



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

**"APLICACIÓN DE UN SOFTWARE PARA EL CÁLCULO, DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA, COMO
TUTORÍAS DE LA ASIGNATURA MÁQUINAS I".**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO ELECTRICO MECÁNICO CON MENCIÓN EN GESTIÓN
EMPRESARIAL INDUSTRIAL**

Presentada por:

Yajayra Katuska Barrios Romero

Jorge Eduardo Loor Mina

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Rafael Hidalgo A.

GUAYAQUIL – ECUADOR

2011

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

TESIS DE GRADO

**"APLICACIÓN DE UN SOFTWARE PARA EL CÁLCULO, DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA, COMO
TUTORÍAS DE LA ASIGNATURA MÁQUINAS I".**

Presentada a la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo, Carrera de
Ingeniería Eléctrico – Mecánica de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil

Por:

Yajayra Katiuska Barrios Romero

Jorge Eduardo Loor Mina

Para dar cumplimiento con uno de los requisitos para optar por el Título de:

Ingeniero Eléctrico – Mecánico

.....
Decano

.....
Director de Carrera

.....
Director de Tesis

Vocal Principal

Vocal Principal

Secretario

DEDICATORIA

A MI DIOS, LA VIRGEN SANTISIMA Y A MIS PADRES, Porque gracias a su cariño, guía y apoyo he llegado a realizar uno de los anhelos más grandes de la vida, fruto del inmenso apoyo, amor y confianza que en mi se depositó y con los cuales he logrado terminar mis estudios profesionales que constituyen el legado más grande que pudiera recibir y por lo cual les viviré eternamente agradecida.

Con cariño, amor y respeto

Yajayra katuska Barrios Romero.

DEDICATORIA

Con todo mí cariño a mi mamá por ser un gran ejemplo de mujer, tan valiente y trabajadora, te voy a admirar y a querer, siempre, este gran esfuerzo es por ti.

A mi amada hija, Johanna

Por su amor y comprensión, pido perdón por sí alguna vez te he alejado de mí, quiero que sepas que eres lo más importante para mí y gracias a ti he aprendido a fijarme metas en la vida y lograrlas, te amaré siempre.

A Dios porque siempre ha estado conmigo, me has protegido y cuidado, Gracias señor.

Jorge Loor Mina.

AGRADECIMIENTO

A Dios por las bendiciones recibidas y el don de la inteligencia que nos sirvió para alcanzar esta meta.

A nuestros profesores por habernos impartido parte de su enorme conocimiento.
¡Gracias por la confianza y experiencia compartida!

A cada una de las personas que de una u otra manera han contribuido con la realización de este trabajo.

Yajayra katuska Barrios Romero

Jorge Eduardo Loor Mina

CERTIFICACIÓN DEL INFORME

Yo, Ing. Rafael Hidalgo A. Como asesor de Tesis de Grado manifiesto que la presente investigación "Aplicación de un Software para el Cálculo, Diseño y Construcción de Transformadores de Potencia, como Tutorías de la Asignatura Máquinas I" ha sido desarrollada por la Srta. Yajayra Katuska Barrios Romero y el Sr. Jorge Eduardo Loor Mina y sometida a revisión, por lo tanto autorizo la presentación para su defensa.

Ing. Rafael Hidalgo A.

ASESOR DE TESIS

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis son de nuestra completa autoría y hasta donde sabemos y creemos, no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona, ni material que de manera substancial haya sido aceptado para el otorgamiento de premios de cualquier otro grado de la universidad u otra institución de enseñanza superior”

Yajayra Katuska Barrios Romero

C.I. 091940820-3

Jorge Eduardo Loor Mina

C.I. 120358134-1

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
CERTIFICACIÓN DEL INFORME	
DECLARACIÓN EXPRESA	
INDICE GENERAL	I
INDICE DE ILUSTRACIONES	V
INDICE DE TABLAS	VIII
PROLOGO	XI

CAPITULO I

1.1	INTRODUCCIÓN	01
1.2	ANTECEDENTES	02
1.3	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	04
	<i>1.3.1 OBJETIVO GENERAL</i>	04
	<i>1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	04
1.4	HIPÓTESIS / PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	05
1.5	METODOLOGÍA	05

CAPITULO II

TRANSFORMADORES DE POTENCIA

2.1	INTRODUCCIÓN	06
2.2	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR	10
2.3	CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS	14
	2.3.1 NÚCLEO	14
	2.3.1.1 NÚCLEO COLUMNA	15
	2.3.1.2 NÚCLEO TIPO ACORAZADO	16
	2.3.2 DEVANADOS	18
	2.3.3 PARTE ACTIVA	21

2.3.4	<i>EL SISTEMA DE AISLAMIENTO</i>	23
2.3.4.1	<i>AISLAMIENTO SOLIDO</i>	23
2.3.4.1.1	<i>FACTORES QUE AFECTAN LA VIDA DEL PAPEL</i>	26
2.3.4.1.2	<i>RÉGIMEN DE ENVEJECIMIENTO RELATIVO SEGÚN NORMAS</i>	30
2.3.4.2	<i>AISLAMIENTO LÍQUIDO</i>	32
2.3.4.2.1	<i>HIDROCARBUROS</i>	33
2.3.4.2.2	<i>NO-HIDROCARBUROS</i>	35
2.3.4.2.3	<i>DEGRADACIÓN DEL ACEITE DIELECTRICO</i>	36
2.3.4.2.4	<i>ANÁLISIS DEL ACEITE AISLANTE</i>	37
2.3.4.2.5	<i>COMPROBACIÓN A ACEITES AISLANTES</i>	38
2.3.4.2.6	<i>CONSEJOS PARA AUMENTAR LA DURACIÓN DE LOS ACEITES AISLANTES EN LOS TRANSFORMADORES</i>	39
2.3.4.2.7	<i>TRATAMIENTOS DE LOS MEDIOS REFRIGERANTES PARA MANTENER LA CALIDAD DEL ACEITE</i>	40
2.3.4.3	<i>CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES AISLANTES</i>	40
2.3.4.4	<i>MEDIDA DE TEMPERATURA--</i>	43
2.3.4.4.1	<i>MÉTODO POR TERMÓMETRO</i>	44
2.3.4.4.2	<i>MÉTODO POR VARIACIÓN DE</i>	44
2.3.4.4.3	<i>MÉTODO DE DETECTORES INTERNOS DE TEMPERATURA</i>	45
2.3.5	<i>TANQUE</i>	46
2.3.5.1	<i>TIPOS DE TANQUE</i>	49
2.3.4.1.1	<i>TIPO TANQUE ACANALADO</i>	49
2.3.4.1.2	<i>TIPO TANQUE CORRUGADO</i>	50
2.3.4.1.3	<i>TIPO SELLADO</i>	51
2.3.6	<i>DERIVACIONES</i>	53
2.3.7	<i>PASA TAPAS (BUSHINGS)</i>	55

2.3.7.1	<i>PASA-TAPAS DE ENTRADA</i>	56
2.3.7.2	<i>PASA-TAPAS DE SALIDA</i>	56
2.3.8	<i>PARARRAYOS</i>	57
2.3.9	<i>DEPÓSITO DE EXPANSIÓN</i>	59
2.3.10	<i>INDICADOR DEL NIVEL DE ACEITE</i>	59
2.3.11	<i>RELÉ BUCHOLZ</i>	60
2.3.12	<i>DESECADOR</i>	60
2.3.13	<i>TERMOSTATO</i>	61
2.3.14	<i>REGULADOR DE TENSIÓN</i>	61
2.3.15	<i>PLACA DE CARACTERÍSTICAS</i>	63
2.3.16	<i>GRIFO DE LLENADO</i>	64
2.3.17	<i>RADIADORES DE REFRIGERACIÓN</i>	65
2.4	<i>REQUERIMIENTOS BÁSICOS QUE DEBE CUMPLIR UN TRANSFORMADOR TERMINADO</i>	66
2.5	<i>CICLO DE VIDA DE LOS TRANSFORMADORES</i>	68
2.5.1	<i>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</i>	69
2.5.2	<i>VERIFICACIÓN DEL DISEÑO</i>	69
2.5.2.1	<i>PUNTOS DESTACADOS EN LA REVISIÓN DEL DISEÑO</i>	70
2.5.3	<i>INSPECCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN</i>	70
2.5.4	<i>ENSAYOS Y COMISIONAMIENTO</i>	71
2.5.5	<i>EL MANTENIMIENTO, CONTROL DE LA VIDA ÚTIL Y RIESGO DE FALLA</i>	72
2.6	<i>CONEXIONES</i>	73
2.6.1	<i>CONEXIÓN DELTA –DELTA</i>	73
2.6.2	<i>CONEXIÓN ESTRELLA-DELTA</i>	74
2.6.3	<i>CONEXIÓN ESTRELLA-ESTRELLA</i>	75
2.6.4	<i>CONEXIÓN DELTA-ESTRELLA</i>	76
2.6.5	<i>EMPAQUES</i>	78

CAPITULO III

CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA

3.1	INTRODUCCIÓN	79
3.2	PÉRDIDAS QUE SE PRODUCEN EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA	80
3.2.1	<i>PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO</i>	81
3.2.1.1	<i>LAS PÉRDIDAS POR CORRIENTES PARÁSITAS</i>	82
3.2.1.1.1	<i>CÁLCULO PARA MEDIR LAS PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO POR LAS CORRIENTES DE FOUCAULT</i>	84
3.2.1.2	<i>LAS PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS</i>	85
3.2.1.2.1	<i>CÁLCULO PARA MEDIR LAS PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS</i>	86
3.2.1.3	<i>MÉTODO PARA MEDIR LAS PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO DE UN TRANSFORMADOR</i>	87
3.2.2	<i>PÉRDIDAS EN EL COBRE</i>	89
3.2.3	<i>MÉTODO PARA DETERMINAR LAS PÉRDIDAS EN EL COBRE</i>	89
3.2.4	<i>ESCAPE DE FLUJO DISPERSO</i>	93

CAPITULO IV

CÁLCULO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

4.1	INTRODUCCIÓN	94
4.2	ANÁLISIS ELÉCTRICO Y ENUNCIADO DE LAS ESPECIFICACIONES	95
4.3	DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA NECESARIA	96
	4.3.1 <i>POTENCIA DEL SECUNDARIO</i>	96
	4.3.2 <i>POTENCIA DE PRIMARIO Y TOTAL</i>	97
4.4	CÁLCULOS EN EL HIERRO	97
	4.4.1 <i>CÁLCULO DE LA SECCIÓN DEL NÚCLEO</i>	99
	4.4.2 <i>DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CARRETE</i>	102
4.5	CALCULOS EN EL COBRE	102
	4.5.1 <i>RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN</i>	102
	4.5.1.1 <i>DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE ESPIRAS PARA CADA BOBINADO</i>	106

CAPITULO V

DESARROLLO DEL SOFTWARE

5.1	INTRODUCCIÓN	109
5.2	ESQUEMA DEL SOFTWARE	110
5.3	ACCESO AL PROGRAMA	112
5.4	INTERFAZ DEL PROGRAMA DESARROLLADO	114
	5.4.1 <i>BOTÓN CALCULAR</i>	116
	5.4.2 <i>BOTÓN VER PRESENTACIÓN</i>	117
	5.4.3 <i>BOTÓN LIMPIAR</i>	118
	5.4.4 <i>IMPRESIÓN DE REPORTE</i>	118
	5.4.5 <i>BOTÓN CERRAR</i>	119
	CONCLUSIONES	XI
	RECOMENDACIONES	XII
	BIBLIOGRAFÍA	XIII
	SUMARIO	XV
	ANEXO	XX
	GLOSARIO	XXXIX

INDICE DE ILUSTRACIONES

FIG. 2.2.1	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR	10
FIG.2.2.2	BOBINADO PRIMARIO CON VOLTAJE ALTERNO	11
FIG. 2.2.3	INDUCCIÓN DE (FE)EN EL BOBINADO SECUNDARIO	12
FIG. 2.2.4	CARGA CONECTADA AL BOBINADO SECUNDARIO	13
FIG.2.3.1.1	NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR	14
FIG. 2.3.1.1.1	NÚCLEO TIPO COLUMNA	15
FIG. 2.3.1.2.1	NÚCLEO TIPO ACORAZADO	16
FIG.2.3.2.1	DEVANADOS	18
FIG. 2.3.4.1.1	AISLANTE SÓLIDO	23
FIG.2.3.4.1.2 (A)	ESTRUCTURA DE LA CELULOSA	25
FIG.2.3.4.1.3 (B)	UNIDAD DE GLUCOSA	25
FIG. 2.3.4.1.4	FACTORES QUE AFECTAN LA VIDA DEL PAPEL (A)	28
FIG. 2.3.4.1.5	FACTORES QUE AFECTAN LA VIDA DEL PAPEL (B)	29
FIG.2.3.4.2.1	AISLAMIENTO LIQUIDO	32
FIG. 2.3.4.2.2	HIDROCARBUROS-NAFTENICOS (A)	34
FIG. 2.3.4.2.3	HIDROCARBUROS-NAFTENICOS (B)	34
FIG.2.3.4.2.4	COMPUESTOS AROMATICOS	34
FIG. 2.3.4.4.1	TERMÓMETRO	44
FIG. 2.3.4.4.2	VARIACIÓN DE RESISTENCIA	44
FIG. 2.3.4.4.3	DETECTORES INTERNOS DE TEMPERATURA	45
FIG. 2.3.5.1	TANQUE DEL TRANSFORMADOR	46
FIG. 2.3.5.1.1	TIPO TANQUE ACANALADO	49
FIG. 2.3.5.1.2	TIPO TANQUE CORRUGADO	50

FIG. 2.3.5.1.3	TIPO TANQUE SELLADO	52
FIG. 2.3.6.1	DERIVADORES	53
FIG. 2.3.7.1	PASA TAPA BUSHINGS	55
FIG. 2.3.8	PARARRAYOS	57
FIG. 2.3.9.1	DEPÓSITO DE EXPANSIÓN	59
FIG. 2.3.10.1	INDICADORES DE NIVEL DE ACEITE	59
FIG. 2.3.11.1	RELÉ BUCHHOLZ	60
FIG. 2.3.12.1	DESECADOR	60
FIG. 2.3.15.1	PLACA DE CARACTERISTICAS	63
FIG. 2.3.17.1	RADIADORES DE REFRIGERACIÓN	65
FIG. 2.4.1	TRANSFORMADOR TERMINADO	66
FIG. 2.5.1	CICLO DE VIDA DEL TRANSFORMADOR	68
FIG. 2.5.2.1.1	PUNTOS DESTACADOS EN LA REVISIÓN DE DISEÑO	69
FIG. 2.5.3.1	INSPECCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN	70
FIG. 2.5.5.1	MANTENIMIENTO CONTROL DE LA VIDA ÚTIL	71
FIG. 2.6.1	CONEXIÓN DELTA – DELTA	72
FIG. 2.6.2	CONEXIÓN ESTRELLA – DELTA	73
FIG. 2.6.3	CONEXIÓN ESTRELLA – ESTRELLA	74
FIG. 2.6.4	CONEXIÓN DELTA – ESTRELLA	75
FIG. 3.2.1.1	PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO	80
FIG. 3.2.1.2.1	LAS PÉRDIDAS POR HISTERESIS	84
FIG. 3.2.1.2.1.1	CÀLCULO PARA MEDIR LAS PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS	86
FIG. 3.2.1.3.1	MÈTODO PARA MEDIR LAS PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO	87
FIG. 3.2.2.1.1	MÈTODO PARA DETERMINAR LAS PÉRDIDAS EN EL COBRE	89
FIG. 3.2.3.1	ESCAPE DE FLUJO DISPERSO	92
FIG. 4.5.1.1	RELACIÓN DE TRANSFORMACION	101
FIG. 5.2.1	ESQUEMA DEL SOFTWARE	108
FIG. 5.3.1	ACCESO AL PROGRAMA	110

FIG. 5.3.2	ACCESO AL PROGRAMA CONTRASEÑA	111
FIG. 5.4.1	PANTALLA TRANSFORMADOR MONOFASICO	112
FIG. 5.4.2	PANTALLA TRANSFORMADOR TRIFÁSICO	112
FIG. 5.4.1.1	INDICA EL BOTÓN CALCULAR	113
FIG. 5.4.2.1	PANTALLA DE PRESENTACIÓN	114
FIG. 5.4.3.1	BOTON LIMPIAR PANTALLA	115
FIG. 5.4.4.1	BOTON IMPRIMIR CALCULO	115
FIG. 5.4.5.1	BOTON CERRAR PANTALLA	116

INDICE DE TABLAS

TABLA 1	TABLA 1. REGIMEN DE ENVEJECIMIENTO RELATIVO SEGÚN NORMA IEC	XXI
TABLA 2	CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES AISLANTES	XXI
TABLA 3	CARACTERÍSTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE POTENCIA (W/Kg)	XXII
TABLA 4	PROPIEDADES FÍSICAS DEL ACEITE DIELECTRICO	XXII
TABLA 5	PROPIEDADES QUIMICAS DEL ACEITE DIELECTRICO	XXIII
TABLA 6	PROPIEDADES ELÉCTRICAS DEL ACEITE DIELECTRICO	XXIII
TABLA 7	TIPO DE AISLAMIENTO	XXIII
TABLA 8	EQUIVALENCIA DE CABALLOS VAPOR A KILOWATTS	XXIV
TABLA 9.	PESOS APROXIMADOS DE ALAMBRE MAGNETO	XXV
TABLA 10	DETERMINACIÓN DE LA FUSIÓN DEL ALAMBRE	XXVI
TABLA 11	RELATIVA AL ALAMBRE DE COBRE DESNUDO	XXVII
TABLA 12	EQUIVALENCIA ENTRE CONDUCTORES	XXVIII
TABLA 13	DIAMETROS DE ALAMBRE DISTINTAS AISLACIONES	XXIX
TABLA 14	CARACTERISTICA DE TEMPERATURA DE CONDUCTORES	XXX
TABLA 15	CARACTERÍSTICAS DEL CABLE ESMALTADO	XXXI
TABLA 16	DIMENSIONES DE CARRETES	XXXII
TABLA 17	CONDUCTORES	XXXIV
TABLA 18	Nº DE CHAPAS Y SUS DIMENSIONES	XXXVIII

PRÓLOGO

El presente trabajo pretende ser guía para el Diseño, Construcción y Cálculo de Transformadores de Potencia con la implementación de un Software como Tutorías de la Asignatura Máquinas I.

El proyecto parte de un repaso en el Capítulo I donde se detalla con claridad la introducción, antecedentes, objetivos e hipótesis que llevarán a obtener un trabajo óptimo.

Seguidamente en el Capítulo II, se dan a conocer los aspectos más generales de un transformador, de forma que el lector conozca las principales características de este tipo de máquinas.

En el Capítulo III, se empieza a tratar el cálculo de las pérdidas en los Transformadores de Potencia, dando a conocer los tipos de pérdidas que pueden producirse en dichas máquinas, además de las fórmulas que son utilizadas en este cálculo.

Después de haber estudiado y analizado las principales pérdidas que ocurren en los transformadores de potencia en el Capítulo IV se detalla toda la información correspondiente al Cálculo, Diseño y Construcción de estas máquinas. Una vez que se tiene toda esta información se presenta la aplicación informática creada. Ésta se

presenta a modo de manual de usuario, de forma que cualquier lector de este proyecto pueda hacer un uso adecuado de la misma.

Al final del proyecto se han incluido los Anexos que detallan la información sobre el diámetro de los conductores y la normativa de los aceites dieléctricos.

CAPITULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

La asignatura Máquinas I, es dictada en el cuarto ciclo de la carrera de Ingeniería Eléctrico-Mecánica de la Facultad Técnica para el Desarrollo, con la finalidad de brindarle al estudiante plenos conocimientos de los fundamentos técnicos para el cálculo de los transformadores. Para ello son empleados solo métodos tradicionales como la teoría y cálculos manuales.

En la actualidad, con el mayor uso de la energía eléctrica a nivel mundial, se hace necesario que los Sistemas Electroenergéticos tengan un alto nivel de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad, lo cual es un requisito indispensable en su operación diaria, la importancia de detectar y diagnosticar su estado, conociendo de antemano la posible aparición de sus fallas ocultas.

Con el propósito de brindarle al estudiante alternativas de fácil aprendizaje se plantea este trabajo que consistirá en la aplicación de un software académico que detallará los fundamentos técnicos para el cálculo, diseño y construcción de transformadores de Potencia, siendo un aporte importante y de fácil consulta no solo para los estudiantes de la Facultad Técnica para el Desarrollo de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, sino que también para profesionales en la rama, que

necesitan realizar análisis o simplemente reforzar conocimientos sobre los cálculos que se utilizan con respecto a la construcción de los transformadores de potencia.

Existen diferentes libros de diseño y cálculo de transformadores, algunos actuales y otros bastante más antiguos, existiendo muchas diferencias de planteamiento entre ellos. Sin embargo, en ninguno de los que se han consultado se ha encontrado un modelo completo de cálculo de un transformador, pues en todos ellos en un momento u otro del diseño se realizan aproximaciones y se utilizan coeficientes para simplificar los cálculos cuya obtención no está al alcance del lector o se realiza un diseño en base a ejemplos en los que determinadas decisiones no están justificadas.

El diseñar y construir transformadores de potencia, constituye una profesión interesante e instructiva.

El propósito principal de un transformador es convertir grandes niveles de voltaje de transmisión de corriente alterna (CA) a niveles de voltaje de distribución de CA de una misma frecuencia pero a otro nivel de voltaje para poder distribuir energía a los grandes centros de distribución.

El desarrollo del presente trabajo consistirá en varias temáticas que a lo largo de la carrera ya se han ido desarrollando, para los conocidos transformadores de potencia, pero esta vez teniendo presente sus definiciones, partes principales que están contruidos, tipos, la polaridad, placa de características, fundamentos y normas técnicas para su construcción, y otros términos a desarrollar relacionados con estos temas.

1.2 ANTECEDENTES

La falta de información tanto escrita (libros, folletos, revistas, etc.) respecto a diseño, cálculo y construcción de transformadores de potencia, conlleva, ocasionalmente, a escribir valores no reales de potencia lo que en muchos casos puede ocasionar problemas en el funcionamiento de los transformadores.

Actualmente de acuerdo a información obtenida, en la Biblioteca de la Facultad Técnica para el Desarrollo de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil no existen textos sobre normas técnicas para la construcción de transformadores de potencia, ni tampoco manuales que hablen sobre este tópico.

Esto nos abre las puertas para pensar que podemos elaborar una tesis que implemente la aplicación de un software académico de fácil utilización sobre este tema, considerando la gran afluencia de alumnos y docentes que día a día acuden en busca de material didáctico ilustrativo y de fácil comprensión que les permitan afianzar sus conocimientos y destrezas y adicionalmente tomando en cuenta la importancia que tienen estos elementos en su construcción y en el ámbito de la Ingeniería en Eléctrico-Mecánica.

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar un Software académico que permita fortalecer la consultoría en el análisis de los fundamentos técnicos para el cálculo, diseño y construcción de transformadores de potencia.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Disponer de recursos tecnológicos en el proceso de aprendizaje en la asignatura de Máquinas I.
- Facilitar el conocimiento de las normas técnicas en el cálculo, diseño y construcción de los transformadores de Potencia.
- Estudiar las características más importantes del Transformador de Potencia, incluyendo el análisis de los materiales con que se construyen.
- Proporcionar la capacidad técnica idónea basadas en normas nacionales e internacionales en la construcción de los Transformadores de Potencia.

1.4 HIPÓTESIS / PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Con la implementación de este software se facilitará el aprendizaje al estudiante y adicionalmente será usado como una guía de apoyo y de consulta técnica en el cálculo, diseño y construcción de los transformadores de potencia en la Biblioteca de la Facultad Técnica para el Desarrollo de la U.C.S.G.

1.5 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos se seleccionaron los siguientes métodos de investigación:

- Método de análisis
- Método de la inducción y la deducción.
- Métodos de comprobación y de observación (Experimental)

CAPITULO II

2 TRANSFORMADORES DE POTENCIA

2.1 INTRODUCCIÓN

Los transformadores son máquinas eléctricas estáticas que tienen la función de modificar parámetros de distribución de energía, utilizando para ello principios de inducción electromagnética. Es así que el principio básico de funcionamiento del transformador consiste en que cualquier variación de flujo magnético que atraviesa un circuito cerrado genera una corriente inducida, que sólo permanece mientras se produce el cambio de flujo magnético. Este es el conocido fenómeno de inducción electromagnética descubierto por Michael Faraday en 1831.

Las aplicaciones de estas máquinas en circuitos eléctricos son diversas, siendo una de las principales, el uso como transformadores de potencia. En este caso, su función es la de modificar los niveles de tensión en los sistemas de transporte y distribución de energía eléctrica. Se caracterizan estos transformadores por tener valores de tensión y frecuencia de entrada razonablemente constantes.

En 1888 Nikola Tesla obtuvo una patente por un generador polifásico alterno que producía gran potencia eléctrica. En el transcurso de los años, varios investigadores trabajaron con diferentes versiones de transformadores.

El primer transformador fue de hecho construido por Faraday cuando realizó los experimentos y descubrió la inducción electromagnética.

Realmente el transformador se le atribuye al Ing. americano William Stanley, que tenía algunos conocimientos sobre transformadores y que en el año 1884 fue contratado por el industrial George Westinghouse quien patentó el primer transformador.

Patentado alrededor de 120 años, el transformador moderno puede representar el eslabón más crucial y vulnerable de la cadena energética. Hacia el año de 1880 cuando se iniciaba el primer sistema de potencia en corriente directa en la ciudad de New York, con las dificultades de no tener la facilidad de transportar energía a grandes distancias se comenzó el estudio de la corriente alterna y los diseños primitivos de los transformadores:

- 1882: Gaulard y Gibas, diseñaron el primer transformador con núcleo abierto y generador secundario, diseño que fue adquirido por la Westinghouse.
- 1884: Den Baithy y Zierpnowski, desarrollaron el núcleo cerrado e implementaron el término hurgar transformator; este avance se convirtió en un éxito comercial y fue exhibido en Budapest.
- 1885: Stanley, contratado por la Westinghouse desarrollo el diseño de la forma carcasa y se realizó su demostración en Great Barrington, MA.
- 1886 Instalación a gran escala de transformadores en Buffalo, NY.

- 1891 Exposición en Frankfurt que terminó por introducir la transmisión de corriente alterna en la formación de los ingenieros eléctricos en Europa y Estados Unidos. Al establecer los sistemas de transmisión para transportar la energía era necesario convertir el voltaje de transmisión a un voltaje de distribución para poder distribuir energía a los grandes centros de distribución.

El Transformador es un Componente esencial e importante del Sistema Eléctrico de Potencia, en toda clase y tipo de instalación eléctrica el suministro de energía se realiza a través de los transformadores de potencia por lo cual la eficiencia y calidad de la energía estará en proporción a la confiabilidad de la instalación de dicho equipo.

Un transformador de potencia es aquel que maneja grandes magnitudes de voltio amperios VA, los cuales se expresan en KVA [kilo voltio amperios] o en MVA [mega voltio amperios].

Es aquel que se encarga de transferir potencia variando los niveles de voltaje y corriente con la finalidad de adecuarlos a las distintas necesidades de un sistema eléctrico de potencia. Estos equipos tendrán niveles de voltaje iguales ó superiores a 1KV. y con una potencia aparente igual ó superior a 1MVA.

Generalmente estos transformadores están instalados en subestaciones, centros

comerciales, compañías privadas; con el cual es transmitida la energía a magnitudes de voltaje adecuadas, que permiten derivar circuitos a los usuarios en alta, medias o bajas tensiones.

También se da una aplicación similar, en las grandes centrales de generación, donde los transformadores de potencia, elevan los niveles de voltaje de la energía generada a magnitudes de voltaje superiores, con el objeto de transportar la energía eléctrica en las líneas de transmisión.

Los transformadores de potencia son equipos que juegan un importante rol en todo sistema eléctrico. A éstos, los podemos encontrar en centrales generadoras, subestaciones y en innumerables instalaciones industriales. Cualquiera sea el lugar de instalación, el impacto producido por estos equipos es tal, que los procesos productivos podrían verse seriamente afectados y se enfrentarían a graves pérdidas económicas con la falla de un transformador.

En el presente capítulo se tratará de describir los aspectos más generales de un transformador, de forma que se pueda tener una visión general de este tipo de máquinas eléctricas y con ello se facilite el entendimiento de los capítulos siguientes y del proyecto en general.

2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR

El transformador consta de un núcleo ferromagnético, que forma el circuito magnético, y dos arrollamientos, que forman el circuito eléctrico, como se muestra en la fig. 2.2.1.

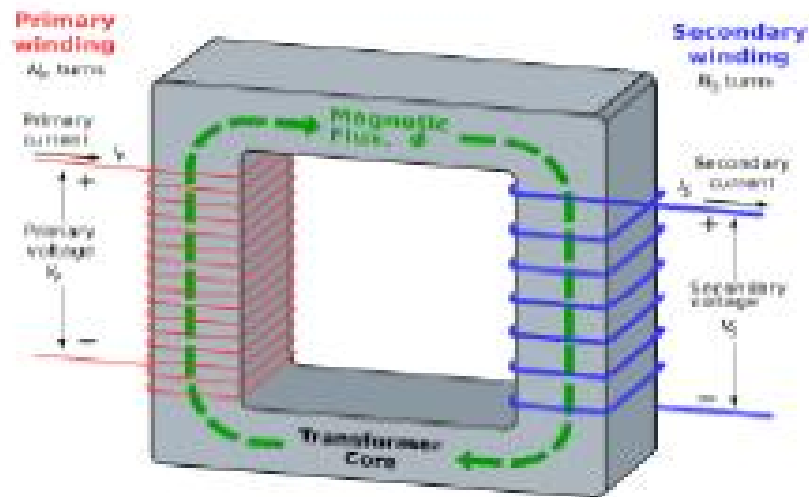


FIG. 2.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR

Al alimentar el bobinado primario con un voltaje alterno, por éste circulará una corriente eléctrica alterna (I_1), que produce una fuerza magneto motriz que causa que se establezca un flujo de líneas de fuerza alterno (Φ_1) en el circuito magnético del transformador, como lo podemos visualizar en la fig. 2.2.2.

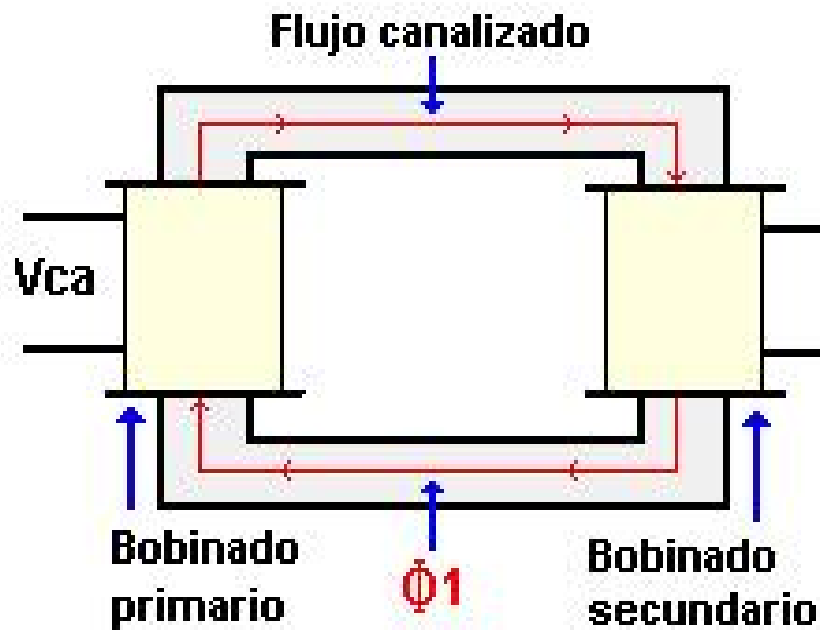


FIG.2.2.2 BOBINADO PRIMARIO CON VOLTAJE ALTERNO

El flujo Φ_1 al estar canalizado en el núcleo, induce en las espiras del bobinado secundario una fuerza electromotriz (E2).

Las espiras del bobinado primario también están en la influencia del Φ_1 . Por lo tanto en ellas se va a inducir una fuerza contraelectromotriz (E1), que se opone al voltaje de alimentación, dando como resultado una disminución de la intensidad de corriente (I1) como se muestra en la fig. 2.2.3.

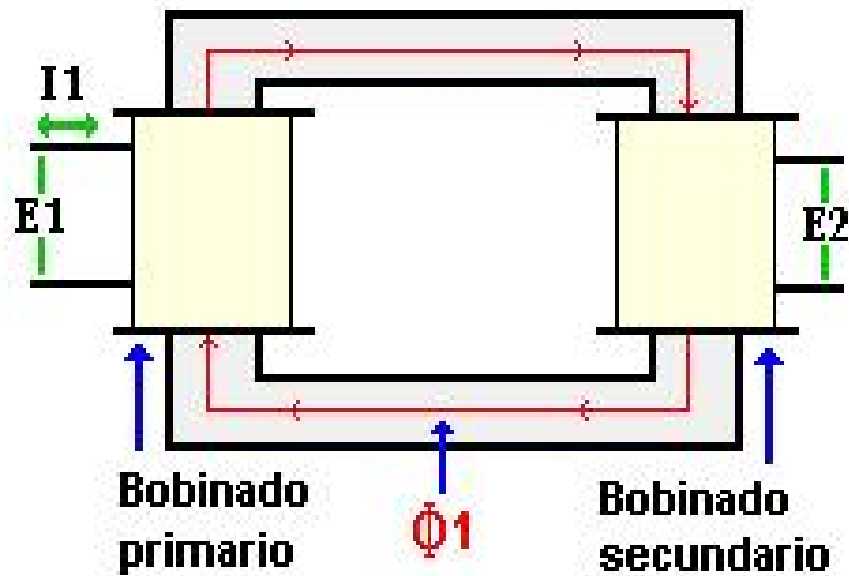


FIG.2.2.3 INDUCCIÓN DE (F.E) EN EL BOBINADO SECUN DARIO

Cuando se le aplica carga (R) al bobinado secundario, circula por él la intensidad de corriente I_2 , la cual produce el flujo magnético Φ_2 , opuesto al Φ_1 , por lo tanto reduce el flujo resultante en el núcleo dando como resultado que la fuerza contraelectromotriz disminuya y la intensidad de corriente I_1 aumente.

Se observa como un aumento de la corriente en el secundario (I_2) provoca un aumento de la corriente en el primario (I_1), sin que exista conexión eléctrica entre ambos bobinados, como se puede observar en la fig. 2.2.3.

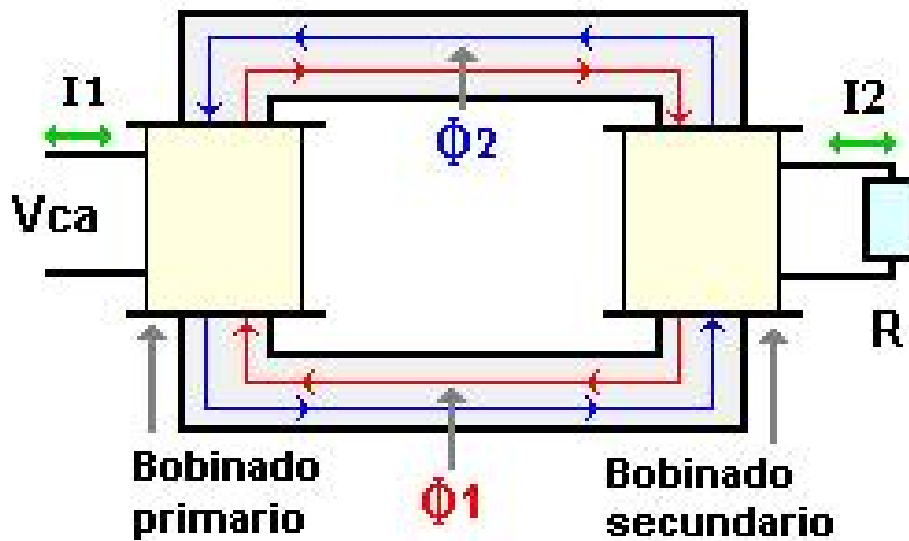


FIG 2.2.4 CARGA CONECTADA AL BOBINADO SECUNDARIO

Dado que la fuerza contraelectromotriz es directamente proporcional al flujo inductor (Φ_1), al disminuir éste, por la contraposición del Φ_2 , se da un incremento en la corriente I_1 .

Si el transformador es reductor el arrollamiento primario será el arrollamiento de mayor tensión y el secundario el de menor tensión, y si el transformador es elevador el arrollamiento primario será el de menor tensión y el secundario el de mayor tensión.

Las tensiones del arrollamiento primario y secundario en vacío, coinciden, en el caso de transformadores monofásicos y algunos grupos de conexión trifásicos, con bastante aproximación con la relación existente entre el número de espiras primarias

y secundarias. Esto determina la relación de transformación del transformador, punto fundamental de estos equipos.

$$rt = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

2.3 *CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS*

2.3.1 *Núcleo.*

El núcleo debe ser de acuerdo al tipo y capacidad del transformador, será fabricado con láminas de acero eléctrico al silicio, grano orientado y laminado en frío u otro material magnético, caracterizado por ser libres de envejecimiento, de alta permeabilidad y bajas pérdidas por histéresis.

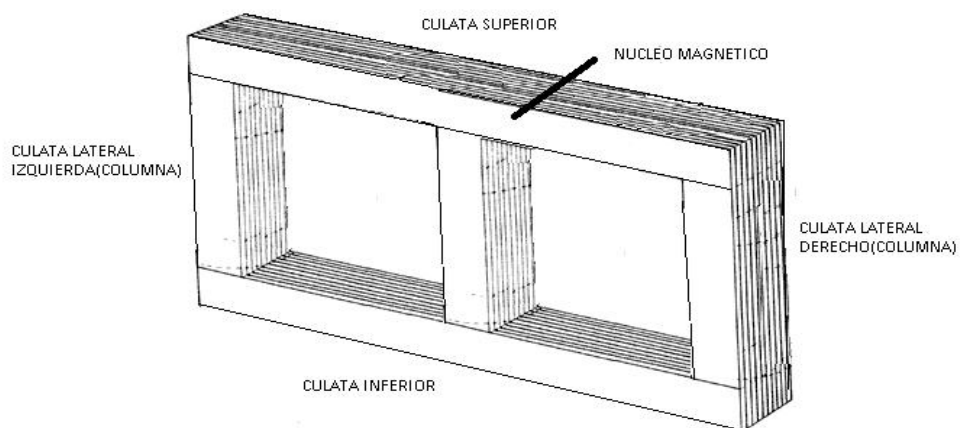


FIG.2.3.1.1 NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR

De acuerdo con el tipo de transformador de potencia que se desee construir, se puede también escoger el tipo de núcleo más apropiado. En la actualidad los núcleos más utilizados son:

2.3.1.1 Núcleo Tipo Columna.

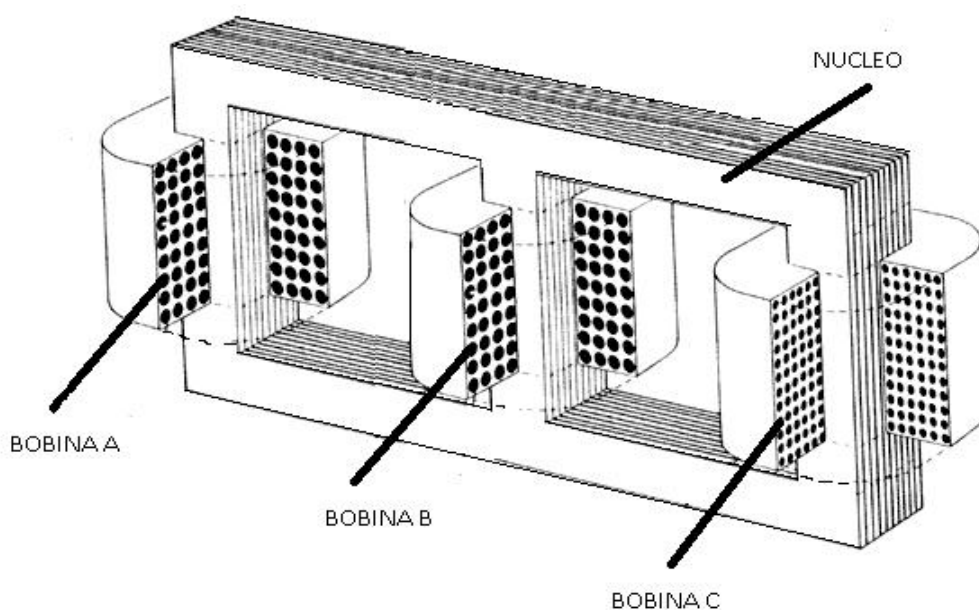


FIG. 2.3.1.1.1 NÚCLEO TIPO COLUMNA

En el diseño de columnas las bobinas están arrolladas alrededor del núcleo, lo cual se presenta en forma de bobinas cilíndricas, como se indica en la fig. 2.3.1.1.1.

Generalmente el arrollamiento de alta y baja tensión es enrollado concéntricamente. Normalmente la bobina de baja tensión se arrolla en el interior de la bobina de alta tensión.

El espacio vacío entre columnas, donde se alojan las bobinas, se llama ventana, normalmente las columnas están alojadas en un plano y su orientación es vertical.

2.3.1.2 Núcleo Tipo Acorazado.

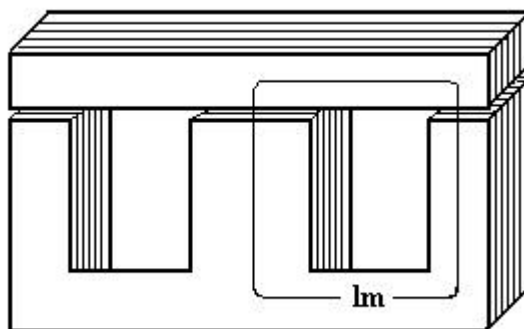


FIG. 2.3.1.2.1 NÚCLEO TIPO ACORAZADO

En el diseño tipo acorazado, el núcleo está construido alrededor de las bobinas, fig. 2.3.1.2.1. Normalmente este tipo es más común en transformadores de potencia debido al menor costo que supone.

En transformadores de grandes potencias, el núcleo de tipo acorazado es mejor, ya que en caso de corto-circuito o sobrecarga las fuerzas electromagnéticas pueden ser mejor controladas.

Las láminas llevarán películas aislantes en sus superficies, las cuales no serán afectadas por el aceite caliente o los aumentos de temperatura propios del núcleo del

transformador y presentarán superficies suaves con el fin de poder obtener elevados factores de laminación.

Cuando el núcleo terminado sea del tipo enrollado, éste deberá ser sometido a un proceso de recocido en atmósfera de gas inerte con el fin de reorientar los granos de las láminas magnéticas.

Las láminas deben estar rígidamente aseguradas para que resistan esfuerzos mecánicos y deslizamientos durante el transporte, montaje y condiciones de cortocircuito. Debe tenerse especial cuidado en distribuir equilibradamente la presión mecánica sobre las láminas del núcleo.

El diseño de la estructura de fijación del núcleo debe minimizar las pérdidas por corrientes parásitas.

El núcleo y las bobinas se fijarán en el tanque de modo que no se presenten desplazamientos cuando se mueva el transformador. El núcleo será aterrizado al tanque del transformador para evitar potenciales electrostáticos.

Todos los soportes y elementos estructurales de fijación del núcleo deben estar aislados dieléctricamente del núcleo. El diseño y los materiales utilizados para el aislamiento de estos soportes deben tomar en cuenta los esfuerzos presentes durante el manejo, el transporte y operación del transformador. No debe sufrir

envejecimiento que deteriore su operación durante la vida esperada del equipo al estar expuesto a líquido aislante caliente dentro del intervalo de temperatura de operación especificado.

El margen de seguridad para el diseño y selección de materiales debe considerar la vida esperada del transformador y la imposibilidad de ejecutar acciones de mantenimiento. El fabricante debe incluir en el manual del transformador un plano que indique los puntos entre núcleo, estructura de fijación y tanque que estén aislados y no aterrizados.

2.3.2 *Devanados.*

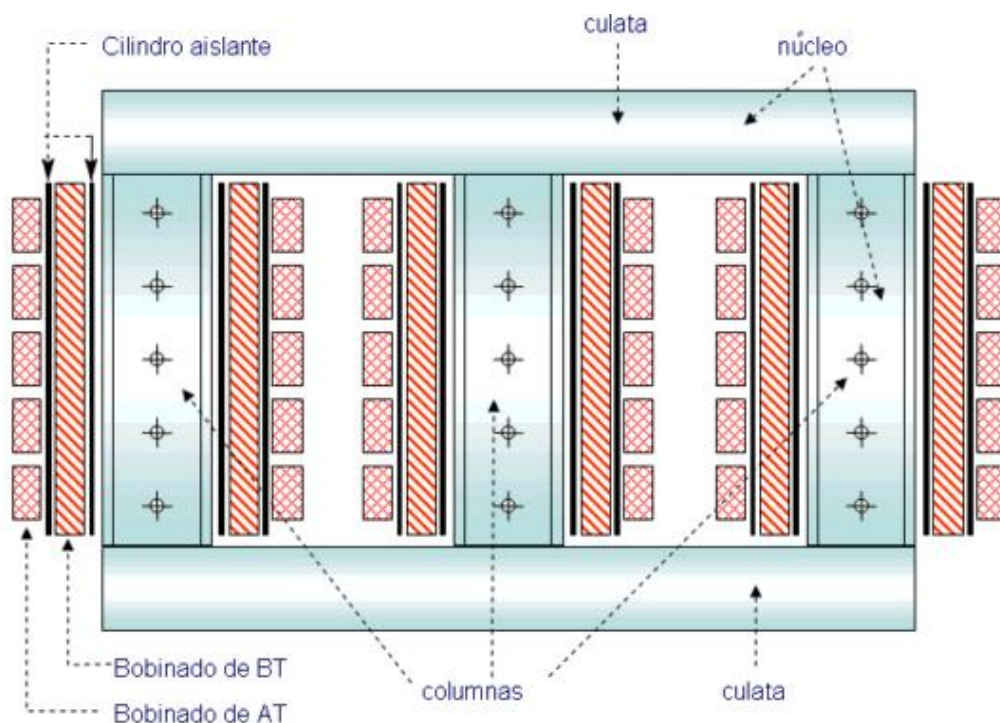


FIG.2.3.2.1 DEVANADOS

Los devanados primarios y secundarios (fig.2.3.2.1), serán de cobre de conductividad 99.9 % mínimo a 20°C. Los devanados deberán constituir una unidad sólida, para lo cual serán sometidos a los procesos de prensado y curados que fueren necesarios.

Cuando los devanados sean construidos con láminas, éstas no podrán presentar limaduras debidas al corte que puedan deteriorar el material aislante y dar lugar a cortocircuitos, o bien, provocar concentraciones elevadas de campo eléctrico que puedan causar perforación del material aislante. El espesor mínimo del aislamiento entre capas deberá ser de acuerdo a la capacidad del transformador.

Los materiales adicionales utilizados en la fabricación tales como pegantes, cintas, etc., deberán ser compatibles con el aceite.

Los materiales usados para construir los canales de refrigeración para circulación de aceite deberán tener adecuadas características aislantes, térmicas y mecánicas.

El borne secundario en su parte interna deberá ir unido a la bobina, de tal forma que presente área de contacto adecuada para la corriente que circulará por allí. El terminal secundario interno del transformador deberá colocarse entre arandelas con tuerca y contratuerca al lado del buje y tuerca en el otro lado. Estos herrajes serán de

cobre dependiendo de la capacidad del transformador. Las soldaduras utilizadas en las uniones deberán ser de aleaciones de plata.

La tensión mecánica del bobinado será la adecuada, de tal forma que no se someta a esfuerzos excesivos que puedan forzar el conductor y los aislamientos o que permitan que el devanado quede demasiado suelto. Debe evitarse toda doblez innecesario del alambre al embobinarlo.

El diseño y construcción de los conductores, aislamiento y blindajes debe ser tal que no exceda el nivel de descargas parciales, no sólo en las tensiones de operación, sino también durante las pruebas dieléctricas.

El diseño de la ubicación de las bobinas que forman los devanados debe asegurar la circulación del líquido aislante, para que la temperatura sea menor a la temperatura máxima del nivel de aislamiento en cualquier parte.

El ensamble completo de devanados y guías de conexión, debe estar sujeto y soportado de manera que resista los esfuerzos mecánicos producidos por la vibración del transformador y por la ocurrencia de cortos circuitos. Debe preverse que su ubicación no obstruya el flujo del líquido aislante de enfriamiento del transformador, no debe sufrir ningún desajuste ni deformación durante el embarque, transporte y maniobras.

Los materiales utilizados en la construcción deben ser nuevos y compatibles con el líquido aislante y con la temperatura máxima presente bajo condiciones normales y máximas de operación.

Los conectores terminales deben ser diseñados en dimensiones y área de contacto de acuerdo a la magnitud de la corriente máxima, no deben forzarse ni ser doblados, para dar el ángulo de contacto con el punto a conectarse.

El cable que salga de devanados o de la conexión, a cualquier accesorio cambiador de derivaciones ó boquillas, debe ser de una sola pieza. No se aceptan empates o empalmes.

Las interconexiones internas para el cierre de deltas o guías a las boquillas y cambiador de derivaciones deben estar aisladas en toda su longitud.

2.3.3 Parte Activa

El núcleo y bobinas una vez acoplados serán soportados por una estructura o correa metálica. Esta correa estará diseñada para soportar las fuerzas axiales de cortocircuito que puedan causar daños o deformación de las bobinas. Además, tendrá en su parte superior medios apropiados para sujetar la parte activa de tal forma que se pueda extraer el conjunto sin dispositivos especiales.

Este conjunto se inmovilizará dentro del tanque del transformador con un mecanismo sencillo, práctico y preciso que evite el uso de herramientas especiales. El fabricante garantizará que las vibraciones producidas durante el transporte no afecten la parte activa. Esta una vez armada, se someterá a un proceso de secado.

La parte activa deberá ser removible fácilmente para propósitos de mantenimiento o reparación. Los tornillos y demás elementos de la parte activa del transformador deberán estar completamente limpios, de tal forma que no contaminen el aceite del transformador.

Los dos tipos fundamentales de diseño de la parte activa de un transformador son el TIPO NUCLEO, en el cual dos grupos de devanados abrazan a un núcleo único y el TIPO ACORAZADO, en el cual el flujo que atraviesa a un único grupo de devanados está formado, al menos, por dos componentes existentes en circuitos magnéticos en paralelo.

El diseño del Tipo Núcleo es usado en transformadores de potencia con valores de corriente y KVA bajos, mientras que el Tipo Acorazado es usado en transformadores con potencias iguales o mayores a 50 MVA.

2.3.4 El Sistema de Aislamiento

La vida de un transformador está determinada por la vida de su aislamiento.

Este sistema tiene como función aislar los devanados del transformador entre sí y de tierra, es decir, los elementos de este sistema aíslan las partes conductoras de corriente del núcleo y de las estructuras de acero.

El sistema de aislamiento de un transformador en aceite consta principalmente de 2 tipos de materiales aislantes: aceite y papel. A continuación se estudiará de manera breve las funciones y propiedades de ambos materiales.

2.3.4.1 Aislamiento Sólido



FIG. 2.3.4.1.1 AISLANTE SÓLIDO

Los papeles (fig. 2.3.4.1.1), utilizados en el aislamiento de los devanados serán clase A, los cuales deberán soportar la máxima temperatura en el punto más caliente de los devanados.

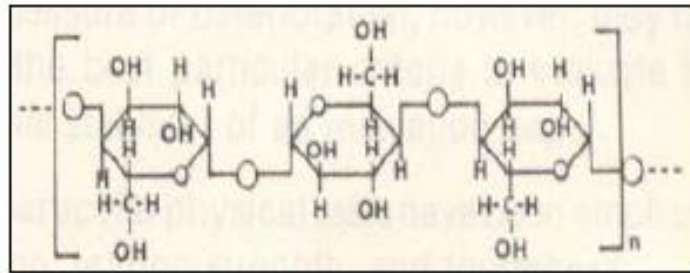
El aislamiento sólido está compuesto por papel Kraft. Este papel desempeña mayormente tres funciones:

1. Soporta los esfuerzos eléctricos producidos por los voltajes en condiciones normales y anormales durante la operación del transformador.
2. Soporta los esfuerzos mecánicos y térmicos que acompañan a un cortocircuito.
3. Previene una acumulación excesiva de calor.

Químicamente, su estructura, se basa en la celulosa que es una de las numerosas sustancias vegetales que a su vez, se compone de anillos de glucosa, fig. 2.3.4.1.3 (B).

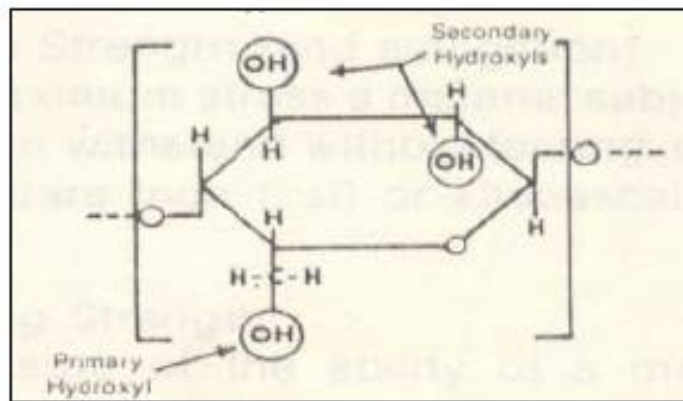
Estos anillos se unen entre sí, a través de puentes de hidrógeno, dando lugar a largas cadenas que conforman la molécula de celulosa, fig. 2.3.4.1.2 (A).

Estas cadenas también se unen, formando fibras de celulosa.



ESTRUCTURA DE LA CELULOSA

FIG. 2.3.4.1.2 (A) ESTRUCTURA DE CELULOSA



UNIDAD DE GLUCOSA

FIG. 2.3.4.1.3 (B) UNIDAD DE GLUCOSA

El papel Kraft, usado en el aislamiento sólido de la mayoría de los transformadores, debe poseer a lo menos las siguientes características:

- Alta rigidez dieléctrica.
- Alto grado de flexibilidad.
- Gran resistencia a la tracción mecánica.
- Gran estabilidad térmica.

2.3.4.1.1 Factores que Afectan la Vida del Papel.

La mayoría de los expertos coinciden en que la vida de un transformador está determinada por la vida del papel. A continuación se identifican cada uno de los factores y los efectos que ellos ocasionan sobre el papel.

- a. Alta temperatura.*** El papel trabaja sin problemas y en condiciones de estabilidad térmica a temperaturas inferiores a los 100 C°. Sobre este valor se comienzan a romper los anillos de glucosa reduciéndose las cadenas. Lo anterior significa una notable disminución del grado de polimerización de las moléculas de celulosa. Se dice que el papel ha llegado al término de su vida útil, y por lo tanto al término de la vida del transformador, cuando el grado de polimerización cae por debajo de 250 unidades. Una buena recomendación es evitar el funcionamiento de un transformador a temperaturas superiores a los 90C°. Cuando el grado de polimerización es de 250 unidades o inferior, el papel pierde su flexibilidad al cristalizarse, disminuyendo la resistencia mecánica a la tracción. Un papel degradado, con bajo número de polimerización, se rompe fácilmente produciendo fallas internas.
- b. Contenido de Agua.*** Químicamente, el agua, es un compuesto polar, es decir, está formado por moléculas de H₂O que tienen un momento dipolar distinto de cero, las que se orientan fácilmente en la dirección de un campo eléctrico. El contenido de agua en el papel afecta fuertemente su rigidez dieléctrica.

Con una elevada presencia de agua, aparece el riesgo de formación de burbujas las cuales incrementan el efecto corona y la posterior aparición de descargas internas. Con un porcentaje de agua superior al 3% se empiezan a liberar fibras de papel al aceite. Sin embargo, es necesario que un porcentaje mínimo de agua se encuentre presente en el orden de 0.5% a 2%, con el fin de asegurar una buena resistencia mecánica y flexibilidad.

- c. **Acidez del Aceite Dieléctrico.** En general, todos los compuestos polares contribuyen a la degradación del papel, particularmente los compuestos ácidos del aceite. Un aceite nuevo, posee un muy bajo contenido de compuestos polares, sin embargo, un aceite contaminado o que se encuentre en operación durante un largo tiempo, contiene una gran cantidad de compuestos ácidos que terminan formando lodos, los cuales precipitan sobre los devanados e intersticios del núcleo.

Estos depósitos logran conseguir altos espesores, afectando la transferencia de calor y aumentando notablemente la temperatura del transformador, aún en condiciones de baja carga. Por otro lado, el grado de acidez de un aceite, medido en su número de neutralización o acidez, afecta notablemente la resistencia a la tracción del papel.

También podemos conocer la pérdida de resistencia a la tracción (ruptura) del aislamiento del papel Kraft, por el grado de polimerización de las fibras que componen el papel aislante, este parámetro nos indicará el grado de envejecimiento del dieléctrico.

El grado de polimerización es un nuevo parámetro a tener en cuenta en el futuro del cálculo de la degradación del papel Kraft.

En la figura 2.3.4.1.4 se puede apreciar cómo se reducen en el tiempo las características de resistencia a la tracción del papel frente al grado de polimerización de manera directamente proporcional, es decir a menor grado de polimerización más fácil es que el dieléctrico se rompa.

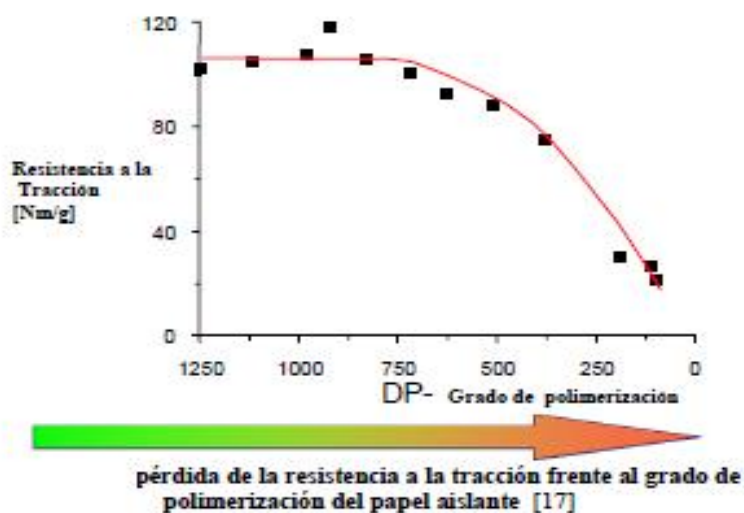
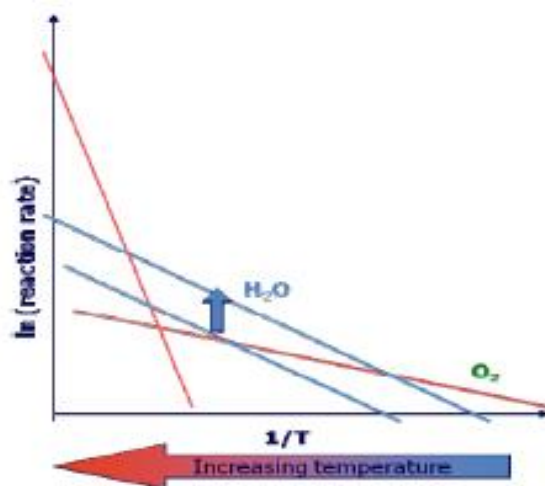


FIG. 2.3.4.1.4 FACTORES QUE AFECTAN LA VIDA DEL PAPEL (A)

La fig. .3.4.1.5 muestra la curva característica del envejecimiento normal del papel Kraft, que viene dado principalmente por dos procesos químicos que se dan en estado de funcionamiento normal, la oxidación y la hidrólisis.

La oxidación incrementa el envejecimiento en dos o tres veces la velocidad de referencia, y la **hidrólisis** es un factor de diez a quince cuando el agua contenida en el papel es de hasta un tres por ciento.



grado de oxidación, hidrólisis y pirolisis frente al aumento de temperatura

FIG. 2.3.4.1.5 FACTORES QUE AFECTAN LA VIDA DEL PAPEL (B)

La pirolisis solamente es considerada a muy altas temperaturas, típicas de algún defecto o fallo térmico. Este calor en extremo lleva a la carbonización de las fibras de celulosa.

El calor en niveles moderados, como normalmente ocurre en transformadores, causa la rotura de los monómeros individuales de la cadena de celulosa, formando un residuo sólido y liberando monóxido de carbono, dióxido de carbono y agua. Como no podía ser diferente, el grado de polimerización se reduce, y por tanto disminuyen características de resistencia mecánica de la celulosa.

La oxidación ocurre con baja energía de activación y a bajas temperaturas, y la hidrólisis tiene una energía de activación de unos 111kj/mol y se rige catalíticamente por disociación de ácidos de bajo nivel molecular (ácidos y agua), produce más ácidos y es una reacción auto acelerada.

2.3.4.1.2 Régimen de envejecimiento relativo según normas

Con Norma IEC.- Utilizando la ecuación de Montsinger para aislamiento con papel común, se pueden relacionar las distintas velocidades de consumo de vida para una temperatura del cobre dada θ_h correlacionándolo con el consumo de vida relativo a una temperatura de referencia θ_{hr} . La fórmula de la **Velocidad Relativa del Consumo de Vida (V)** queda:

$$V = 2^{(\theta_h - 98) / 6}$$

Donde:

θ_h = Temperatura en el cobre

θ_a = Temperatura ambiente

θ_o = Temperatura en el aceite

θ_{hmr} = Temperatura media del bobinado a potencia nominal

θ_{hr} = Temperatura del punto caliente a corriente de regímenes es 98°C para un transformador construido con la norma IEC 60076 de 1998 y θ_a de 20° C.

Estos valores corresponden al funcionamiento con una temperatura ambiental θ_a de 0°C y la potencia nominal, del transformador, es decir, se acepta que se los construya con una elevación de temperatura sobre el ambiente de $\Delta \theta_h = 78^\circ \text{C}$.

Para el punto más caliente, el Hot Spot. se considera el bobinado $\theta_{hr} - \theta_{hmr} 13^\circ \text{C}$ superando la temperatura del calentamiento medio del cobre (medido por resistencia).

Este valor de temperatura según IEC está definido en 65 °C. Ver tabla1.

Con Norma ANSI IEEE.- Las normas americanas especifican $\theta_{hmr} = 55^\circ\text{C}$ para las máquinas construidas con papel común, en la misma norma $\theta_{hmr} = 65^\circ\text{C}$ exige el uso de papel mejorado térmicamente. En las Especificaciones Técnicas se pueden definir valores diferentes, los valores bajos son los recomendables para climas tropicales. Los transformadores construidos con norma ANSI presentan la fórmula para la **Velocidad Relativa del Consumo de Vida (V)**:

$$V = e^{\left(\frac{15000}{110+273} - \frac{1500}{\theta_h+273} \right)}$$

2.3.4.2 Aislamiento Líquido.



FIG.2.3.4.2.1 AISLAMIENTO LIQUIDO

La mayoría de los transformadores usan como aislante líquido al aceite mineral derivado del petróleo. Este elemento, cumple múltiples funciones como:

- Mejora del aislamiento entre componentes del Transformador.
- Mantiene la temperatura interna adecuada en el transformador.
- El aceite debe mantener excelentes propiedades eléctricas para poder soportar la degradación térmica y la oxidación.
- sirve como elemento aislante para poder soportar los altos voltajes que se generan internamente dentro del transformador
- El aceite mineral tiene la función de servir de elemento transmisor de calor para poder disipar el calor

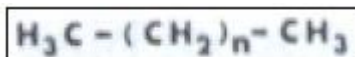
El aceite aislante, es una mezcla adecuada de hidrocarburos, cuyas moléculas contienen entre 16 a 22 átomos de carbono y no-hidrocarburos. Cada uno de estos componentes presentes en la mezcla, aportan sus características correspondientes, haciendo que el producto final sea un aceite que cumpla con las funciones de aislante, refrigerante y protector de las partes metálicas internas del transformador. A continuación se hará una explicación breve de la composición química del aceite mineral.

2.3.4.2.1 Hidrocarburos

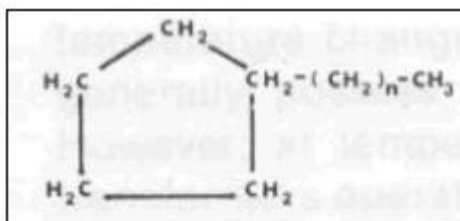
Son compuestos químicos que contienen solo hidrógeno y carbono. Los compuestos de hidrocarburos son el mayor constituyente del aceite mineral y pueden ser divididos en tres grandes grupos:

- Parafínicos.
- Nafténicos.
- Compuestos aromáticos.

a. Parafínicos: generalmente considerados hidrocarburos saturados, caracterizados por una estructura de enlaces rectos.

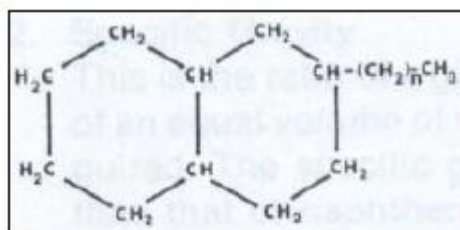


b. **Nafténicos:** clasificados como compuestos de enlaces en forma de anillo, pueden ser monocíclicos, (fig. 2.3.4.2.2), bicíclicos, (fig. 2.3.4.2.3) , etc.



HIDROCARBURO NAFTENICO MONOCICLICO

FIG. 2.3.4.2.2 HIDROCARBUROS-NAFTENICOS (A)



HIDROCARBURO NAFTENICO BICICLICO

FIG. 2.3.4.2.3 HIDROCARBUROS-NAFTENICOS (B)

c. **Compuestos aromáticos:** poseen uno o más anillos aromáticos, (fig. 2.3.4.2.1), los cuales pueden ser unidos con anillos a cíclicos.

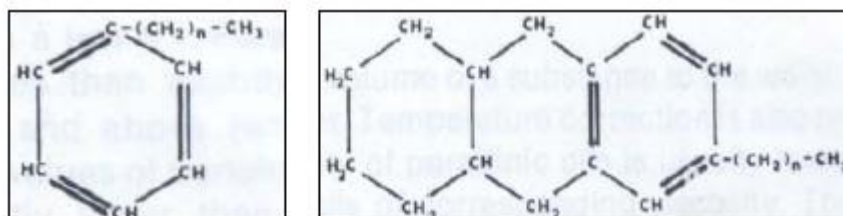


FIG.2.3.4.2.4 COMPUESTOS AROMATICOS

2.3.4.2.2 No-Hidrocarburos

El petróleo del cual se deriva el aceite usado en transformadores, también contiene compuestos que no son hidrocarburos. Estos compuestos presentan una estructura semejante a la de los hidrocarburos, con la excepción de que los átomos de carbono son reemplazados por uno, dos, tres o más átomos de azufre, oxígeno o nitrógeno. Los compuestos no-hidrocarburos en el aceite mineral pueden ser ácidos Nafténicos, esterres, alcoholes, entre otros.

Es importante señalar que existen algunas propiedades físicas que incluyen:

- 1. Viscosidad.-** Considerada una medida de la resistencia del aceite a fluir. Este parámetro es controlado para asegurar una libre circulación en los transformadores y mecanismos, así como una adecuada transferencia de calor.
- 2. Gravedad específica.-** es la razón entre el peso de un volumen dado de una sustancia y el peso de un volumen igual de agua. Este parámetro es útil como ayuda para identificar tipos de aceites nuevos.
- 3. Tensión interfacial.-** un elevado valor de tensión interfacial en un aceite nuevo es indicativo de la ausencia de contaminantes polares indeseables, pero el mayor uso de la tensión interfacial esta en la determinación del grado de deterioro y contaminación que posee un aceite en servicio.
- 4. Estabilidad de oxidación.**

5. Volatibilidad.

Los transformadores deben ser entregados llenos de aceite, el cual debe ser mineral, preparado y refinado especialmente para uso en transformadores y deberá cumplir con las características físicas, químicas y eléctricas de la norma NTC 1465 (ASTM D-3487).

2.3.4.2.3 Degradación Del Aceite Dieléctrico.

Un aceite en óptimas condiciones, debe asegurar que las propiedades del papel aislante, no se vean afectadas o que el papel no se degrade. Sin embargo, durante el funcionamiento de un transformador, existen varios aspectos que contribuyen a la degradación o particularmente a la oxidación del aceite, como el tipo de transformador, ubicación, carga y temperatura de trabajo, etc.

La oxidación del aceite, produce formación de lodos. Durante el funcionamiento de un transformador, el aceite puede degradarse u oxidarse debido a los siguientes agentes catalizadores:

- Contacto con la celulosa.
- Barnices, lacas, pinturas.
- Exposición a la humedad o agua.
- Exposición a altas temperaturas.
- Exposición a campos eléctricos.

- Al establecimiento de partículas polares.

Los agentes mencionados, se comportan como catalizadores, contribuyendo al desarrollo de reacciones químicas en cadena, formando en una primera etapa, distintos productos intermedios de oxidación, siendo los alcoholes y los aldehídos las primeras sustancias polares que aparecen. A su vez, estos reaccionan entre si, en forma lateral, formando cetonas. La cetona se oxida formando ácidos.

Estos ácidos reaccionan con los alcoholes formando ésteres. Estos ésteres se activan con el oxígeno, formando ésteres activados los que al reaccionar con los ácidos se forman poli ésteres ó lodos.

2.3.4.2.4 Análisis del Aceite Aislante

El Mantenimiento Preventivo de los Aceites Aislantes debe incluir el Análisis del Aceite, mediante diferentes pruebas que permitan conocer el estado funcional del mismo, que evite fallas inesperadas de los Transformadores, con las consecuencias económicas y de calidad en el servicio de suministro eléctrico.

La necesidad de Mantenimiento de un Transformador Eléctrico es, por lo tanto, directamente proporcional al valor del mismo, y a la importancia del suministro de energía que ofrece.

2.3.4.2.5 Comprobación a Aceites Aislantes

La toma de muestras para el análisis del Aceite Aislante debe ser realizada de forma segura y cuidadosa, para conseguir resultados reales. Las pruebas básicas que pueden hacerse a los Aceites Aislantes para transformador son:

- 1. Test de Rigidez Dieléctrica:** Consiste en la comprobación de la capacidad aislante del aceite del transformador, mediante la extracción de una muestra y el uso de un aparato Comprobador de Rigidez Dieléctrica (conocido vulgarmente como CHISPOMETRO).
- 2. Agua disuelta en el Aceite:** Medida en PPM, partes por Millón, y de efecto directo en la pérdida de la Rigidez Dieléctrica de la muestra.
- 3. Neutralización/Acidez:** Control de los niveles de ACIDO en el Aceite, como referencia del nivel de Oxidación del mismo.
- 4. Turbiedad/Color:** Tanto la presencia de Agua como de otras partículas disueltas produce turbiedad en el Aceite Aislante.
- 5. Partículas Disueltas:** contaminación por todo tipo de suciedad.
- 6. Gases Disueltos:** El envejecimiento, junto con la degradación de las partículas por la temperatura y posibles descargas internas, generan diferentes gases dentro del transformador y en el aceite, el tipo y cantidad de ellos pueden dar importante información.
- 7. Tensión Superficial:** Valor Físico del Aceite, con relación a la viscosidad.

2.3.4.2.6 Consejos para aumentar la duración de los Aceites Aislantes en los Transformadores.

Aunque en algunas ocasiones donde la degradación y contaminación del Aceite haga más cara su regeneración que su sustitución, se dan una serie de consejos que eviten llegar a esa situación:

- Equilibrar adecuadamente los Transformadores logrará que el aceite cubra la totalidad de las partes del interior de los mismos.
- Colocar filtros adecuados en los respiradores de los Transformadores, de forma que evite la entrada de la mayor cantidad posible de humedad, polvo y otras partículas.
- Comprobar el cierre de tapas, pasacables, rejilla, etc. para evitar tanto el acceso de suciedad como la pérdida de aceite.
- Realizar pruebas, test y/o análisis periódicos para poder tomar acciones de mantenimiento antes de que, la excesiva degradación del aceite lo haga irrecuperable e incluso dañe de forma grave el interior del Transformador.
- El uso de Equipos de Purificación y Regeneración de Aceite Aislante permite devolver las características funcionales mínimas para continuar usándolo. Este tratamiento debe realizarse antes de que la contaminación del Aceite provoque depósitos en el fondo del Transformador.

2.3.4.2.7 Tratamientos de los medios refrigerantes para mantener la calidad del aceite

- Aplicación de aditivos en aceites
- Control de las temperaturas.
- Control de las sobrecargas.
- Mejoras en la refrigeración
- Limitación de esfuerzos extremos (cortocircuitos y/o arranques)
- Aplicar modificaciones en los sistemas de respiración
- Reacondicionamiento de las aislaciones y del arrollamiento.
- Secado reconstrucción de aislaciones en forma total o parcial

2.3.4.3 Clasificación de los materiales aislantes.

La clasificación de los materiales aislantes (tabla 2) para máquinas eléctricas con relación a su estabilidad terminal, cubre básicamente siete clases de materiales aislantes que se usan por lo general y que son los siguientes:

Clase Y.

Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales, tales como algodón, seda y papel sin impregnar.

Clase A.

Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales tales como el algodón, seda y papel con alguna impregnación o recubrimiento o cuando se sumergen en líquidos dieléctricos tales como aceite.

Otros materiales o combinación de materiales que caigan dentro de estos límites de temperatura, pueden caer dentro de esta categoría.

Clase E.

Este aislamiento consiste en materiales o combinaciones de materiales que por experiencia o por pruebas, pueden operar a temperaturas hasta de 5° C, sobre la temperatura de los aislamientos Clase A.

Clase B.

Consiste en materiales o combinaciones de materiales tales como: fibra de vidrio, asbestos, etc. con algunas substancias aglutinantes.

Además puede haber otros materiales inorgánicos.

Clase F.

Este aislamiento consiste en materiales o combinaciones de materiales tales como mica, fibra de vidrio, asbesto, etc., con sustancias aglutinantes, así como otros materiales o combinaciones de materiales no necesariamente inorgánicos.

Clase H.

Este aislamiento consiste de materiales tales como el silicón, elastómeros y combinaciones de materiales tales como la mica, la fibra de vidrio, asbestos, etc., con sustancias aglutinantes como son las resinas y silicones apropiados.

Clase C.

Este aislamiento consiste en materiales o combinaciones de materiales tales como la mica, la porcelana, vidrio, cuarzo con o sin aglutinantes.

La confiabilidad y la operación segura por largo tiempo de los transformadores, está asegurada por los buenos criterios de diseño y la alta calidad de los materiales empleados.

A pesar de esto se puede lograr gran optimización, aumentar la rigidez dieléctrica, reducir el volumen global o cualquier otro logro adicional sin aumentar el volumen

de los transformadores. La reducción del volumen de la aislación global requiere la mayor comprensión de cómo interactúan ambas aislaciones, la líquida y la sólida.

La aislación líquida debe proveer el mayor esfuerzo dieléctrico llenando e impregnando completamente el volumen de la celulosa reforzando su rigidez dieléctrica, además de evacuar el calor generado internamente.

La aislación sólida es usada para construir sistemas de barreras subdividiendo los canales con campos elevados en varios espacios angostos “gaps”.

Esta mayor rigidez de campo eléctrico en el aceite, puede ser lograda si las barreras de “pressboard” están conforme al campo y se arman manteniendo relativa verticalidad a las líneas de fuerza eléctrica.

2.3.4.4 Medida de Temperatura

Se utilizan varios métodos para medir la temperatura en el transformador.

1. Método por termómetro.
2. Método por variación de resistencias de los bobinados.
3. Método por detectores internos de temperatura.

2.3.4.4.1 Método por termómetro.



FIG. 2.3.4.4.1.1 TERMOMETRO

Consiste en tomar la temperatura en el aceite refrigerante y sobre el núcleo y se utilizan dispositivos como el que se muestra en la fig. 2.3.4.4.1.1.

2.3.4.4.2 Método por variación de resistencias

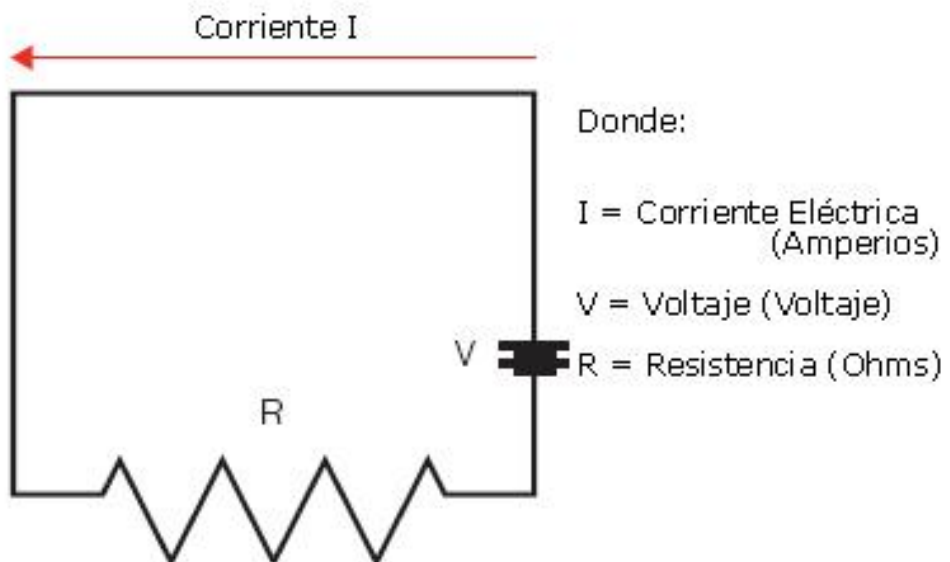


FIG. 2.3.4.4.2 VARIACIÓN DE RESISTENCIA

En la fig. 2.3.4.4.2 se muestra la medición de las resistencias en frío, y después de un tiempo estipulado de aproximadamente cuatro horas, una vez que el transformador está funcionando en régimen nominal, volver a medir las resistencias de los bobinados y calcular la variación de temperatura en función de la diferencia de resistencias de los mismos.

2.3.4.4.3 Método de detectores internos de temperatura.



FIG. 2.3.4.4.3 DETECTORES INTERNOS DE TEMPERATURA

Consiste en introducir, durante la construcción del transformador, unos sensores de temperatura conocidos como termo resistores, fig. 2.3.4.4.3 que actúan en forma de señal al detectar la temperatura que se les ha marcado.

El aislamiento del alambre esmaltado deberá soportar como mínimo dos veces la tensión espira a espira del diseño del arrollamiento a baja frecuencia y cumplirá los requisitos establecidos en la norma NTC 361.

2.3.5 Tanque

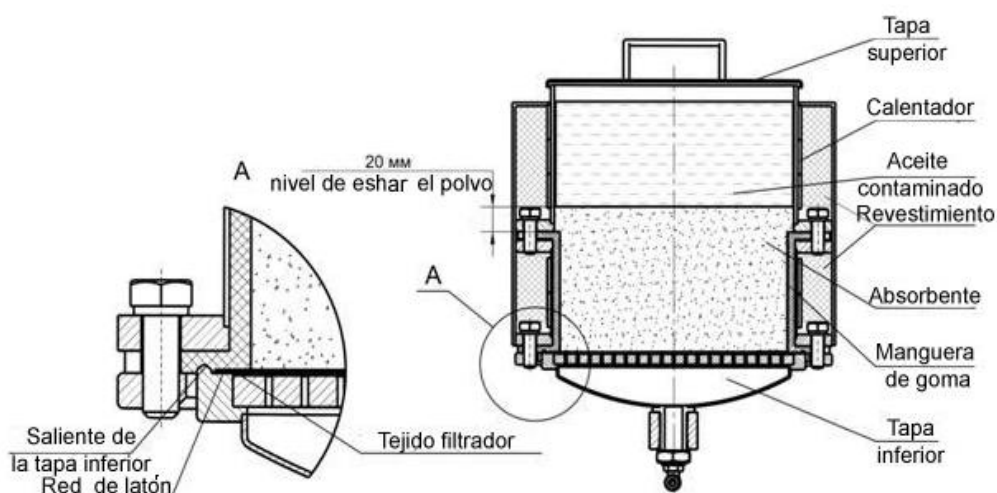


FIG. 2.3.5.1 TANQUE DEL TRANSFORMADOR

El tanque del transformador, fig. 2.3.5.1 debe estar diseñado de tal manera que cuando esté totalmente ensamblado, soporte sin deformación permanente, una presión 25% mayor que la presión máxima de operación que resulte del sistema de preservación del líquido aislante utilizado de acuerdo a las normas NMX-J-169-2004-ANCE y NMX-J-284-1998-ANCE.

El tanque de un transformador, generalmente hecho de acero, desempeña las siguientes funciones:

- Provee protección mecánica al conjunto (núcleo, bobinas).
- Protege el aceite o dieléctrico del aire, humedad y contaminación externa.
- Por medio de los radiadores permite que el transformador mantenga su temperatura normal para su correcto funcionamiento.
- Mantiene el líquido refrigerante/aislante.

El tanque y la tapa de los transformadores deberán ser de lámina de acero; la tapa deberá ir con tornillos o cinta metálica, provista de empaque, de acuerdo con la norma NTC 1490 y 1656. No se aceptan transformadores cuyas tapas estén soldadas al tanque. La lámina a utilizar en la construcción del tanque deberá ser de un espesor tal que esté en capacidad de soportar todos los esfuerzos mecánicos originados por el propio peso del transformador y los esfuerzos producidos por sobrepresiones internas debido a sobrecargas o cortocircuitos.

El diseño de la tapa del tanque debe ser tal que no permita el almacenamiento de agua encima de ella. Así mismo, las perforaciones que posee la tapa para asegurar los aisladores a la misma, deben tener un resalto circunferencial hacia arriba con el fin de evitar la acumulación de agua y por ende minimizar la entrada de humedad al transformador.

El tanque de los transformadores deberá ser capaz de soportar sin deformarse presiones que van desde -0.65 Kgf/cm² (vacío) a +0.65 kgf/cm² (sobrepresión) a nivel del mar.

Todas las uniones soldadas deberán presentar buena aleación y un excelente acabado superficial, libre de asperezas y poros. Estos puntos deberán poder soportar un esfuerzo mínimo igual al 150% del esfuerzo máximo que soporta el material de la lámina y cumplir con los procedimientos del código AWS.

Los cordones de soldadura y las partes principales deben ser unidos con materiales de la mejor calidad, y en donde sea necesario debe hacerse doble cordón de soldadura.

Cuando se utilicen refuerzos en el tanque se deberá soldar con cordones continuos, que eviten el estancamiento del agua.

En los tanques de forma rectangular o poligonal, la soldadura en las esquinas debe llegar hasta la parte superior, con el fin de evitar discontinuidades que permitan la entrada de humedad.

El diseño de los tanques debe ser tal que permita izar el transformador completo por medio de grúas y transportarlo por carretera, ferrocarril o barco, sin sobreesforzar las uniones que causen el subsecuente escape de aceite y deformaciones del tanque y la

tapa. El diseño del tanque de los transformadores debe tener una forma cóncava en la parte inferior o algo similar de tal manera que al colocar dicho tanque sobre una superficie plana, el fondo del mismo quede por encima del nivel de esa superficie.

2.3.5.1 Tipos de Tanque

En la actualidad podemos encontrar diferentes tipos de diseños de tanques para transformadores. Dentro de los existentes y más comunes en nuestro medio se encuentran los Tipo Acanalados, los Tipo Tanque Corrugado y los Tipo Sellado.

2.3.5.1.1 Tipo tanque acanalado



FIG. 2.3.5.1.1 TIPO TANQUE ACANALADO

En este tipo de diseño el espacio o colchón de aire a presión atmosférica que se forma sobre el aceite tiene salida a la atmósfera a través de una tubería de respiración. Dicha tubería es doblada hacia abajo y posee una pantalla en el extremo que da hacia el exterior del transformador, evitándose de esta manera el ingreso de la lluvia, insectos o roedores.

Este diseño de tanque, se muestra en la fig. 2.3.5.1.1 no posee un removedor de humedad en la tubería de respiración, por ende el transformador tendrá una fuente de humedad, oxígeno y contaminación por dicha tubería. Es recomendable que el propietario o responsable de un transformador de este tipo instale un removedor de humedad, (como la Sílica gel) en dicha tubería de manera que se reduzca el ingreso de humedad, oxígeno y contaminación al transformador.

2.3.5.1.2 Tipo Tanque corrugado



FIG. 2.3.5.1.2 TIPO TANQUE CORRUGADO

En la fig. 2.3.5.1.2 se muestra que en este diseño se coloca un tanque adicional al transformador, llamado tanque de expansión o tanque de conservación.

Este tanque adicional se encuentra localizado sobre el transformador de manera que el tanque principal estará lleno de aceite.

La expansión del aceite y el intercambio de aire con la atmósfera (respiración del transformador) ocurren lejos del total del aceite en el transformador ya que, solo una pequeña cantidad de aceite existe entre el tanque principal y el tanque conservador.

Por lo explicado anteriormente este diseño reduce el ingreso de oxígeno, humedad y contaminación al transformador, retardándose así el proceso de oxidación del aceite.

Existen transformadores de este tipo que llevan instalado en el interior del tanque conservador una especie de “vejiga” o “diafragma”.

Con este sistema se reduce en mayor medida el ingreso de humedad y oxígeno al transformador ya que dicha vejiga aísla al aceite de la atmósfera.

2.3.5.1.3 Tipo Sellado

Este tipo de tanque se lo muestra en la fig. 2.3.5.1.3 es similar al de respiración libre, con la adición de una válvula de alivio de presión/vacío, la cual está diseñada para mantener una presión interna de + o de -5 psi.



FIG. 2.3.5.1.3 TIPO TANQUE SELLADO

Además la tapa superior no es empernada, sino soldada, con lo cual se evita el uso de empaques.

Al instalarse el transformador se coloca a presión aire libre de humedad o nitrógeno, de manera que se forma un colchón de aire/gas sobre el aceite.

Cuando la presión interna del transformador excede los 5 psi el aire o el nitrógeno son expulsados a la atmósfera por la válvula de alivio.

Cuando el transformador se enfría el aceite se contrae, si la presión interna cae por debajo de la presión atmosférica exterior en 5 psi, la válvula de alivio permitirá el ingreso de humedad y oxígeno al tanque.

2.3.6 Derivaciones



FIG. 2.3.6.1 DERIVADORES

El cambio de derivación de los transformadores se hará por medio de un conmutador con un mínimo de 5 posiciones como se lo visualiza en la fig. 2.3.6.1

La operación del conmutador se deberá efectuar con el transformador desenergizado por medio de una perilla colocada en una parte externa del mismo, de tal manera que para efectuar la operación de conmutación el transformador no deberá destaparse ni deberá perder su hermeticidad.

En la perilla de accionamiento, placa indicadora o pared del tanque se deberá indicar claramente cada una de las respectivas posiciones de tensión.

Los conmutadores deberán ser contruidos para operación manual. El mecanismo propio de conmutación deberá colocarse internamente dentro del tanque del transformador y sumergido en el aceite.

El cambiador de derivaciones, deberá ser fabricado en material de alta resistencia mecánica que mantenga constante la presión en los contactos durante la vida útil del transformador.

Además soportará la elevación de la temperatura máxima admisible en la parte superior del aceite sin presentar deformaciones que puedan afectar la presión de los contactos.

La mayoría de los transformadores están equipados con un equipo Cambiador de Taps, el cual permite pequeños cambios en la relación de voltaje de la unidad. El devanado de alto voltaje es el que generalmente se construye con Taps.

Al pasar de un Tap al otro, este equipo provee de una manera de cambiar la relación de vueltas del transformador y con ello el nivel de voltaje del mismo.

Los cambios de TAP pueden ser hechos solo sí el transformador esta desenergizado o mientras la unidad esta con carga.

Dichos cambios pueden ser realizados de forma manual o de forma automática.

2.3.7 Pasa tapas (Bushings)



FIG. 2.3.7.1 PASA TAPAS (BUSHINGS)

La función de los pasa tapas en un transformador es de llevar o transportar los conductores de los devanados a través del tanque y hacia el exterior de una manera segura. Los pasa tapas están diseñados para:

- Soportar las tensiones de operación normal y anormal.
- Mantener la humedad fuera del transformador.
- Resistir los esfuerzos mecánicos debido al peso y tensión de los conductores conectados a ellos.

2.3.7.1 Pasa-tapas de entrada

Conectan el bobinado primario del transformador con la red eléctrica de entrada a la estación o subestación transformadora.

2.3.7.2 Pasa-tapas de salida

Conectan el bobinado secundario del transformador con la red eléctrica de salida a la estación o subestación transformadora.

Para cumplir con lo anterior existen diferentes tipos de pasa tapas, entre los que tenemos:

- Porcelana (hasta 25 KV)
- Porcelana-Aceite (25-69 KV)
- Porcelana-Compuesto epóxico
- Porcelana-Resina sintética (34.5-115KV)
- Porcelana-Papel impregnada de aceite (mayores a 275 KV)

La clase de pasa tapa a utilizar es dependiente del nivel de voltaje para el que es diseñado. Los pasa tapas son de forma cilíndrica, cubiertos con un esmalte especial para evitar la adherencia de humedad y contaminantes.

Están diseñados de tal manera que puedan aumentar la distancia de fuga (distancia entre el terminal del pasa tapa y su base acoplada al tanque) y así reducir la posibilidad de un arco debido a sobre voltajes.

2.3.8 Pararrayos



FIG. 2.3.8.1 PARARRAYOS

Las instalaciones donde se encuentran montados los transformadores (Subestaciones) están sujetas a sobre voltajes debidos a descargas atmosféricas, maniobras o a fallas en los circuitos del sistema al cual el transformador está conectado.

Los pararrayos son los principales medios para proteger no solo al transformador, sino a los demás equipos contra dichos sobre voltajes. Estos elementos de protección, están divididos en tres clasificaciones:

Tipo Subestación (684 KV), Intermedios (hasta 120 KV) y Tipo distribución (hasta 30 KV), siendo los de tipo subestación los más caros y los que prestan mayor protección.

El tipo de pararrayo más empleado es el Tipo Válvula.

La mayor protección posible contra sobre voltajes que un pararrayo puede ofrecer a un transformador se obtiene cuando:

- El máximo voltaje del pararrayo es igual o mayor al voltaje nominal línea a tierra del transformador.
- Las conexiones del pararrayo son hechas lo más cerca y directamente posible al transformador.
- Los pararrayos, tierras del tanque y neutro del secundario, si existiere, son conectados a un punto de tierra común.
- El valor de la resistencia a tierra del pararrayo es como máximo 5Ω y preferiblemente 1Ω .
- Se sigue las recomendaciones del fabricante.

2.3.9 Depósito de Expansión



FIG. 2.3.9.1 DEPOSITO DE EXPANSIÓN

Sirve de cámara de expansión del aceite, ante las variaciones de volumen que sufre ésta debido a la temperatura, se muestra en la fig. 2.3.9.1

2.3.10 Indicador del Nivel de Aceite



FIG. 2.3.10.1 INDICADOR DE NIVEL DE ACEITE

Visualicemos la fig. 2.3.10.1 que permite observar desde el exterior el nivel de aceite del transformador.

2.3.11 Relé Buchholz



FIG. 2.3.11.1 RELE BUCHHOLZ

Este relé de protección reacciona cuando ocurre una anomalía interna en el transformador, le envía una señal de apertura a los dispositivos de protección.

2.3.12 Desecador



FIG. 2.3.12.1 DESECADOR

Su misión es secar el aire que entra en el transformador como consecuencia de la disminución del nivel de aceite. Observemos la fig. 2.3.12.1.

En su operación y mantenimiento, equipos eléctricos como transformadores y reactores son muy fáciles de ser afectados por la humedad sobre todo en temporada de lluvias, que es muy peligroso para el equipo. El generador de aire seco ayuda a resolver este problema con eficacia alta soplando aire seco 0.02-0.03Mpa en el equipo. También puede ser utilizado para secar otros aparatos eléctricos antes de la inyección de aceite aislante. Puede servir como aire acondicionado para los talleres.

2.3.13 Termostato

Mide la temperatura interna del transformador y emite alarmas en caso de que esta no sea la normal.

2.3.14 Regulador de Tensión

Permite aplicar la tensión al transformador para adaptarla a las necesidades del consumo. Esta acción solo es posible si el bobinado secundario está preparado para ello.

Los reguladores de voltaje son esencialmente auto-transformadores con cambiadores de taps bajo carga. Éstos regulan los voltajes de las líneas de distribución desde un

aumento de un 10% hasta una disminución de un 10% en 32 pasos de aproximadamente un 5/8 %cada uno.

La clasificación de voltajes disponibles va desde 2400 volts (60 Kv BIL) hasta 34500 volts (200 kV BIL) para sistemas de 60 Hz y 50 Hz.

El potencial interno de los taps de la bobina y el transformador externo corrector del nivel de transformación son entregados para todos los niveles de voltajes, de modo que cada regulador puede ser usado en más de un sistema de voltaje.

Los reguladores de voltaje de menores potencias están provistos con soportes para montaje en postes y con plataformas para montaje en subestaciones. Los reguladores de mayor potencia pueden ser instalados para un montaje tipo subestación.

El voltaje se mantiene dentro de los límites deseados gracias a los controles que ofrecen mayor exactitud, confiabilidad y utilidad.

La continuidad del servicio es asegurada por cambiadores de taps y conjunto del núcleo-enrollado resistente, probado bajo condiciones de servicio, los cuales son ensamblados de modo que operen en forma directa con el controlador CL-6^a.

2.3.15 Placa de Características

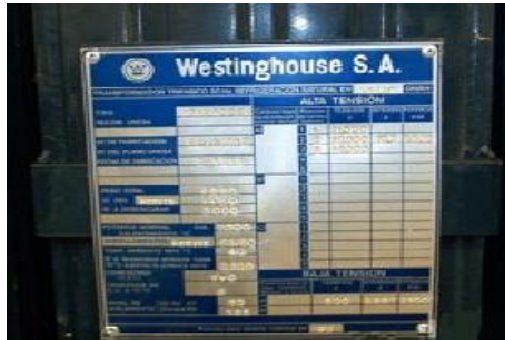


FIG. 2.3.15.1 PLACA DE CARACTERISTICA

En ella se recogen las características más importantes del transformador, para que se pueda disponer de ellas en caso de que fuera necesaria conocerlas. La placa de características fig.2.3.15.1 recoge todos los datos del transformador necesarios para que el usuario pueda realizar un uso adecuado de éste.

Según la norma UNE-EN 60076-1, cada transformador llevará una placa de características de material resistente a la intemperie, fijada en un lugar visible y que recoja las indicaciones enumeradas a continuación. Las inscripciones sobre la placa estarán marcadas de forma indeleble.

La información que debe aparecer en todos los casos es la siguiente:

- a. Tipo del transformador (por ejemplo, transformador, autotransformador, etc)
- b. Número de la norma.
- c. Nombre del fabricante.
- d. Número de serie del fabricante.
- e. Año de fabricación.
- f. Número de fases.
- g. Potencia asignada (en kVA o MVA).
- h. Frecuencia asignada (en HZ).
- i. Tensiones asignadas en (en V o kV) y extensión de tomas.
- j. Corrientes asignadas (en A o kA).
- k. Símbolo de acoplamiento.
- l. Impedancia de cortocircuito, valor medido expresado en tanto por ciento.
- m. Tipo de refrigeración.
- n. Masa total.
- o. Masa del aceite aislante.

Si el transformador tiene más de un régimen asignado, según las diferentes conexiones de los arrollamientos previstos en su construcción, los regímenes asignados complementarios se indicarán en la placa de características, o se colocarán placas de características separadas para cada régimen.

2.3.16 Grifo de Llenado

Permite introducir líquido refrigerante en la cuba del transformador.

2.3.17 Radiadores de Refrigeración



FIG. 2.3.17.1 RADIADORES DE REFRIGERACION

Los radiadores de refrigeración fig. 2.3.17.1 son aquellos encargados de disipar el calor que se pueda producir en las carcasas del transformador y evitar así que el aceite se caliente en exceso.

2.4 *REQUERIMIENTOS BÁSICOS QUE DEBE CUMPLIR UN TRANSFORMADOR TERMINADO*

- a. El transformador totalmente terminado fig. 2.4.1 debe cumplir con los valores de pruebas dieléctricas, del nivel de aislamiento, valores de prueba de impulso con onda completa, onda cortada y valores de prueba de baja frecuencia de acuerdo a las normas NMX-J-284-1998-ANCE y NMX-J-169-2004-ANCE.



FIG. 2.4.1 TRANSFORMADOR TERMINADO

- b. Para transformadores clase II, el valor máximo permisible de descargas parciales debe ser el medido de acuerdo a la norma ANSI/IEEE C57.113-1991 ó equivalente durante la prueba de tensión inducida de larga duración y debe

ser menor a 300 pC, registrado cada cinco minutos durante la hora que dura la aplicación de la tensión de prueba de 1,5 veces la tensión nominal máxima de fase a tierra, aplicada después de que se ha esforzado dieléctricamente el transformador durante 7 200 ciclos, con una tensión de realce de 1,732 veces la tensión máxima fase a tierra. Para transformadores clase I no aplica esta prueba.

- c. Se deben usar conexiones atornilladas en las boquillas de baja tensión. En las boquillas de alta tensión se pueden utilizar conexiones atornilladas del lado del líquido aislante y/o guías de cable pasado.

Todas las conexiones deben tener contratueras y seguros que garanticen la confiabilidad del apriete y la baja resistencia de contacto de la conexión durante la operación y vida esperada del transformador. Las conexiones (conectores y terminales) deben estar libres de puntas y filos que produzcan descargas parciales y/o efecto corona en el líquido aislante.

Los devanados y el núcleo completamente ensamblados deben secarse al vacío o mediante una combinación de vacío-temperatura u otro sistema debidamente probado, sin que se exceda la temperatura máxima del nivel de aislamiento especificada.

El fabricante debe incluir dentro de los reportes de pruebas, las curvas del proceso de secado (temperatura, vacío, extracción de agua por hora masa de aislamiento, factor de potencia de aislamiento, resistencia de aislamiento vs. tiempo).

El factor de potencia de los aislamientos de los devanados contra tierra y entre devanados corregidos a 293.15K (20 °C), debe ser menor de 0,5%.

2.5 *CICLO DE VIDA DE LOS TRANSFORMADORES*

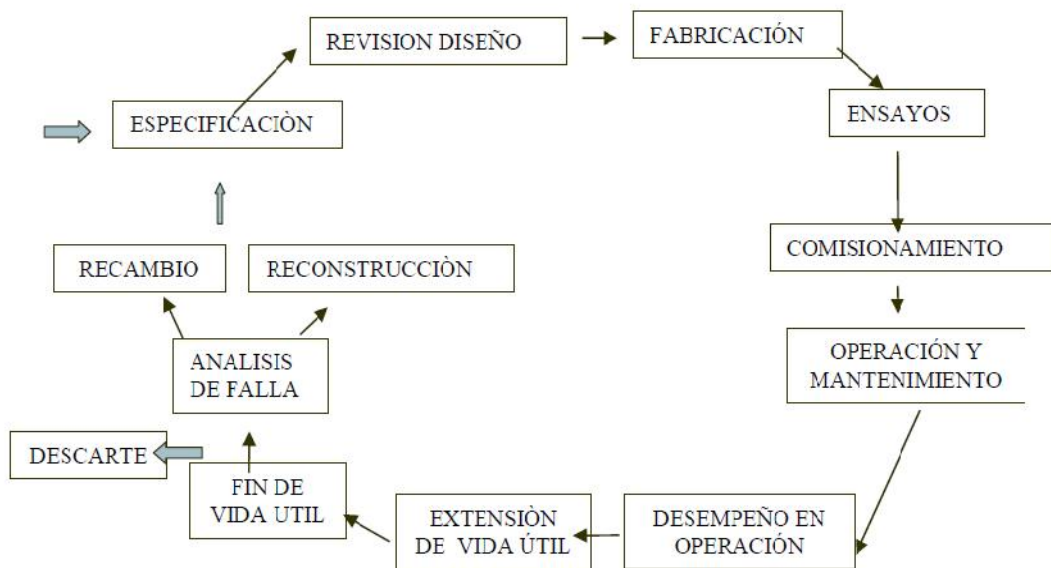


FIG. 2.5.1 CICLO DE VIDA DEL TRANSFORMADOR

2.5.1 Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas del transformador, son de gran importancia para el futuro desempeño de la unidad, en ellas, el operador debe especificar además de todas las exigencias del sistema eléctrico, las condiciones ambientales a las que someterá a la unidad durante la vida de la misma.

Además es conveniente el uso de la planilla de datos garantizados donde se especificaran todas las exigencias técnicas requeridas por el comprador de la unidad y también figurarán, aquellas que serán completadas por el fabricante.

2.5.2 Verificación del diseño

En ella se verifican todos los datos que se puedan auditar, tanto los ofrecidos como los garantizados en la planilla de oferta, como aquellos que permiten verificar los parámetros ofrecidos.

La verificación se realiza básicamente sobre los parámetros principales y consiste en los siguientes pasos fig. 2.5.2.1.1:

2.5.2.1 Puntos destacados en la revisión del diseño

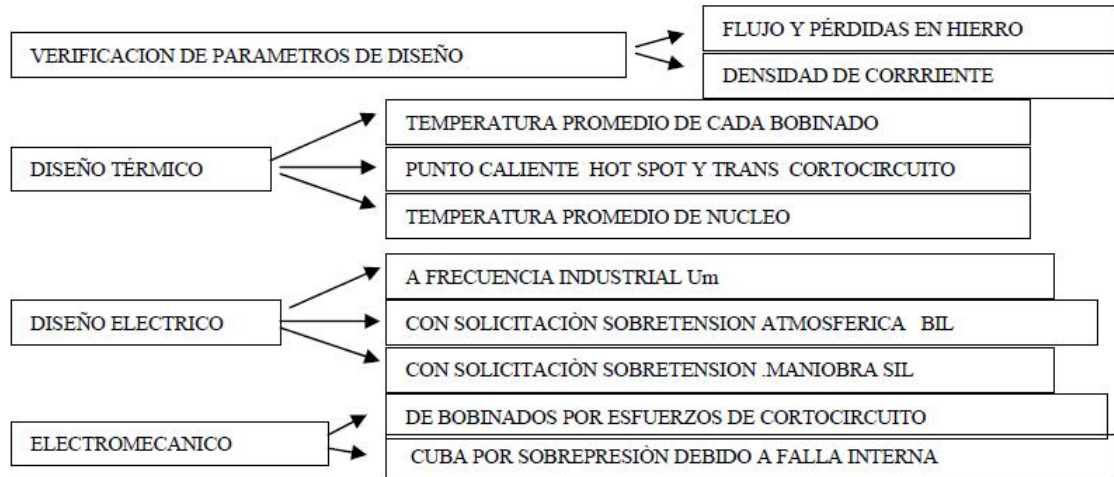


FIG. 2.5.2.1.1 PUNTOS DESTACADOS EN LA REVISIÓN DEL DISEÑO

2.5.3 Inspección del proceso de fabricación

Las instalaciones donde se fabrica la unidad, así como la pericia técnica de los operarios de la planta para ejecutar la manufactura del transformador, deben ser verificadas apropiadamente con el siguiente esquema fig. 2.5.3.1.



FIG. 2.5.3.1 INSPECCION DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

2.5.4 Ensayos y comisionamiento

Las unidades antes de salir de fábrica deben ser ensayadas convenientemente de acuerdo a la norma IEC60076, especialmente para verificar si el espécimen responde a las características técnicas pactadas en la compra, y también será un efectivo control, para cuando se realice el transporte y el montaje en sitio.

Los ensayos de comisionamiento, son en general, los que verifican el funcionamiento correcto y seguro de la máquina, sus accesorios y las protecciones, pero también muchas mediciones servirán como dato de partida para el historial al que el responsable de la explotación debe recurrir para evaluar cualquier cambio de valor que se aprecie fuera de lo normal.

2.5.5 El mantenimiento, control de la vida útil y Riesgo de falla

Existen una serie de ensayos, que por sus características pueden ser realizados tanto en laboratorio como en campo, y además, ser repetidos sin mayor costo; estos son importantes, dado que es el único método que se dispone para evaluar si el transformador aún es confiable, o si se detecta un aumento en el índice de falla, fig.

2.5.5.1 durante el servicio.

Curva doble exponencial invertida

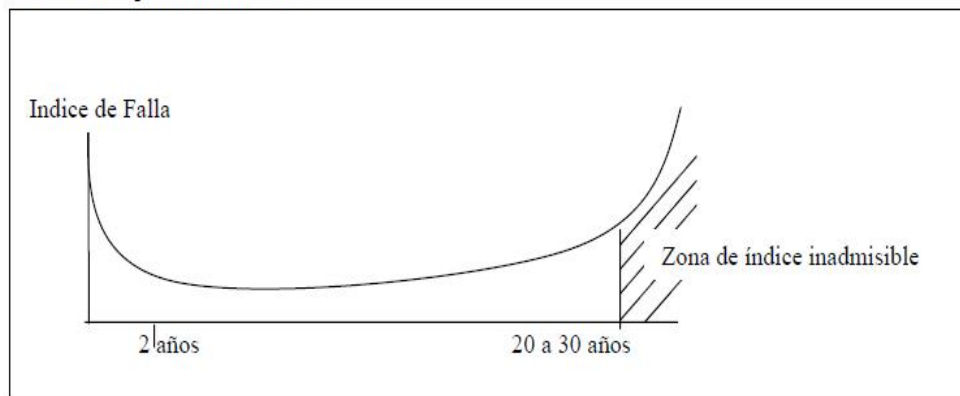


FIG. 2.5.5.1 MANTENIMIENTO CONTROL DE LA VIDA UTIL DEL TRANSFORMADOR

2.6 CONEXIONES

Dependiendo del propósito de la instalación, un transformador se puede conectar de distintas formas. Dos o más transformadores se pueden conectar en distintas formas para cumplir con distintos requerimientos.

2.6.1 Conexión delta -delta.

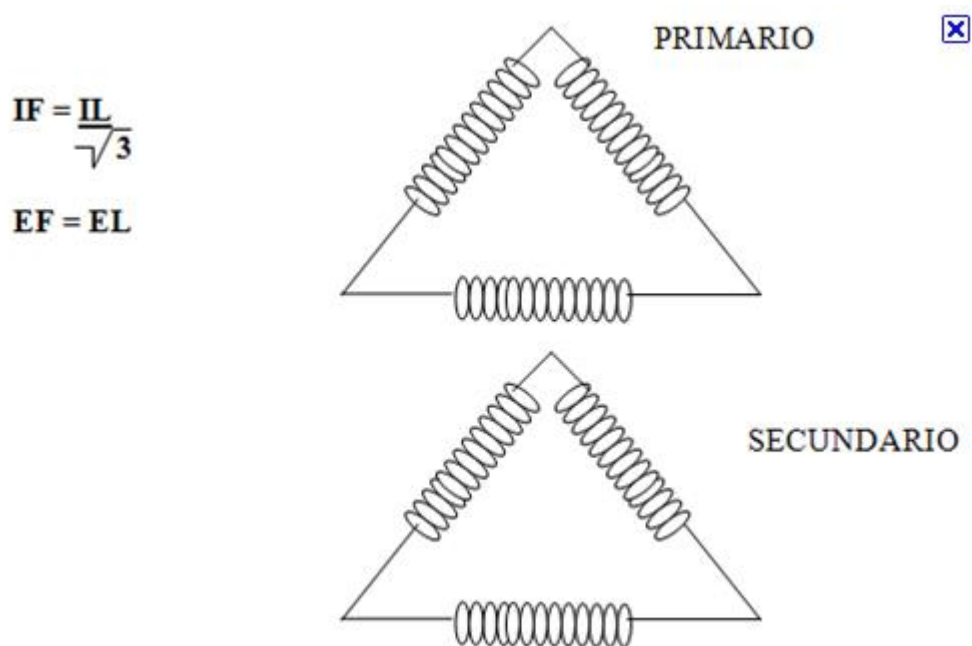


FIG. 2.6.1 CONEXIÓN DELTA - DELTA

Se utiliza esta conexión cuando se desean mínimas interferencias en el sistema. Además, si se tiene cargas desequilibradas, se compensa dicho equilibrio, ya que las corrientes de la carga se distribuyen uniformemente en cada uno de los devanados.

La conexión delta-delta fig. 2.6.1, de transformadores monofásicos se usa generalmente en sistemas cuyos voltajes no son muy elevados especialmente en aquellos en que se debe mantener la continuidad de unos sistemas. Esta conexión se emplea tanto para elevar la tensión como para reducirla.

En caso de falla o reparación de la conexión delta-delta se puede convertir en una conexión delta abierta-delta abierta.

2.6.2 *Conexión estrella-delta.*

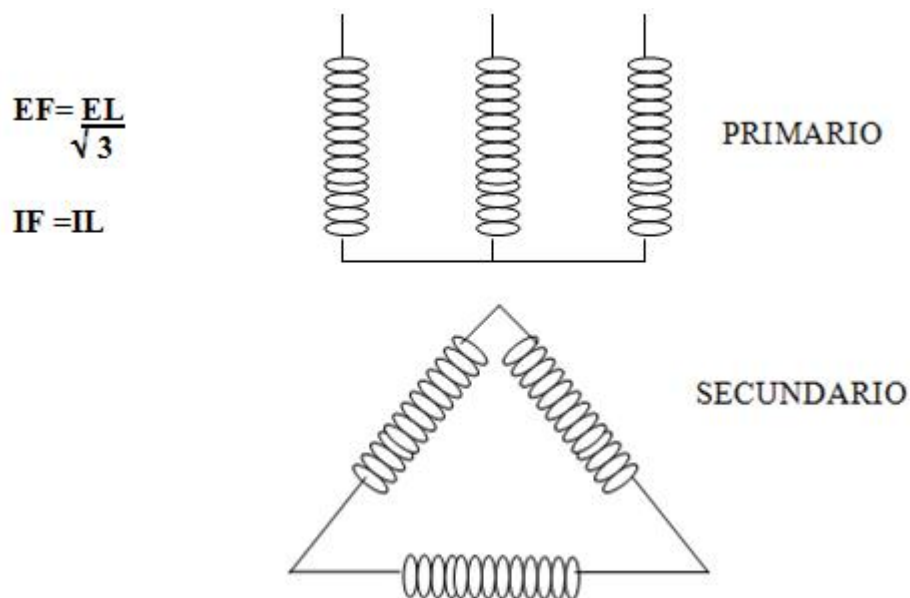


FIG. 2.6.2 CONEXIÓN ESTRELLA - DELTA

La conexión estrella-delta fig. 2.6.2, es contraria a la conexión delta-estrella; por ejemplo en sistema de potencia, la conexión delta-estrella se emplea para elevar voltajes y la conexión estrella-delta para reducirlos. En ambos casos, los devanados conectados en estrella se conectan al circuito de más alto voltaje, fundamentalmente por razones de aislamiento. En sistemas de distribución esta conexión es poco usual, salvo en algunas ocasiones para distribución a tres hilos.

2.6.3 Conexión estrella-estrella.

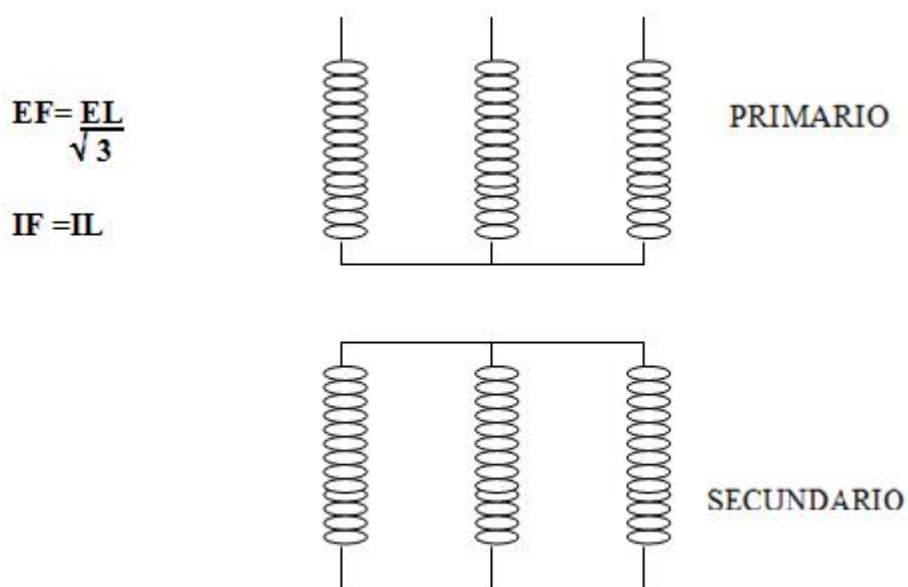


FIG. 2.6.3 CONEXIÓN ESTRELLA - ESTRELLA

Las corrientes en los devanados en estrella son iguales a las corrientes en la línea. Si las tensiones entre línea y neutro están equilibradas y son sinusoidales, el valor eficaz de las tensiones respecto al neutro es igual al producto de $1/\sqrt{3}$ por el valor eficaz de

las tensiones entre línea y línea y existe un desfase de 30° entre las tensiones de línea a línea y de línea a neutro más próxima.

Las tensiones entre línea y línea de los primarios y secundarios correspondientes en un banco estrella-estrella, están casi en concordancia de fase.

Por tanto, la conexión en estrella fig. 2.6.3, será particularmente adecuada para devanados de alta tensión, en los que el aislamiento es el problema principal, ya que para una tensión de línea determinada las tensiones de fase de la estrella sólo serían iguales al producto $1/\sqrt{3}$ por las tensiones en el triángulo.

2.6.4 Conexión delta-estrella.

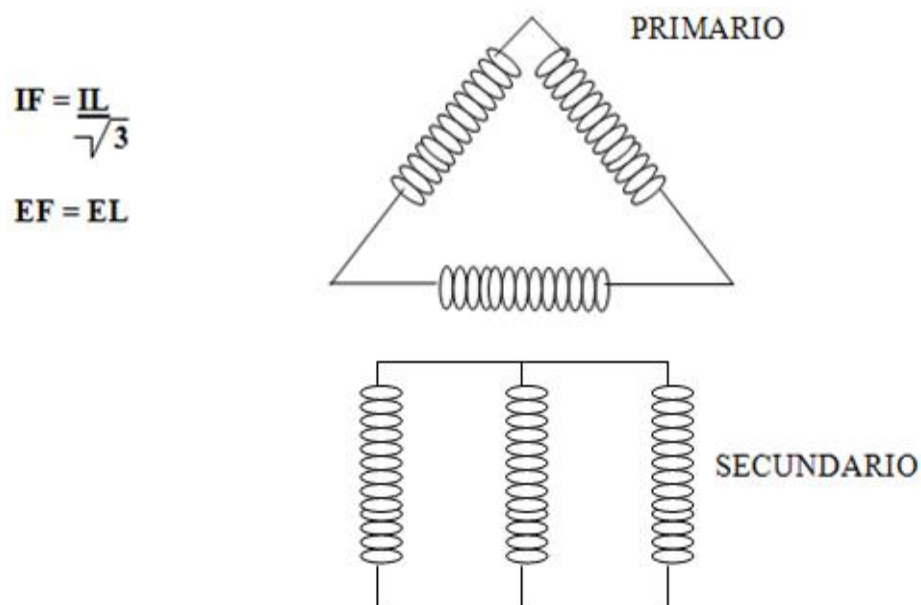


FIG. 2.6.4 CONEXIÓN DELTA - ESTRELLA

La conexión delta-estrella fig. 2.6.4, es una de las más empleadas, se utiliza en los sistemas de potencia para elevar voltajes de generación o de transmisión, en los sistemas de distribución (a 4 hilos) para alimentación de fuerza y alumbrado.

1. Qué importancia tiene la conexión a tierra de los neutros de transformadores trifásicos, en su comportamiento en vacío.

Su *importancia* radica en que por medio del neutro es posible la circulación de las corrientes armónicas y con esto se logra variar la distorsión de la señal de entrada. De existir esta distorsión, también se transmitirá al secundario y por ende, a las cargas conectadas a él.

2. Qué efecto produce un terciario en una conexión Delta, en transformadores trifásicos funcionando en vacío.

El diseño de los devanados terciarios está determinado por las conexiones del sistema y los resultados que se espera obtener del triángulo de terciarios.

Por ejemplo, si están aislados los neutros de los primarios y los secundarios y el triángulo de terciarios no alimenta a carga alguna, las únicas corrientes que pueden circular por los devanados terciarios son los terceros armónicos o corrientes de excitación de secuencia cero y en consecuencia, los devanados pueden ser

relativamente finos. Sin embargo, el neutro de la estrella de alta tensión suele estar puesto a tierra, y a veces lo están ambos neutros. En estas condiciones las averías de puesta a tierra de las líneas de alta tensión pueden inducir corrientes muy intensas en el terciario y éstos deberán poder soportar el calentamiento y las fuerzas mecánicas ocasionadas por ellas.

A menudo, el triángulo de terciarios alimenta una carga.

Por ejemplo circuitos auxiliares de una subcentral, o condensadores estáticos para regulación del factor de potencia y de la tensión. En estas condiciones el triángulo de terciarios debe soportar los efectos de cortocircuitos entre sus propios terminales.

2.7 EMPAQUES

Todos los empaques para boquillas, registros de hombre, registros de mano, radiadores, válvulas y demás accesorios deben ser de material elastomérico, de una sola pieza compatibles con el líquido aislante. Deben estar indicados claramente en una lista de partes que debe ser incluida en el instructivo e identificados con número de partes, indicando la posición y el material de que están fabricados. Los empaques deben ser instalados en ranuras maquinadas para satisfacer las condiciones de operación y ambientales durante la vida esperada del transformador.

El fabricante debe diseñar para garantizar la hermeticidad (cero fugas a través de empaques) del transformador al menos por 15 años sin necesidad de cambiar algún empaque.

CAPITULO III

3 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA

3.1 INTRODUCCIÓN

El cálculo de las pérdidas en los transformadores ha sido siempre un tema de interés en el sector industrial, más que nada para quienes tienen a su cargo el diseño de estas máquinas y para quienes los operan cuando estos realizan su función, con el fin de obtener de ellos siempre la mayor eficiencia en el momento de su funcionamiento bajo determinadas condiciones.

El uso de fórmulas empíricas en el desarrollo de proyectos o en algún cálculo de ingeniería, siempre produce algún tipo de inseguridad en el resultado por parte de quien lo interpreta.

Hoy en día gran parte de los proyectistas estiman sus datos con el uso de programas simuladores, olvidándose muchas veces del origen de las fórmulas reales o aproximadas que producen esos resultados.

Para realizar el contraste de estas fórmulas con cálculos teóricos se usará un software con el fin de verificar que los datos teóricos son los mismos o muy aproximados a los obtenidos con el software, es decir verificar que el software entrega valores muy aproximados a los esperados, generando la confianza necesaria al usuario en futuros cálculos con la aplicación del software.

3.2 PÉRDIDAS QUE SE PRODUCEN EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Las pérdidas en un transformador comprenden un pequeño porcentaje de la potencia total que transmite. Sin embargo pueden provocar calentamiento localizados en zonas donde pueden comprometer el buen funcionamiento de la máquina. Es muy importante calcular estas pérdidas con tanta precisión como sea posible para poder proveer al transformador de la refrigeración adecuada. Esos cálculos y los parámetros de los que dependen pueden sugerir maneras de reducir estas pérdidas todo lo que nos lo permita el diseño y por supuesto, teniendo en cuenta los costes adicionales que puedan suponer dicha reducción. En la actualidad existen métodos de cálculo como los elementos finitos que permiten calcular las pérdidas parásitas totales con muy buena precisión incluso en geometrías complejas.

En los transformadores se representan pérdidas de potencia de varias clases, entre las que tenemos.

3.2.1 Pérdidas en el núcleo

Las pérdidas en el hierro se obtienen mediante el ensayo de vacío del transformador, en dicho ensayo el primario se energiza a la tensión nominal mientras que el secundario se deja en circuito abierto o viceversa. Con esto se consigue que todo el flujo circule por el núcleo y que solo circule por los arrollamientos la corriente de excitación necesaria (corriente de vacío). Para reducir la pérdida de energía, y la consiguiente pérdida de potencia, es necesario que los núcleos que están bajo un flujo variable, no sean macizos; deberán estar contruidos con chapas magnéticas de espesores mínimos, apiladas y aisladas entre sí.

La corriente eléctrica, al no poder circular de unas chapas a otras, tiene que hacerlo independientemente en cada una de ellas, con lo que se induce menos corriente y disminuye la potencia perdida por corrientes de Foucault. En la fig. 3.2.1.1 podemos observar cómo circula la corriente por ambos núcleos magnéticos.

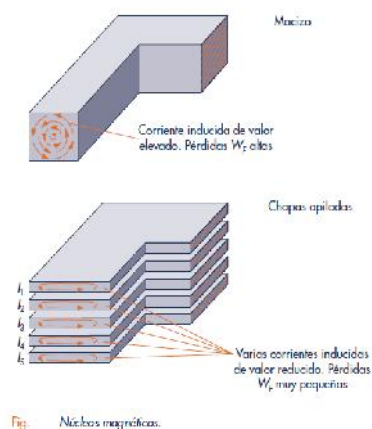


FIG. 3.2.1.1 PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO

Existen dos tipos de pérdidas en el hierro:

- Pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault.
- Pérdidas por histéresis

3.2.1.1 Las pérdidas por corrientes parásitas

El núcleo en los transformadores de potencia, está formado por láminas de acero, el grosor de estas láminas varía en un rango de 0,23 – 0,46 mm y se apilan, hasta llegar a una anchura de aproximadamente un metro, en el taller de laminación.

El acero utilizado para este fin lleva un contenido de silicio en torno al 3% para aumentar la resistividad, un mayor contenido en silicio aumentaría la fragilidad del acero lo que sería perjudicial a la hora de manipularlo.

Utilizando ciertas aleaciones especiales, procesos de laminado y ciclos de templado adecuados, se consigue una mejor orientación de los granos que conforman el acero, mejorando las propiedades magnéticas del material como conseguir una mayor permeabilidad en la dirección de laminado.

Las corrientes de Foucault se producen en cualquier material conductor cuando se encuentra sometido a una variación del flujo magnético.

Como los materiales magnéticos son buenos conductores eléctricos, en los núcleos magnéticos de los transformadores se genera una fuerza electromotriz inducida que origina corriente de circulación en los mismos, lo que da lugar a pérdidas de energía por efecto Joule.

Las pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault dependerán del material del que esté constituido el núcleo magnético.

La tabla 3 indica las características de construcción, los valores magnéticos y la composición química para la determinación de las pérdidas de potencia en el hierro en función del espesor, la aleación y la inducción.

Si el núcleo fuese de acero macizo, las corrientes de Foucault producidas originarían pérdidas intolerables.

Por este motivo los núcleos de los transformadores se construyen en láminas delgadas de acero, al silicio que ofrece gran resistencia a las corrientes parásitas, inducidas en el núcleo.

Las laminaciones son destempladas en un horno eléctrico y son recubiertas por una delgada capa de barniz que aumenta la resistencia a las corrientes parásitas.

3.2.1.1.1 Cálculo para medir las pérdidas en el núcleo por las Corrientes de Foucault.

Para el cálculo de las pérdidas en el hierro por las corrientes de Foucault se recurrirá a la fórmula dada a continuación, que indica que las pérdidas en el hierro son proporcionales al cuadrado de la inducción y al cuadrado de la frecuencia.

Fórmula

$$P_f = \frac{2.2 * f^2 * \beta_{max}^2 * \Delta^2}{10^{11}}$$

Donde:

P_f = pérdidas por corrientes de Foucault en W/kg

f = frecuencia en Hz

β_{max} = inducción máxima en Gauss

Δ = espesor de la chapa magnética en mm

De esta fórmula se deduce que el cambio de frecuencia de 50 a 60 Hz, por ejemplo hacen que aumenten las pérdidas en el transformador.

3.2.1.2 Las pérdidas por histéresis

La histéresis magnética es el fenómeno que se produce cuando la imantación de los materiales ferro magnéticos no sólo dependen del valor del flujo, sino también de los estados magnéticos anteriores.

En el caso de los transformadores, al someter el material magnético a un flujo variable se produce una imantación que se mantiene al cesar el flujo variable, lo que provoca una pérdida de energía que se justifica en forma de calor.

Debido a que el flujo magnético se invierte repetidas veces por segundo según la frecuencia, se producen pérdidas de potencia debido a la fricción de millones de moléculas que cambian de orientación varias veces, lo que puede apreciarse en la fig. 3.2.1.2.1.

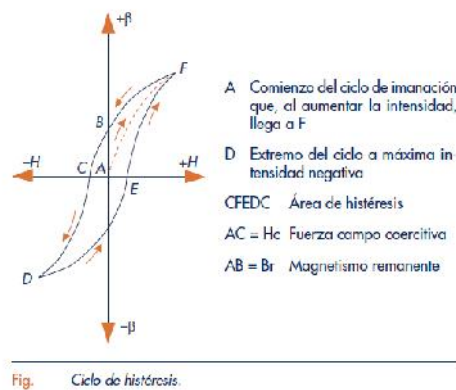


FIG. 3.2.1.2.1 LAS PÉRDIDAS POR HISTERESIS

La potencia perdida por histéresis depende esencialmente del tipo de material; también puede depender de la frecuencia, pero como la frecuencia en una misma

zona o país siempre es la misma, la inducción magnética dependerá del tipo de chapa.

3.2.1.2.1 Cálculo para medir las pérdidas por histéresis

A través de la fórmula de Steinmetz se determinarán las pérdidas por histéresis.

El coeficiente de chapa oscila entre 0,0015 y 0,003, aunque baja hasta 0,007 en hierro de muy buena calidad, esto se lo representa en la fig. 3.2.1.2.1.1

Fórmula

$$P_H = K_h * f * \beta^{n_{max}}$$

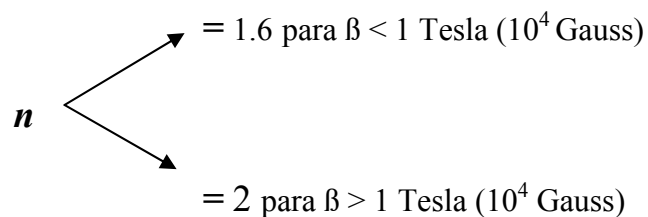
Donde:

K_h = coeficiente de cada material

f = frecuencia en Hz

β_{max} = inducción máxima en Tesla

P_H = pérdida por histéresis en W /kg

n  $= 1.6$ para $\beta < 1$ Tesla (10^4 Gauss)
 $= 2$ para $\beta > 1$ Tesla (10^4 Gauss)

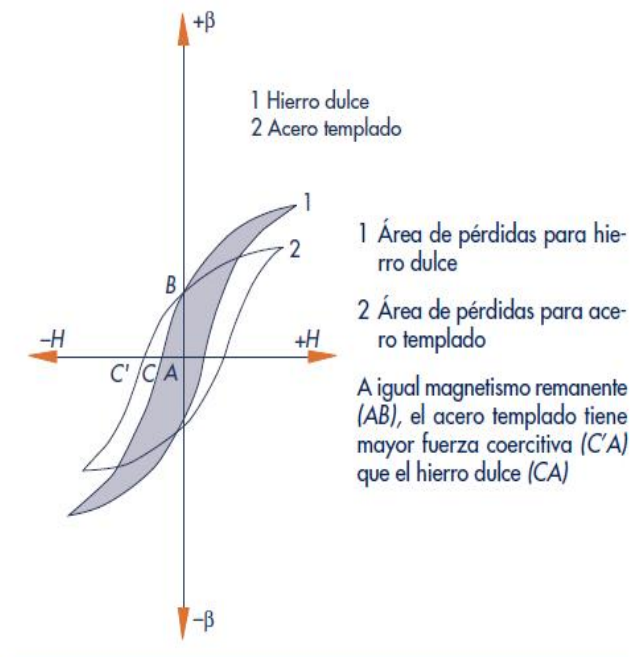


Fig. Ciclo de histéresis de dos materiales diferentes.

FIG. 3.2.1.2.1.1 CALCULO PARA MEDIR LAS PÉRDIDAS POR HISTERESIS

3.2.1.3 Método para medir las pérdidas en el núcleo de un transformador

Las pérdidas de potencia, en vatios, en el núcleo de un transformador se pueden determinar fácilmente, leyendo la entrada en vatios por medio de un vatímetro cuando el secundario ha quedado abierto (fig. 3.2.1.3.1).

También se podría calcular la potencia por medio de un voltímetro y un amperímetro.

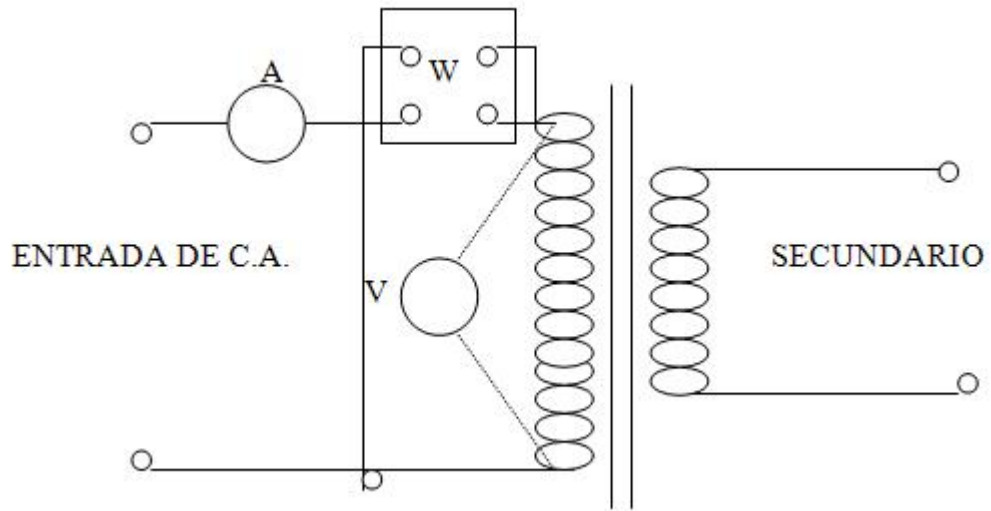


FIG. 3.2.1.3.1 METODO PARA MEDIR LAS PÉRDIDAS EN EL NUCLEO

La lectura del vatímetro se considera como pérdidas en el núcleo, debido a que la corriente de excitación es muy baja.

Las pérdidas sin carga, en el núcleo del transformador, son pequeñas y, por lo tanto, deben comprobarse los errores de los instrumentos.

Es conveniente controlar la tensión aplicada al bobinado del transformador, por ejemplo usando un autotransformador variando la tensión desde cero hasta el valor de la tensión nominal.

3.2.2 Pérdidas en el cobre

Las pérdidas en el cobre o en los bobinados del transformador, se deben a la disipación de calor que se producen en los devanados. Estas pérdidas son proporcionales a las resistencias de cada bobinado, y a través de la corriente que circula en ellos.

Pérdidas en el devanado primario = $I_1^2 R_1$ vatios

I_1 corriente en el devanado primario

R_1 resistencia efectiva del devanado primario

Pérdidas en el devanado secundario = $I_2^2 R_2$ vatios

I_2 y R_2 corriente y resistencia efectiva del devanado secundario.

Las pérdidas totales en el cobre serán entonces:

$P_T = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$ vatios.

3.2.2.1 Método para determinar las pérdidas en el cobre

En la fig. 3.2.2.1.1 se muestra como se aplica a cada devanado un voltaje de corriente continua de valor bajo, por ejemplo 120 Voltios, se mide la corriente y el voltaje del devanado en cuestión, se aplica la ley de Ohm y se obtiene la resistencia efectiva en corriente continua (C.C), se multiplica por 1.1 para obtener la resistencia efectiva a la corriente alterna (C.A).

El grupo de resistencias se utiliza para limitar la corriente en los devanados a n valor seguro.

El voltímetro se debe desconectar antes de cortar la corriente en los circuitos, por que los devanados tienen mucha autoinducción y se puede dañar el instrumento.

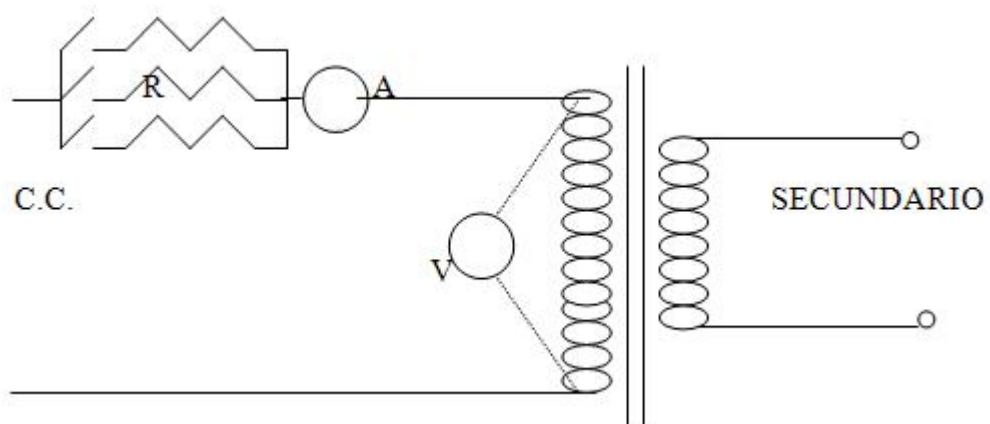


FIG 3.2.2.1.1 METODO PARA DETERMINAR LAS PÉRDIDAS EN EL COBRE

a. Pérdidas en el cobre por transformador (con factor de carga)

Las pérdidas en el cobre por transformador (kWh) con factor de carga se calculan multiplicando 8760 h (en el año) por pérdida en el P_o (Kw) por el factor de carga.

b. Pérdida anual por antigüedad por transformador (con factor de carga)

Son calculadas como pérdidas adicionales por antigüedad P_o (%) por pérdida anual en el núcleo por transformador (kWh), más pérdidas adicionales por antigüedad P_{cu} (%) por pérdidas en el cobre por transformador con factor de antigüedad (kWh).

c. Pérdida anual total por transformador (con factor de carga)

Es la suma de pérdida anual en el núcleo por transformador (kWh), más pérdidas en el cobre por transformador con factor de carga (kWh), más pérdida anual por antigüedad por transformador con factor de carga (kWh).

d. Pérdidas anuales totales por cantidad de transformadores (con factor de carga)

Se trata de la multiplicación de pérdida anual total por transformador con factor de carga (kWh) por la cantidad de transformadores.

e. Pérdidas en el cobre por transformador (con factor eficaz)

Se calcula las pérdidas en el cobre por transformador (kWh) con factor eficaz, como 8760 h (en el año) por pérdida en el P_o (Kw) por el factor eficaz.

f. Pérdida anual por antigüedad por transformador (con factor eficaz)

Se calculan como pérdidas adicionales por antigüedad P_o (%) por pérdida anual en el núcleo por transformador (kWh), más pérdidas adicionales por antigüedad P_{cu} (%) por pérdidas en el cobre por transformador con factor eficaz (kWh).

g. Pérdida anual total por transformador (con factor eficaz)

Es la suma de la pérdida anual en el núcleo por transformador (kWh), más pérdidas en el cobre por transformador con factor eficaz (kWh), más pérdida anual por antigüedad por transformador con factor eficaz (kWh).

h. Pérdidas anuales totales por cantidad de transformadores (con factor eficaz)

Se trata de la multiplicación de pérdida anual total por transformador con factor eficaz (kWh) por la cantidad de transformadores.

3.2.3 Escape de flujo disperso

Todo el flujo producido por el primario no atraviesa el secundario, sino que completa en parte su circuito magnético, pasando a través del aire que por el núcleo.

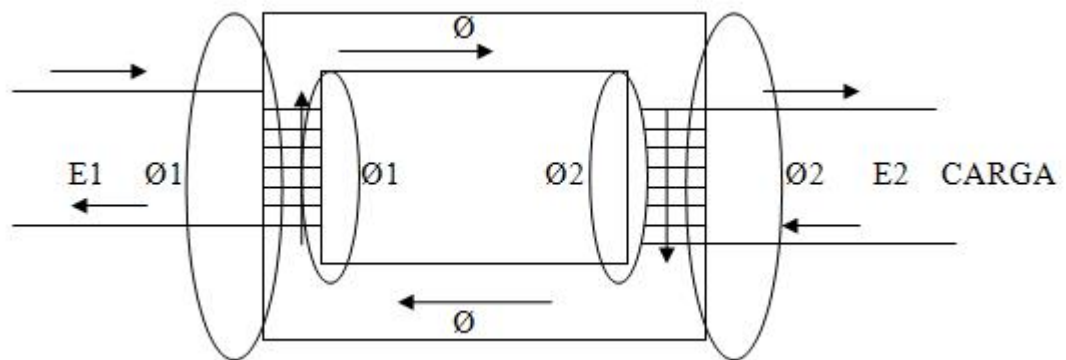


FIG. 3.2.3.1 ESCAPE DE FLUJO DISPERSO

La fig. 3.2.3.1 muestra la forma en que Φ_1 induce una fuerza electromotriz (F.E.M) en el primario, la cual es una fuerza electromotriz que tiende a impedir el flujo de corriente en el primario, que es proporcional a la corriente y a la frecuencia, y se retrasa de la corriente en 90°.

Por esto, una F.E.M de reactancia que produce una caída de reactancia $I_1 X_1$ en el primario. X_1 se denomina reactancia de pérdidas del primario. Fácilmente se ve que una parte de la tensión fija del primario se utiliza para suplir esta caída de reactancia, lo que a su vez reduce la F.C.E.M., y por consiguiente el flujo y, ello produce una disminución en la F.E.M inducida en el secundario.

CAPITULO IV

4 CÁLCULO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

4.1 INTRODUCCIÓN

El cálculo o diseño de transformadores se puede decir que es un aspecto suficientemente tratado, en el que intervienen algunas variantes dependiendo del tipo de transformador y de los materiales empleados. En la actualidad los fabricantes de transformadores a gran escala, disponen por lo general de programas de computadora y de laboratorio apropiados para diseño prueba y desarrollo.

No obstante, los conceptos básicos del cálculo de transformadores deben ser conocidos por las personas relacionadas con las máquinas eléctricas, ya que esto no solo permite una mejor comprensión de su funcionamiento, sino también que se esté en posibilidad de entender mejor las posibles fallas que tienen y su reparación.

4.2 ANALISIS ELÉCTRICO Y ENUNCIADO DE LAS ESPECIFICACIONES

Las especificaciones técnicas del transformador, son de gran importancia para el futuro desempeño de la unidad, en ellas, el operador debe especificar además de todas las exigencias del sistema eléctrico, las condiciones ambientales a las que someterá a la unidad durante la vida de la misma.

Además es conveniente el uso de la planilla de datos garantizados donde se explicitarán todas las exigencias técnicas requeridas por el comprador de la unidad y también figurarán, aquellas que serán completadas por el fabricante.

En la construcción de los transformadores deben especificarse los bobinados tanto en el PRIMARIO como en el SECUNDARIO. Además se tendrá en cuenta el tipo de tensión que se requerirá.

Los puntos que indican el comienzo de los bobinados es necesario tenerlos muy en cuenta, para permitir que las tensiones inducidas en el bobinado de dos ramas (punto medio) se encuentren en fase y sumen sus efectos, de tal forma de obtener entre los extremos de las ramas un total normalizado.

También se considerará la topología.

4.3 DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA NECESARIA

La potencia del transformador depende de la carga conectada a la misma. Esta potencia está dada por el producto de la tensión secundaria y la corriente secundaria.

Es decir:

$$\text{Potencia útil} = \text{tensión secundaria} * \text{corriente secundaria}$$

4.3.2 Potencia del Secundario

La potencia del secundario, viene dada por la suma de las potencias que debe entregar cada arrollamiento.

$$W_{\text{sec}} = W_{\text{sec1}} + W_{\text{sec2}} + W_{\text{sec3}} + \dots + W_{\text{secn}}$$

En donde:

$W_{\text{sec}} =$	Potencia eléctrica total eficaz del secundario	Wats
$W_{\text{seci}} =$	Potencia eficaz de cada secundario $i = 1, 2, 3, \dots, n$	Wats

4.3.3 *Potencia de Primario y Total*

Debido esencialmente a las pérdidas en el hierro, experimentalmente se sabe que la potencia del primario (igual a la potencia total) es aproximadamente superior a la del secundario en un 20%. Vale por ello la siguiente fórmula:

$$W_{pri} = 1,2 \cdot W_{sec}$$

El valor del 20% aplicado, corresponde al valor más frecuente de pérdidas en el hierro. Luego de construido el transformador se puede aproximar mejor este valor, según la calidad de los materiales empleados en su construcción.

4.4 *CÁLCULOS EN EL HIERRO*

Para el diseño del núcleo magnético se debe tener en cuenta que un incremento en el diámetro aumenta el área de la sección transversal del núcleo, con lo que se incrementa la tensión por espira y se reduce el número de vueltas de los arrollamientos.

La reactancia de cortocircuito porcentual entre arrollamientos es directamente proporcional al número de vueltas y a los diámetros de los diferentes arrollamientos y es inversamente proporcional a la tensión por espira y a la altura de las bobinas. Por lo tanto si se produce un incremento en el diámetro del núcleo es necesario reducir la altura de los arrollamientos e incrementar las dimensiones en dirección

radial, es decir se debe reducir la altura del núcleo e incrementar el diámetro de las bobinas.

Reducir la altura del núcleo e incrementar su diámetro se traduce en un aumento de peso del núcleo, más acero, con lo que se incrementan las pérdidas en vacío del transformador. Por otro lado, reducir el número de vueltas en los devanados significa utilizar menos cobre y reducir las pérdidas en carga del transformador.

De la misma manera reducir el diámetro del núcleo se traduce en una reducción en la cantidad de acero y por lo tanto menos pérdidas en vacío pero a su vez aumenta la cantidad de cobre y las pérdidas en carga.

Lo esencial de este cálculo, pasa por considerar las dimensiones críticas del núcleo de hierro.

El diseño del núcleo magnético comienza eligiendo:

- El valor de la tensión por espira.
- El valor de la inducción.

4.4.1 Cálculo de la Sección del Núcleo

La sección del núcleo del transformador está determinada por una constante (k) por la raíz de la potencia de la columna del transformador, por la frecuencia.

La fórmula de la sección transversal del núcleo se la determina mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Sección} = 0,0722 * \sqrt{f} * P_{\text{columna}}$$

Donde:

S: es la sección transversal del núcleo en cm².

P_{columna}: es la potencia de la columna en Watts.

f: frecuencia en Hz.

K: Constante = 0,125/1,73

K = 0,7 para chapas magnéticas de buenas calidad y en
Perfecto estado

K = 1 para chapas magnéticas de mala calidad y en
Perfecto estado

La sección transversal del núcleo también está dada por el producto de los lados “A * B”:

$$S = A * B$$

Donde:

A: es el ancho de la columna en cm.

B: es acopilamiento de las láminas en cm.

También podemos determinar A: ancho de la columna mediante la raíz de la sección transversal del núcleo

$$A = \sqrt{S}$$

Donde:

A: es el ancho de la columna en cm.

S: es la sección transversal del núcleo en cm².

Una vez determinados estos parámetros puede determinarse el acopilamiento de las láminas en cm que es igual a B

Para determinar la cantidad de láminas que se necesita para formar el lado B de la Columna debe tomarse en cuenta la siguiente fórmula:

$$N^{\circ} LC = B/ESP$$

Donde:

Nº LC: es el número de láminas por columna

B: es acopilamiento de las láminas en cm.

ESP: es el espesor de cada lámina en mm.

La sección geométrica o neta de la sección transversal del núcleo, es decir lo que se debe medir en la realidad teniendo en cuenta un factor de acopilamiento de láminas (Chapas barnizadas) de 0,9 se la determinará con la siguiente fórmula:

$$SR_n = S/FA$$

Donde:

SN: es la sección real o neta de la sección transversal del núcleo cm².

S: es la sección transversal del núcleo cm².

FA: factor de acopilamiento de las laminas.= 0,9

4.4.2 Determinación del número de Carrete

Para una fabricación en serie, nada mejor que aplicar, para los arrollamientos los carretes de tamaño normalizado. Alternativamente pueden construirse con cartón prespan.

Es conveniente obtener de algún proveedor una tabla de carretes con la finalidad de poder comprarlo después de haber realizado los cálculos.

4.5 CALCULOS EN EL COBRE

4.5.1 Relación de Transformación.

La relación existente entre el número de espiras del primario y del secundario de un transformador fig. 4.5.1.1, determinará el valor de la f.e.m. inducida sobre su circuito secundario. Un transformador que posea en su secundario mayor número de espiras que las del primario, inducirá sobre aquel una tensión mayor que la aplicada. A la inversa, un secundario con menor número de espiras que las del primario generará una tensión menor que la del primario.

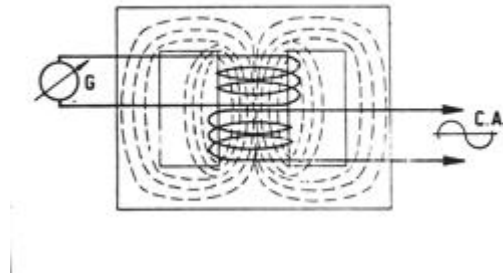


FIG. 4.5.1.1 RELACION DE TRANSFORMACIÓN

La relación que existe entre la tensión del primario (E_p) y la tensión del secundario (E_s) es igual a la relación entre el número de espiras del primario (N_p) y el número de espiras del secundario (N_s).

En consecuencia, puede decirse que:

$$V_1/V_2 = N_{EP1}/N_{EP2}$$

y efectuando trasposición de términos, tenemos:

$$V_1/V_2 = V_1 * N_{EP2}/N_{EP1}$$

Fórmula de la cual se deduce que la tensión inducida en el secundario es proporcional a la relación del número de vueltas del secundario con respecto a las del

primario. Por tanto, a la relación entre vueltas o entre tensiones del primario y secundario se la denomina relación de transformación.

En los sistemas trifásicos las tensiones están desplazadas 120 grados eléctricos, además la relación de transformadores (m)

$$m = V_1/V_2 = V_1 \cdot N_{EP2}/N_{EP1}$$

Donde:

V1: es la tensión del primario

V2: es la tensión del secundario

N_{EP1}: es la relación de vueltas en el primario

N_{EP2}: es la relación de vueltas en el secundario

M: relación de transformadores

La densidad de corriente eléctrica se define como una magnitud vectorial que tiene unidades de corriente eléctrica por unidad de superficie, si la densidad de corriente máxima en los conductores es de 3,5 A/mm²

$$3,5 \text{ A} \text{ -----} \rightarrow 1 \text{ mm}^2$$

$$X \text{ A} \text{ -----} \rightarrow X$$

$$X = \text{mm}^2$$

$$\text{mm}^2 = \pi \cdot D^2 / 4$$

$$D = \sqrt{4 \cdot \text{mm}^2 / \pi}$$

Para determinar el número de vueltas del bobinado secundario se lo obtiene utilizando el voltaje primario del transformador multiplicado * 100 dividido para la frecuencia * Inducción magnética * sección del núcleo, lo que se representa con la siguiente fórmula:

$$N_{EP2} = V_2 \cdot 100 / 4.44 \cdot F \cdot B \cdot S$$

Debe utilizarse la inducción magnética apropiada para este tipo de Transformadores, se deduce de 17000 a 17500 gauss

Los arrollamientos de un transformador están estrechamente relacionados con la impedancia de cortocircuito del mismo, con las pérdidas de potencia por efecto Joule y con las fuerzas entre arrollamientos en cortocircuito. Por tanto su dimensionado debe tener en cuenta todos esos aspectos.

La impedancia de cortocircuito de un transformador es una de las especificaciones más importantes, pues tiene un impacto significativo en su diseño global. El coste de los materiales de un transformador depende del valor de la impedancia de cortocircuito especificada. Generalmente existe un valor de la impedancia con el que se obtiene un coste mínimo de materiales.

- Si la impedancia es menor que esa impedancia óptima, el precio aumenta ya que la corriente de cortocircuito y las fuerzas serán demasiado altas con lo cual será necesario el uso de una menor densidad de corriente y con ello se incrementa el contenido de material.
- Si la impedancia requerida es mayor que la óptima se incrementarán las pérdidas en los arrollamientos y las pérdidas parásitas en las partes estructurales dando lugar a unas mayores pérdidas en carga y una mayor temperatura del aceite y de los arrollamientos, por lo que habrá que aumentar el contenido en cobre y/o usar una refrigeración extra.

4.5.1.1 Determinación del Número de Espiras para cada bobinado

Para la determinación del número de espiras se utiliza la siguiente expresión:

$$N = V / (f * S * B * 4,4 * 10^{-8})$$

Esta expresión se la utiliza en el bobinado primario y en el secundario cambiándole el voltaje.

Para determinar el número de espiras del bobinado primario se lo obtiene utilizando el voltaje primario del transformador multiplicado * 10^8 dividido para la frecuencia* Inducción magnética* Sección del núcleo la representamos con la siguiente formula
Para el bobinado primario tenemos:

$$N1 = V1 / (f * S * B * 4,44 * 10^{-8})$$

Para determinar el número de espiras del bobinado secundario se lo obtiene utilizando el voltaje primario del transformador multiplicado * 10 ó dividido para la frecuencia* Inducción magnética* sección del núcleo la que se representa con la siguiente formula:

$$N2 = V2 / (f * S * B * 4,44 * 10^{-8})$$

Donde:

N1: es el número de espiras del bobinado primario.

N2: es el número de espiras del bobinado secundario.

f: es la frecuencia de la red domiciliaria en Hertz (Hz).

V1: es la tensión en el bobinado primario en Voltios (V).

V2: es la tensión en el bobinado secundario en Voltios (V).

B: es la inducción magnética en el núcleo elegido en Gauss. Este valor puede variar entre 10.000 y 17.000 Gauss.

S: es la sección del núcleo en cm^2 .

10-8: Es una constante para que todas las variables estén en el Sistema M.K.S.

La inducción magnética en Gauss está dada por la siguiente expresión:

$$B = \mu \times H$$

Donde:

B: es la inducción magnética en el núcleo elegido en Weber/m².

μ : es la permeabilidad del acero usado en el núcleo en Weber/A x m.

H: es la intensidad del campo magnético en A/m (Amper/metro).

CAPITULO V

DESARROLLO DEL SOFTWARE

5.1 INTRODUCCIÓN

El programa de cálculo implementado, se lo realizó en un software de desarrollo de interfaz gráfico Visual Basic 6.0 y una base de datos en MicroSoft Access 2003

El programa ofrece ventajas, especialmente agilidad al proceso de diseño de transformadores de potencia ya que permite obtener los resultados del cálculo de forma rápida y sencilla.

Esta aplicación es de fácil utilización porque tiene una interfaz “amigable” que hace muy fácil para el usuario, la introducción de datos y el análisis de los resultados.

El programa es de fácil utilización porque tiene una interfaz “amigable” que hace muy fácil para el usuario la introducción de datos y el análisis de los resultados.

5.2 ESQUEMA DEL SOFTWARE.

El esquema funcional del software se presenta de la siguiente manera:

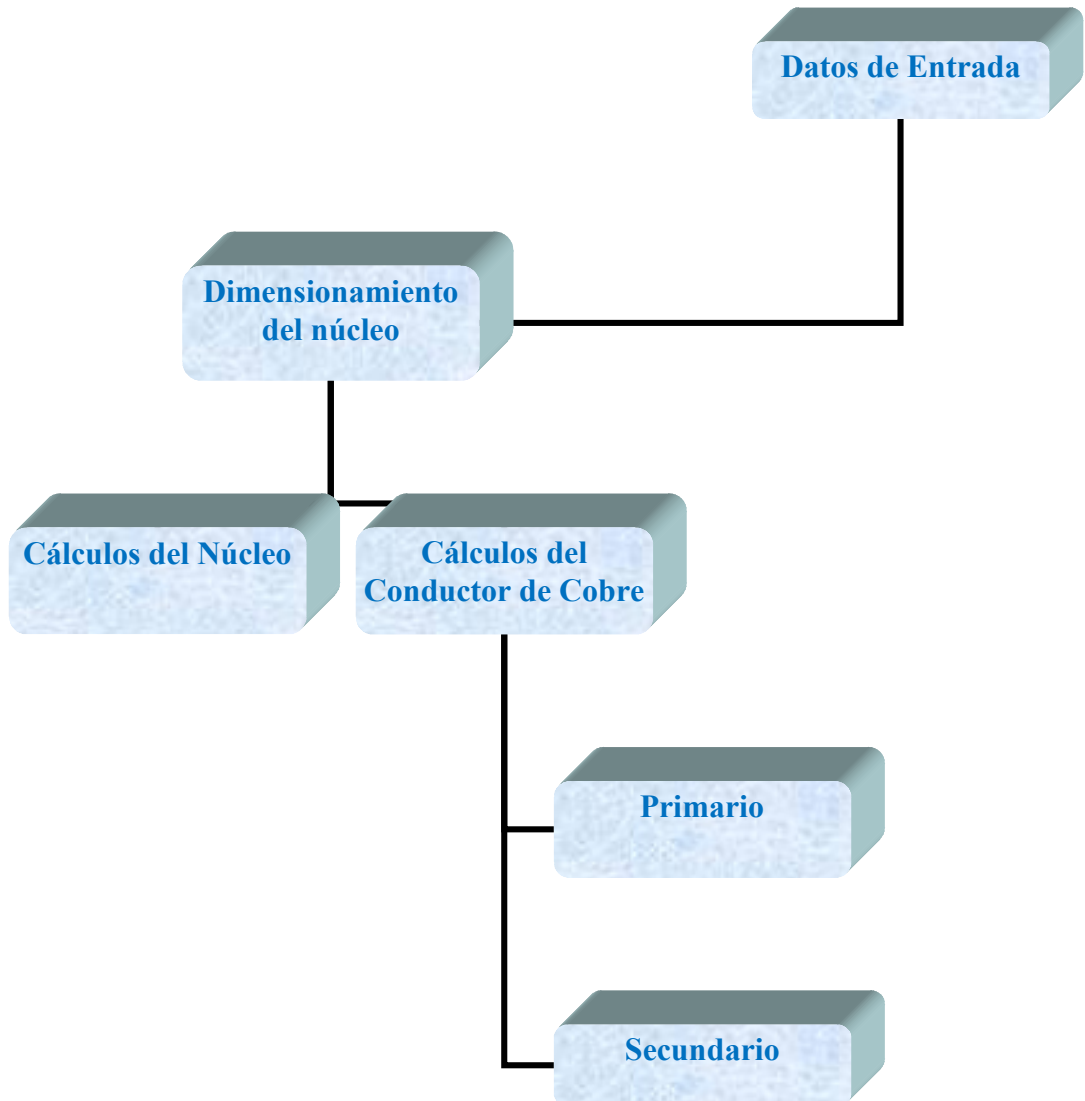


FIG. 5.2.1 ESQUEMA DEL SOFTWARE

Los principales módulos del software se describen a continuación:

- **Datos de entrada:** el usuario ingresa los datos nominales del transformador, así como tipo de frecuencia, nivel de voltaje primario, nivel de voltaje secundario a plena carga, carga instalada, factor de potencia, tipo de conexión en el primario y la conexión en el secundario, con todos estos datos nos permite calcular la capacidad del transformador el tipo de transformador (elevador o reductor), los cálculos del núcleo y los del cobre.
- **Dimensiones del núcleo:** el programa entrega los resultados, relacionados con la sección del núcleo y sus dimensiones (alto, ancho de acuerdo al espesor de las láminas o chapas que se utilizara para la construcción del núcleo).
- **Cálculos del Núcleo:** Lo esencial de este cálculo, pasa por considerar las dimensiones críticas del núcleo de hierro. Este cálculo nos mostrará la potencia por columna, sección del núcleo, sección efectiva, ancho de la columna, alto de la columna, número de láminas por columna y carrete aproximado.
- **Cálculos del conductor de Cobre:** Una vez determinadas las dimensiones del núcleo, se determina la construcción de cada una de las bobinas según el tipo de conductor. Entre los datos calculados en esta etapa se encuentran:
 1. **Para el primario:** voltaje fase 1, intensidad fase 1, espesor del cobre fase 1, calibre del conductor, número de espiras fase 1.

2. **Para el secundario:** voltaje fase 2, intensidad fase 2, espesor del cobre fase 2, calibre del conductor, número de espiras fase 2.

5.3 ACCESO AL PROGRAMA

Antes de acceder al software el usuario deberá registrarse, siendo obligatorio el ingreso de todos los campos que se encuentran marcados con asterisco, tal como se indica en la figura.

The screenshot shows a window titled "Registro de Usuario...". At the top, there is a red asterisk and the text "Importante: * Datos obligatorios, deben ser ingresados." The form is divided into two sections: "Perfil de Usuario:" and "Datos del Usuario:".

Perfil de Usuario:

- Usuario: Jorge Loor *
- Contraseña: **** *
- Confirmar Contraseña: **** *
- Primera Pregunta: Mascota preferida *
- Respuesta: perro *
- Segunda Pregunta: Nombre de tu mejor amigo@ *
- Respuesta: *

Datos del Usuario:

- Cédula: *
- Apellidos: *
- Nombres: *
- Celular: *
- e-mail: *
- Edad: *
- Sexo: *

On the right side of the window, there are two buttons: "Guardar" and "Cancelar".

FIG. 5.3.1 ACCESO AL PROGRAMA

Una vez que se hayan llenado todos los campos se guardará la información. Para poder ingresar al programa debemos ingresar nuestro usuario y contraseña tal como se muestra en la figura.

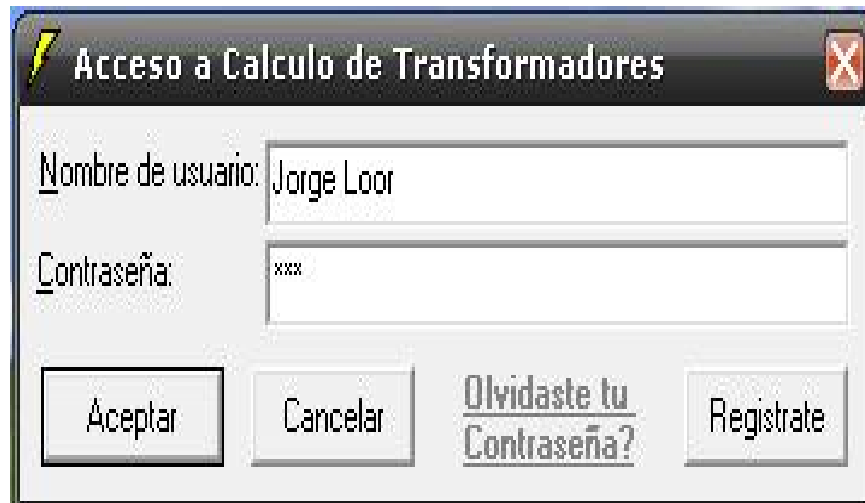


FIG. 5.3.2 ACCESO AL PROGRAMA CONTRASEÑA

5.4 INTERFAZ DEL PROGRAMA DESARROLLADO

La estructura del programa elaborado le permite al usuario obtener de manera sencilla, las fichas técnicas para la construcción de los transformadores de potencia que cumplirán las normas existentes.

El programa permite optimizar el diseño de aspectos constructivos, como el determinar la mejor distribución de las espiras de cada bobina, en el caso en que se necesite más de un conductor por espira, permitiendo que el ancho de la ventana del núcleo no sea superado por el ancho de la bobina. Esto tiene como consecuencia un impacto económico favorable en el proceso de construcción.

El programa tendrá un menú que permitirá realizar cálculos para transformadores Trifásicos y monofásicos tal como se muestra en las figuras siguientes:

PANTALLA QUE PERMITE REALIZAR CÁLCULOS PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

The screenshot shows a software window titled "Calculos de Transformadores de Potencia". It has two tabs: "Trifásico" and "Monofásico", with "Monofásico" selected. The interface includes the following sections:

- Tipo:** Frecuencia ==> 60 (dropdown), Transformador ==> []
- Voltajes:** Primario ==> [] En Vacío ==> [] En Plena Carga ==> []
- Transformador:** Carga Instalada ==> [] KW (dropdown), Factor de Potencia ==> [], Potencia Del Transformador ==> [] KVA
- Cálculo del Nucleo:** Potencia x Columna ==> [] VA, Sección del Nucleo ==> [] cm², Sección Efectiva ==> [] cm², Ancho de la Columna ==> [] cm, Alto de la Columna ==> [] cm, # de Láminas x Columna ==> [] Láminas, Carrete Aproximado ==> [] x [] cm
- Cálculo del Conductor de Cobre:**
 - Primario:** Voltaje ==> [] Voltios, Intensidad ==> [] Amperios, Espesor del Cobre ==> [] mm², Calibre del Conductor ==> [] Awg, Numero de Espiras ==> [] Vueltas
 - Secundario:** Voltaje ==> [] Voltios, Intensidad ==> [] Amperios, Espesor del Cobre ==> [] mm², Calibre del Conductor ==> [] Awg, Numero de Espiras ==> [] Vueltas

Buttons: Calcular, Limpiar, Informar, Calculos anteriores, Cerrar.

FIG. 5.4.1 PANTALLA DE TRANSFORMADORES MONOFASICOS

PANTALLA QUE PERMITE REALIZAR CÁLCULOS EN TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

The screenshot shows a software window titled "Calculos de Transformadores de Potencia". It has two tabs: "Trifásico" and "Monofásico", with "Trifásico" selected. The interface includes the following sections:

- Tipo:** Frecuencia ==> 60 (dropdown), Transformador ==> [], Conexión Primario ==> Estrella (dropdown), Conexión Secundario ==> Estrella (dropdown)
- Voltajes:** Primario ==> [] En Vacío ==> [] En Plena Carga ==> []
- Transformador:** Carga Instalada ==> [] KW (dropdown), Factor de Potencia ==> [], Potencia Del Transformador ==> [] KVA
- Cálculo del Nucleo:** Potencia x Columna ==> [] VA, Sección del Nucleo ==> [] cm², Sección Efectiva ==> [] cm², Ancho de la Columna ==> [] cm, Alto de la Columna ==> [] cm, # de Láminas x Columna ==> [] Láminas, Carrete Aproximado ==> [] x [] cm
- Cálculo del Conductor de Cobre:**
 - Primario:** Voltaje ==> [] Voltios, Intensidad ==> [] Amperios, Espesor del Cobre ==> [] mm², Calibre del Conductor ==> [] Awg, Numero de Espiras ==> [] Vueltas
 - Secundario:** Voltaje ==> [] Voltios, Intensidad ==> [] Amperios, Espesor del Cobre ==> [] mm², Calibre del Conductor ==> [] Awg, Numero de Espiras ==> [] Vueltas

Buttons: Calcular, Limpiar, Informar, Calculos anteriores, Cerrar.

FIG. 5.4.2 PANTALLA DE TRANSFORMADORES TRIFASICOS

5.4.1 Botón Calcular

Este botón presentará cálculos necesarios para el diseño del transformador. Aquí el usuario ingresa datos al programa como: nivel de voltaje primario, nivel de voltaje secundario, nivel de frecuencia, carga instalada, tipo de conexión en el primario, secundario. Una vez ingresados todos estos parámetros el programa realizará el cálculo tal como muestra la figura.

Calculos de Transformadores de Potencia

Trifásico Monofásico

Tipo:
Frecuencia ==> 60 Transformador ==> Reductor Conexión Primaria ==> Estrella Conexión Secundaria ==> Estrella

Voltajes:
Primario ==> 13200 En Vacío ==> 252 En Plena Carga ==> 240

Transformador:
Carga Instalada ==> 180 KW
Factor de Potencia ==> 0.9
Potencia Del Transformador ==> 250 KVA

Cálculo del Nucleo:
Potencia x Columna ==> 83333.33333 VA
Sección del Nucleo ==> 169.86769 cm²
Sección Efectiva ==> 161.37431 cm²
Ancho de la Columna ==> 13.03333 cm
Alto de la Columna ==> 13.03333 cm
de Láminas x Columna ==> 372.38086 Láminas
Carrete Aproximado ==> 13.29 x 13.29 cm

Cálculo del Conductor de Cobre:
Primario:
Voltaje ==> 7621.0235539 Volts
Intensidad ==> 10.93466419 Amperios
Espesor del Cobre ==> 3.64488806 mm²
Calibre del Conductor ==> 1.21602484 Awg
Numero de Espiras ==> 1043 Vueltas

Secundario:
Voltaje ==> 138.56406 Volts
Intensidad ==> 601.40555037 Amperios
Espesor del Cobre ==> 200.46385012 mm²
Calibre del Conductor ==> 9.0182817 Awg
Numero de Espiras ==> 19 Vueltas

Calcular Limpiar InformaT Calculos anteriores Cerrar

FIG. 5.4.1.1 INDICA EL BOTON CALCULAR

Una vez mostrados los resultados se podrá dar doble clic en cada uno de los textos de los datos del transformador y se visualizará el detalle de los cálculos realizados.

5.4.2 Botón Ver Presentación

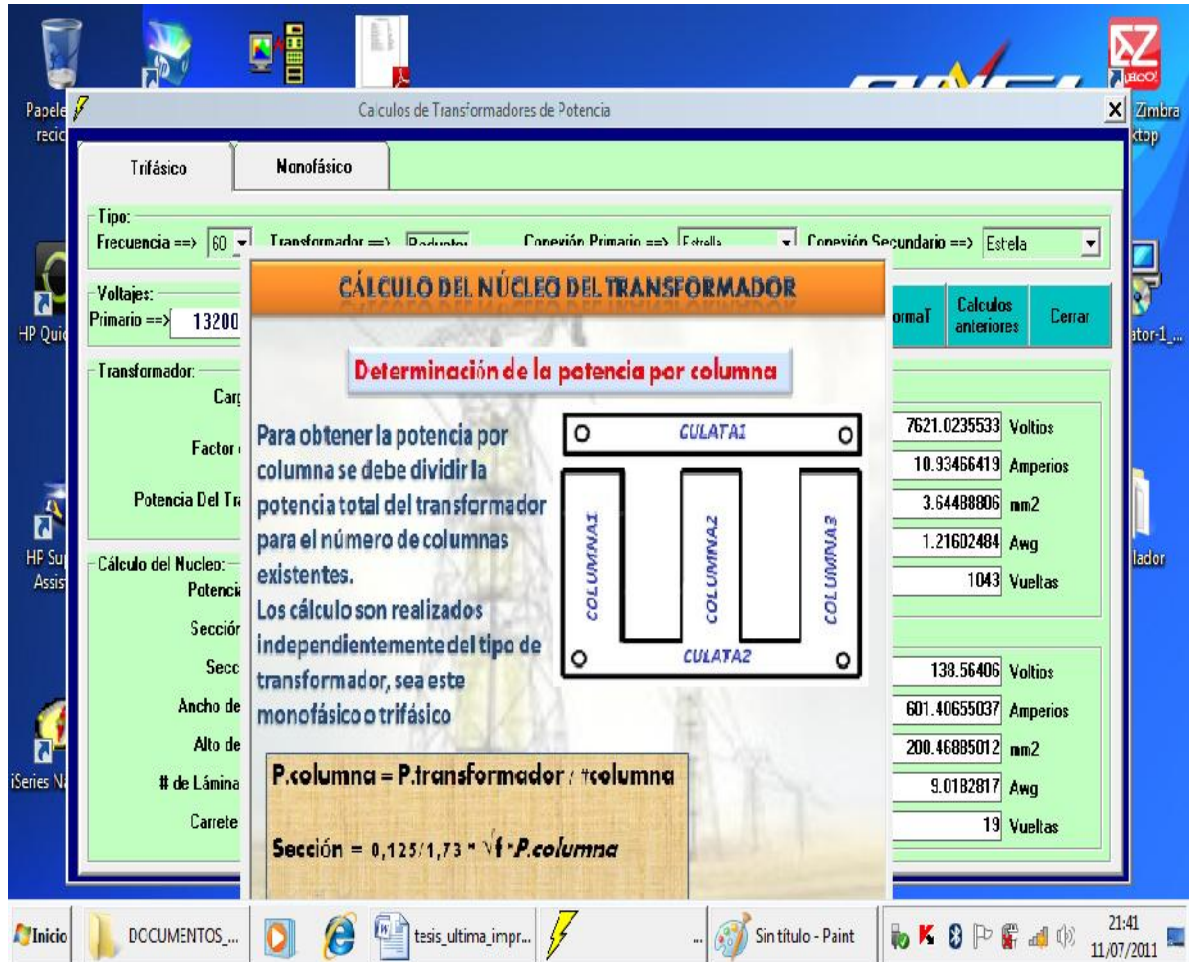


FIG. 5.4.2.1 PANTALLA DE PRESENTACION

Al dar clic sobre este botón se mostrará la presentación de la información más relevante sobre los transformadores de potencia.

5.4.3 Botón Limpiar

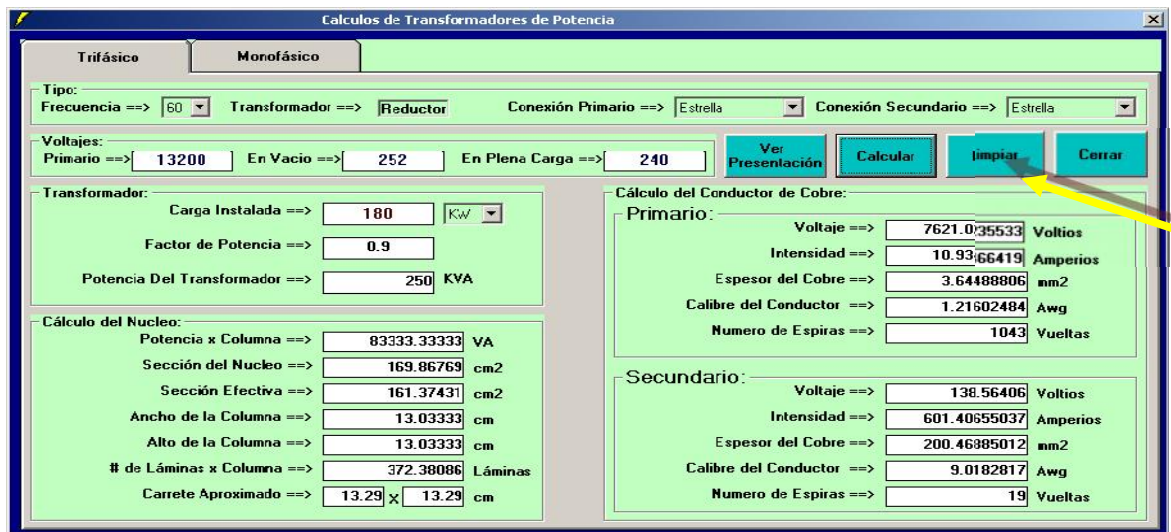


FIG. 5.4.3.1 BOTON LIMPIAR PANTALLA

Este botón una vez que realice el cálculo permite limpiar la pantalla para ingresar nuevos datos

5.4.4 Impresión de reporte

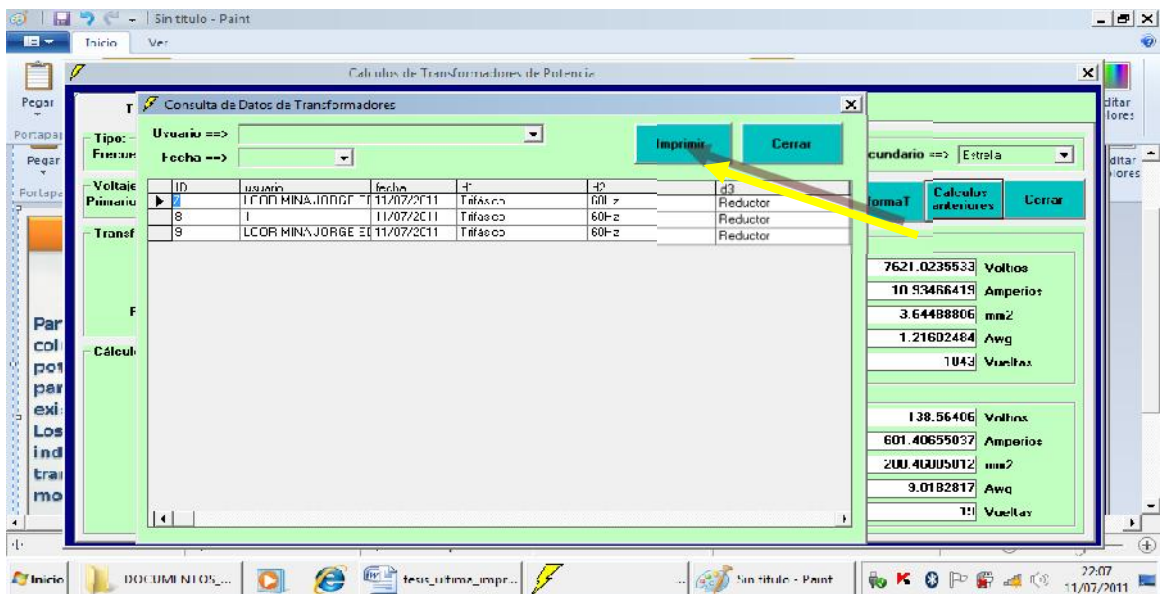


FIG. 5.4.4.1 BOTON IMPRIMIR CALCULO

Esta ventana permite imprimir el reporte de los cálculos realizados en el momento o en fechas anteriores, permite realizar búsquedas con filtros de fechas o por usuarios

5.4.5 Botón Cerrar

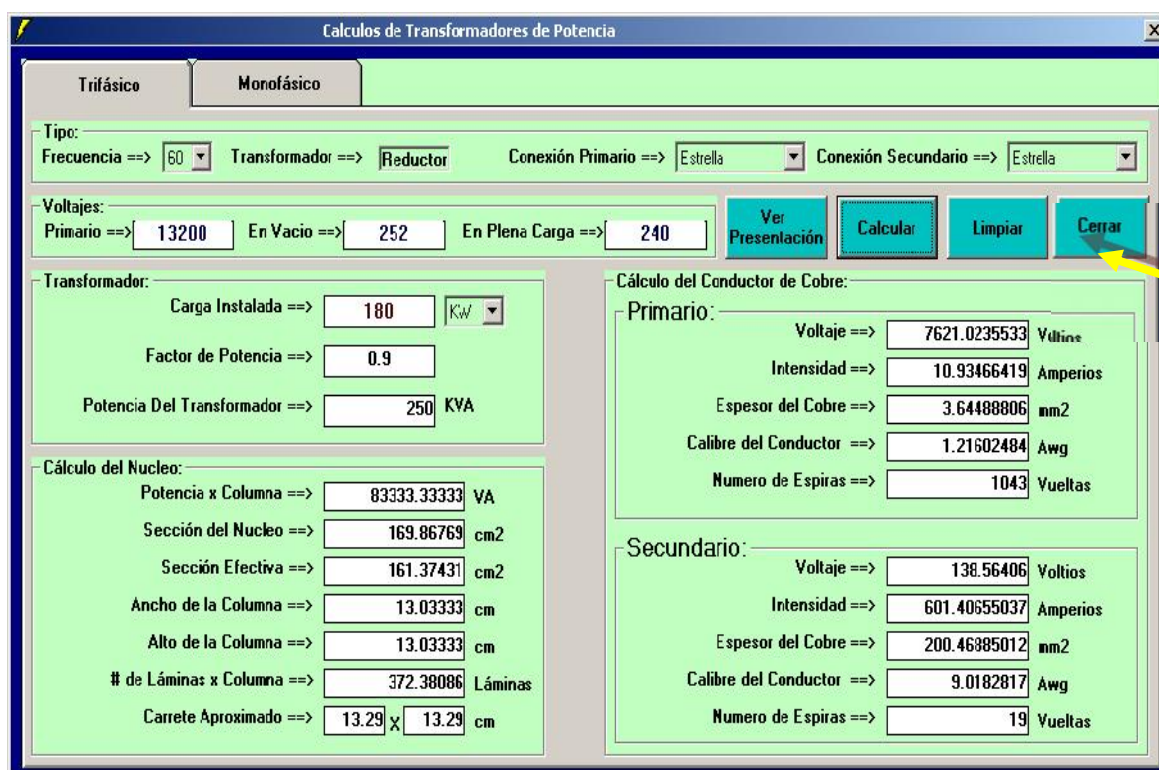


FIG. 5.4.5.1 BOTON CERRAR PANTALLA

Este botón una vez que se haya realizado el cálculo permite salir de la aplicación

CONCLUSIONES

Se ha comprobado que la tarea de diseñar un transformador es realmente compleja debido a los diversos problemas en diferentes campos de la ingeniería que hay que afrontar a la hora de su diseño.

Se ha podido comprobar que entre la bibliografía consultada no se ha encontrado ningún libro que proporcione una guía integral para un diseño de transformadores, pues todos los libros toman en algún momento decisiones que sólo son válidas para el transformador que está siendo diseñado, pero no para otros transformadores de diferentes potencias o tensiones.

La implementación de un software académico facilita y simplifica las tareas de cálculos de transformadores de potencia ya sea a estudiantes o docentes inmersos en el ámbito de la electricidad.

Las diferentes pruebas a las que se sometió el software demuestran que existe una alta confiabilidad a la hora de realizar los cálculos.

RECOMENDACIONES

Esta aplicación se la desarrollo para que el estudiante y profesionales puedan obtener conocimientos actualizados del diseño construcción y cálculo de los transformadores de potencia, para lo que se debe tomar las siguientes consideraciones.

Los tipos de láminas que se debe utilizar para este tipo de transformadores son de 0.3mm, 0.35mm mientras menor espesor tenga la lámina menores son las pérdidas.

Los tipos de conexión mas utilizados para este tipo de transformador son conexión estrella, conexión estrella zigzag.

Es recomendable que un transformador terminado cumpla con los valores de pruebas dieléctricas, del nivel de aislamiento, valores de prueba de impulso con onda completa, onda cortada y valores de prueba de baja frecuencia de acuerdo a las normas NMX-J-284-1998-ANCE y NMX-J-169- 2004-ANCE.

Para un correcto funcionamiento del software debe seguirse cuidadosamente con las instrucciones del manual de usuario explicadas en el Capítulo V.

BIBLIOGRAFIA

Navarro, R. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. México: Pearson Educación, 2007

Kosow Irving, L. (2006). *Control de Máquinas Eléctricas*. España Barcelona: Editorial Reverté, 2006

Duncan J., Mulukutla S. (2004). *Sistemas de potencia: análisis y diseño*. México D.F: Thompson, 2004

Enríquez, G. (2006). *Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta TENSION*: México: Editorial Limusa, 2006

Enríquez, G. (2000). *Curso de transformadores y motores de inducción*: México: Editorial Limusa, 2000

Biddle Instruments, *Manual on Electrical Insulation testing for the, practical man*, PA. 19422.

Westinghouse Electric Co, *Electrical Maintenance Hints*, 1976.

IEEE, *Guide for the acceptance and maintenance of insulating oil in equipment*, C57.106.1991

Gallo, E. (1996). *Diagnóstico y mantenimiento de transformadores en campo*, Transequipos, Colombia, 1996

IEEE, *Guide for the interpretation of gases generated in oil immersed transformers*, C57.104.1991.

Myers. S.D, Kelly J.J, Parrish R.H. *A guide to transformer maintenance*, Transformer maintenance institute, 1981

Sobrevilla, A. *Máquinas eléctricas*, editorial Alsina, 2000

SUMARIO

El propósito principal de un transformador es convertir grandes niveles de voltaje de transmisión de corriente alterna (CA) a niveles de voltaje de distribución de CA de una misma frecuencia pero a otro nivel de voltaje para poder distribuir energía a los grandes centros de distribución.

Los transformadores son máquinas eléctricas estáticas que tienen la función de modificar parámetros de distribución de energía, utilizando para ello principios de inducción electromagnética. Se caracterizan estos transformadores por tener valores de tensión y frecuencia de entrada razonablemente constantes.

Los transformadores de potencia son equipos que juegan un importante rol en todo sistema eléctrico.

El transformador consta de un núcleo ferromagnético, que forma el circuito magnético, y dos arrollamientos, que forman el circuito eléctrico.

Al alimentar el bobinado primario con un voltaje alterno, por éste circulará una corriente eléctrica alterna (I_1), que produce una fuerza magneto motriz que causa que se establezca un flujo de líneas de fuerza alterno (Φ_1) en el circuito magnético del transformador.

El flujo Φ_1 al estar canalizado en el núcleo, induce en las espiras del bobinado secundario una fuerza electromotriz (E_2).

Si el transformador es reductor el arrollamiento primario será el arrollamiento de mayor tensión y el secundario el de menor tensión, y si el transformador es elevador el arrollamiento primario será el de menor tensión y el secundario el de mayor tensión.

Esto determina la relación de transformación del transformador, punto fundamental de estos equipos.

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

El núcleo debe ser de acuerdo al tipo y capacidad del transformador, será fabricado con láminas de acero eléctrico al silicio, grano orientado y laminado en frío u otro material magnético, caracterizado por ser libres de envejecimiento, de alta permeabilidad y bajas pérdidas por histéresis.

De acuerdo con el tipo de transformador de potencia que se desee construir, se puede también escoger el tipo de núcleo más apropiado. En la actualidad los núcleos más utilizados son:

La vida de un transformador está determinada por la vida de su aislamiento.

Este sistema tiene como función aislar los devanados del transformador entre sí y de tierra, es decir, los elementos de este sistema aíslan las partes conductoras de corriente del núcleo y de las estructuras de acero.

El sistema de aislamiento de un transformador en aceite consta principalmente de 2 tipos de materiales aislantes: aceite y papel.

El aislamiento sólido está compuesto por papel Kraft.

La mayoría de los expertos coinciden en que la vida de un transformador está determinada por la vida del papel.

La mayoría de los transformadores usan como aislante líquido al aceite mineral derivado del petróleo. Este elemento, cumple múltiples funciones como:

Mejora del aislamiento entre componentes del Transformador.

Mantiene la temperatura interna adecuada en el transformador.

La oxidación del aceite, produce formación de lodos.

El tanque de un transformador, generalmente hecho de acero, desempeña las siguientes funciones:

Provee protección mecánica al conjunto (núcleo, bobinas).

Por medio de los radiadores permite que el transformador mantenga su temperatura normal para su correcto funcionamiento.

Las instalaciones donde se encuentran montados los transformadores (Subestaciones) están sujetas a sobre voltajes debidos a descargas atmosféricas, maniobras o a fallas en los circuitos del sistema al cual el transformador está conectado.

Los pararrayos son los principales medios para proteger no solo al transformador, sino a los demás equipos contra dichos sobre voltajes.

La mayor protección posible contra sobre voltajes que un pararrayo puede ofrecer a un transformador se obtiene cuando:

El máximo voltaje del pararrayo es igual o mayor al voltaje nominal línea a tierra del transformador.

Las conexiones del pararrayo son hechas lo más cerca y directamente posible al transformador.

También puede ser utilizado para secar otros aparatos eléctricos antes de la inyección de aceite aislante.

Dependiendo del propósito de la instalación, un transformador se puede conectar de distintas formas. *Conexión delta –delta, Conexión estrella-delta, Conexión estrella-estrella, Conexión delta-estrella.*

Las pérdidas en un transformador comprenden un pequeño porcentaje de la potencia total que transmite.

Las pérdidas en el hierro se obtienen mediante el ensayo de vacío del transformador, en dicho ensayo el primario se energiza a la tensión nominal mientras que el secundario se deja en circuito abierto o viceversa.

Las pérdidas en el cobre o en los bobinados del transformador, se deben a la disipación de calor que se producen en los devanados. Estas pérdidas son proporcionales a las resistencias de cada bobinado, y a través de la corriente que circula en ellos.

El cálculo o diseño de transformadores se puede decir que es un aspecto suficientemente tratado, en el que intervienen algunas variantes dependiendo del tipo de transformador y de los materiales empleados.

En la construcción de los transformadores deben especificarse los bobinados tanto en el PRIMARIO como en el SECUNDARIO.

La potencia del transformador depende de la carga conectada a la misma. Esta potencia está dada por el producto de la tensión secundaria y la corriente secundaria.

La potencia del secundario, viene dada por la suma de las potencias que debe entregar cada arrollamiento.

ANEXOS

θ_h °C Hot Spot	Horas por día con papel común
98	24
101,5	16
104	12
110	6
113,5	4
116	3
119,5	2
122	1,5
125,5	1
128	0,75
131,5	0,50

TABLA1. RÉGIMEN DE ENVEJECIMIENTO RELATIVO SEGÚN NORMA IEC

CLASE	TEMPERATURA
Y	90 °C
A	105 °C
E	120 °C
B	130 °C
F	155 °C
H	180 °C
C	Mayor a 180 °C

TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES AISLANTES

Espesor (mm)	Tolerancia	Aleación % SI	1 Tesla (104 Gauss) W/Kg	1,5 Tesla 1,5 * 104 Gauss W/Kg
0,5	0,10	0,5 – 1	2,9	7,40
0,5	0,10	2,5	2,3	5,6
0,35	0,10	2,5	1,7	4
0,35	0,10	4	1,3	3,25
0,35	0,10	4,5	1,2	3
0,35	0,10	4,5	0,9	2,1

TABLA 3. CARACTERÍSTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE POTENCIA (W/Kg)

NORMATIVA SOBRE LOS ACEITES DIELECTRICOS

PROPIEDADES	NORMA
Viscosidad	ASTM D445
Color	ASTM D1500
Punto de Inflamación	ASTM D92/93
Punto de fluidez	ASTM D97
Punto de anilina	ASTM D611
Tensión Interfacial	ASTM D971

TABLA 4. PROPIEDADES FÍSICAS DEL ACEITE DIELECTRICO

PROPIEDADES	NORMA
Número total de acidez	ASTM D974
Estabilidad de oxidación	ASTM D2440
Contenido de inhibidores de oxidación tipo I	ASTM D1473
Contenido de H ₂ O	ASTM D1533
Contenido de PCB	ASTM D4059

TABLA 5. PROPIEDADES QUIMICAS DEL ACEITE DIELECTRICO

PROPIEDADES	NORMA
Rigidez Dieléctrica	ASTM D877
Tensión de ruptura al impulso	ASTM D1816
Factor de Potencia	ASTM D924 A 60 HZ

TABLA 6. PROPIEDADES ELÉCTRICAS DEL ACEITE DIELECTRICO

Calibre	1 forro y esmalte	2 forros sin esmalte	Seda 1 forro
De 0 al n° 10	8.5 mils	15.5 mils	-
De 10 al n° 20	5.5 mils	10 mils	-
De 20 al n° 40	4.25 mils	8 mils	2.25

TABLA 7. TIPO DE AISLAMIENTO

Caballos de Vapor	Kilowatts	Caballos de Vapor	Kilowatts
1	0.746	8	5.97
2	1.492	9	6.71
3	2.24	10	7.46
4	2.98	20	14.91
5	3.73	30	22.37
6	4.48	40	29.83
7	5.22	50	37.28

TABLA 8. EQUIVALENCIA DE CABALLOS DE VAPOR A KILOWATTS

Esmaltado y un forro de algodón		Esmaltado sin forro	
Número	Kg por 1000 m.	Número	Kg por 1000 m.
10	47.962	10	47.322
11	38.140	11	37.574
12	30.313	12	29.937
13	24.107	13	23.661
14	19.137	14	18.750
15	15.253	15	14.881
16	12.113	16	11.800
17	9.628	17	9.388
18	7.649	18	7.411
19	6.101	19	5.886
20	4.886	20	4.665
21	3.899	21	3.705
22	3.080	22	2.932
23	2.470	23	2.329
24	1.964	24	1.853
25	1.577	25	1.470
26	1.265	26	1.167
27	1.007	27	0.926
28	0.813	28	0.926
29	0.647	29	0.538
30	0.521	30	0.462
31	0.521	31	0.367
32	0.341	32	0.292

TABLA 9.PESOS APROXIMADOS DE ALAMBRE MAGNETO

N° Calibre	Corriente(AMP)	N° Calibre	Corriente(AMP)
10	333	21	49.3
11	284	22	41.1
12	236	23	34.5
13	200	24	28.9
14	165.7	25	24.6
15	129	26	20.7
16	117.7	27	17.7
18	81.9	28	14.5
19	66.7	29	12.5
20	58.5	30	10.2

TABLA 10.DETERMINACION DE LA FUSIÓN DEL ALAMBRE

Calibre	Diámetro. En mm	Sec. En mm²	Kg por ohm
8	3.264	8.366	36.14
9	2.906	6.635	22.73
10	2.588	5.260	14.29
11	2.305	4.172	8.999
12	1.828	3.309	5.656
13	1.728	2.618	3.656
14	1.628	2.081	2.236
15	1.540	1.650	1.406
16	1.291	1.309	0.8845
17	1.150	1.038	0.4561
18	1.024	0.823	0.3498
19	0.899	0.6346	0.2200
20	0.812	0.5170	0.1383
21	0.723	0.4106	0.8704
22	0.644	0.3257	0.05474
23	0.573	0.2579	0.03442
24	0.510	0.2043	0.02166
25	0.455	0.1620	0.01351
26	0.405	0.1288	0.008563
27	0.360	0.1018	0.005384
28	0.321	0.0809	0.003386
29	0.286	0.0642	0.002130
30	0.255	0.0510	0.001339
31	0.2268	0.04039	0.0008423
32	0.2019	0.03203	0.0005298
33	0.1798	0.02540	0.0003332
34	0.1602	0.02014	0.0002095
35	0.1426	0.01597	0.0001317

TABLA 11. RELATIVA AL ALAMBRE DE COBRE DESNUDO

Cuando no se disponga de un hilo del N°	Pueden usarse dos hilos del N°	Cuando no se disponga de dos hilos del N°	Puede usarse un hilo del N°
10	13	28	25
11	14	27	24
12	15	26	23
13	16	25	22
14	17	24	21
15	18	23	20
16	19	22	19
17	20	21	18
18	21	20	17
19	22	19	16
20	23	18	15

TABLA 12.EQUIVALENCIA ENTRE CONDUCTORES

Número	Diámetro en mm		
	Desnudo	Doble capa de algodón	Esmalte y 1 capa de algodón
1	7.348	7.79	
2	6.544	6.99	
3	5.827	6.28	
4	5.189	5.65	
5	4.621	5.08	
6	4.115	4.515	
7	3.665	4.06	
8	3.264	3.619	
9	2.906	3.21	
10	2.588	2.839	
11	2.305	2.56	
12	2.053	2.301	2.22
13	1.818	2.081	1.998
14	1.628	1.856	1.792
15	1.45	1.679	1.617
16	1.291	1.518	1.451
17	1.15	1.377	1.31
18	1.024	1.251	1.185
19	0.9116	1.14	1.172
20	0.8118	1.04	0.969
21	0.723	0.952	0.878
22	0.6438	0.87	0.8
23	0.5733	0.815	0.726
24	0.5106	0.739	0.665
25	0.4547	0.6835	0.606
26	0.4049	0.632	0.556
27	0.3606	0.589	0.51
28	0.3211	0.548	0.469
29	0.2859	0.515	0.4315
30	0.2546	0.482	0.401

TABLA 13 DIAMETROS DE ALAMBRE DE DISTINTAS AISLACIONES

(t) Temperatura inicial centígrados	(a) Coeficiente de temperatura	(t) Temperatura inicial centígrados	(a) Coeficiente de temperatura
0	0.00420	26	0.00379
1	0.00418	27	0.00377
2	0.00417	28	0.00376
3	0.00415	29	0.00374
4	0.00413	30	0.00373
5	0.00411	31	0.00372
6	0.00410	32	0.00370
7	0.00408	33	0.00369
8	0.00406	34	0.00368
9	0.00404	35	0.00366
10	0.00403	36	0.00365
11	0.00402	37	0.00364
12	0.00400	38	0.00362
13	0.00398	39	0.00361
14	0.00367	40	0.00360
15	0.00395	41	0.00358
16	0.00394	42	0.00357
17	0.00392	43	0.00356
18	0.00391	44	0.00355
19	0.50389	45	0.00353
20	0.09388	46	0.00352
21	0.00386	47	0.00351
22	0.00385	48	0.00350
23	0.00383	49	0.00348
24	0.00383	50	0.00347
25	0.00381		

TABLA 14 CARACTERISTICA DE TEMPERATURA DE LOS CONDUCTORES

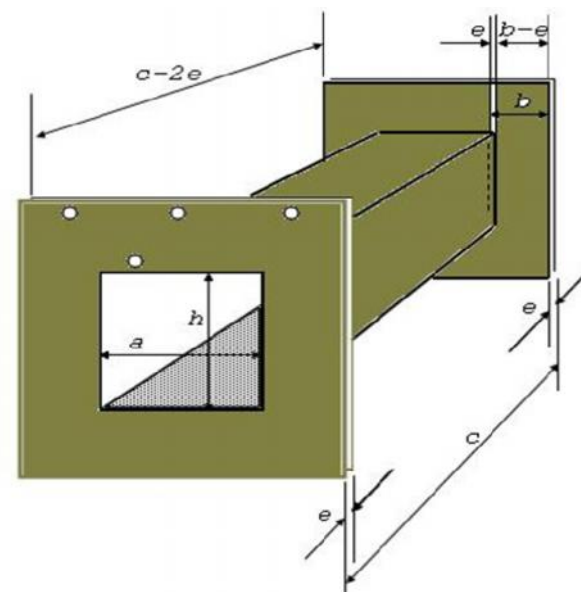
Diámetro del alambre desnudo	Diámetro total aproximado. mm	Resistencia aproximada ohms/Km	Cantidad aproximada. m/Kg.
0.04	0.05	13700	75000
0.05	0.06	8750	50000
0.06	0.07	6070	34000
0.07	0.08	4460	25600
0.08	0.09	3420	20000
0.09	0.10	2700	16000
0.10	0.11	2190	13000
0.11	0.13	1810	10800
0.12	0.14	1520	9200
0.13	0.15	1300	7900
0.14	0.16	1120	6800
0.15	0.17	970	6000
0.16	0.18	844	5300
0.17	0.19	757	4700
0.18	0.20	676	4200
0.19	0.21	605	3700
0.20	0.22	547	3400
0.23	0.25	381	2704
0.25	0.27	351	2200
0.28	0.31	259.4	1824
0.30	0.33	243	1550
0.32	0.34	198.6	1397
0.35	0.38	178	1150
0.38	0.41	140.8	990.7
0.40	0.43	137	880

TABLA 15 CARACTERISTICAS DEL CABLE ESMALTADO

TABLA DE CARRETES

CARRETE N°	a [mm]	h [mm]	Detalle	Precio mayorista sin IVA en [S]
14	3.5	4		
15	4	5.6		
18	4	4.5		0.0125
25	1.25	1.25		0.0138
25.1	1.25	1.7		
37	10	10		0.0149
37.1	10	13		0.0149
25	12.5	12.5		0.0162
25.1	12.5	12.5	c/separador	0.0187
25.2	12.5	17		0.0187
62	16	16		
62.1	16	12		0.0187
62.2	16	20		0.0200
62.3	16	25		0.0212
62.4	16	25	doble	0.0312
62.5	16	30		
63	6.5	6.5		
75	20	20	a/c	0.0212
75.1	20	20	a/l	0.0212
75.2	20	26	a/c	0.0262
75.3	20	26	a/l	0.0262
77	22	22		0.0436
77.1	22	22	c/separador	0.0512

Geometría de los carretes



77.3	22	26	c/separador	0.0537	
77.4	22	30		0.0461	
77.5	22	30	c/separador	0.0575	
77.6	22	40		0.0474	
111	26	26		0.0474	
111.1	26	26	c/separador	0.0575	
111.2	26	16		0.0449	
111.3	26	30		0.0486	
111.4	26	36		0.0512	
111.5	26	36	c/separador	0.0649	
112	29	29		0.0662	
112.1	29	33		0.0686	
112.2	29	40		0.0748	
112.3	29	46		0.0798	
125	33	33		0.0811	
125.1	33	39		0.0836	
125.2	33	39	c/separador	0.1199	
125.3	33	44		0.0899	
125.4	33	44	c/separador	0.1234	
125.5	33	54		0.0899	
125.6	33	59		0.0960	
155	38	38		0.1048	
155.1	38	43		0.1173	
155.2	38	50		0.1224	
155.3	38	60		0.1272	
155.4	42	42	E	0.1360	
155.5	42	50	E	0.1386	

a = ancho central del núcleo
h = altura de apilado de las chapas
b = ancho de la ventana de conductores
c = altura de la ventana de conductores
e = espesor del carrete
Shr = a.h = sección real del núcleo de hierro
Ac = b.c = área de la ventana de conductores
b-e = ancho útil de la ventana de conductores
c-2e = altura útil de la ventana de conductores
Acu = (b-c).(c-2e) = área útil de la ventana de conductores

TABLA DE CONDUCTORES

B. y S. Calibre Americano	AWG Calibre Inglés	Diámetro [mm]	Sección [mm ²]	Peso [g/Km]	Longitud [m/Kg]	Resistencia [ohm/m]	Propiedades físicas del cobre	
		0.05	0.00196	17.4555	5728.8618	8.78076920	Variación de la resistividad	0.0041 <i>por °C</i>
		0.06	0.00283	25.1359	3978.3763	6.09775639	Peso atómico	63.57
		0.07	0.00385	34.2127	2922.8887	4.47998428	Número atómico	29
40		0.08	0.00503	44.6860	2237.8367	3.42998797	Peso específico 20° Pec =	8.89 <i>g/cm³</i>
39		0.09	0.00636	56.5557	1768.1672	2.71011395	Punto de fusión	1081 °C
38		0.1	0.00785	69.8219	1432.2155	2.19519230	Punto de ebullición	2310 °C
37		0.11	0.00950	84.4845	1183.6491	1.81420851	Calor específico 18 a 100 °C	0.0925 <i>Cal/Kg</i>
36		0.12	0.01131	100.5435	994.5941	1.52443910	Calor latente de fusión	43.3 <i>Cal/Kg</i>
36	40	0.13	0.01327	117.9990	847.4648	1.29893035	Coef. lineal de dilatación	0.000017 <i>1/°C</i>
35	39	0.14	0.01539	136.8509	730.7222	1.11999607	Resistencia eléctrica a 20 °C	17.241 <i>ohm.mm²/Km</i>
		0.15	0.01767	157.0993	636.5402	0.97564102	Conductibilidad térmica	340 <i>Cal/h m C</i>
34	38	0.16	0.02011	178.7441	559.4592	0.85749699	Los pesos indicados son del cobre desnudo (sin aislación)	
		0.17	0.02270	201.7853	495.5763	0.75958211	Para aislación de algodón, aumentar dicho peso en un 6%	
33	37	0.18	0.02545	226.2229	442.0418	0.67752849	Para 2 capas de algodón hay que aumentar 10%	
32	36	0.2	0.03142	279.2876	358.0539	0.54879807	Para cobre esmaltado solo un 2%	
31	34	0.22	0.03801	337.9380	295.9123	0.45355213	Los calibres indicados son aproximados	
30	33	0.25	0.04909	436.3869	229.1545	0.35123077		
		0.28	0.06158	547.4037	182.6805	0.27999902		
29	31	0.3	0.07069	628.3971	159.1351	0.24391026		
28	30	0.32	0.08042	714.9762	139.8648	0.21437425		
27	28	0.35	0.09621	855.3182	116.9155	0.17919937		

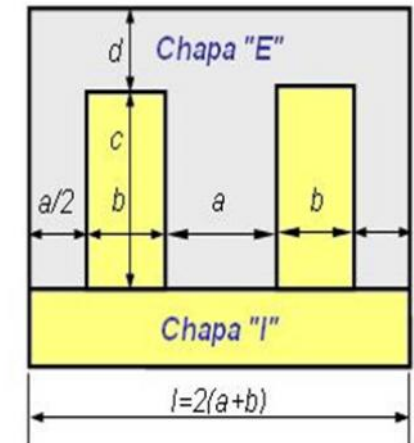
		0.38	0.11341	1008.2282	99.1839	0.15202163
26	27	0.4	0.12566	1117.1503	89.5135	0.13719952
		0.42	0.13854	1231.6583	81.1914	0.12444401
25	26	0.45	0.15904	1413.8934	70.7267	0.10840456
		0.48	0.18096	1608.6965	62.1621	0.09527744
24	25	0.5	0.19635	1745.5474	57.2886	0.08780769
		0.52	0.21237	1887.9841	52.9665	0.08118315
		0.55	0.23758	2112.1124	47.3460	0.07256834
23	24	0.58	0.26421	2348.8086	42.5748	0.06525542
		0.6	0.28274	2513.5883	39.7838	0.06097756
		0.62	0.30191	2683.9537	37.2585	0.05710698
22	23	0.65	0.33183	2949.9751	33.8986	0.05195721
		0.68	0.36317	3228.5645	30.9735	0.04747388
21	22	0.7	0.38485	3421.2729	29.2289	0.04479984
		0.75	0.44179	3927.4817	25.4616	0.03902564
20	21	0.8	0.50265	4468.6014	22.3784	0.03429988
		0.85	0.56745	5044.6320	19.8231	0.03038328
19	20	0.9	0.63617	5655.5736	17.6817	0.02710114
		0.95	0.70882	6301.4262	15.8694	0.02432346
18	19	1	0.78540	6982.1897	14.3222	0.02195192
		1.05	0.86590	7697.8641	12.9906	0.01991104
		1.1	0.95033	8448.4495	11.8365	0.01814209
17		1.15	1.03869	9233.9458	10.8296	0.01659881
		1.2	1.13097	10054.3531	9.9459	0.01524439
		1.25	1.22718	10909.6714	9.1662	0.01404923
16	18	1.3	1.32732	11799.9005	8.4746	0.01298930
		1.35	1.43139	12725.0407	7.8585	0.01204495
		1.4	1.53938	13685.0918	7.3072	0.01119996
15	17	1.45	1.65130	14680.0538	6.8120	0.01044087
		1.5	1.76715	15709.9268	6.3654	0.00975641

		1.55	1.88692	16774.7107	5.9614	0.00913712
		1.6	2.01062	17874.4056	5.5946	0.00857497
14	16	1.65	2.13825	19009.0114	5.2607	0.00806315
		1.7	2.26980	20178.5282	4.9558	0.00759582
		1.75	2.40528	21382.9559	4.6766	0.00716797
		1.8	2.54469	22622.2945	4.4204	0.00677528
13	15	1.85	2.68803	23896.5442	4.1847	0.00641400
		1.9	2.83529	25205.7047	3.9674	0.00608087
		1.95	2.98648	26549.7762	3.7665	0.00577302
12	14	2	3.14159	27928.7587	3.5805	0.00548798
		2.1	3.46361	30791.4565	3.2477	0.00497776
		2.2	3.80133	33793.7980	2.9591	0.00453552
11	13	2.3	4.15476	36935.7834	2.7074	0.00414970
		2.4	4.52389	40217.4125	2.4865	0.00381110
		2.5	4.90874	43638.6855	2.2915	0.00351231
10	12	2.6	5.30929	47199.6022	2.1187	0.00324733
		2.7	5.72555	50900.1627	1.9646	0.00301124
		2.8	6.15752	54740.3670	1.8268	0.00279999
9	11	2.9	6.60520	58720.2151	1.7030	0.00261022
		3	7.06858	62839.7071	1.5914	0.00243910
		3.1	7.54768	67098.8428	1.4903	0.00228428
8	10	3.2	8.04248	71497.6222	1.3986	0.00214374
		3.3	8.55299	76036.0455	1.3152	0.00201579
		3.4	9.07920	80714.1126	1.2389	0.00189896
		3.5	9.62113	85531.8235	1.1692	0.00179199
7	9	3.8	11.34115	100822.8189	0.9918	0.00152022
		3.9	11.94591	106199.1049	0.9416	0.00144326
		4	12.56637	111715.0348	0.8951	0.00137200
6	8	4.2	13.85442	123165.8258	0.8119	0.00124444
		4.4	15.20531	135175.1921	0.7398	0.00113388

		4.5	15.90431	141389.3409	0.7073	0.00108405
5	7	4.6	16.61903	147743.1335	0.6769	0.00103743
		4.8	18.09557	160869.6501	0.6216	0.00095277
		5	19.63495	174554.7418	0.5729	0.00087808
3	4	5.2	21.23717	188798.4087	0.5297	0.00081183
		5.5	23.75829	211211.2376	0.4735	0.00072568
2	3	5.8	26.42079	234880.8606	0.4257	0.00065255
1	2	6	28.27433	251358.8282	0.3978	0.00060978
1	1	7	38.48451	342127.2940	0.2923	0.00044800
		8	50.26548	446860.1390	0.2238	0.00034300
		9	63.61725	565557.3635	0.1768	0.00027101
		10	78.53982	698218.9673	0.1432	0.00021952

Tabla de N° de chapas y sus dimensiones.

Chapa N°	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	l [mm]	I' calculada	CBK	Peso x sección cuadrada [Kg]	Peso de chapas [g]		Geometría de las chapas	
									Chapa "E"	Chapa "I"		
14	3.5	3.5	8.75	1.75	14	14	6	0.025	760	240		
18	4.8	4.8	11	2.5	19	19.2	13.5	0.065	770	230		
25	12.5	8	20.75	8	41.5	41	36.5	0.110	710	290	Peh	Peso específico del
30	33	27	97	17.5	120	120	132	2.320	810	190		7.85 [g/cm3]
37	9.5	7.95	19	4.8	35	34.9	28.6	0.046	750	250		
60	40	20	60	20	120	120	100	2.800	750	250		
62	16	8	24	8	48	48	40	0.180	750	250		
75	19	9.5	26.5	9.5	57	57	47.5	0.300	750	250		
77	22	12	34	12	68	68	58	0.510	750	250		
111	25.4	12.7	33.1	12.7	76.2	76.2	63.5	0.720	750	250		
112	28.6	14.3	43	14.3	85.8	85.8	71.6	1.030	750	250		
125	32	16	49	16	95	96	80	1.420	750	250		
150	45	28.5	117	22.5	147	147	162	5.653	810	190		
155	38	19	57	19	147	114	95	2.430	750	250		
55 E	42	21	21	21	126	126	105	3.100	750	250		
200	33	27	65	17.5	120	120	100	1.960	750	250		
500	64	32	96	32	192	192	160	11.350	750	250		
600	50	25	75	25	150	150	125	9.400	750	250		
700	64	32	93	32	192	192	256	16.200	830	170		
800	82	41	122	41	246	246	204	24.500	750	250		
850	82	41	244	41	246	246	326	36.300	830	170		
1102	102	51	153	51	305	306	324	43.400	750	250		



GLOSARIO

ÁCIDOS.- compuesto químico que, cuando se disuelve en agua, produce una solución con una actividad de catión hidronio mayor que el agua pura

ALCOHOLES.- Nombre genérico de una familia de compuestos químicos de carbono, hidrógeno y oxígeno que siempre contienen el grupo funcional hidroxilo (-OH)

ALDEHÍDOS.- Compuesto químico orgánico, de fórmula general R-CHO, procedente de la oxidación moderada de un alcohol primario.

CATALIZADORES.- Sustancia que hace más rápida o más lenta la velocidad de una reacción química sin participar en ella.

CETONAS.- Compuesto orgánico que procede, generalmente, de la deshidratación de ciertos alcoholes; se emplea como disolvente y para la síntesis de otros compuestos orgánicos.

CORRIENTES ARMÓNICAS.- fenómenos imperceptibles por sí mismos, se requieren aparatos especiales para medirlos

DIÓXIDO DE CARBONO.- gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono.

EFECTO CORONA.- fenómeno eléctrico que se produce en los conductores de las líneas de alta tensión y se manifiesta en forma de halo luminoso a su alrededor.

ELASTÓMEROS.- Polímeros sólidos que poseen notables propiedades elásticas. Son elastómeros el caucho natural y las sustancias sintéticas parecidas a él.

ELASTOMÉRICO.- producto catalizado 100% sólido de tres componentes.

ESTERES.- compuestos orgánicos en los cuales un grupo orgánico alquilo (simbolizado por R') reemplaza a un átomo de hidrógeno (o más de uno) de un ácido oxigenado.

GRADO DE POLIMERIZACIÓN.- indica cuantas unidades repetitivas se encuentran en un polímero.

HIDROCARBUROS SATURADOS.- compuestos químicos que se encuentran formados en exclusiva por átomos de carbono y de hidrógeno.

MONÓMEROS.- molécula de pequeña masa molecular que unida a otros monómeros, a veces cientos o miles, por medio de enlaces químicos, generalmente covalentes, forman macromoléculas llamadas polímeros.

MONOXIDO DE CARBONO.- gas carbonoso y anhídrido carbonoso.

SÍLICA GEL.- forma granular y porosa de dióxido de silicio fabricado sintéticamente a partir de silicato sódico. A pesar del nombre, el gel de sílice es un sólido.