., en Kg

L_{bt} = Longitud del conductor del devanado de B.T., en m.

g_{bt} = Peso del conductor por unidad de longitud, en Kg/m.

4.11. -CALCULO DE LAS PERDIDAS DE EXCITACION.

Las pérdidas de excitación o pérdidas en vacío es la potencia activa que consume el transformador, cuando se le aplica tensión nominal a frecuencia nominal, en las terminales de un devanado, estando las terminales del otro devanado en circuito abierto.

Las pérdidas de excitación se calculan en base a la curva de Watts/Libra contra densidad de flujo magnético (Kilogausses), que proporciona el fabricante de acero eléctrico, gráfica que aparece en la fig. 4.11. a la pérdida así calculada se le aplica el factor de destrucción o factor de pérdidas en el núcleo, para considerar la pérdida adicional debida a rebabas que causan corto circuito entre

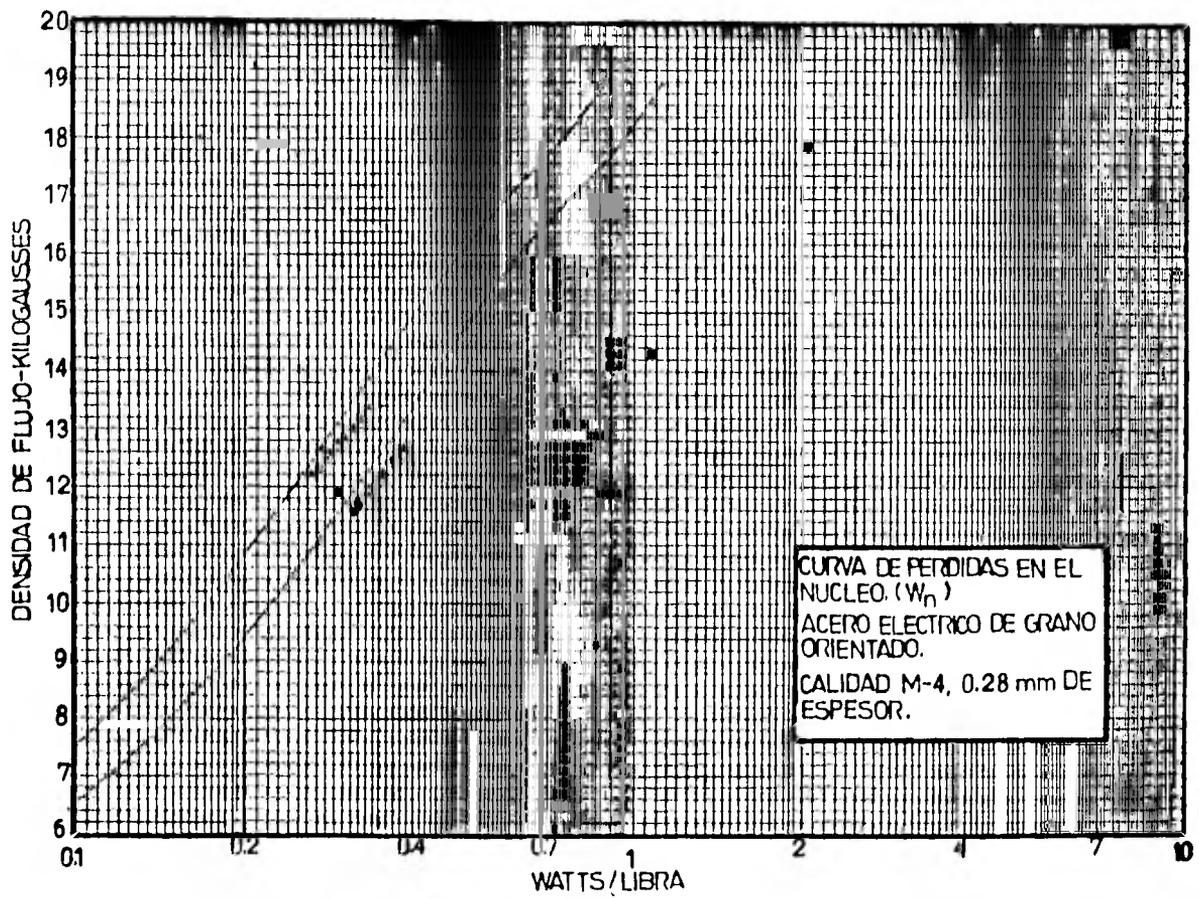


FIG. 4-11- PERDIDAS EN EL NUCLEO-WATTS/LIBRA

laminaciones, por la perforación de la capa aislante de las mismas, distribución no uniforme del flujo magnético y los esfuerzos introducidos en la fabricación.

En la figura 4.11 se reproduce la curva mencionada para el acero eléctrico de grano orientado de calidad M4, con 0.279 mm de espesor. En el eje horizontal se encuentran las pérdidas expresadas en Watts/Libra y en el eje vertical la densidad de flujo magnético expresada en Kilogausses.

Las pérdidas de excitación están dadas por la expresión siguiente:

$$W_n = k_s F_d (G_c + G_y) \quad \dots\dots\dots (48)$$

Donde:

W_n = Pérdidas de excitación en Watts.

k_s = Factor de la curva de acero eléctrico, en Watts/Kg.

F_d = Factor de destrucción o de pérdidas en el núcleo.

(Generalmente varía entre un 10 y 15 % de las pérdidas de excitación).

G_c = Peso de las columnas, en Kg.

G_y = Peso de los yugos, en Kg.

El peso de las columnas y los yugos se calcula del modo siguiente:

$$G_c = 3 H_v A_g \rho_{aa} \quad \dots\dots\dots (49)$$

$$G_y = 2 (2 A_v + 3 A_{esc}) A_g \rho_{aa} \quad \dots\dots\dots (50)$$

Donde:

g_{ae} = Peso específico del acero eléctrico de grano orientado, ($g_{ae} = 7.85 \text{ gr./cm}^3$).

A_{esc} = Ancho máximo de laminaciones de la sección transversal del núcleo, en mm.

4.12. -CALCULO DE LAS PERDIDAS DE CARGA.

Las pérdidas de carga en transformadores de dos devanados, es la potencia activa que se consume cuando circula la corriente nominal, a frecuencia nominal, a través de un devanado, estando las terminales del otro devanado en corto circuito. El valor de estas pérdidas debe ajustarse a la temperatura de referencia.

Las pérdidas de carga consisten de dos partes:

(1) Las pérdidas por efecto Joule ($I^2 \cdot R$), debidas a la corriente nominal: I , que circula a través de los conductores con resistencia: R y

(2) Las pérdidas por corrientes de Eddy debidas a las corrientes inducidas por el campo magnético disperso que enlaza los conductores de los devanados.

a). -PERDIDAS POR EFECTO JOULE ($I^2 \cdot R$).

Para calcular las pérdidas por efecto Joule, se debe encontrar la resistencia de los devanados a la temperatura de referencia (75 u 85°C), a partir de la expresión siguiente:

$$R = \rho \frac{N_n^2 V_m}{S} \quad \text{.....(51)}$$

Donde:

R= Resistencia por fase a la temperatura de referencia, en Ω

ρ = Resistividad para conductores rectangulares de cobre,
($\rho = 21.4 \times 10^{-9} \Omega\text{-mm}$ a 75°C).

N_n = Número de espiras nominales del devanado correspondiente.

V_m = Vuelta media del devanado, en mm.

S= Sección transversal del conductor, en mm^2 .

Las pérdidas por efecto Joule en Watts/Kilogramo del material del conductor estan dadas por:

$$P_j = (J^2 \times \rho \times 10^9) / \rho_d \quad \text{.....(52)}$$

Donde:

J= Densidad de corriente del devanado, en amps./mm^2 .

ρ_d = Densidad del cobre= 8.89 gr./cm^3 .

Sustituyendo los valores numéricos de la ecuación anterior obtenemos la expresión final:

$$P_j = 2.41 \times J^2 \quad \text{.....(53)}$$

b). -PERDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY.

Las pérdidas específicas por corrientes de Eddy en Watts por kilogramo del material del conductor, en base a un flujo magnético perpendicular a la superficie del espesor

del conductor rectangular, están dadas por la ecuación siguiente:

$$P_c = 6.2 \times 10^{-8} \times (B_m \times f \times D_o)^2 / \rho \quad \dots\dots\dots (54)$$

Donde:

B_m = Densidad de flujo magnético máxima dispersa en el espacio alta-baja de los devanados, en Kilogausses.

$$B_m = (\sqrt{2} \times \mu_o \times I \times N) / H \quad \dots\dots\dots (55)$$

$I \times N$ = Ampere-vueltas de cualquier devanado.

H = Altura efectiva del devanado, en mm.

D_o = Espesor del conductor rectangular de cobre, en mm.

μ_o = Constante de permeabilidad magnética del vacío.

$$\mu_o = 0.4 \times \pi \times 10^{-6} \text{ en H/m.} \quad \dots\dots\dots (56)$$

Sustituyendo los valores numéricos de la ecuación anterior se obtiene la expresión final:

$$P_c = 9.1 \times 10^{-9} \times (f \times D_o \times I \times N / H)^2 \quad \dots\dots\dots (57)$$

De la ecuación anterior se deduce que las pérdidas por corrientes de Eddy son proporcionales al cuadrado del espesor del conductor, por ello para reducir las pérdidas se subdivide el conductor en un diferente número de cintas de cobre aisladas en paralelo transpuestas, con el objetivo de que todos los conductores tengan la misma longitud y ocupen cada una de las diferentes posiciones relativas al campo magnético disperso que los atraviesa.

En general, las pérdidas por corrientes de Eddy pueden ser del orden del 5% de las pérdidas por efecto Joule (I^2R), a 75°C en pequeños transformadores, incrementándose hasta cerca del 15% en transformadores de gran potencia.

c). -PERDIDAS DISPERSAS.

Las pérdidas dispersas son aquellas que se producen por las corrientes inducidas que ocasiona el flujo magnético al pasar por materiales conductores tales como: Las paredes del tanque, herrajes, barras de conexión, entre otros, su determinación se basa en la fórmula empírica siguiente:

$$P_d = (4.4717 \times 10^{-8} I_{gr}^2 + 0.0024) (P_{jat} + P_{jbt}) \dots\dots (58)$$

Donde:

P_d = Pérdidas dispersas, en Watts.

I_{gr} = Corriente de fase del devanado de B.T., en amps.

P_{jbt} = Pérdidas por efecto Joule en el devanado de B.T.

P_{jat} = Pérdidas por efecto Joule en el devanado de A.T.

La suma de las pérdidas descritas constituyen las pérdidas de carga totales W_{cu} y se expresan por la ecuación siguiente:

$$W_{cu} = P_{jat} + P_{jbt} + P_{cat} + P_{cbt} + P_d \dots\dots\dots (59)$$

Donde:

P_{cbt} = Pérdidas por corrientes de Eddy en el devanado de B.T.

P_{cat} = Pérdidas por corrientes de Eddy en el devanado de A.T.

4.13. -CALCULO DE LA CORRIENTE DE EXCITACION.

La corriente de excitación es la corriente que circula a través de las terminales de un devanado cuando se le aplica tensión nominal a frecuencia nominal, manteniéndose las terminales del otro devanado en circuito abierto.

La corriente de excitación se calcula en base a la curva de potencia de excitación contra densidad de flujo magnético. Esta curva también es proporcionada por el fabricante de acero eléctrico de grano orientado.

En la figura 4.12, se reproduce esta curva, para el acero eléctrico de grano orientado de calidad M4, con 0.270 mm de espesor. En el eje horizontal se localiza la potencia de excitación, expresada en volt-amperes/Libra y en el eje vertical la densidad de flujo magnético, expresada en Kilogausses.

La corriente de excitación expresada en porcentaje de la corriente de línea se calcula en base a la siguiente ecuación:

$$\% I_e = \frac{V I}{10 * KVA} \dots\dots\dots(60)$$

Donde:

% I_e = Porcentaje de corriente de excitación.

V I = Potencia de excitación en volt-amperes.

KVA = Capacidad del transformador.

ESTA TESIS NO DEBE
SAIR DE LA BIBLIOTECA

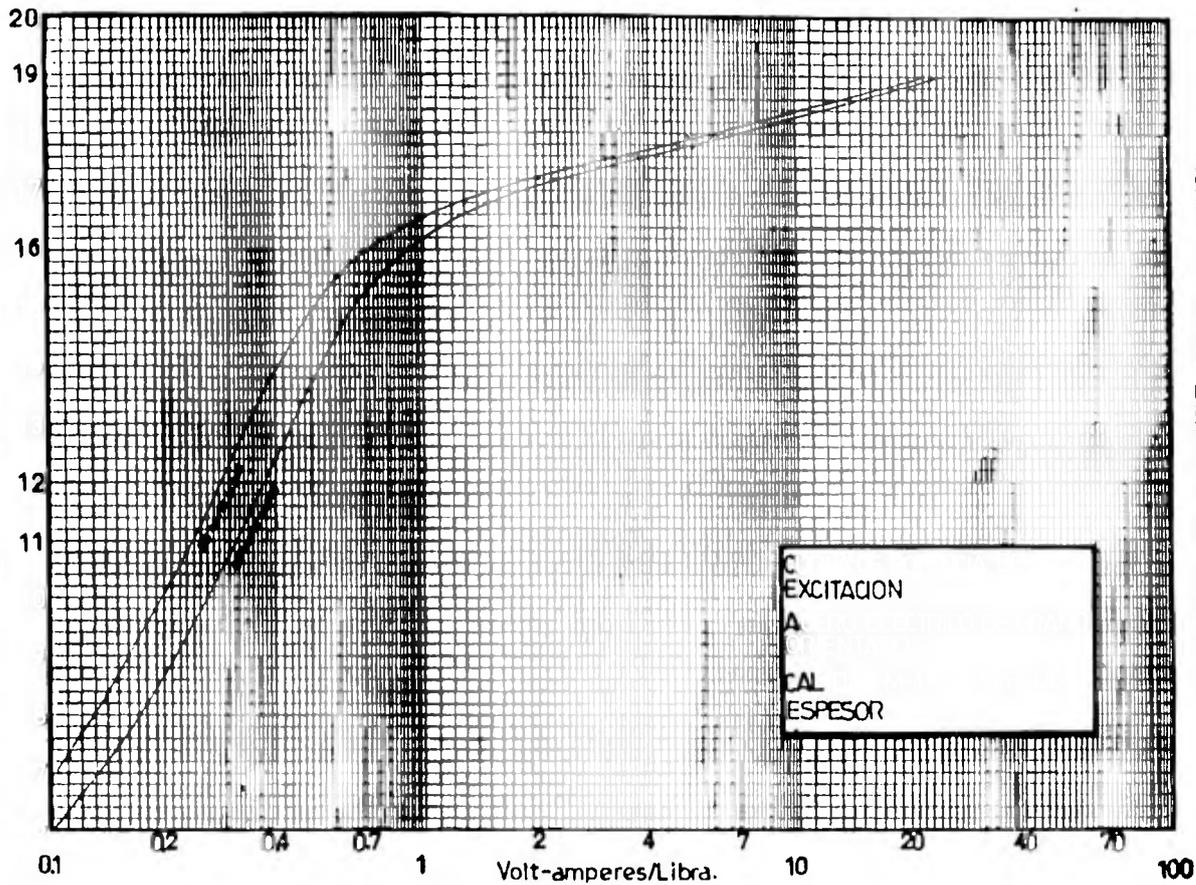


FIG.4.12-

DCIT

La potencia total de excitación se calcula del modo siguiente:

$$V I = k_4 \times (G_c + G_y) \quad \dots\dots\dots (61)$$

Donde:

k_4 = Factor de la curva de acero eléctrico, en volt-amps./Kg.

4.14.-CALCULO DE LA RESISTENCIA EQUIVALENTE EXPRESADA EN POR CIENTO Y EN POR UNIDAD.

Esta resistencia se define por la relación:

$$\% R = 100 \times \frac{W_{cu}}{P} \quad \dots\dots\dots (62)$$

$$R_{p.u.} = \frac{W_{cu}}{P} \quad \dots\dots\dots (63)$$

Donde:

$\%R, R_{p.u.}$ = Resistencias equivalentes expresadas en por ciento y en por unidad, respectivamente.

W_{cu} = Pérdidas de carga del transformador.

P = Potencia nominal del transformador.

Quando P se expresa en KVA la expresión anterior se convierte en:

$$\% R = \frac{W_{cu}}{10 \times KVA} \quad \dots\dots\dots (64)$$

4.13. -CALCULO DE LA REACTANCIA EXPRESADA EN POR CIENTO.

En la práctica la reactancia total de dos devanados concéntricos, expresada en por ciento se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\% X = \frac{0.752 \times 10^{-8} \times f \times N_1^2 \times I_{1F} \times V_m \times \delta}{V_{1F} \times \alpha} \quad \dots\dots\dots (65)$$

Donde:

f = Frecuencia en Hertz.

N₁ = Número de espiras nominales del devanado de A.T.

I_{1F} = Corriente de fase del devanado de A.T., en amps.

V_{1F} = Tensión de fase del devanado de A.T., en volts.

V_m = Vuelta media de ambos devanados, en cm.

$$V_m = \frac{V_{me} + V_{mi}}{2} \quad \dots\dots\dots (66)$$

$$\delta = b + \frac{E_{at} + E_{bt}}{3} \quad \dots\dots\dots (67)$$

b = Espesor radial del aislamiento entre devanados o espacio alta-baja, en cm.

α = Longitud de la trayectoria del flujo magnético disperso.

$$\alpha = \frac{H_1 + H_2}{2} + \frac{E_{at} + b + E_{bt}}{3} \quad \dots\dots\dots(88)$$

Obsérvese la dependencia del porcentaje de reactancia directamente con el cuadrado de las vueltas, tal como sucedería con cualquier reactancia inductiva. Así también % X depende directamente de ó, es decir, depende casi linealmente con el espesor del aislamiento alta-baja (b). El % X varía inversamente con α en la cual las variables dominantes son las alturas de los devanados.

4.16. -CALCULO DE LA IMPEDANCIA.

La tensión de impedancia a corriente nominal es la tensión que se debe aplicar, a frecuencia nominal, a las terminales de un devanado de un transformador, para que a través de las mismas circule la corriente nominal, cuando las terminales del otro devanado están en corto circuito, este valor debe ajustarse a la temperatura de referencia.

La tensión nominal de impedancia, o simplemente impedancia, se expresa generalmente como por ciento de la tensión del devanado al cual se le aplica la tensión de impedancia y se calcula mediante la expresión siguiente:

$$\% Z = \sqrt{(\%R)^2 + (\%X)^2} \quad \dots\dots\dots(89)$$

Donde:

% R= Porcentaje de resistencia.

% X= Porcentaje de reactancia de dispersión.

Normalmente la impedancia del transformador se calcula para 75 u 85°C, para transformadores con elevaciones de temperatura de 55 o 65°C, respectivamente.

4.17. -CALCULO DE LA EFICIENCIA.

La eficiencia de un transformador es la razón de la potencia de salida a la potencia de entrada, expresada en por ciento.

A continuación se muestra la ecuación para calcular el por ciento de eficiencia para cualquier factor de potencia en la carga y porcentaje de la capacidad nominal.

$$\% \eta = 100 \frac{(K/100) \text{MKVA} \text{COS}\phi}{(K/100) \text{MKVA} \text{COS}\phi + W_n + (K/100)^2 W_{cu}} \dots\dots (70)$$

Donde:

% η = Porcentaje de eficiencia.

COS ϕ = Factor de potencia de la carga.

W_n = Pérdidas en vacío, en Watts.

W_{cu} = Pérdidas de carga, en Watts.

K = Porcentaje de la capacidad nominal.

4.18. -CALCULO DE LA REGULACION.

La regulación de un transformador se define como el cambio que ocurre en la tensión del devanado secundario expresado en por ciento de la tensión nominal del mismo devanado, cuando los KVA de salida a un específico factor de potencia, se reducen a cero, manteniendo la tensión del devanado primario constante.

A continuación se muestra la ecuación para calcular el por ciento de regulación para diferente factor de potencia y por ciento de la capacidad nominal, para carga inductiva:

$$\% \text{ REG} = (K/100) \cdot (\%R) \cdot \text{COSE} + (K/100) \cdot (\%X) \cdot \text{SENE} +$$

$$\left[\frac{(K/100) \cdot (\%X) \cdot \text{COSE} - (K/100) \cdot (\%R) \cdot \text{SENE}}{200} \right]^2 \dots\dots (71)$$

Donde:

COSE= Factor de potencia de la carga.

SENE= Factor reactivo de la carga.

%R, %X= Porcentaje de resistencia y reactancia respectivamente.

CAPITULO V

CONSIDERACIONES
DE CORTO CIRCUITO
EN EL
DISEÑO ELECTRICO
DE TRANSFORMADORES

5.-CONSIDERACIONES DE CORTO CIRCUITO EN EL DISEÑO ELECTRICO DE TRANSFORMADORES.

5.1.-GENERALIDADES.

Los transformadores sumergidos en líquido aislante, deben ser diseñados y construidos para soportar los esfuerzos mecánicos y térmicos producidos por cortos circuitos externos. Los cortos circuitos externos deben incluir fallas trifásicas, de una fase a tierra, doble fase a tierra y de fase a fase en cualquier grupo de terminales.

Para otras condiciones de falla los requerimientos deben ser especificados por los responsables de la aplicación del transformador. Se reconoce que la capacidad de soportar cortos circuitos puede ser afectado adversamente por los efectos acumulados, de esfuerzos mecánicos y térmicos repetidos tales como los producidos por cortos circuitos y sobrecargas severas. Debido a que no hay medios para detectar y evaluar cuantitativamente los efectos de degradación de tales ciclos de sobrecarga o corto circuito, cuando se especifiquen pruebas de corto circuito, estas deben ser realizadas antes de poner el transformador en servicio.

Para transformadores de potencia, la duración de la corriente de corto circuito se limita a dos segundos a menos que se especifique de otra manera por el usuario.

Quando se realizan pruebas de corto circuito, la duración de cada prueba debe ser de 0.25 segundos, excepto aquella que satisfaga las necesidades de la corriente simétrica de corto circuito, la cual debe ser hecha con una duración mayor en transformadores comprendidos en el rango de capacidades de 5000 a 30000 KVA, que es de 0.5 segundos.

5.2. -CALCULO DE LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO.

Para transformadores de potencia con capacidades mayores a 5000 KVA, la corriente simétrica de corto circuito debe ser calculada usando la impedancia del transformador más la impedancia del sistema, según sea especificada por el usuario. Cuando no se especifique la impedancia del sistema deben utilizarse valores de las características del sistema.

Las características del sistema para cada juego de terminales del transformador (capacidad de falla del sistema y la relación X_0/X_1) deben ser especificadas. Para terminales conectadas a máquinas rotatorias, la impedancia del equipo conectado debe ser especificada. En concordancia con la capacidad de falla del sistema especificada y la impedancia de las máquinas rotatorias, los valores deben ser especificados para cada fuente de la Tabla 5.1. Cuando no se especifique una relación X_0/X_1 , se debe usar una relación de 2.0.

TABLA 5.1.-REACTANCIA SUBTRANSITORIA DE MAQUINAS SINCROAS TRIFASICAS.

TIPO DE MAQUINA	Reactancia más común en por unidad.	Rango de reactancia subtransitoria, en por unidad.
Turbo generador de 2 polos.	0.10	0.07 a 0.20
Turbo generador de 4 polos	0.14	0.12 a 0.21
Generadores de polos salientes y motores con amortiguadores.	0.20	0.13 a 0.32
Generadores de polos salientes sin amortiguadores.	0.30	0.20 a 0.50
Condensadores enfriados por aire.	0.27	0.19 a 0.30
Condensadores enfriados por hidrógeno.	0.32	0.23 a 0.36

a).-CORRIENTE SIMETRICA.

La corriente simétrica de corto circuito, para transformadores de dos devanados, en amperes r.c.m. se calcula del modo siguiente:

$$I_{cc} = \frac{I_n}{Z_T + Z_S} \dots\dots\dots (72)$$

Donde:

I_n = Corriente nominal en una derivación dada, en amps.r.c.m.

Z_T = Impedancia del transformador en una derivación dada, en por unidad.

Z_s = Impedancia del sistema o de aparatos permanentemente conectados, en por unidad.

b). -CORRIENTE ASIMETRICA.

El pico de la corriente asimétrica del primer ciclo, que el transformador debe soportar, se determina como sigue:

$$I_{acc}(\text{pico asimétrica}) = K I_{cc} \quad \dots\dots\dots(73)$$

Donde:

$$K = 2M \left[1 + \exp \left\{ -(\theta + \pi/2) \times (R/X) \right\} \times \text{SENO} \theta \right] \quad \dots\dots\dots(74)$$

\exp = Base de los logaritmos naturales.

θ = $\text{arc tan}(X/R)$, en radianes. $\dots\dots\dots(75)$

X/R = Relación de reactancia a resistencia.

Cuando la impedancia del sistema esta incluida en el cálculo de la corriente de falla, la relación X/R de la impedancia externa se considera igual a la del transformador, si no se especifica de otra manera.

c). -LIMITACIONES DE CORRIENTE.

Los materiales y construcciones de los transformadores convencionales tienen ciertas limitaciones inherentes de resistencia al corto circuito. Un ejemplo es la habilidad de resistencia mecánica al esfuerzo de tensión del cobre recocido, la cual determina un limite en el esfuerzo de tensión en el devanado externo de un transformador de tipo núcleo.

Las técnicas de construcción y materiales modernos se están y continuarán desarrollando, para mejorar las limitaciones de resistencia mecánica. En ciertas circunstancias puede no ser posible cumplir los requisitos de resistencia mecánica en el transformador y en tales condiciones podría ser necesario limitar la corriente de falla por medio de impedancias adicionales externas a los devanados del transformador.

Si los requisitos de corriente no pueden ser cumplidos, en la propuesta técnica del fabricante se deben especificar los límites de corriente de falla del transformador e incorporar esta información en la placa de datos del transformador.

d).-LÍMITES DE TEMPERATURA DE TRANSFORMADORES PARA CONDICIONES DE CORTO CIRCUITO.

La temperatura de los conductores en los devanados de transformadores bajo las condiciones de corto circuito, no deben exceder de 250°C para conductores de cobre.

Estos límites de temperatura fueron fijados considerando los siguientes factores:

- 1.-Generación de gas a partir del líquido aislante o del aislamiento sólido.
- 2.-Recocido del conductor.
- 3.-Envejecimiento del aislamiento.

5.3.-ESFUERZOS ELECTRODINAMICOS DE CORTO CIRCUITO EN EL TRANSFORMADOR.

Cualquier conductor que transporte corriente eléctrica y se encuentre perpendicular a un campo magnético esta sujeto a una fuerza, según la Regla de Ampere, que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$F = B \cdot I \cdot L \quad \dots\dots\dots (70)$$

Donde:

F= Fuerza ejercida en el conductor en Newtons.

B= Densidad de flujo magnético, en Weber/m² =10⁸ Gausses.

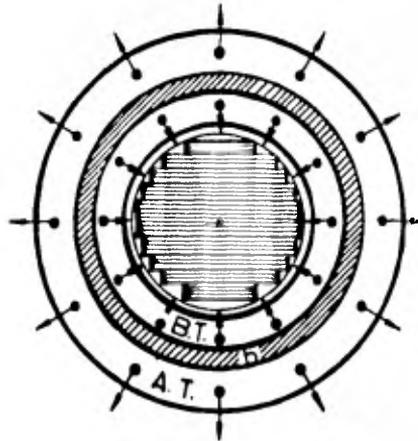
L= Longitud del conductor, en m.

I= Corriente eléctrica, en amperes.

Dado que la densidad de flujo magnético es proporcional a la corriente de los devanados, de la ecuación anterior se deduce que la fuerza ejercida sobre el conductor es directamente proporcional al cuadrado de la corriente. A plena carga estas fuerzas son pequeñas, pero bajo condiciones de corto circuito, se pueden producir grandes fuerzas en las estructuras metálicas, en el aislamiento y en el conductor mismo.

5.3.1.-CALCULO DE ESFUERZOS RADIALES.

La interacción del flujo disperso principal y la corriente en los devanados producen esfuerzos que tienden a mover a los devanados radialmente tanto en dirección interna como externa, dependiendo de la dirección de la corriente relativa a la del flujo magnético, fig. 5.1.

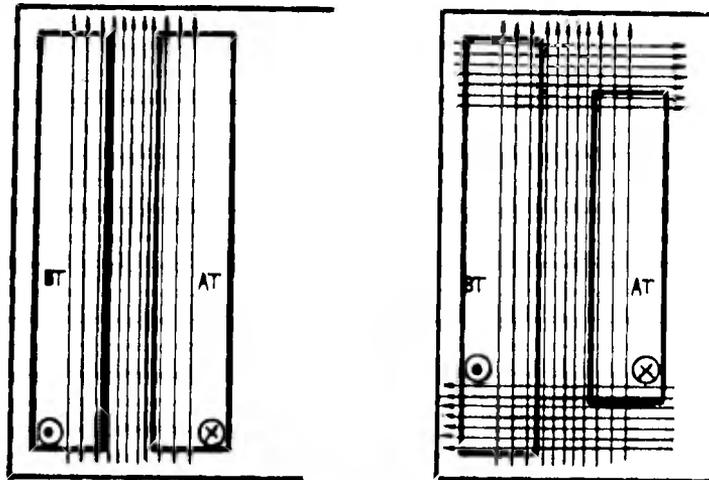


(BT) DEVANADO DE BAJA TENSION.

(AT) DEVANADO DE ALTA TENSION.

(b) ESPACIO ALTA-BAJA.

FIG. 5.1. -ESFUERZOS RADIALES EN UNA BOBINA CIRCULAR.



(a)

(b)

FIG. 5.2. -COMPONENTES APROXIMADAS DEL FLUJO DISPERSO.

(a) Devanados concéntricos de la misma altura.
 (b) Devanados concéntricos de alturas diferentes.

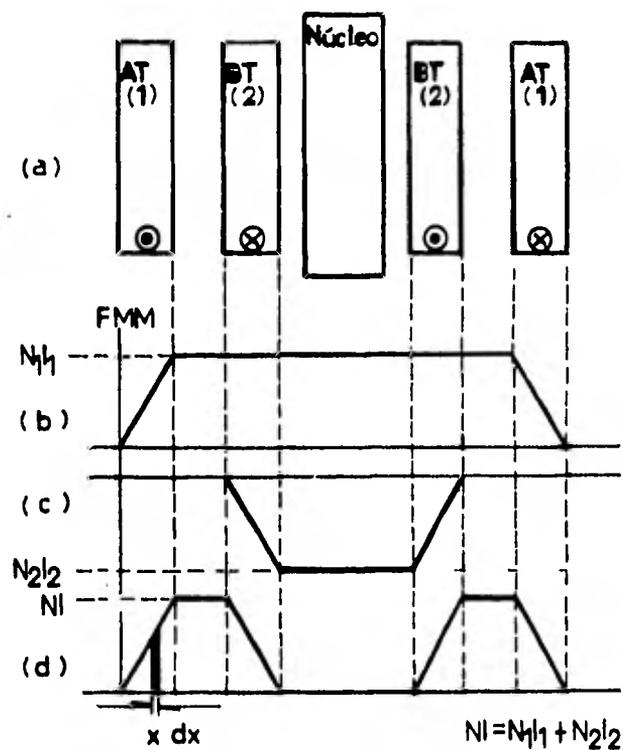


FIG. 5. 3. -FUERZA MAGNETOMOTRIZ (FMM) EN UN TRANSFORMADOR.

- (a) Disposición de los devanados
- (b) FMM producida por la bobina de A. T.
- (c) FMM producida por la bobina de B. T.
- (d) FMM resultante.

El devanado de B. T. tiende a moverse hacia el interior mientras que el devanado de A. T. se mueve hacia el exterior. En devanados con cambiador de derivaciones, las fuerzas pueden actuar en ambas direcciones.

En un transformador de dos devanados la mayor parte del flujo disperso esta confinado al espacio alta-baja como se muestra en la figura 5.2.

En los diagramas de la fig. 5.3, se aprecia que la componente axial del flujo disperso decrece linealmente desde un máximo en el espacio alta-baja hasta cero en las superficies externa del devanado de A.T. e interna del devanado de B.T. Entonces la fuerza radial que actúa en cada uno de los devanados de acuerdo con la regla de la fuerza magnética de Ampere, se obtiene del modo siguiente:

$$F_{rad} = B \cdot \mu_0 \cdot \frac{C I N D}{2 \pi H} \dots\dots\dots (77)$$

La fuerza radial para cada uno de los devanados varia de acuerdo a la longitud de la vuelta media, como se muestra a continuación:

a)DEVANADO DE ALTA TENSION (A.T.).

$$F_{ra} = 0.404 \cdot 10^{-44} \cdot \frac{C I N^2 V_{ma}}{H} \dots\dots\dots (78)$$

b)DEVANADO DE BAJA TENSION (B.T.).

$$F_{rb} = 0.404 \cdot 10^{-44} \cdot \frac{C I N^2 V_{mb}}{H} \dots\dots\dots (79)$$

Donde:

I_N = Ampere-vueltas instantáneos de cualquier devanado.

F_{re} = Fuerza radial sobre el devanado externo (A.T.), en Ton.

F_{ri} = Fuerza radial sobre el devanado interno (B.T.), en Ton.

V_{me} = Vuelta media del devanado de A.T., en m, Ec.(42).

V_{mi} = Vuelta media del devanado de B.T., en m, Ec.(44).

H = Altura de los devanados, en m.

B_t = Densidad de flujo magnético disperso promedio en el espacio alta-baja, en Weber/m².

D_{ext} = Diámetro exterior del devanado, en m.

Los esfuerzos radiales se presentan en todos los transformadores, en pequeñas unidades generalmente son insignificantes, pero en transformadores de potencia es vital el verificar que se cuenta con la capacidad suficiente para soportar estos esfuerzos. En ocasiones puede ser necesario proveer de soporte especial al devanado interno o usar conductores de cobre endurecido por tratamiento térmico o por aleación, de modo que se incremente el esfuerzo de tensión en los conductores de ambos devanados.

5.3.2. -CALCULO DE ESFUERZOS AXIALES

El flujo disperso radial en transformadores con bobinas concéntricas devanadas con solera, no posee generalmente una distribución uniforme en los diferentes arreglos de bobinas utilizadas. Por esta razón el análisis y la evaluación de los esfuerzos axiales resultan más complicados que en el caso de los esfuerzos radiales.

Los esfuerzos axiales dependen de la altura de los devanados, del espacio alta-baja, del espacio entre el devanado interno y la columna del núcleo y del espacio entre el devanado externo y la pared del tanque.

Un valor aproximado para calcular el esfuerzo axial de compresión en ambos devanados balanceados de un transformador, fig.5.2.a), está dado por la expresión siguiente:

$$F_a = \left(2 \times 10^{-7} \pi^2 \times (I N)^2 \times V_m \times \delta \right) + H^3 \quad \dots\dots\dots (80)$$

Donde:

I N = Amperes-vueltas instantáneos de cualquier devanado.

H = Altura de los devanados, en m.

V_m = Vuelta media de ambos devanados, Ec. (66).

δ = Ecuación (67).

Se producen esfuerzos adicionales cuando los devanados de un transformador no están perfectamente balanceados a través de su altura, bajo todas las condiciones de operación. Cuando existe desbalanceo entre devanados se presenta un flujo perpendicular al flujo disperso principal, fig.5.2.b, que reacciona con la corriente del devanado produciendo esfuerzos de tensión en un devanado y esfuerzos de compresión en el otro devanado.

CAPITULO VI

CONSIDERACIONES
DE OPTIMIZACION
EN EL
DISEÑO ELECTRICO
DE TRANSFORMADORES

6. -CONSIDERACIONES DE OPTIMIZACION EN EL DISEÑO ELECTRICO DE TRANSFORMADORES.

6.1. -RELACION OPTIMA ENTRE EL VOLT/ESPIRA Y LA SECCION TRANSVERSAL DEL NUCLEO.

Dentro de los puntos importantes en el diseño de transformadores eléctricos destaca el aspecto económico. El diseñador debe obtener un transformador que además de cumplir con las especificaciones del usuario y garantizar una operación confiable, sea también el más económico.

Generalmente es posible combinar las variables básicas obteniéndose diferentes diseños con algunas diferencias en las características de operación, pero que sin embargo satisfacen las necesidades del usuario. El ingeniero deberá seleccionar entre estos, el diseño que requiera la menor cantidad de materiales.

En el capítulo 4 se muestra la relación directa que existe entre el volt/espira (V_1) y la sección transversal del núcleo (A), o la relación inversa entre el número de espiras (N) y la misma sección transversal (A), ecuación número (12).

$$V_1 = \frac{E}{N} = K \cdot A \quad \text{Donde: } K = 4.44 \cdot f \cdot B \cdot 10^{-8}$$

Para una densidad de flujo y una densidad de corriente en los devanados dada, se puede observar que, si el número

de espiras (ND) , es relativamente grande (y el volt/espira relativamente pequeño) entonces se tendrá, un peso en los devanados también grande, puesto que el peso de los devanados es directamente proporcional al número de espiras en los mismos.

Por otro lado el peso del núcleo disminuye proporcionalmente, ya que la sección (A) es relativamente menor.

Asimismo, un peso relativamente grande de los devanados origina altas pérdidas en la carga y en la impedancia. Y un peso relativamente pequeño del núcleo origina bajas pérdidas en vacío y baja corriente de excitación.

En el caso opuesto en que (ND) sea pequeño y (A) grande, entonces se tendrá un peso relativamente grande del núcleo y uno pequeño de los devanados, con los cambios correspondientes en las características de operación.

Existe un valor óptimo del volt/espira con el cual se obtiene el menor costo de acero eléctrico y conductores en los devanados. Este valor es diferente para cada capacidad en KVA del transformador, y cambia cuando se incrementan o disminuyen los valores de la densidad de flujo y la densidad de corriente de los devanados.

8.2.-EFECTO DE LAS PERDIDAS Y LA IMPEDANCIA EN LA ECONOMIA DEL TRANSFORMADOR.

8.2.1.-EFECTO DE LAS PERDIDAS EN VACIO.

De las pérdidas totales que se generan en un transformador, las pérdidas en el núcleo merecen especial atención, ya que éstas se generan siempre que el transformador esté conectado a la línea independientemente de que éste se encuentre con carga o no. Debido a esto, es recomendable mantenerlas lo más bajo posible.

Existen diferentes formas para mantener bajas las pérdidas en vacío, pero todas ellas conducen a un transformador de mayor costo, ya que se aumenta el peso del núcleo o bien se trabaja con un V_t que generalmente está fuera del intervalo de costo mínimo.

Los diferentes procedimientos para bajar las pérdidas en el núcleo son los siguientes:

a) Utilizar un V_t bajo (incrementando el número de espiras de los devanados). De esta manera se reduce la sección transversal del núcleo, reduciéndose también el peso y por lo tanto las pérdidas.

Se tiene la desventaja de utilizar un V_t que generalmente está fuera del intervalo óptimo, por lo que el transformador será más costoso. Por otro lado la pérdida en los devanados y la impedancia se incrementan.

b) Bajar la densidad de flujo a valores muy inferiores del punto de saturación. Como ejemplo, se puede observar que el valor en Watts/Kg. para 17 000 gauss es de 1.898, mientras que el valor correspondiente a 14 000 gauss es 0.970. Sin embargo las pérdidas en vacío no bajan en esta proporción, ya que al bajar la densidad de flujo se aumenta la sección transversal del núcleo y por lo tanto su peso. Aumentando la longitud media de los devanados, las pérdidas en la carga y la impedancia.

c) Aumentar la densidad de corriente de los devanados. De esta manera se reduce la sección transversal de los conductores, reduciéndose también el área de la ventana y por lo tanto el peso del núcleo. Esta solución es la menos recomendable, y sólo es posible cuando las pérdidas en la carga se encuentran a un valor relativamente muy bajo. En este caso el costo del transformador disminuye, pero las pérdidas en la carga se incrementan notablemente.

En la práctica, es muy común bajar las pérdidas en vacío mediante una combinación de los dos primeros incisos.

6.2.2.-EFECTO DE LAS PERDIDAS DE CARGA.

Las pérdidas en la carga tienen un efecto muy significativo en el costo de un transformador, ya que para reducirlas se requiere aumentar el peso de los conductores y del núcleo, como se explicará en los incisos siguientes:

Los diferentes procedimientos para bajar las pérdidas en la carga se detallan en seguida:

a) Utilizar un V_1 alto (disminuyendo el número de espiras de los devanados). Este es el caso opuesto al correspondiente al inciso 0.2.1.a). Al disminuir el número de espiras, el peso de los devanados disminuye y consecuentemente las pérdidas en la carga. Sin embargo, esta disminución no es proporcional ya que al bajar el número de espiras, la sección transversal del núcleo aumenta, aumentando la longitud media de los devanados. Las pérdidas en vacío aumentan y el V_1 generalmente queda fuera del intervalo óptimo.

b) Bajar la densidad de corriente de los devanados. Al bajar la densidad de corriente, la sección transversal de los conductores aumenta, aumentando proporcionalmente su peso. Por otra parte las pérdidas en la carga son directamente proporcionales al peso de los conductores y al cuadrado de la densidad de corriente, por lo tanto al bajar la densidad de corriente, bajan también las pérdidas en la misma proporción.

Por otro lado, el aumento de la sección transversal de los conductores, origina un aumento en el área de la ventana del núcleo, aumentando su peso y las pérdidas en vacío. El costo del transformador es por lo tanto afectado por el incremento de los dos materiales básicos: Conductores y acero eléctrico.

Cuando se requiere bajar las pérdidas totales de un transformador, para obtener una alta eficiencia, es necesario bajar tanto la densidad de flujo como la densidad de corriente de los devanados. El criterio de selección se cambia y en vez de buscar un V_l que corresponda al diseño óptimo desde el punto de vista de costos, se buscará un V_l que corresponda al diseño de menores pérdidas totales.

6.2.3.-EFECTO DE LA IMPEDANCIA.

La impedancia de un transformador generalmente se analiza desde dos puntos de vista. Por un lado es deseable mantener la impedancia en un valor bajo, si la regulación ha de mantenerse a un valor mínimo. Por otro lado debe mantenerse alta con objeto de reducir la corriente de corto circuito.

Tomando en cuenta este compromiso se desprende que el valor adecuado de la impedancia esta determinado por las circunstancias particulares de cada aplicación.

El efecto que tiene la impedancia en el costo del transformador es menor si se compara con el efecto que tienen las pérdidas en vacío y las pérdidas en la carga. Tomando en cuenta que el valor de la reactancia suele ser del 90 al 95 % del valor de la impedancia, se obtiene del producto de lo que podemos llamar un factor eléctrico y un factor geométrico. El primero es proporcional a la

frecuencia y al cuadrado del número de espiras, mientras que el segundo está en función de las dimensiones de los devanados.

Por lo tanto, es posible aumentar o disminuir, el valor de la reactancia sin modificar el número de espiras (y por lo tanto el V_t), modificando la forma geométrica de los devanados. Para un valor bajo de reactancia corresponderá menor dimensión radial y mayor altura de los devanados. Mientras que para un valor alto de reactancia corresponderá una dimensión radial mayor, una distancia entre devanados (espacio alta-baja) también mayor y una altura menor de los devanados.

Cuando no es posible obtener el valor de impedancia deseado con sólo cambiar las dimensiones de las bobinas entonces es necesario cambiar el número de espiras. En aplicaciones prácticas se encuentra que una impedancia alta generalmente implica altas pérdidas en la carga. Esto se debe a que una alta impedancia requiere un número de espiras relativamente mayor, o bien devanados cuya longitud media es relativamente grande.

CAPITULO VII

IMPLEMENTACION DEL
METODO
TRADICIONAL
DE
DISEÑO
ELECTRICO DEL
TRANSFORMADOR
POR COMPUTADORA

7.-IMPLEMENTACION DEL METODO TRADICIONAL DE DISEÑO ELECTRICO DEL TRANSFORMADOR POR COMPUTADORA.

De lo establecido en el capítulo 4 se puede observar la gran cantidad de trabajo aritmético que se requiere para el diseño eléctrico de transformadores. En el presente capítulo se mostrará la forma en que se deben agrupar los diferentes cálculos para implementar el método tradicional de diseño por computadora. Al final se muestran los datos y resultados del diseño del transformador trifásico de 18/24/30 MVA, 115KV Δ - 13.8KV Y, con sección transversal de núcleo cruciforme y bobinas concéntricas: Continua en alta tensión y helitran en baja tensión, devanadas con solera de cobre.

En la figura 7.1 se muestra el diagrama de flujo general para el diseño eléctrico de transformadores. Cada uno de los bloques representa los diferentes cálculos, mientras que las flechas la secuencia en que estos deben realizarse.

Puede observarse que a partir del bloque número 10 donde son calculadas las características de operación, existe simbología de decisión para verificar que se cumplan las restricciones impuestas por el usuario, con flechas que direccionan el flujo a diferentes bloques del diagrama. Esto permite modificar las variables básicas de diseño, y calcular nuevamente las características de operación, lo cual es necesario cuando se desea obtener el diseño de un

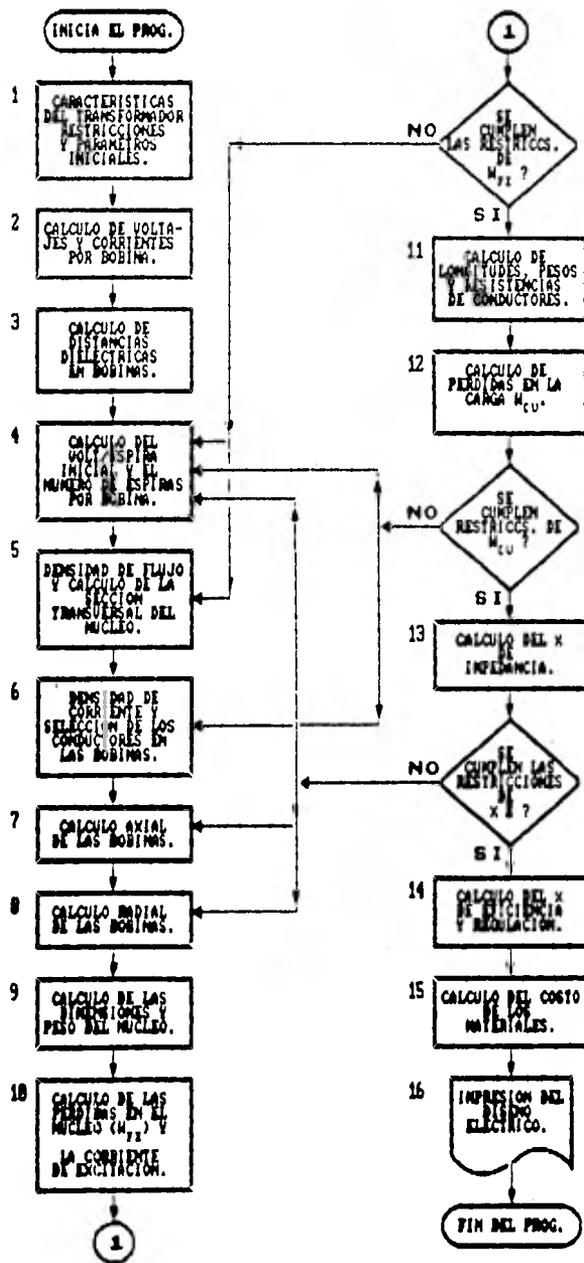


FIG. 7.1.-DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL PARA EL DISEÑO ELECTRICO DE TRANSFORMADORES.

transformador con valores de impedancia y pérdidas prefijadas.

De lo anterior puede observarse que cada uno de los bloques de la figura 7.1, corresponde a un subprograma individual de computadora, que en el lenguaje Pascal se le da el nombre de Procedimiento (Procedure). Los primeros nueve procedimientos se corren en forma secuencial pero a partir del procedimiento número 10 el diseñador tiene la opción de continuar con los procedimientos siguientes o bien de regresar a procedimientos anteriores si las características de operación no están dentro de los valores requeridos.

A continuación se mencionarán los cálculos que se realizan en cada procedimiento y los detalles más importantes de los mismos:

7.1.-PROCEDIMIENTO NUM. 1: CARACTERISTICAS DEL TRANSFORMADOR, RESTRICCIONES Y PARAMETROS INICIALES.

En este procedimiento se proporcionan los datos necesarios para el diseño del transformador. La información necesaria junto con el nombre de la variable que lleva en el programa (entre paréntesis), es la siguiente:

- a) Capacidad nominal del transformador (KVANOM).
- b) Tensión en el devanado de alta tensión (V1).
- c) Tensión en el devanado de baja tensión (V2).
- d) Conexión en el devanado de alta tensión (CONEX1).
- e) Conexión en el devanado de baja tensión (CONEX2).

- f) Frecuencia (F).
- g) Número de derivaciones arriba de la tensión nominal en el devanado de alta tensión (MDERIV).
- h) Número de derivaciones abajo de la tensión nominal en el devanado de alta tensión (NDERIV), con signo negativo.
- i) Valor de las derivaciones en por ciento del valor de la tensión nominal en el devanado de alta tensión (PDERIV).
- j) Límites de aumento de temperatura: 55 o 65°C, (TEMP).
- k) Porcentaje de impedancia propia del transformador (Z).
- l) Porcentaje de impedancia del sistema o de aparatos permanentemente conectados (ZS).
- m) Porcentaje de corriente de excitación (PIE).
- n) Pérdidas totales (WC).
- o) Pérdidas sin carga o pérdidas en el hierro (WH).
- p) Altura de operación sobre el nivel del mar (ASNND).
- q) Densidad de corriente inicial en el devanado de A.T. (J1).
- r) Densidad de corriente inicial en el devanado de B.T. (J2).
- s) Densidad de flujo máxima en el núcleo (B).
- t) Volt/espira en los devanados (VT).
- u) Nivel básico de aislamiento al impulso en el devanado de alta tensión (ATNBAI).
- v) Nivel básico de aislamiento al impulso en el devanado de baja tensión (BTNBAI).
- w) Porcentaje del factor de destrucción en el núcleo (FD).
- x) Porcentaje del factor de apilamiento o de laminación (F1).
- y) Primer y segundo pasos de enfriamiento, utilizados para información de placa de datos (TIPENF1, TIPENF2).

7.2.-PROCEDIMIENTO NUM. 2: CALCULO DE VOLTAJES Y
CORRIENTES POR BOBINA.

Este procedimiento calcula los voltajes y corrientes, de línea y de fase de ambos devanados, de acuerdo al tipo de conexión: Delta o estrella, así como los voltajes y corrientes para cada una de las derivaciones del devanado de A.T.

La figura 7.2 muestra el diagrama de flujo correspondiente al procedimiento número dos, donde las variables que quedan por definir son las siguientes:

$TLi[i]$, $TFi[i]$ = Tensiones de línea y de fase respectivamente, del devanado de A.T., en volts.

$ILi[i]$, $IFi[i]$ = Corrientes de línea y de fase respectivamente, del devanado de A.T., en amperes.

$V2$, $TF2$ = Tensiones de línea y de fase respectivamente, del devanado de B.T., en volts.

$IL2$, $IF2$ = Corrientes de línea y de fase respectivamente del devanado de B.T., en amperes.

7.3.-PROCEDIMIENTO NUM. 3: CALCULO DE DISTANCIAS
DIELECTRICAS EN BOBINAS.

Este procedimiento selecciona de la Tabla 4.7 de distancias mínimas para aislamientos mayores, las distancias dieléctricas de acuerdo a los niveles básicos de aislamiento al impulso asignados a los devanados de alta y baja tensión.

Los valores de la Tabla de distancias dieléctricas, son almacenados en el archivo: AISLAMIE.DTA, para formar una

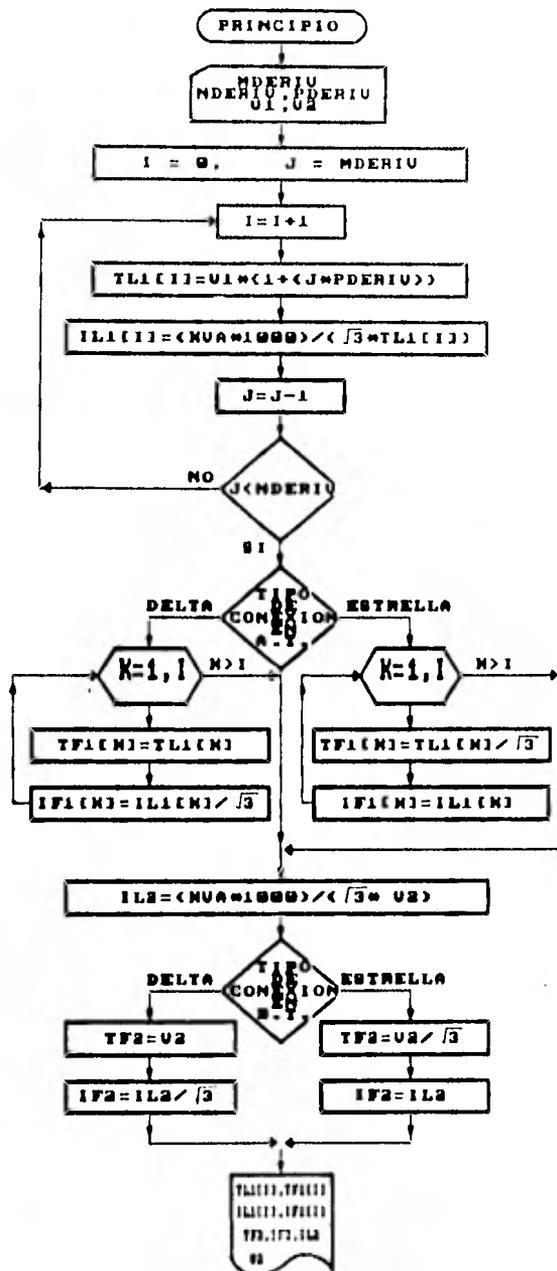


FIG. 7.2.-DIAGRAMA DE FLUJO DEL CALCULO DE VOLTAJES Y CORRIENTES POR BOBINA.

matriz de datos numéricos de 10×12 (AISLAMIE(10,12)), de la cual se seleccionan los valores de distancias dieléctricas para ambos devanados.

La figura 7.3 muestra el diagrama de flujo correspondiente al procedimiento número tres, donde la matriz DISTANCIAS(I,L) almacena las distancias dieléctricas de ambos devanados.

7.4.-PROCEDIMIENTO NUM. 4: CALCULO DEL VOLT/ESPIRA INICIAL Y EL NUMERO DE ESPIRAS POR BOBINA.

Este procedimiento calcula el volt/espira (VTD), mediante la ecuación empírica número 8, descrita en el capítulo cuatro, o bien se introduce como dato inicial según lo decida el diseñador. El procedimiento también calcula el número de espiras de ambos devanados, así como el número de espiras para cada una de las derivaciones y la diferencia de espiras entre cada derivación del devanado de A.T.

La figura 7.4 muestra el diagrama de flujo correspondiente al procedimiento número cuatro, donde las variables que quedan por definir son las siguientes:

N2= Número de espiras nominales del devanado de B.T.

N(K)= Número de espiras para cada una de las derivaciones del devanado de A.T.

P(K)= Diferencia de espiras entre cada derivación del devanado de A.T.

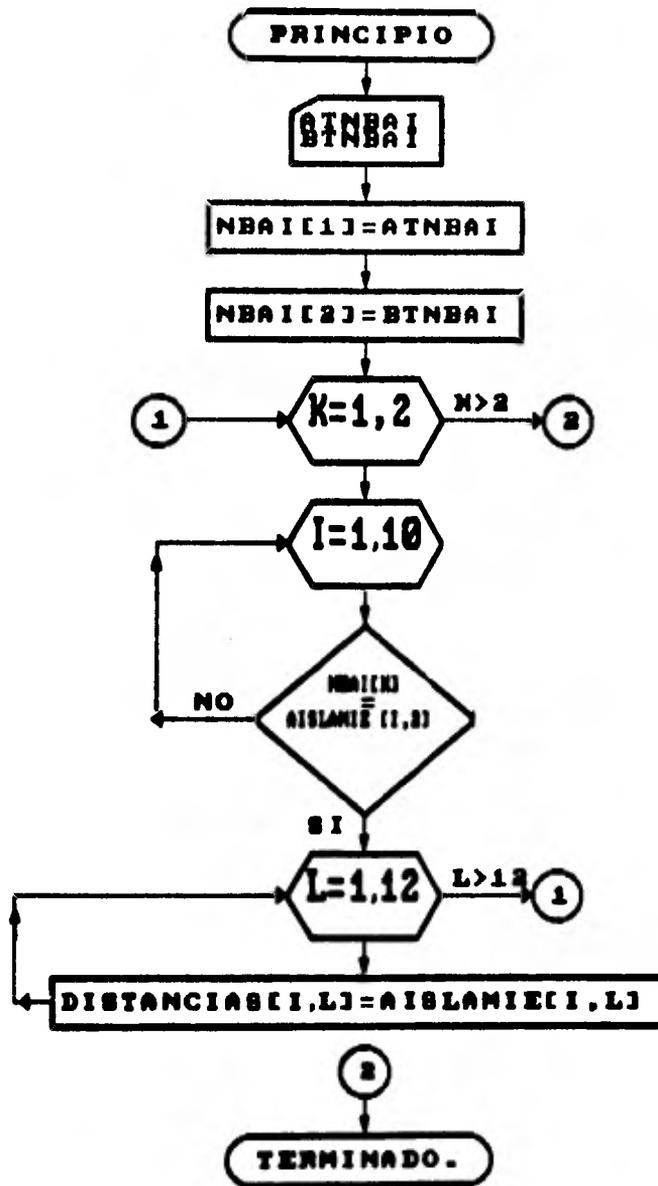


FIG.7.3.-DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CALCULO DE DISTANCIAS DIELECTRICAS EN BOBINAS.

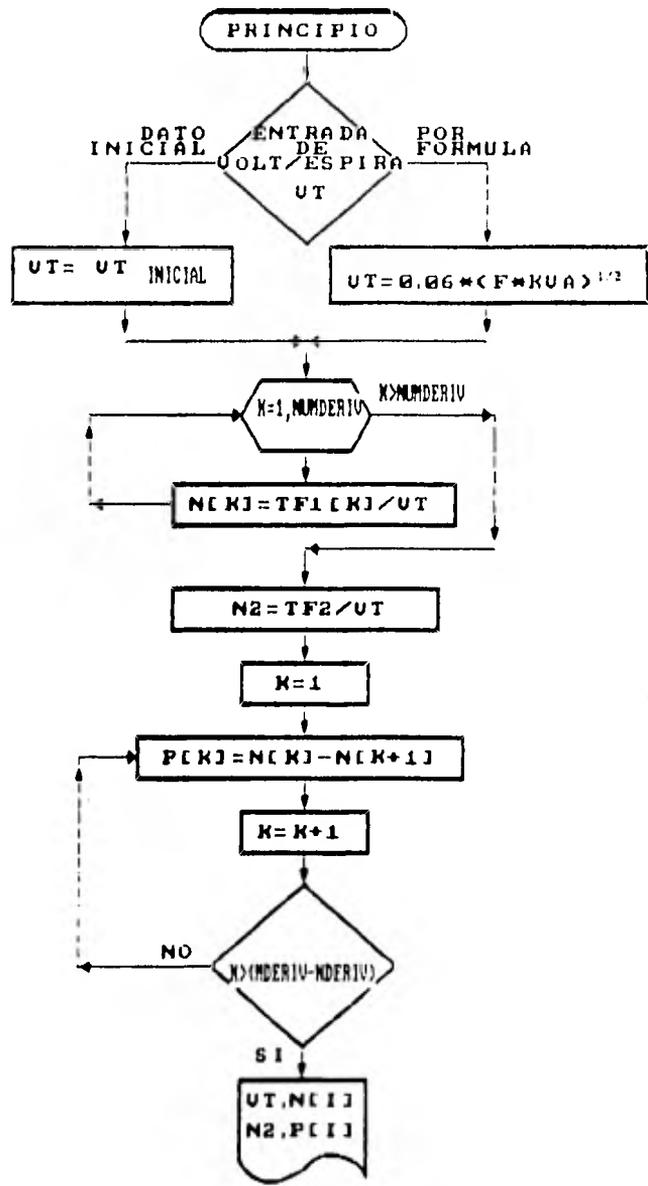


FIG. 7. 4.-DIAGRAMA DE FLUJO DEL CALCULO DEL VOLT/ESPIRA Y EL NUMERO DE ESPIRAS POR BOBINA.

NUMDEPIV= Número máximo de derivaciones en el devanado de A.T.

7.5.-PROCEDIMIENTO NUM. 5: DENSIDAD DE FLUJO Y CALCULO DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL NUCLEO.

Este procedimiento calcula el área geométrica de la sección transversal del núcleo en función de la densidad de flujo (B), proporcionada como dato de entrada. No obstante, en la práctica lo que se acostumbra, una vez que se ha calculado el área geométrica (AG), es buscar la sección transversal del núcleo circular, que tiene en manufactura el fabricante, más próxima a la calculada, aunque con ello se desvíe ligeramente de las dimensiones óptimas, como se mencionó en el capítulo cuatro. Por último se calcula la densidad de flujo definitiva (BDEF), tomando el área real de la sección transversal del núcleo.

La figura 7.5 muestra el diagrama de flujo correspondiente al procedimiento número cinco.

7.6.-PROCEDIMIENTO NUM. 6.-DENSIDAD DE CORRIENTE Y SELECCION DE LOS CONDUCTORES EN LAS BOBINAS.

Este procedimiento selecciona el área de la sección transversal de los conductores de ambos devanados, en base a las densidades de corriente introducidas en el programa de cómputo como dato inicial, restringiéndolas en un rango aproximado de 2.2 a 2.6 A/mm², con el objeto de reducir las pérdidas en la carga a un mínimo. El área del conductor es



FIG. 7.5.-DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CALCULO DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL NUCLEO Y DENSIDAD DE FLUJO MAGNETICO.

seleccionado de la Tabla 4.10 de características del alambre magneto rectangular con aislamiento de papel, cuyos valores numéricos se encuentran almacenados en el archivo: CONDUCTR.DTA, para formar una matriz de 20*10 (CONDUCTR(20,10)), asimismo el procedimiento almacena las características de los conductores de ambos devanados en la matriz: MAGNETO(2,10).

La corriente de fase que circula en el devanado de A.T., es pequeña (52 Amps.), por lo que al ser dividida por un valor de densidad de corriente, dentro del rango especificado, se obtiene un área del conductor que varía entre 20 y casi 24 mm², de ahí es que solamente se emplee un sólo conductor en paralelo en el devanado de A.T., por el contrario en el devanado de B.T., circula una corriente mayor (753 Amps.), que al ser dividida por un valor de densidad de corriente, dentro del rango mencionado, se obtiene un área del conductor que varía entre 200 y 340 mm², como no se encuentra disponible algún conductor con esa área, se divide en 18 conductores en paralelo, con el objeto de reducir el área de la sección transversal del conductor al rango que va de 18 hasta 19 mm², los cuales se encuentran disponibles en la Tabla 4.6, seleccionando las áreas de los conductores que tengan una relación espesor:ancho de por lo menos 1:3, para reducir las pérdidas por corrientes inducidas a un mínimo.

Finalmente se recalculan las densidades de corriente de ambos devanados con el área del conductor seleccionado.

La figura 7.6 muestra el diagrama de flujo correspondiente al procedimiento número 6, donde las variables que quedan por definir son las siguientes:

$S(1)$, $S(2)$ = Área de la sección transversal del conductor en el devanado de alta y baja tensión respectivamente.

I, J, N= Contadores para el procedimiento.

7.7.-PROCEDIMIENTO NUM. 7.-CALCULO AXIAL DE LAS BOBINAS.

Este procedimiento calcula la altura efectiva de las bobinas, el número de secciones o vueltas y de espiras por sección o vuelta, así como el espesor radial o corona de ambos devanados.

El arreglo del devanado de baja tensión se hace de tal manera que todas las vueltas o discos se encuentren en una sola capa y tengan el mismo número de espiras por vuelta, puesto que en cada vuelta se devanan 18 conductores en paralelo.

La altura del devanado de alta tensión debe ser la misma que la del devanado de baja tensión, para lo cual se efectúan iteraciones sucesivas con los diferentes conductores disponibles para cada devanado, hasta encontrar la altura efectiva de los devanados que satisfaga principalmente los requerimientos del porcentaje de impedancia.

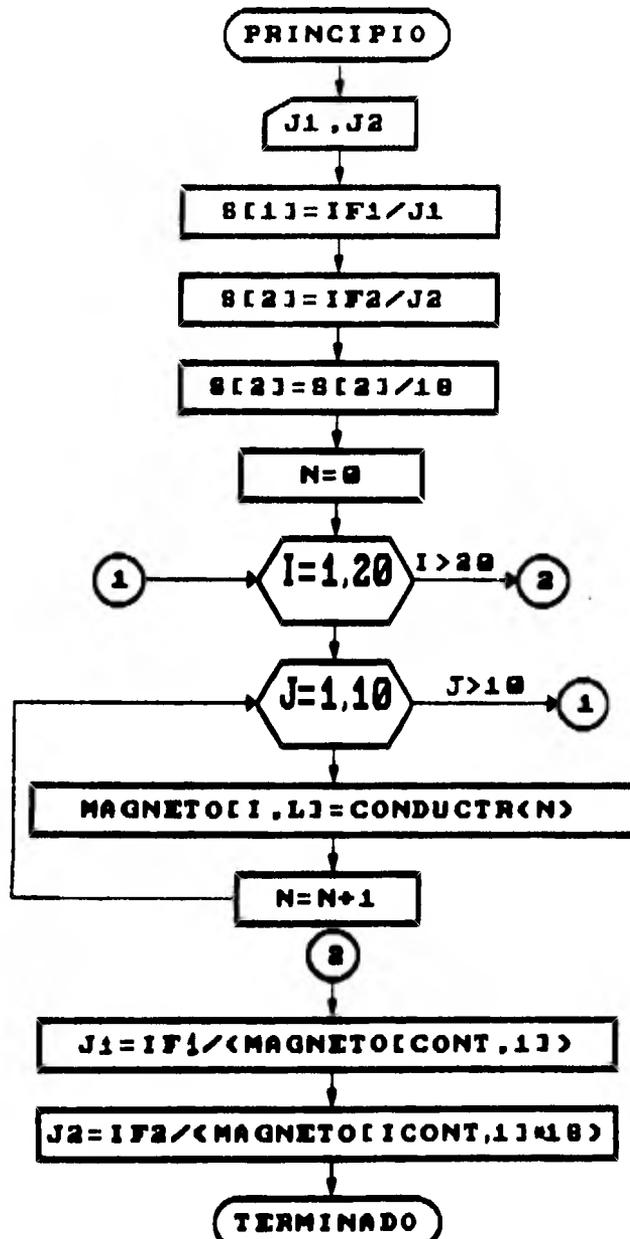


FIG. 7.6.-DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA SELECCION DE LOS CONDUCTORES EN AMBOS DEVANADOS Y SU DENSIDAD DE CORRIENTE.

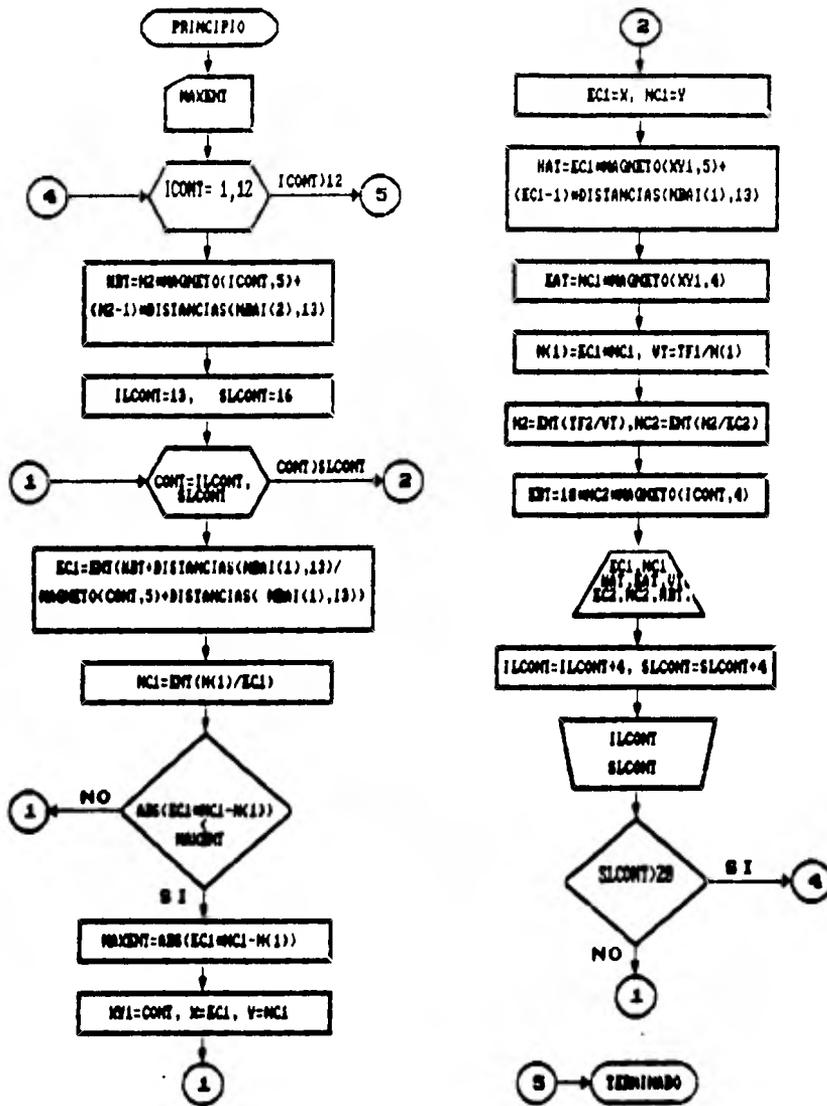


FIG.7.7.-DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CALCULO AXIAL DE LAS BOBINAS.

La figura 7.7 muestra el diagrama de flujo correspondiente al procedimiento num. 7, donde las variables que quedan por definir son las siguientes:

HAT, HBT= Altura efectiva del devanado de alta y baja tensión respectivamente.

EAT, EBT= Espesor radial o corona del devanado de alta y baja tensión respectivamente.

EC1, EC2= Número de secciones o vueltas del devanado de alta y baja tensión respectivamente.

NC1, NC2= Número de espiras por sección o vuelta del devanado de alta y baja tensión respectivamente.

W, CONT, ICONT, XY1, X, Y= Contadores del procedimiento.

ABSC), ENTIC)= Valor absoluto y entero del argumento entre paréntesis respectivamente.

7.8. -PROCEDIMIENTO NUM.8. -CALCULO RADIAL DE LAS BOBINAS.

Este procedimiento selecciona por medio de la matriz DISTANCIAS[I,L], las distancias dieléctricas y las barreras aislantes que se colocarán entre el devanado de baja tensión y el núcleo, entre devanados (espacio alta-baja) y entre fases (espacio alta-alta) dichas distancias dieléctricas ya han sido previamente almacenadas como se mencionó en el procedimiento numero 3.

El paso anterior permite que todas las secciones y vueltas de los devanados tengan contacto con el aceite aislante.

Asimismo el procedimiento define el número de ductos de enfriamiento, los cuales se colocan entre los tubos aislantes de cartón prensado, cuyo espesor es seleccionado de la Tabla 7.8 de espesores de cartones prensados para transformadores, como lo especifica la Norma Oficial Mexicana J-319-1978 "Papel y cartón prensado para transformadores".

Los diámetros interior y exterior de los devanados se calculan con las ecuaciones 34 a la 37 de la sección 4.8.

TABLA 7.8.-ESPESORES DE CARTON PENSADO PARA TRANSFORMADORES [mm].

mm	TOLERANCIA (+/-)
0.80	7
1.00	7
1.20	7
1.60	5
2.00	5
2.50	5
2.80	5
3.00	5
3.20	5

7.9. -PROCEDIMIENTO NUM. 9: CALCULO DE LAS DIMENSIONES Y PESO DEL NUCLEO.

Este procedimiento calcula las dimensiones del núcleo, siendo las más importantes: El ancho y la altura de la ventana del núcleo y el ancho y la altura total del núcleo, que constituyen las ecuaciones 38, 21, 39 y 40 respectivamente, de la sección 4.7.

Asimismo el procedimiento calcula el peso de las columnas y los yugos, por medio de las ecuaciones 49 y 50 respectivamente, de la sección 4.11.

7.10. -PROCEDIMIENTO NUM. 10: CALCULO DE LAS PERDIDAS EN EL NUCLEO Y LA CORRIENTE DE EXCITACION.

Este procedimiento ajusta a curvas polinomiales los valores de las tablas de Watts/Libra y Volts-amperes/Libra contra densidad de flujo, que aparecen en las figuras: 4.11 y 4.12 respectivamente.

Con objeto de obtener un mejor ajuste, la tabla de Watts/Kg. contra densidad de flujo y la tabla de Volt-amperes/Kg. contra densidad de flujo, que aparecen en las Tablas 7.9 y 7.10 respectivamente, se dividieron en tres partes:

La primera comprende de 14 a 15 Kilogaussos, las ecuaciones correspondientes son las siguientes:

$$K1 = 14.265524 - 1.9691366 \times 10^{-6} B + 0.06803506 \times 10^{-6} B^2 + 41.382E-8 B^3 \dots (81)$$

$$K2 = -1.459988 + 0.1689345 \times 10^{-6} B + 489.054E-8 B^2 - 11.279E-8 B^3 \dots (82)$$

La segunda parte comprende de 15.1 a 16.5 Kilogausses, las ecuaciones correspondientes son las siguientes:

$$K1 = -1130.132216 + 219.16626B - 14.1842B^2 + 0.3068B^3 \dots (83)$$

$$K2 = -24.7328366 + 4.978186B - 0.33285B^2 + 773.2043E-5B^3 \dots (84)$$

La tercera parte comprende de 16.6 a 18 Kilogausses, las ecuaciones correspondientes son las siguientes:

$$K1 = 552.650202 + 24.421596B - 8.7771755B^2 + 0.3201301B^3 \dots (85)$$

$$K2 = 2.38931196 - 0.514104B + 0.030863B^2 - 1655E-7B^3 \dots (86)$$

En las Tablas 7.9 y 7.10 se muestran los valores de Watts/Kg. y de Volt-amperes/Kg. contra densidad de flujo respectivamente, obtenidos de las curvas proporcionadas por el fabricante de acero eléctrico y los valores calculados a partir de las ecuaciones 81 a 86.

TABLA 7.9.-VALORES DE LA CURVA DE WATTS/KG. CONTRA DENSIDAD DE FLUJO PARA EL ACERO CALIDAD M4.

DENSIDAD DE FLUJO (KILOGAUSSSES)	WATTS/KG. (SEGUN CURVA)	WATTS/KG. (SEGUN ECUACIONES: K2)
14.0	0.970	0.970
14.5	1.058	1.058
15.0	1.146	1.146
15.5	1.234	1.235
16.0	1.378	1.379
16.5	1.521	1.522
17.0	1.698	1.698
17.5	1.896	1.896
18.0	2.105	2.105

TABLA 7.10.-VALORES DE LA CURVA DE VOLTS-AMPERES/KG.
CONTRA DENSIDAD DE FLUJO PARA EL ACERO CALIDAD M4.

DENSIDAD DE FLUJO (KILOGAUSSSES)	VOLT-AMPERES/KG. (SEGUN CURVA)	VOLT-AMPERES/KG. (SEGUN ECUACIONES: K1)
14.0	1.168	1.168
14.5	1.279	1.279
15.0	1.433	1.433
15.5	1.675	1.676
16.0	2.028	2.028
16.5	2.646	2.647
17.0	4.012	4.013
17.5	7.716	7.715
18.0	15.432	15.433

Las pérdidas en el núcleo o pérdidas de excitación se calculan por medio de la ecuación 48, de la sección 4.11 y el porcentaje de la corriente de excitación se calcula a partir de la ecuación 50, de la sección 4.13.

Regresando al diagrama de la figura 7.1, puede observarse que existen dos opciones para modificar las pérdidas en el núcleo y la corriente de excitación. La primera de ellas consiste en regresar al procedimiento num. 4, y modificar el volt/espira inicial para disminuir o aumentar el área de la sección transversal del núcleo, y la segunda consiste en regresar al procedimiento num. 5 y modificar la densidad de flujo magnético inicial, para aumentar o disminuir las pérdidas de excitación por kilogramo de acero eléctrico empleado.

7.11.-PROCEDIMIENTO NUM. 11.-CALCULO DE LONGITUDES, PESOS Y RESISTENCIAS DE CONDUCTORES.

En este procedimiento se calculan las longitudes de los conductores en ambos devanados a partir de las ecuaciones 41 a 44, que aparecen en la sección 4.8.

La resistencia de los conductores se calcula a partir de la Tabla 4.10 de características de conductores de alambre magneto rectangular con aislamiento de papel, asimismo se hace la corrección de resistencias a la temperatura de referencia (75 u 85°C), como aparece en la ecuación 45 de la sección 4.9.

El peso de los conductores se obtiene a partir de las ecuaciones 46 y 47, para los devanados de alta y baja tensión respectivamente, de la sección 4.10.

7.12.-PROCEDIMIENTO NUM. 12.-CALCULO DE LAS PERDIDAS EN LA CARGA.

Este procedimiento calcula a partir de las ecuaciones 51 a 59 que se muestran en la sección 4.12, las pérdidas por efecto Joule (I^2R), las pérdidas por corrientes de Eddy y las pérdidas dispersas para constituir las pérdidas totales en la carga, ecuación 59.

Se dispone de dos posibilidades para obtener un valor de pérdidas en la carga prefijado. La primera consiste en

regresar al procedimiento num. 4, y modificar el volt/espira inicial, lo que trae como consecuencia un aumento o disminución del número de espiras en las bobinas. La segunda opción consiste en regresar al procedimiento num. 6 y modificar las densidades de corriente de los devanados.

Este procedimiento también calcula las corrientes de línea para cada una de las derivaciones del devanado de alta tensión y la del devanado de baja tensión, junto con la respectiva pérdida en la carga que generan, para cada uno de los pasos de enfriamiento del transformador: 18/24/30 MVA (OA/FA/FA).

7.13. -PROCEDIMIENTO NUM. 13. -CALCULO DEL PORCENTAJE DE IMPEDANCIA.

Este procedimiento calcula el porcentaje de resistencia a partir de las ecuaciones 62 a 64, que se muestran en la sección 4.14 y el porcentaje de reactancia a partir de las ecuaciones 65 a 68, que se muestran en la sección 4.15, para finalmente calcular el porcentaje de impedancia a partir de la ecuación 69, de la sección 4.16, y de los porcentajes de resistencia y reactancia.

Como en los procedimientos anteriores, el diagrama de flujo general de la figura 7.1, muestra las diversas opciones que se tienen cuando es necesario calcular un valor

de por ciento de impedancia predeterminado. Dichas opciones son las siguientes:

- a.-Modificar la altura de los devanados.
- b.-Modificar el ducto A.T.-B.T. y/o la dimensión radial de las bobinas.
- c.-Modificar el volt/espira.

El procedimiento también calcula el porcentaje de impedancia para cada uno de los pasos de enfriamiento del transformador: 18/24/30 MVA (OA/FA/FA), generados a partir del procedimiento número 12.

7.14.-PROCEDIMIENTO NUM. 14.-CALCULO DEL PORCENTAJE DE EFICIENCIA Y REGULACION.

El procedimiento calcula el porcentaje de eficiencia a partir de la ecuación 70, de la sección 4.17 y el porcentaje de regulación a partir de la ecuación 71, de la sección 4.18, ambos para factores de potencia de: 0.8, 0.9 y 1, así como para diferentes capacidades: 12/18/24/30 MVA.

7.15.-PROCEDIMIENTO NUM. 15.-CALCULO DEL COSTO DE LOS MATERIALES.

Este procedimiento evalúa los pesos de los materiales en kilogramos y los costos de los materiales como son: Conductores de cobre, los cuales son proporcionados por el fabricante en \$/Kg. y almacenados en la matriz MAGNETO[I,L], el costo por Kg. del acero al silicio calidad M4. es

introducido en el programa como dato de entrada y el precio de los aislamientos en \$/Kg., (Proporcionados por el Instituto de Investigaciones Eléctricas, abril-1989).

7.18. -PROCEDIMIENTO NUM. 18. -CALCULO DE LAS CARACTERISTICAS DE CORTO CIRCUITO.

Este procedimiento calcula la corriente de corto circuito simétrica y asimétrica pico para ambos devanados por medio de las ecuaciones 72 a 75 del capítulo cinco.

La ecuación 72 del capítulo cinco establece que se debe utilizar para el cálculo de la corriente de corto circuito, la impedancia del sistema o de aparatos permanentemente conectados al transformador, no obstante los resultados del programa de cómputo muestran el cálculo de las corrientes de corto circuito considerando bus infinito ($Z_{\infty}=0$), con el objeto de hacer el cálculo más general a cualquier aparato que se conecte permanentemente al transformador.

El procedimiento también calcula la fuerza radial en ambos devanados, por medio de las ecuaciones 78 y 79 y finalmente se calcula el esfuerzo axial de compresión en ambos devanados balanceados por medio de la ecuación 80 del capítulo cinco.

Todas las fuerzas están calculadas para condiciones de corto circuito y plena carga, como medio de comparación de la magnitud de ambas fuerzas.

El objetivo del cálculo de los esfuerzos a que se verán sometidas las bobinas durante la condición de corto circuito es poder determinar lo siguiente:

- a) Dureza de los conductores de cobre usados en las bobinas.
- b) Esfuerzos en los aislamientos (Separadores radiales y verticales, entre otros.)
- c) Esfuerzos para calcular el sistema de prensado de las bobinas.

7.17. -IMPRESION DEL DISEÑO ELECTRICO DEL TRANSFORMADOR DE 18/24/30 MVA, 115-13.8 KV.

En el Apéndice I anexo al listado del programa de cómputo se muestran los resultados del diseño del transformador de potencia arriba mencionado, para un porcentaje de impedancia de 9.20%, acorde con el rango de impedancias especificado en la Norma Oficial Mexicana-J-284-1988, como se muestra en la Tabla 7.11.

De los resultados anteriores se puede ver que un transformador con un porcentaje de impedancia elevado requiere una menor altura efectiva de los devanados, disminuyendo como consecuencia la altura de la ventana del núcleo, el peso del acero eléctrico y las pérdidas en vacío.

Por otra parte, un transformador con alta impedancia trae como consecuencia, que al disminuir la altura efectiva de los devanados aumenta la longitud de la espira media de los mismos, aumentandose de este modo el peso del cobre y las pérdidas en la carga.

De lo anterior se puede resumir que un transformador con alta impedancia tiene ligeramante mayores pérdidas totales y por tanto menor eficiencia y mayor regulación con respecto a un transformador de menor impedancia. No obstante, un transformador con mayor porcentaje de impedancia disminuye la corriente de corto circuito y por lo tanto la magnitud de los esfuerzos radiales y axiales, con respecto a uno de menor porcentaje de impedancia.

TABLA 7.11.-PORCENTAJES DE IMPEDANCIA REFERIDOS A 60 HZ. EN CLASE DE AISLAMIENTO 115 KV. PARA LOS DIFERENTES PASOS DE ENFRIAMIENTO DEL TRANSFORMADOR.

CLASE	NBAI	KV		% Z (REFERIDA A 60 HZ.)		
		ALTA TENSION	BAJA TENSION	OA CAPACIDAD NOMINAL	FA, FOA PRIMER PASO	FA, FOA SEGUNDO PASO
115	550	115	15-34.5	6.0-9.5	7.0-14.0	8.0-16.0

CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se ha descrito la técnica utilizada en el diseño eléctrico de transformadores.

En los primeros capítulos se ha descrito el método tradicional de diseño eléctrico de transformadores, mostrando los principios fundamentales de operación, así como las diferentes etapas de diseño. Se ha hecho énfasis en el aspecto de la economía del transformador al analizar las características del diseño óptimo.

En la última parte se ha analizado la forma de agrupar los diferentes cálculos para implementar el método tradicional de diseño eléctrico del transformador de potencia de 19/24/30 MVA, 115-13.8 KV, con sección transversal de núcleo cruciforme y bobinas concéntricas: Continua en alta tensión y helitran en baja tensión, devanados con solera de cobre, en un programa de cómputo en lenguaje Pascal, mostrándose los procedimientos más importantes que constituyen el programa de diseño eléctrico del transformador de potencia.

La aplicación del programa del cómputo para el diseño eléctrico del transformador de potencia, realizado en el presente trabajo muestra las siguientes ventajas:

- 1.-El programa obtiene rápidamente el diseño más económico, en base a los datos comerciales que normalmente definen al transformador, en los precios de los materiales

de fabricación, los costos de penalización por pérdida y en los valores de éstas y de impedancia que se requieran. Asimismo, permite analizar el impacto que producen los cambios de materiales y el aumento en los precios de los mismos. Además, posibilita realizar análisis en función de las variaciones en las tarifas de penalización por pérdidas que determinan las empresas eléctricas.

2.-Reducción del tiempo de diseño: El tiempo requerido para el diseño del transformador se reduce notablemente con el uso del programa de cómputo, lo cual da como resultado entregas más rápidas a los usuarios. Así mismo, se proporcionan respuestas más rápidas a las solicitudes de precios del transformador para fines de evaluación.

3.-Consistencia en el diseño: Con el uso del programa de cómputo se aplica el mismo criterio de cálculo para todos los casos. Esto asegura la adecuada selección de barreras aislantes, distancias dieléctricas, conductores en los devanados y la aplicación de las fórmulas correctas para el cálculo de las características de operación.

4.-Reducción de posibles errores: La posibilidad de cometer errores de cálculo que representen pérdidas económicas y de tiempo es reducida con el uso del programa de cómputo, ya que se pueden hacer impresiones adecuadas para enviar la información directamente a manufactura, evitándose

la necesidad de transcribir la información a hojas especiales.

5.-Se puede estudiar fácilmente el efecto del cambio de cualquier parámetro de diseño, como es el incremento en el costo del transformador debido a una impedancia muy baja o muy alta, los valores prácticos de la eficiencia, entre otros. De igual manera se puede estudiar el efecto de nuevos materiales en la economía del transformador, como es el caso de un acero eléctrico de menores pérdidas.

De lo anterior se puede asegurar que el programa de cómputo contribuye en gran medida a la tarea del Ingeniero, el cual tiene como meta obtener el transformador más económico, el más eficiente y el más confiable.

BIBLIOGRAFIA

1).-R. Feinberg, Modern Power Transformer Practice. Inglaterra: Butterworths, 1983. Pags: 5-68, 112-164.

2).-S. Austen Stigant, A. C. Franklin, The J. & P. Transformer Book: A Practical Technology of the Power Transformer. Inglaterra: Butterworths, 1983. Pags.: 4-5, 32-43, 106-111, 115-123, 125-134, 139-146, 625-632, 666-680.

3).-Gregorio Hernández Jiménez, Diseño de transformadores de distribución. Palmira, Morelos, México: Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1985. Pags.: 27-56, 70-80.

4).-Noe Reyes Hernández, Diseño de transformadores de potencia. México. Tecnolab. Comisión Federal de Electricidad, 1987. Pags.: 1-26.

5).-American National Standard Institute/IEEE, Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers, C57.12.00-1980. Pags.: 10-15, 17-19, 25-29.

6).-Norma Oficial Mexicana: NOM-J-284-1986, Productos Eléctricos: Transformadores de Potencia. México: SECOFI, DGN. Pags.: 3, 7-16, 19-21, 25-31, 33-35, 53-58, 61-62.

7).-Norma Oficial Mexicana: NOM-J-319-1978, Papel y cartón prensado para transformadores. México: SECOFI, DGN. Pags.: 25-28.

8).-Catálogo de Conductores Monterrey S.A., Alambre Magneto. México, 1984. Pags.: 3, 24, 30-53.

9).-Armco Steel Corporation, Grain Oriented Electrical Steels Catalogue, U.S.A., 1984. Pags.: 1-36.

10).-Allegheny Ludlum Steel Corporation, Grain Oriented Electrical Steels Catalogue, U.S.A., 1984. Pags.: 1-20.

11).-Turbo Pascal: Reference Manual, Borland International Inc.: U.S.A., 1985. Pags.: 41-42, 47-81, 75-82, 93-116, 127-147.

12).-ChiWriter: The scientific/multifont word processor for the IBM-PC and compatibles. Horstmann Software Design Corporation, U.S.A., 1988. Pags.: I-1,10, II-1,50, II-54,72, III-1,7.

13).-José Ochoa Rangel, Diseño y manufactura de transformadores eléctricos en México. México: Tesis Profesional, Instituto Politécnico Nacional, 1983. Pags.: 41-55, 90-107, 111-115, 127-130.

14).-Ramón Rodríguez Álvarez, Aplicación de las computadoras al diseño de transformadores eléctricos. México: Tesis Profesional, Instituto Politécnico Nacional, 1983. Pags.: 32-65, 96-98.

15).-William H. Hayt, Jr; Engineering Electromagnetics. U.S.A., Mc. Graw-Hill, 1983. Pags.: 236-253, 294-315.

16).-Joaquín Navarro Sagristá, Ensayos físico-mecánicos del papel, España, Ed. Marfil, 1982. Pags. 224-228.

17).-Industrial Eléctrica S.A. Instructivo de Instalación, operación y mantenimiento, división transformadores, 1987, México. Pags. 14-16.

18).-R.A. Flinn, Paul K. Trojan, Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones, México, Mc Graw Hill, 1980, cap. 14.

19).-Ras Oliva, Enrique, Transformadores de Potencia, de Medida y de Protección, España, Boixareu, 1972. Pags.7-10, 207-209.

20).-Kaiser, Carl, Ciencia de materiales para Ingeniería, México, Limusa, 1982. Pags. 423-434.

21).-Olivares Muñoz, Aguirre Sánchez, Arroyo Olvera, Conservación y uso eficiente de la energía en los transformadores, México, Tesis Profesional, UNAM, 1983. Pags. 6-9, 41-50, 79-81, 93-97, 111-112.

22).-Enriquez Harper, Manual de Instalaciones Eléctricas, Residenciales e Industriales, México, 1982, Limusa. Pags. 365-379.

APENDICE I

RESULTADOS Y LISTADO
DEL PROGRAMA EN
LENGUAJE PASCAL
PARA EL DISEÑO
ELECTRICO DEL
TRANSFORMADOR
TRIFASICO DE
18-24-30 MVA 115-13.8 KV

=====

ESPECIFICACIONES

=====

CAPACIDAD NOMINAL DEL TRANSFORMADOR (OA) = 18000 KVA
 TENSION NOM. DEVANADO DE A.T. = 115000 VOLTS
 TENSION NOM. DEVANADO DE B.T. = 13800 VOLTS
 CONEXION DEVANADO A.T. = DELTA
 CONEXION DEVANADO B.T. = ESTRELLA
 DERIVACIONES ARRIBA TENSION NOM. DEV. A.T. = +2
 DERIVACIONES ABAJO TENSION NOM. DEV. A.T. = -2
 VALOR DERIVACIONES = 2.50 %
 NUMERO DE FASES = 3
 FRECUENCIA = 60 HERTZ

=====

RESTRICCIONES

=====

LIMITE DE AUMENTO DE TEMPERATURA = 55 C
 PORCENTAJE DE IMPEDANCIA PROPIA = 9.50 %
 PORCENTAJE CORRIENTE DE EXCITACION = 0.50 %
 PERDIDAS TOTALES = 90000 WATTS
 PERDIDAS SIN CARGA = 20000 WATTS
 PERDIDAS CON CARGA = 70000 WATTS
 ALTURA DE OPERACION SOBRE NIVEL DE MAR = 2300 METROS

=====

PARAMETROS INICIALES

=====

% FACTOR DE DESTRUCCION DEL NUCLEO = 10 %
 % FACTOR DE APILAMIENTO O LAMINACION = 97 %
 DENSIDAD DE CORRIENTE INICIAL DEV. A.T. = 2.50 AMPS./MM²
 DENSIDAD DE CORRIENTE INICIAL DEV. B.T. = 2.50 AMPS./MM²
 DENSIDAD DE FLUJO MAXIMA EN EL NUCLEO = 17500 GAUSSES
 NIV. BASICO DE AISLAM. AL IMPULSO DEV. A.T. = 550 KILOVOLTS
 NIV. BASICO DE AISLAM. AL IMPULSO DEV. B.T. = 110 KILOVOLTS
 VOLTS/ESPIRA INICIALES = 62.35

=====

CALCULO DE VOLTAJES Y CORRIENTES DE LOS DEVANADOS

=====

VOLT/ESPIRA FINALES = 62.37

DEVANADO DE A.T.

DERIV. VOLTS DE LINEA AMPS. DE LINEA VOLTS/FASE AMPS/FASE ESPINAS DIF./ESP.

1	120750	86.06	120750	49.69	1936	
2	117875	88.16	117875	50.90	1890	46
3	115000	90.37	115000	52.17	1844	46
4	112125	92.68	112125	53.51	1798	46
5	109250	95.12	109250	54.92	1752	46

DEVANADO DE B.T.

TENSION DE LINEA = 13800.00 VOLTS
 CORRIENTE DE LINEA = 753.07 AMPS.
 TENSION DE FASE = 7967.48 VOLTS
 CORRIENTE DE FASE = 753.07 AMPS.
 ESPIRAS = 128

=====

CALCULO DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL NUCLEO

=====

DENSIDAD DE FLUJO =	17500 GAUSSES
SECCION EFECTIVA =	1336.99 CM ²
SECCION GEOMETRICA =	1378.34 CM ²
DIAMETRO =	43.98 CM
PORCENTAJE FACTOR DE ESPACIO =	90.74 %
NUMERO DE ESCALONES =	5
ANCHO MAXIMO DE LOS ESCALONMIENTOS =	41.72 CM

=====

CALCULO DE LAS DIMENSIONES AXIALES DE LOS DEVANADOS

=====

DEVANADO DE A.T.

DENSIDAD DE CORRIENTE =	2.22 AMPS/MM ²
SECC. TRANSV. DEL CONDUCTOR SELECCIONADO =	23.47 MM ²
ESPEOR DEL CONDUCTOR DESNUDO =	2.59 MM #10 AWG
ESPEOR DEL CONDUCTOR AISLADO =	3.07 MM
ANCHO DEL CONDUCTOR DESNUDO =	9.27 MM #210 AWG
ANCHO DEL CONDUCTOR AISLADO =	9.71 MM
NUMERO DE CONDUCTORES EN PARALELO =	1
ALTURA TOTAL DEL DEVANADO =	1376.22 MM
COLLARIN =	120.00 MM
NUMERO DE SECCIONES =	88
NUMERO DE ESPIRAS/SECCION =	22
NUMERO DE DUCTOS ENTRE SECCIONES =	87
ESPEOR DUCTO DE ENFRIAMIENTO =	6.00 MM

DEVANADO DE B.T.

DENSIDAD DE CORRIENTE =	2.27 AMPS/MM ²
SECC. TRANSV. DEL CONDUCTOR SELECCIONADO =	18.47 MM ²
ESPEOR DEL CONDUCTOR DESNUDO =	2.59 MM #10 AWG
ESPEOR DEL CONDUCTOR AISLADO =	3.04 MM
ANCHO DEL CONDUCTOR DESNUDO =	7.35 MM # 1 AWG
ANCHO DEL CONDUCTOR AISLADO =	7.74 MM
NUMERO DE CONDUCTORES EN PARALELO =	18
ALTURA TOTAL DEL DEVANADO =	1371.46 MM
COLLARIN =	120.00 MM
NUMERO DE VUELTAS =	128
NUMERO DE ESPIRAS/VUELTA =	1
NUMERO DE DUCTOS ENTRE VUELTAS =	127
ESPEOR DUCTO DE ENFRIAMIENTO =	3.00 MM

=====

CALCULO DE LAS DIMENSIONES RADIALES DE LOS DEVANADOS

=====

DEVANADO DE B.T.

DIAMETRO INTERIOR =	489.78	MM
DIAMETRO EXTERIOR =	599.12	MM
ESPEJOR DEL DEVANADO =	54.67	MM
DIST. NUCLEO BARRERA AISL. B.T. =	25.00	MM
NUM. DUCTOS ENFRIAM. =	2	
ESPEJOR DUCTO ENFRIAM. =	10	MM
NUM. CAPAS AISLANTES =	2	
ESPEJOR CAPA AISLANTE =	2.50	MM
DIST. B.T. BARRERA AISL. A.T. =	50.00	MM
NUM. DUCTOS ENFRIAM. =	3	
ESPEJOR DUCTO ENFRIAM. =	12.40	MM
NUM. CAPAS AISLANTES =	4	
ESPEJOR CAPA AISLANTE =	3.20	MM

DEVANADO DE A.T.

DIAMETRO INTERIOR =	699.12	MM
DIAMETRO EXTERIOR =	834.20	MM
ESPEJOR DEL DEVANADO =	67.54	MM
DIST. A.T. - A.T. =	60.00	MM
NUM. DUCTOS ENFRIAM. =	3	
ESPEJOR DUCTO 1 ENFRIAM. =	17.20	MM
ESPEJOR DUCTO 2 ENFRIAM. =	15	MM
NUM. CAPAS AISLANTES =	4	
ESPEJOR CAPA AISLANTE =	3.20	MM
CLARO DEVANADO-TANQUE =	80.00	MM

=====

CALCULO DE DIMENSIONES Y PERDIDAS EN EL NUCLEO

=====

ANCHO DE VENTANA =	477.03	MM
ALTURA DE VENTANA =	1616.22	MM
ANCHO NUCLEO =	2205.56	MM
ALTURA NUCLEO =	2297.46	MM
PERDIDAS ESPECIFICAS EN EL NUCLEO =	1.90	WATTS/KG
PERDIDAS VACIO =	18512.17	WATTS
VOLT-AMPERES DE EXCITACION =	75328.06	WATTS
CORRIENTE DE EXCITACION =	5.46	AMPS.
PORCENTAJE CORRIENTE DE EXCITACION =	0.42	%

=====

CALCULO DE LAS PERDIDAS EN LOS DEVANADOS E IMPEDANCIA

=====

DEVANADO DE A.T.

LONGITUD ESPIRA MEDIA =	2408.52	MM
RESISTENCIA/FASE =	4.05	OHMS A 75 C
PERDIDAS I ² R ESPECIFICAS =	11.91	WATTS/KG. A 75 C
PERDIDAS I ² R NOMINALES =	33070.45	WATTS. A 75 C
PERDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY ESPECIFICAS =	1.07	WATTS/KG. A 75 C
PERDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY NOMINALES =	2981.09	WATTS. A 75 C
PERDIDAS DE CARGA TOTALES NOMINALES =	36051.55	WATTS. A 75 C

DEVANADO DE B.T.

LONGITUD ESPIRA MEDIA =	1710.44	MM
RESISTENCIA/FASE =	0.01	OHMS A 75 C
PERDIDAS I ² R ESPECIFICAS =	12.37	WATTS/KG. A 75 C
PERDIDAS I ² R NOMINALES =	23976.13	WATTS. A 75 C
PERDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY ESPECIFICAS =	1.00	WATTS/KG. A 75 C
PERDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY NOMINALES =	2104.12	WATTS. A 75 C
PERDIDAS DE CARGA TOTALES NOMINALES =	26080.25	WATTS. A 75 C

LONGITUD ESPIRA PROMEDIO DEVS. =	2059.48	MM
PERDIDAS DISPERSAS EN DEVANADOS. =	5478.53	WATTS. A 75 C
PERDIDAS DE CARGA TOTS. DEVANADOS =	67610.33	WATTS. A 75 C

PERDIDAS TOTALES (CU + FE) =	86122.50	WATTS. A 75 C
------------------------------	----------	---------------

RESISTENCIA (% R) =	0.38	%
REACTANCIA (% X) =	9.19	%
IMPEDANCIA (% Z) =	9.19	%

=====

CALCULO DEL PORCENTAJE DE EFICIENCIA Y REGULACION

=====

% DE EFICIENCIA

KVA	FACTOR DE POTENCIA		
	1.00	0.90	0.80
12000	99.60	99.55	99.50
18000	99.52	99.47	99.41
24000	99.43	99.36	99.28
30000	99.32	99.24	99.15

% DE REGULACION

KVA	FACTOR DE POTENCIA		
	1.00	0.90	0.80
12000	0.44	3.04	3.99
18000	0.80	4.67	6.07
24000	1.25	6.37	8.20
30000	1.80	8.15	10.39

=====

CALCULO DEL PESO TOTAL DE LOS MATERIALES

=====

PESO DEL CONDUCTOR DEVANADO A.T. =	2780.02 Kg.
PESO DEL CONDUCTOR DEVANADO B.T. =	1941.25 Kg.
PESO DE AISLAMIENTOS =	176.48 Kg.
PESO DEL NUCLEO =	9763.77 Kg.
PESO TOTAL MATERIALES =	14485.03 Kg.

=====

CALCULO DEL COSTO TOTAL DE LOS MATERIALES

=====

ACERO DE GRAND ORIENTADO M4 =	3586 \$/KG
WATTS SIN CARGA =	1350 \$/WATT
WATTS CON CARGA =	1350 \$/WATT
COSTO CONDUCTOR DEV. B.T. =	28148053 \$
COSTO CONDUCTOR DEV. A.T. =	43090268 \$
COSTO AISLAMIENTOS =	3000106 \$
COSTO NUCLEO =	35012873 \$
COSTO PERDS. CU =	91273942 \$
COSTO PERDS. FE =	24991428 \$
COSTO TOTAL MATERIALES =	225516670 \$

=====

CALCULO DE LAS CARACTERISTICAS DE CORTOCIRCUITO

=====

CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO EN A.T. =	567.50	AMPS.P.C.B.
CORRIENTE ASIMETRICA PICO EN A.T. =	1508.97	AMPS.P.C.B.
CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO EN B.T. =	8191.12	AMPS.P.C.B.
CORRIENTE ASIMETRICA PICO EN B.T. =	21780.05	AMPS.P.C.B.
FUERZA RADIAL EN A.T. A PLENA CARGA =	1.04	TON
FUERZA RADIAL EN A.T. EN CORTO CIRCUITO =	122.95	TON
FUERZA RADIAL EN B.T. A PLENA CARGA =	0.74	TON
FUERZA RADIAL EN B.T. EN CORTO CIRCUITO =	87.65	TON
FUERZA AXIAL A PLENA CARGA =	0.00	TON
FUERZA AXIAL EN CORTO CIRCUITO =	0.09	TON

=====

CALCULO DE CARACTERISTICAS EN FASOS DE ENFRIAMIENTO

=====

DEVANADO	VOLTS	AMPERES			DERIVACION
		DA	FA	FA	
ALTA TENSION	120750	86.06	114.75	143.44	1
	117875	88.16	117.55	146.94	2
	115000	90.37	120.49	150.61	3
	112125	92.68	123.58	154.47	4
	109250	95.12	126.83	158.54	5
BAJA TENSION	13800	753.07	1004.09	1255.11	
PORCENTAJE DE IMPEDANCIA		9.19 %	12.26 %	15.32 %	
PERDIDAS DE CARGA, TOTALES * EN DEVANADOS EN WATTS A 75 C		67610	121335	191304	

PROGRAM DISENOTRANSFORMADOR18_24_30MVA;

VAR

VT1,VT2,IR1,IR2,KVANOM,JI1,JI2,VH,PDISP,PIE:REAL;
ZCONT,ZS,ICC,IAP,FRE1,FRE2,FR11,FR12,FAX1,FAX2:REAL;
U3,M4,CDBT,CDAT,CWSC,CWCC,VTINC,PIE1:REAL;
WCU1,WCU2,PEC1,PEC2,LY,VB,R3,V1,V2:REAL;
ICONT,XY1,NOE,CONEX1,CONEX2,K,NDERIV,I,FASES,F,L,TEMP,DB,Q:BYTE;
PUNTO,ILCONT,SLCONT,NUMBERIV,IMPCONT,I1,I2,F1,TREF:BYTE;
AV,IE,HY,AESC,A,AG,FCS,HV,AW,HW,G1,G2,N1,K1,K2,R2,GS,FD,K3:REAL;
VI,B1,B2,B3,B4,FACTOR,ULIMSUP,UTLIMSUP,UTLIMINF:REAL;
WCI,WCC,WH1,IE1,BTLEM,ATLEM,PR,PX,RBT1,RAT1:REAL;
B,JI,HBT,HAT,EBT,EAT,D,J2,KVA,PDERIV,Z,WC,WH,IF2,TF2,VT:REAL;
ASNH,NDERIV,J,N2,EC1,EC2,NC1,NC2:INTEGER;
LE,RESP,RESULTADO,TIPEM1,TIPEM2:STRING[3];
N,T,P:ARRAY[1..10]OF INTEGER;
WCT,S,TF1,TF12,TL12,TL1,IF1,IF12,PZ,IL2:ARRAY[1..5]OF REAL;
NBAI:ARRAY[1..20]OF BYTE;
PN:ARRAY[1..2,1..18,1..8]OF REAL;
MAGNETO,DISTANCIAS,IL1,IL12:ARRAY[1..20,1..13]OF REAL;

PROCEDURE NUM_1;

(CARACTERISTICAS DEL TRANSFORMADOR, RESTRICCIONES Y PARAMETROS INICIALES)

BEGIN

Writeln('ESPECIFICACION DE LOS DATOS DE DISEÑO PARA EL TRANSFORMADOR');
Writeln('ELECTRICO DE POTENCIA CON CAPACIDAD 18/24/30 MVA.');

Writeln('=====');

Writeln;
Write('ESPECIFIQUE CAPACIDAD NOMINAL [KVA] = ');
Readln(KVANOM);Writeln;
KVA:=KVANOM;
Write('ESPECIFIQUE VOLTAJE EN EL DEVANADO DE A.T. [VOLTS] = ');
Readln(V1);Writeln;
Write('ESPECIFIQUE VOLTAJE EN EL DEVANADO DE B.T. [VOLTS] = ');
Readln(V2);Writeln;
Writeln('ESPECIFIQUE TIPO DE CONEXION EN LOS DEVANADOS ENTRE PARENTESIS:');
Writeln('(1) DELTA - (2) ESTRELLA');Writeln;
Write('DEVANADO DE ALTA TENSION = ');
Readln(CONEX1);Writeln;
Write('DEVANADO DE BAJA TENSION = ');
Readln(CONEX2);Writeln;
Write('FRECUENCIA [CICLOS/SEGUNDO O HERTZ] = ');
Readln(F);Writeln;
Writeln('NUMERO DE DERIVACIONES ARRIBA DE LA TENSION NOMINAL');
Write('EN EL DEVANADO DE ALTA TENSION = ');
Readln(NDERIV);Writeln;
Writeln('NUMERO DE DERIVACIONES ABAJO DE LA TENSION NOMINAL');
Write('EN EL DEVANADO DE ALTA TENSION [sgn negativo]= ');
Readln(NDERIV);Writeln;
Writeln('VALOR DE LAS DERIVACIONES EN PORCENTAJE (%) DEL VALOR ');
Write('DE LA TENSION NOMINAL EN EL DEVANADO DE ALTA TENSION = ');
Readln(PDERIV);Writeln;
Write('LIMITES DE AUMENTO DE TEMPERATURA: 55 o 65 [GRADOS CENTIGRADOS] = ');
Readln(TEMP);Writeln;
Write('PORCENTAJE DE IMPEDANCIA PROPIA DEL TRANSFORMADOR = ');
Readln(Z); Writeln;
Writeln('PORCENTAJE DE IMPEDANCIA DEL SISTEMA O DE APARATOS ');
Write('PERMANENTEMENTE CONECTADOS AL TRANSFORMADOR = ');
Readln(ZS); Writeln;
Write('PORCENTAJE DE CORRIENTE DE EXCITACION = ');
Readln(PIE);Writeln;
Write('PERDIDAS TOTALES [WATTS] = ');
Readln(WC);Writeln;
Write('PERDIDAS EN EL HIERRO O PERDIDAS SIN CARGA [WATTS] = ');
Readln(WH);Writeln;
Write('ALTURA DE OPERACION SOBRE EL NIVEL DEL MAR [METROS] = ');

```

WRITELN('DEVANADO':15,'VOLTS':10,'AMPERES':23);WRITELN;
WRITELN('OA':35,TIPENF1:10,TIPENF2:9,'DERIVACION':14);WRITELN;
WRITELN;
FOR K:=1 TO NUMBERIV DO
  BEGIN
    IF K=L THEN WRITE('ALTA TENSION':15,TL12[K]:11:0) ELSE
      WRITE(TL12[K]:26:0);
    FOR I:=1 TO 3 DO
      BEGIN
        WRITE(IL12[I,K]:10:2);
        IF I=3 THEN WRITELN(K:7);
      END;
    END;WRITELN;
WRITELN('BAJA TENSION':15,V2:11:0,IL2[1]:10:2,IL2[2]:10:2,IL2[3]:10:2);
WRITELN;
END;
WRITE('PORCENTAJE DE IMPEDANCIA',PZ[1]:12:2,'%':2,PZ[2]:8:2,'%':2);
WRITELN(PZ[3]:8:2,'%':2);
WRITELN;WRITELN;
WRITE('PERDIDAS DE CARGA TOTALES =',WCTE[1]:9:0,WCTE[2]:10:0);
WRITELN(WCTE[3]:10:0);
WRITELN('EN DEVANADOS EN WATTS A ',TREF:2,' C');
END;(PROCEDURE NUM_16)
BEGIN (PROGRAMA PRINCIPAL)
  IMPCONT:=1;
  PUNTO:=1;
  NUM_1;
  NUM_3;
  NUM_2;
  PUNTO:=SUCC(PUNTO);
  NUM_4;
  NUM_6;
  ICONT:=1;
  REPEAT
    ILCONT:=13;
    SLCONT:=16;
    REPEAT
      NUM_7;
      NUM_5;
      NUM_8;
      NUM_9;
      NUM_10;
    IF (WH1<=WH#1.1) AND (PIE1<=PIE) THEN
      BEGIN
        NUM_11;
        NUM_12;
        IF (WH1+WCTE[IMPCONT]<=WC#1.06) THEN
          BEGIN
            NUM_13;
            IF (PZ[1]<=Z#1.075) AND (PZ[1]>=Z#0.925) THEN
              BEGIN
                NUM_14;
                NUM_17;
                NUM_16;
                ZCONT:=1+1/3;
                REPEAT
                  IMPCONT:=SUCC(IMPCONT);
                  KVA:=KVANOM#ZCONT;
                  NUM_2;
                  NUM_11;
                  NUM_12;
                  NUM_13;
                  ZCONT:=ZCONT+1/3;
                UNTIL ZCONT>1+2/3;
              END;
            END;
          END;
        END;
      END;
    END;
  END;

```

```

KO:=2/3;
FOR I:=1 TO I1 DO
  BEGIN
    WRITE(KO*KUANON:10:0);
    FOR K:=1 TO I2 DO
      BEGIN
        WRITE(PNCJ,I,KJ:15:2);
        END;
      WRITELN;
      KO:=KO+1/3;
    END;
  WRITELN;
  WRITELN;
  IF J=1 THEN WRITELN('% DE REGULACION':45);
  END;
  READ(LE);CLRSR;
  WRITELN('=====');
  WRITELN('          CALCULO DEL PESO TOTAL DE LOS MATERIALES          ');
  WRITELN('=====');
  WRITELN;
  WRITELN('PESO DEL CONDUCTOR DEVANADO A.T. =',G1*MAGNETOCXY1,8J:21:2,'Kg.':5);
  WRITELN('PESO DEL CONDUCTOR DEVANADO B.T. =',G2*MAGNETOICONT,8J:21:2,'Kg.':5);
  G1AISL:=3E-5*ATLEN*NCLJ*(MAGNETOCXY1,8J-MAGNETOCXY1,7J);
  G2AISL:=3E-5*BTLEN*N2*(MAGNETOICONT,8J-MAGNETOICONT,7J);
  WRITELN('PESO AISLAMIENTOS CONDUCTOR EN A.T. =',G1AISL:18:2,'Kg.':5);
  WRITELN('PESO AISLAMIENTOS CONDUCTOR EN B.T. =',G2AISL:18:2,'Kg.':5);
  WRITELN('PESO DEL NUCLEO =',GS:38:2,'Kg.':5);
  WRITELN('PESO TOTAL MATERIALES =',G1+G2+GS+G1AISL+G2AISL:32:2,'Kg.':5);
  READ(LE);
  CLRSR;
  WRITELN('=====');
  WRITELN('          CALCULO DEL COSTO TOTAL DE LOS MATERIALES          ');
  WRITELN('=====');
  WRITELN;
  WRITELN('ACERO DE GRAND ORIENTADO M4 =',M4:26:0,'$/KG':6);
  WRITELN('WATTS SIN CARGA =',CWSC:38:0,'$/WATT':8);
  WRITELN('WATTS CON CARGA =',CWCC:38:0,'$/WATT':8);
  WRITELN;
  WRITELN('COSTO CONDUCTOR DEV. B.T. =',G2*MAGNETOICONT,11J:28:0,'$':3);
  WRITELN('COSTO CONDUCTOR DEV. A.T. =',G1*MAGNETOCXY1,11J:28:0,'$':3);
  WRITELN('COSTO NUCLEO =',GS*M4:41:0,'$':3);
  WRITELN('COSTO PERDS. CU =',CWCC*WCT(IMPCONT):38:0,'$':3);
  WRITELN('COSTO PERDS. FE =',CWSC*WH1:38:0,'$':3);
  SUMA1:=G2*CDBT+G1*CDAT+GS*M4+CWCC*WCT(IMPCONT)+CWSC*WH1;
  WRITELN('COSTO TOTAL MATERIALES =',SUMA1:31:0,'$':3);
  WRITELN;
  WRITELN('=====');
  WRITELN('          CALCULO DE LAS CARACTERISTICAS DE CORTOCIRCUITO          ');
  WRITELN('=====');
  WRITELN;
  WRITELN('CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO =',ICC:26:2,'AMPS.P.C.M.':13);
  WRITELN('CORRIENTE ASIMETRICA PICO =',IAP:28:2,'AMPS.P.C.M.':13);
  WRITELN('FUERZA RADIAL EN A.T. A PLENA CARGA =',FRE1:18:2,'TON':5);
  WRITELN('FUERZA RADIAL EN A.T. EN CORTO CIRCUITO =',FRE2:14:2,'TON':5);
  WRITELN('FUERZA RADIAL EN B.T. A PLENA CARGA =',FRI1:18:2,'TON':5);
  WRITELN('FUERZA RADIAL EN B.T. EN CORTO CIRCUITO =',FRI2:14:2,'TON':5);
  WRITELN('FUERZA AXIAL A PLENA CARGA =',FAX1:27:2,'TON':5);
  WRITELN('FUERZA AXIAL EN CORTO CIRCUITO =',FAX2:23:2,'TON':5);
  READLN(LE);
  CLRSR;
  WRITELN('=====');
  WRITELN('          CALCULO DE CARACTERISTICAS EN PASOS DE ENFRIAMIENTO          ');
  WRITELN('=====');
  WRITELN;

```

```

WRITELN('PERDIDAS ESPECIFICAS EN EL NUCLEO =',K2:20:2,'WATTS/KG':10);
WRITELN('PERDIDAS VACIO =',WH1:39:2,'WATTS':7);
WRITELN('VOLT-AMPERES DE EXCITACION =',VI:27:2,'WATTS':7);
WRITELN('CORRIENTE DE EXCITACION =',IE1:30:2,'AMPS.':7);
WRITELN('PORCENTAJE CORRIENTE DE EXCITACION =',PIE1:19:2,'%':3);
READ(LE);CLRSR;
WRITELN('=====');
WRITELN('      CALCULO DE LAS PERDIDAS EN LOS DEVANADOS E IMPEDANCIA      ');
WRITELN('=====');
WRITELN;
WRITELN('      DEVANADO DE A.T. ');
WRITELN;
WRITELN('RESISTENCIA/FASE =',RAT1:35:2,'OHMS A ':9,TREF:2,' C');
WRITELN('PERDIDAS I^2R ESPECIFICAS =',WC1:26:2,'WATTS/KG. A ':14,TREF:2,' C');
WRITELN('PERDIDAS I^2R NOMINALES =',IR1:28:2,'WATTS. A ':11,TREF:2,' C');
WRITELN('PERDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY ESPECIFICAS =',PEC1:8:2);
WRITELN('WATTS/KG. A ':14,TREF:2,' C');
WRITE('PERDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY NOMINALES =',PEC1*G1:10:2);
WRITELN('WATTS. A ':11,TREF:2,' C');
WRITE('PERDIDAS DE CARGA TOTALES NOMINALES =',WCU1:16:2,'WATTS. A ':11);
WRITELN(TREF:2,' C');
WRITELN('LONGITUD ESPIRA MEDIA =',ATLEN:30:2,'MM':4);
READLN(LE);
WRITELN;
WRITELN;
WRITELN('      DEVANADO DE B.T. ');
WRITELN;
WRITELN('RESISTENCIA/FASE =',RBT1:35:2,'OHMS A ':9,TREF:2,' C');
WRITELN('PERDIDAS I^2R ESPECIFICAS =',WC2:26:2,'WATTS/KG. A ':14,TREF:2,' C');
WRITELN('PERDIDAS I^2R NOMINALES =',IR2:28:2,'WATTS. A ':11,TREF:2,' C');
WRITE('PERDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY ESPECIFICAS =',PEC2:8:2);
WRITELN('WATTS/KG. A ':14,TREF:2,' C');
WRITE('PERDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY NOMINALES =',PEC2*G2:10:2);
WRITELN('WATTS. A ':11,TREF:2,' C');
WRITE('PERDIDAS DE CARGA TOTALES NOMINALES =',WCU2:16:2,'WATTS. A ':11);
WRITELN(TREF:2,' C');
WRITELN('LONGITUD ESPIRA MEDIA =',BTLEN:30:2,'MM':4);
WRITELN;
WRITE('PERDIDAS DISPERSAS EN DEVANADOS. =',PDISP:19:2,'WATTS. A ':11);
WRITELN(TREF:2,' C');
WRITE('PERDIDAS DE CARGA TOTS. DEVANADOS =',WCTEIMPCONT1:18:2);
WRITELN('WATTS. A ':11,TREF:2,' C');
WRITELN('LONGITUD ESPIRA PROMEDIO DEVS. =',VM:21:2,'MM':4);
WRITELN;
WRITE('PERDIDAS TOTALES (CU + FE) =',WH1+WCTEIMPCONT1:25:2,'WATTS. A ':11);
WRITELN(TREF:2,' C');
WRITELN;
WRITELN('RESISTENCIA (% R) =',PR:34:2,'%':3);
WRITELN('REACTANCIA (% X) =',PX:35:2,'%':3);
WRITELN('IMPEDANCIA (% Z) =',PZ1:35:2,'%':3);
READ(LE);
CLRSR;
WRITELN('=====');
WRITELN('      CALCULO DEL PORCENTAJE DE EFICIENCIA Y REGULACION      ');
WRITELN('=====');
WRITELN;
WRITELN('% DE EFICIENCIA':45);
FOR J:=1 TO 2 DO
  BEGIN
  WRITELN;
  WRITELN('KVA':10,'FACTOR DE POTENCIA':37);
  WRITELN;
  WRITELN(1.0:25:2,0.9:15:2,0.8:15:2);
  WRITELN;

```

```

WRITE('SECC. TRANSV. DEL CONDUCTOR SELECCIONADO =',MAGNETOICONT,1,13:2);
WRITELN('MM^2':6);
WRITE('ESPESOR DEL CONDUCTOR DESNUDO =',MAGNETOICONT,2,24:2,'MM':4,'Ø':2);
WRITELN(MAGNETOICONT,9,2:0,'AWG':4);
WRITE('ESPESOR DEL CONDUCTOR AISLADO =',MAGNETOICONT,4,24:2,'MM':4);
WRITE('ANCHO DEL CONDUCTOR DESNUDO =',MAGNETOICONT,3,26:2,'MM':4,'Ø':2);
WRITELN(MAGNETOICONT,10,2:0,'AWG':4);
WRITE('ANCHO DEL CONDUCTOR AISLADO =',MAGNETOICONT,5,26:2,'MM':4);
WRITELN('NUMERO DE CONDUCTORES EN PARALELO =',MCICONT,20);WRITELN;
WRITE('ALTURA TOTAL DEL DEVANADO =',HBT,28:2,'MM':4);
WRITELN('COLLARIN =',DISTANCIAS[BAIC,8]+DISTANCIAS[BAIC,9]-6:45:2,'MM':4);
WRITELN('NUMERO DE VUELTAS =',EC2,36);
WRITELN('NUMERO DE ESPIRAS/VUELTA =',NC2,29);
WRITELN('NUMERO DE DUCTOS ENTRE VUELTAS =',EC2-1:23);
WRITELN('ESPESOR DUCTO DE ENFRIAMIENTO =',DISTANCIAS[BAIC,13],24:2,'MM':4);
READ(LN);CLRSCR;
WRITELN('=====');
WRITELN('          CALCULO DE LAS DIMENSIONES RADIALES DE LOS DEVANADOS          ');
WRITELN('=====');
WRITELN;
WRITELN('          DEVANADO DE B.T. ');
WRITELN;
WRITELN('DIAMETRO INTERIOR =',B1,36:2,'MM':4);
WRITELN('DIAMETRO EXTERIOR =',B2,36:2,'MM':4);
WRITELN('ESPESOR DEL DEVANADO =',EBT,33:2,'MM':4);WRITELN;
WRITE('DIST. NUCLEO BARRERA AISL. B.T. =');
WRITELN(DISTANCIAS[BAIC,4]+DISTANCIAS[BAIC,5]-1:22:2,'MM':4);
WRITELN('NUM. DUCTOS ENFRIAM. =',2:33);
WRITELN('ESPESOR DUCTO ENFRIAM. =',DISTANCIAS[BAIC,2],2,31:2,'MM':4);
WRITELN('NUM. CAPAS AISLANTES =',2:33);
WRITELN('ESPESOR CAPA AISLANTE =',DISTANCIAS[BAIC,3],3,32:2,'MM':4);
WRITELN;
WRITE('DIST. B.T. BARRERA AISL. A.T. =');
WRITELN(DISTANCIAS[BAIC,6]+DISTANCIAS[BAIC,7]-1:24:2,'MM':4);
WRITELN('NUM. DUCTOS ENFRIAM. =',3:33);
WRITELN('ESPESOR DUCTO ENFRIAM. =',DISTANCIAS[BAIC,2],14,33:2,'MM':4);
WRITELN('NUM. CAPAS AISLANTES =',4:33);
WRITELN('ESPESOR CAPA AISLANTE =',DISTANCIAS[BAIC,2],15,32:2,'MM':4);
READLN(LN);
WRITELN;
WRITELN('          DEVANADO DE A.T. ');
WRITELN;
WRITELN('DIAMETRO INTERIOR =',B3,36:2,'MM':4);
WRITELN('DIAMETRO EXTERIOR =',B4,36:2,'MM':4);
WRITELN('ESPESOR DEL DEVANADO =',EAT,33:2,'MM':4);
WRITELN;
WRITE('DIST. A.T. - A.T. =');
WRITELN(DISTANCIAS[BAIC,10]+DISTANCIAS[BAIC,11]-1:36:2,'MM':4);
WRITELN('NUM. DUCTOS ENFRIAM. =',3:33);
WRITELN('ESPESOR DUCTO 1 ENFRIAM. =',DISTANCIAS[BAIC,1],2,29:2,'MM':4);
WRITELN('ESPESOR DUCTO 2 ENFRIAM. =',DISTANCIAS[BAIC,1],3,29:2,'MM':4);
WRITELN('NUM. CAPAS AISLANTES =',4:33);
WRITELN('ESPESOR CAPA AISLANTE =',DISTANCIAS[BAIC,1],14,32:2,'MM':4);
WRITELN('CLARO DEVANADO-TANQUE =',DISTANCIAS[BAIC,1],12,32:2,'MM':4);
READ(LN);CLRSCR;
WRITELN('=====');
WRITELN('          CALCULO DE DIMENSIONES Y PERDIDAS EN EL NUCLEO          ');
WRITELN('=====');
WRITELN;
WRITELN('ANCHO DE VENTANA =',AV,40:2,'MM':4);
WRITELN('ALTURA DE VENTANA =',HV,39:2,'MM':4);
WRITELN('ANCHO NUCLEO =',AN,44:2,'MM':4);
WRITELN('ALTURA NUCLEO =',HN,43:2,'MM':4);
WRITELN;

```

```

WRITELN;
WRITELN('VOLT/ESPIRA =',VT:37:2);
WRITELN;
WRITELN('          DEVANADO DE A.T. ');
WRITELN;
WRITE('DERIV.', 'VOLTS DE LINEA':15, 'AMPS. DE LINEA':15, 'VOLTS/FASE':11);
WRITELN('AMPS/FASE':10, 'ESPIRAS':8, 'DIF./ESP.':10);
WRITELN;
FOR K:=1 TO NUMBERIV DO
  BEGIN
    WRITE(K:3, TL12[K]:15:0, IL12[IMPCONT, K]:15:2, TF12[K]:13:0, IF12[K]:10:2, NCK:8);
    IF K>1 THEN
      BEGIN
        WRITE(PCK-1:8);
      END;
    WRITELN;
  END;
WRITELN;
WRITELN('          DEVANADO DE B.T. ');
WRITELN;
WRITELN('TENSION DE LINEA =', V2:37:2, 'VOLTS':7);
WRITELN('CORRIENTE DE LINEA =', IL2[IMPCONT]:35:2, 'AMPS.':7);
WRITELN('TENSION DE FASE =', TF2:38:2, 'VOLTS':7);
WRITELN('CORRIENTE DE FASE =', IF2:36:2, 'AMPS.':7);
WRITELN('ESPIRAS =', N2:43);
READ(LE); CLRSCR;
WRITELN('=====');
WRITELN('          CALCULO DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL NUCLEO          ');
WRITELN('=====');
WRITELN;
WRITELN('DENSIDAD DE FLUJO =', B#1E3:36:0, 'GAUSSES':9);
WRITELN('SECCION EFECTIVA =', A:37:2, 'CM^2':6);
WRITELN('SECCION GEOMETRICA =', AG:35:2, 'CM^2':6);
WRITELN('DIAMETRO =', D/10:45:2, 'CM':4);
WRITELN('PORCENTAJE FACTOR DE ESPACIO =', FCS*100:25:2, '%':3);
WRITELN('NUMERO DE ESCALONES =', NOE:34);
WRITELN('ANCHO MAXIMO DE LOS ESCALONAMIENTOS =', AESC/10:18:2, 'CM':4);
READ(LE); CLRSCR;
WRITELN('=====');
WRITELN('          CALCULO DE LAS DIMENSIONES AXIALES DE LOS DEVANADOS          ');
WRITELN('=====');
WRITELN;
WRITELN('          DEVANADO DE A.T. ');
WRITELN;
WRITELN('DENSIDAD DE CORRIENTE =', J1:32:2, 'AMPS/MM^2':11);
WRITE('SECC. TRANSV. DEL CONDUCTOR SELECCIONADO =', MAGNETO(XY1, 1):13:2);
WRITELN('MM^2':6);
WRITE('ESPESOR DEL CONDUCTOR DESNUDO =', MAGNETO(XY1, 2):24:2, 'MM':4, 'Ø':2);
WRITELN(MAGNETO(XY1, 9):2:0, 'AWG':4);
WRITELN('ESPESOR DEL CONDUCTOR AISLADO =', MAGNETO(XY1, 4):24:2, 'MM':4);
WRITE('ANCHO DEL CONDUCTOR DESNUDO =', MAGNETO(XY1, 3):26:2, 'MM':4, 'Ø':2);
WRITELN(MAGNETO(XY1, 10):2:0, 'AWG':4);
WRITELN('ANCHO DEL CONDUCTOR AISLADO =', MAGNETO(XY1, 5):26:2, 'MM':4);
WRITELN('NUMERO DE CONDUCTORES EN PARALELO =', MCXY1:20); WRITELN;
WRITELN('ALTURA TOTAL DEL DEVANADO =', HAT:28:2, 'MM':4);
WRITELN('COLLARIN =', DISTANCIAS[NBAI(1, B)]+DISTANCIAS[NBAI(1, 9)]-6:45:2, 'MM':4);
WRITELN('NUMERO DE SECCIONES =', EC1:34);
WRITELN('NUMERO DE ESPIRAS/SECCION =', NCI:28);
WRITELN('NUMERO DE DUCTOS ENTRE SECCIONES =', EC1-1:21);
WRITELN('ESPESOR DUCTO DE ENFRIAMIENTO =', DISTANCIAS[NBAI(1, 13)]-24:2, 'MM':4);
WRITELN; READLN(LE);
WRITELN('          DEVANADO DE B.T. ');
WRITELN;
WRITELN('DENSIDAD DE CORRIENTE =', J2:32:2, 'AMPS/MM^2':11);

```

```

FOR I:=1 TO NUMDERIV DO
  NCI:=ROUND(TF12CI)/VT);
I:=1;
REPEAT
  FCI:=NCI-NCI+1;
  I:=SUCC(I);
UNTIL I>(MDERIV-NDERIV);
HCONT:=1+1/3;
GCONT:=1;
REPEAT
  GCONT:=SUCC(GCONT);
  KVA:=KVANOM*HCONT;
  IL2[GCONT]:=(KVA*1000)/(R3*V2);
  FOR K:=1 TO NUMDERIV DO
    IL12[GCONT,K]:=(KVA*1000)/(R3*TL12[K]);
  HCONT:=HCONT+1/3;
UNTIL HCONT>1+2/3;
WRITE(' LOS RESULTADOS SON POR PANTALLA <P> O IMPRESORA <I> ?=>');
READLN(RESULTADO); CLRSCR;
IF RESULTADO='P' THEN BEGIN
  WRITELN('=====');
  WRITELN('          ESPECIFICACIONES          ');
  WRITELN('=====');
  WRITELN;
  WRITELN('CAPACIDAD NOMINAL DEL TRANSFORMADOR (OA) =',KVANOM:13:0,'KVA':5);
  WRITELN('TENSION NOM. DEVANADO DE A.T. =',V1:24:0,'VOLTS':7);
  WRITELN('TENSION NOM. DEVANADO DE B.T. =',V2:24:0,'VOLTS':7);
  WRITELN('CONEXION DEVANADO A.T. =',CONE1:3);
  WRITELN('CONEXION DEVANADO B.T. =',CONE2:3);
  WRITELN('DERIVACIONES ARRIBA TENSION NOM. DEV. A.T. =','+',10,MDERIV:1);
  WRITELN('DERIVACIONES ABAJO TENSION NOM. DEV. A.T. =','- ',10,NDERIV:1);
  WRITELN('VALOR DERIVACIONES =',FDERIV*100:35:2,'%':3);
  WRITELN('NUMERO DE FASES =',FASES:3);
  WRITELN('FRECUENCIA =',F:43,'HERTZ':7);
  READ(LE);CLRSCR;
  WRITELN('=====');
  WRITELN('          RESTRICCIONES          ');
  WRITELN('=====');
  WRITELN;
  WRITELN('LIMITE DE AUMENTO DE TEMPERATURA =',TEMP:21,' C':4);
  WRITELN('PORCENTAJE DE IMPEDANCIA PROPIA =',Z:22:2,'%':3);
  WRITELN('PORCENTAJE CORRIENTE DE EXCITACION =',PIE:19:2,'%':3);
  WRITELN('PERDIDAS TOTALES =',WC:37:0,'WATTS':7);
  WRITELN('PERDIDAS SIN CARGA =',WH:35:0,'WATTS':7);
  WRITELN('PERDIDAS CON CARGA =',WC-WH:35:0,'WATTS':7);
  WRITELN('ALTURA DE OPERACION SOBRE NIVEL DE MAR =',ASNMM:15,'METROS':8);
  READ(LE);CLRSCR;
  WRITELN('=====');
  WRITELN('          PARAMETROS INICIALES          ');
  WRITELN('=====');
  WRITELN;
  WRITELN('% FACTOR DE DESTRUCCION DEL NUCLEO =',(FD-1)*100:19:0,'%':3);
  WRITELN('% FACTOR DE APILAMIENTO O LAMINACION =',F1:17,'%':3);
  WRITELN('DENSIDAD DE CORRIENTE INICIAL DEV. A.T. =',J1:14:2,'AMPS./MM^2':12);
  WRITELN('DENSIDAD DE CORRIENTE INICIAL DEV. B.T. =',J2:14:2,'AMPS./MM^2':12);
  WRITELN('DENSIDAD DE FLUJO MAXIMA EN EL NUCLEO =',B*1E3:16:0,'GAUSSES':9);
  WRITELN('NIV. BASICO DE AISLAM. AL IMPULSO DEV. A.T. =',TE1:10,'KILOVOLTS':11);
  WRITELN('NIV. BASICO DE AISLAM. AL IMPULSO DEV. B.T. =',TE2:10,'KILOVOLTS':11);
  WRITELN('PORCENTAJE DE IMPEDANCIA DEL SISTEMA =',ZS:17:2,'%':3);
  WRITELN('VOLTS/ESPIRA INICIALES =',VTINC:31:2);
  READ(LE);CLRSCR;
  WRITELN('=====');
  WRITELN('          CALCULO DE VOLTAJES Y CORRIENTES DE LOS DEVANADOS          ');
  WRITELN('=====');

```

```

PROCEDURE NUM_13;
(CALCULO DEL PORCENTAJE DE IMPEDANCIA.)
VAR
  U1,U2:REAL;
BEGIN
  PR:=WCT[IMPCONT]/(10*KVA);
  U1:=0,752*F[NCL]*NCL*IF1[CL]*VM;
  U2:=DISTANCIAS[BAIC1],6)+DISTANCIAS[BAIC1],7)+((EHT+EAT)/3;
  U3:=((HBT+HAT)/2)+(DISTANCIAS[NBAIC1],6)+DISTANCIAS[BAIC1],7)+ERT+EAT)/3;
  PX:=(U1*U2)/(TF1[CL]*1E6*U3);
  PZ[IMPCONT]:=SQRT(SQR(PR)+SQR(PX));
END;(PROCEDURE NUM_13)
PROCEDURE NUM_14;
(CALCULO DEL PORCENTAJE DE EFICIENCIA Y REGULACION.)
VAR
  K,FAC,COSO,SENO,MIEM1,MIEM2:REAL;
BEGIN
  K:=2/3;
  I1:=0;
  REPEAT
    I1:=SUCC(I1);
    COSO:=1;
    I2:=0;
    REPEAT
      I2:=SUCC(I2);
      FAC:=K*KVA*1E3*COSO;
      PNC[1,I,I2]:=(FAC*100)/(FAC+WH1+WCT[IMPCONT]*SQR(K));
      SENO:=SQRT(1-SQR(COSO));
      MIEM1:=K*(PR*COSO+PX*SENO);
      MIEM2:=SQR(K*(PX*COSO-PR*SENO))/200;
      PNC[2,I,I2]:=MIEM1+MIEM2;
      COSO:=COSO-0,1;
    UNTIL COSO<0,8;
    K1:=K*I1/3;
  UNTIL K>1+2/3;
END;(PROCEDURE NUM_14)
PROCEDURE NUM_17;
(CALCULO DE LAS CARACTERISTICAS DE CORTO CIRCUITO.)
VAR
  ICC1,TETA,KCTE,ALTM,DIFE,KCTE:REAL;
BEGIN
  ICC:=(IF2*100)/(ZS+PZ[IMPCONT]);
  ICC1:=(IF1[CL]*100)/(ZS+PZ[IMPCONT]);
  TETA:=ARCTAN(PX/PR);
  KCTE:=R2*(1+SIN(TETA))*EXP(-(TETA+PI/2)*(PR/PX));
  IAP:=KCTE*ICC;
  ALTM:=(HAT+HBT)/2;
  FRE1:=6,404E-12*ATLEM*SQR(NCL)*IF1[CL]/ALTM;
  FRE2:=6,404E-12*ATLEM*SQR(NCL)*ICC1/ALTM;
  FRI1:=6,404E-12*BTLEM*SQR(N2*IF2)/ALTM;
  FRI2:=6,404E-12*BTLEM*SQR(N2*ICC)/ALTM;
  IF HAT-HBT>=0 THEN DIFE:=(HAT-HBT)/HAT ELSE DIFE:=(HBT-HAT)/HBT;
  FAX1:=1,602E-11*DIFE*VM*SQR(NCL)*IF1[CL]/U3;
  FAX2:=1,602E-11*DIFE*VM*SQR(NCL)*ICC1/U3;
END;(PROCEDURE NUM_17)
PROCEDURE NUM_16;
(IMPRESION DEL DISEÑO ELECTRICO DEL TRANSFORMADOR.)
VAR
  CONE1,CONE2:STRING[8];
  G1A1SL,G2A1SL,HCONT,K0,SUMA1,SUMA2:REAL;
  GCONT:BYTE;
BEGIN
  IF CONEX1=1 THEN CONE1:='DELTA' ELSE CONE1:='ESTRELLA';
  IF CONEX2=1 THEN CONE2:='DELTA' ELSE CONE2:='ESTRELLA';

```

```

LY:=2*AV+3*AES;
AN:=2*AV+3*AES;
HN:=HV+2*HY;
GS:=(2*LY+3*HV)*AG*7,65E-4;
END;
PROCEDURE NUM_10;
(CALCULO DE LAS PERDIDAS EN EL NUCLEO Y LA CORRIENTE DE EXCITACION.)
BEGIN
IF B<=13,5 THEN BEGIN
K1:=0,074218864+0,022471006*B-0,000095917*B*B+0,000283707*B*B*B;
K2:=-1,660871413+0,458171875*B-0,036902342*B*B+0,001262356*B*B*B;
END ELSE
IF (B>13,5) AND (B<=15) THEN BEGIN
K1:=14,26552397-1,969136592*B+0,068035061*B*B+0,000413819*B*B*B;
K2:=-1,459987933+0,168934488*B+0,000489054*B*B-0,000011279*B*B*B;
END ELSE
IF (B>15) AND (B<=16,5) THEN BEGIN
K1:=-1130,132216+219,1662620*B-14,18419439*B*B+0,306799745*B*B*B;
K2:=-24,73283657+4,978185915*B-0,332854035*B*B+0,007732043*B*B*B;
END ELSE BEGIN
K1:=552,6502024+24,42158591*B-8,777175545*B*B+0,320130074*B*B*B;
K2:=2,389311861-0,514104004*B+0,030662829*B*B-0,0001655*B*B*B;
END;
WH1:=FD*K2*GS;
VI:=FD*K1*GS;
PIE1:=VI/(10*KVA);
IE1:=VI/V2;
END;(PROCEDURE NUM_10)
PROCEDURE NUM_11;
(CALCULO DE LONGITUDES, PESOS Y RESISTENCIAS DE CONDUCTORES.)
VAR
LAT,LBT:REAL;
BEGIN
BTLEM:=PI*(B2-EBT);
ATLEM:=PI*(B4-EAT);
LAT:=NCLJ*ATLEM;
LBT:=N2*BTLEM;
G1:=3*ATLEM*NCLJ*MAGNETOCXY1,1)*8,89E-6;
G2:=3*BTLEM*N2*MAGNETOCICONT,1)*18*8,89E-6;
RBT1:=21,4E-6*N2*BTLEM/(MAGNETOCICONT,1)*18;
RAT1:=21,4E-6*NCLJ*ATLEM/MAGNETOCXY1,1);
VM:=(BTLEM+ATLEM)*0,5;
IF TEMP=55 THEN TREF:=75 ELSE
BEGIN
TREF:=85; RBT1:=RBT1*(234,5+TREF)/(234,5+75);
RAT1:=RAT1*(234,5+TREF)/(234,5+75);
END;
END;
PROCEDURE NUM_12;
(CALCULO DE PERDIDAS EN LA CARGA.)
BEGIN
J1:=IF1ELJ/(MAGNETOCXY1,1);
J2:=IF2/(18*MAGNETOCICONT,1);
PEC1:=9,1E-9*SQR(F*MAGNETOCXY1,2)*IF1ELJ*NCLJ/MAT);
PEC2:=9,1E-9*SQR(F*MAGNETOCICONT,2)*IF2*N2/HBT);
WC1:=2,41*J1*J1;
WC2:=2,41*J2*J2;
IR1:=3*IF1ELJ*IF1ELJ*RAT1;
IR2:=3*IF2*IF2*RBT1;
WCU1:=IR1+PEC1*G1;
WCU2:=IR2+PEC2*G2;
PDISP:=0,97*(4,61E-5*IF2+0,06429)*(IR1+IR2);
WCT[IMPCONT1]=WCU1+WCU2+PDISP;
END;(PROCEDURE NUM_12)

```

```

                                END;{FOR - J -}
                                END;{FOR - I -}
CLOSE(REG);
END;{PROCEDURE NUM_6}
PROCEDURE NUM_7;
(CALCULO AXIAL DE LAS BOBINAS.)
VAR
  Y,X:INTEGER;
  MAXENT,SUMANDO:REAL;
  CONT:BYTE;
BEGIN
  MAXENT:=100;
  HBT:=N2*MAGNETOICONT,5)+(N2-1)*DISTANCIAS[NBAI[2],13];
  FOR CONT:=ILCONT TO SLCONT DO
  BEGIN
    SUMANDO:=HBT+DISTANCIAS[NBAI[1],13];
    EC1:=ROUND(SUMANDO/(MAGNETOICONT,5)+DISTANCIAS[NBAI[1],13]);
    NC1:=ROUND(NI1/EC1);
    IF ABS((NC1*EC1)-NI1)<MAXENT THEN
      BEGIN
        MAXENT:=ABS(NC1*EC1-NI1);
        XY1:=CONT;
        X:=EC1;
        Y:=NC1;
      END;
    END;{FOR}
  EC1:=X;
  NC1:=Y;
  HAT:=EC1*MAGNETOEXY1,5)+(EC1-1)*DISTANCIAS[NBAI[1],13];
  EAT:=NC1*MAGNETOEXY1,4);
  NC1:=EC1*NC1;
  VT:=TF12[1]/NI1;
  NCL1:=ROUND(TF12[1]/VT);
  N2:=ROUND(TF2/VT);
  EC2:=N2;
  NC2:=ROUND(N2/EC2);
  EBT:=18*NC2*MAGNETOICONT,4);
END;{PROCEDURE NUM_7}
PROCEDURE NUM_5;
(DENSIDAD DE FLUJO Y CALCULO DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL NUCLEO.)
BEGIN
  A:=VT/(PI*R2*F*B*1E-5);
  AG:=A*100/F1;
  FCS:=(68,36+7,67189*NOE-0,7799*NOE*NOE+0,028125*NOE*NOE*NOE)/100;
  FACTOR:=0,775945+0,060271*NOE-0,006295*NOE*NOE+0,0002292*NOE*NOE*NOE;
  D:=10*SQRT((4*AG)/(PI*FCS));
  AESC:=D*FACTOR;
END;
PROCEDURE NUM_8;
(CALCULO RADIAL DE LAS BOBINAS.)
BEGIN
  B1:=D+2*(DISTANCIAS[NBAI[1],4]+DISTANCIAS[NBAI[1],5]-1);
  B2:=B1+2*EBT;
  B3:=B2+2*(DISTANCIAS[NBAI[1],6]+DISTANCIAS[NBAI[1],7]-1);
  B4:=B3+2*EAT;
END;
PROCEDURE NUM_9;
(CALCULO DE LAS DIMENSIONES Y PESO DEL NUCLEO.)
BEGIN
  AV:=(B4-AESC)+(DISTANCIAS[NBAI[1],10]+DISTANCIAS[NBAI[1],11]-1);
  IF HAT-HBT=0 THEN
  HV:=HAT+2*(DISTANCIAS[NBAI[1],8]+DISTANCIAS[NBAI[1],9]-6) ELSE
  HV:=HBT+2*(DISTANCIAS[NBAI[1],8]+DISTANCIAS[NBAI[1],9]-6);
  HY:=(AG*10000)/(AESC*F1);

```

```

                IF12CKJ:=IF1CKJ;
            END;
        END;
    END;{CASE}
    IL2[IMPCONTJ]:=(KVA#1000)/(R3#V2);
    CASE CONEX2 OF
        1:BEGIN
            TF2:=V2;
            IF2:=IL2[IMPCONTJ]/R3;
        END;
        2:BEGIN
            TF2:=V2/R3;
            IF2:=IL2[IMPCONTJ];
        END;
    END;{CASE}
END;{PROCEDURE NUM_2}
PROCEDURE NUM_4;
(CALCULO DEL VOLT/ESPIRA INICIAL Y EL NUMERO DE ESPIRAS POR BOBINA.)
BEGIN
    WRITE('SE VAN A INTRODUCIR LOS VOLT/ESPIRA COMO DATO FIJO? <SI/NO> =');
    READLN(RESPI);
    IF RESPI='SI' THEN BEGIN
        WRITE('LOS VOLT/ESPIRA SON= ');
        READLN(VT);
        VTMINF:=VT;
        VTINC:=VT;
    END ELSE
    BEGIN
        VT1:=0.06#SQRT(F#KVA);
        VTINC:=VT1;
        VT:=VTINC;
    END;
    N1LJ:=ROUND(TF1[LJ]/VT);
    N1CJ:=ROUND(TF1[CJ]/VT);
    N2:=ROUND(TF2/VT);
END;{PROCEDURE NUM_4}
PROCEDURE NUM_6;
(DENSIDAD DE CORRIENTE Y SELECCION DE LOS CONDUCTORES EN LAS BOBINAS.)
TYPE
    CONDOC=RECORD
        C:REAL;
    END;
VAR
    N:INTEGER;
    REG:FILE OF CONDOC;
    A:CONDOC;
BEGIN
    SC1J:=IF1[LJ]/J1;
    SC2J:=IF2/J2;
    SC2J:=SC2J/18;
    ASSIGN(REG,'C:CONDUCTR.DTA');
    RESET(REG);
    N:=0;
    FOR I:=1 TO 20 DO
        BEGIN
            FOR J:=1 TO 10 DO
                BEGIN
                    WITH A DO
                        BEGIN
                            SEEK(REG,N);
                            READ(REG,A);
                            MAGNETO[I,J]:=C;
                        END;{WITH}
                    N:=SUCC(N);
                END;
            END;
        END;
    END;

```

```

        END;
VAR
    NS:INTEGER;
    RE:FILE OF AISLA;
    AC:AISLA;
BEGIN
    R2:=SQRT(2);
    FD:=1+FD/100;
    ASSIGN(RE,'C:AISLAMIE.DTA');
    RESET(RE);
    FOR K:=1 TO 2 DO
        BEGIN
            NS:=(NBAI(K)-1)*13;
            FOR J:=1 TO 13 DO
                BEGIN
                    SEEK(RE,NS);
                    READ(RE,AC);
                    DISTANCIAS[NBAI(K),J]:=AC.A;
                    NS:=SUCC(NS);
                END;
            END;
        END;
    CLOSE(RE);
END;
<PROCEDURE NUM_3>
PROCEDURE NUM_2;
<CALCULO DE VOLTAJES Y CORRIENTES POR BOBINA.>
BEGIN
    R3:=SQRT(3);
    PDERIV:=PDERIV/100;
    NUMDERIV:=0;
    J:=MDERIV;
    REPEAT
        NUMDERIV:=SUCC(NUMDERIV);
        TL1(NUMDERIV):=V1*(1+(J*PDERIV));
        IL1(IMPCONT,NUMDERIV):=(KVA*1000)/(R3*TL1(NUMDERIV));
        IF PUNTO=1 THEN
            BEGIN
                TL12(NUMDERIV):=TL1(NUMDERIV);
                IL12(IMPCONT,NUMDERIV):=IL1(IMPCONT,NUMDERIV);
            END;
        IF J=0 THEN L:=NUMDERIV;
        J:=PRED(J);
    UNTIL J<NUMDERIV;
    CASE CONEX1 OF
        1 :BEGIN
            FOR K:=1 TO NUMDERIV DO
                BEGIN
                    TF1(K):=TL1(K);
                    IF1(K):=IL1(IMPCONT,K)/R3;
                    IF PUNTO=1 THEN
                        BEGIN
                            TF12(K):=TF1(K);
                            IF12(K):=IF1(K);
                        END;
                END;
            END;
        2 :BEGIN
            FOR K:=1 TO NUMDERIV DO
                BEGIN
                    TF1(K):=TL1(K)/R3;
                    IF1(K):=IL1(IMPCONT,K);
                END;
            IF PUNTO=1 THEN
                BEGIN
                    TF12(K):=TF1(K);
                END;
        END;

```

```

READLN(ASNM);
CLRSR;
WRITELN('LOS TIPOS DE ENFRIAMIENTO USADOS SON LOS SIGUIENTES: ');
WRITELN;
WRITELN('(OA)      -( 1 )AUTOENFRIADO ');
WRITELN('(OA/FA)     -( 2 )AUTOENFRIADO Y ENFRIADO POR AIRE FORZADO');
WRITELN('(OA/FA/FA)  -( 3 )AUTOENFRIADO Y CON DOS PASOS DE ENFRIAMIENTO');
WRITELN('          POR AIRE FORZADO. ');
WRITELN('(OA/FA/FOA) -( 4 )AUTOENFRIADO, ENFRIADO POR AIRE FORZADO Y ');
WRITELN('          ENFRIADO POR AIRE Y LIQUIDO AISLANTE FORZADOS. ');
WRITELN('(OA/FOA/FOA) -( 5 )AUTOENFRIADO Y CON DOS PASOS DE ENFRIAMIENTO POR ');
WRITELN('          AIRE Y LIQUIDO AISLANTE FORZADOS. ');
WRITELN('(OW)        -( 6 )ENFRIADO POR AGUA. ');
WRITELN('(OW/OA)     -( 7 )ENFRIADO POR AGUA, AUTOENFRIADO ');
WRITELN('(FOA)       -( 8 )ENFRIADO POR AIRE Y LIQUIDO AISLANTE FORZADOS ');
WRITELN('(FOW)      -( 9 )ENFRIADO POR AGUA Y LIQUIDO AISLANTE FORZADOS ');
WRITELN;
WRITE('ESPECIFIQUE EL PRIMER Y SEGUNDO PASO DE ENFRIAMIENTO (SPACE/VAR) = ');
READLN(TIPENF1,TIPENF2);
CLRSR;
WRITELN('ESPECIFICACION DE LAS VARIABLES DE DISEÑO EN EL TRANSFORMADOR');
WRITELN('DE POTENCIA CON CAPACIDAD 18/24/30 MVA');
WRITELN('=====');
WRITELN;
WRITELN('1.-EL ARREGLO GENERAL DE LOS DEVANADOS CON RESPECTO A LA COLUMNA ');
WRITELN('  DEL NUCLEO ES DEL TIPO CONCENTRICO. ');
WRITELN;
WRITELN('2.-EL TIPO DE DEVANADO ES CONTINUO EN ALTA TENSION Y HELITRAM EN ');
WRITELN('  BAJA TENSION. ');
WRITELN;
WRITELN('3.-EL TIPO DE CONDUCTORES EN LOS DEVANADOS ES SOLERA RECTANGULAR');
WRITELN('  MAGNETO. ');
WRITELN;
WRITELN('4.-EL TIPO DE NUCLEO ES CIRCULAR. ');
WRITELN;
WRITELN('5.-EL TIPO DE ACERO EMPLEADO ES : M4. ');
WRITELN;
WRITE('      PORCENTAJE FACTOR DE DESTRUCCION EN EL NUCLEO = ');
READLN(FD);WRITELN;
WRITE('      PORCENTAJE FACTOR DE APILAMIENTO O DE LAMINACION = ');
READLN(F1);WRITELN;NDE:=5;
WRITELN('6.-LA DENSIDAD DE CORRIENTE EN EL COBRE VARIA DE 2.2 A 2.6 A/MM^2');
WRITELN('  SELECCIONE VALOR INICIAL : ');
WRITE('  EN EL DEVANADO DE A.T. = '); READLN(JI1);J1:=JI1;
WRITE('  EN EL DEVANADO DE B.T. = '); READLN(JI2);J2:=JI2;
WRITELN;
WRITE('8.-LA DENSIDAD DE FLUJO MAXIMA EN EL NUCLEO ES (KILOGAUSSSES) = ');
READLN(BLINSUP); WRITELN;
WRITE('  NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO AL IMPULSO EN EL DEVANADO DE A.T. = ');
READLN(NBAIC1);WRITELN;
WRITE('  NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO AL IMPULSO EN EL DEVANADO DE B.T. = ');
READLN(NBAIC2);WRITELN;
CLRSR;
WRITELN('COSTOS UNITARIOS');
WRITELN;
WRITE('ACERO DE GRAND ORIENTADO M4 [%/KG] =');READLN(M4);WRITELN;
WRITE('WATTS SIN CARGA [%/WATT] =');READLN(CWSC);WRITELN;
WRITE('WATTS CON CARGA [%/WATT] =');READLN(CWCC);WRITELN;
END;
PROCEDURE NUM_3;
(CALCULO DE DISTANCIAS DIELECTRICAS EN BOBINAS.)
TYPE
  AISLA=RECORD;
  A:REAL;

```

```
NUM_162;  
IMPCONT:=1;  
KVA:=KVANOM;  
NUM_2;  
END;  
END;  
VT:=VTINC;  
NEL:=ROUND(TF12[13]/VT);  
NE1:=ROUND(TF12[11]/VT);  
N2:=ROUND(TF2/VT);  
ILCONT:=ILCONT+4;  
SLCONT:=SLCONT+4;  
UNTIL (ILCONT>17) AND (SLCONT>20);  
ICONT:=SUCC(ICONT);  
UNTIL ICONT>12;  
END.(PROGRAMA PRINCIPAL)
```

-:- TESIS PROFESIONALES -:-

MECANOGRAFIA E IMPRESION

Campeche No. 156 - - - - Col. Roma
México, D. F. - - - - 06700

564-3954 ★ 584-8153