



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE UN INYECTOR DE CORRIENTE PARA COMPRESIÓN DE
VOLTAJES DE PASO Y DE CONTACTO EN UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

Ulises Leonel Xutuc López

Asesorado por el Ing. Francisco Javier González López

Guatemala, junio de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN INYECTOR DE CORRIENTE PARA COMPROBACIÓN DE
VOLTAJES DE PASO Y DE CONTACTO EN UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR**

**ULISES LEONEL XUTUC LÓPEZ
ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ**

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, JUNIO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Armando Cortez Chanchavac
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN INYECTOR DE CORRIENTE PARA COMPROBACIÓN DE VOLTAJES DE PASO Y DE CONTACTO EN UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 4 de mayo de 2011.

Ulises Leonel Xutuc López



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 18 de Noviembre de 2011.

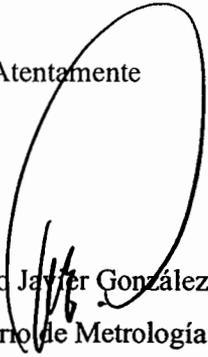
Ingeniero Romeo Neftalí López Orozco
Coordinador Área de Electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Estimado Ingeniero:

Por este medio le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado:
**DISEÑO DE UN INYECTOR DE CORRIENTE PARA COMPROBACIÓN DE
VOLTAJES DE PASO Y DE CONTACTO EN UN SISTEMA DE PUESTA A
TIERRA**, elaborado por el estudiante Ulises Leonel Xutuc López.

El mencionado trabajo llena los requisitos para dar mi aprobación, e indicarle
que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones de la
misma.

Atentamente


Ing. Francisco Javier González López
Jefe de laboratorio de Metrología Eléctrica
Centro de Investigaciones de Ingeniería USAC
Asesor





Ref. EIME 11. 2012
Guatemala, 14 de MARZO 2012.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
DISEÑO DE UN INYECTOR DE CORRIENTE PARA
COMPROBACIÓN DE VOLTAJES DE PASO Y DE CONTACTO
EN UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA, del estudiante Ulises
Leonel Xutuc López, que cumple con los requisitos establecidos para
tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Romeo Neftalí López Orozco
Coordinador de Electrotécnica



RNLO/sro



REF. EIME 13. 2012.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Ulises Leonel Xutuc López titulado: **DISEÑO DE UN INYECTOR DE CORRIENTE PARA COMPROBACIÓN DE VOLTAJES DE PASO Y DE CONTACTO EN UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

GUATEMALA, 20 DE MARZO 2012.





DTG. 294.2012

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN INYECTOR DE CORRIENTE PARA COMPROBACIÓN DE VOLTAJES DE PASO Y DE CONTACTO EN UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**, presentado por el estudiante universitario **Ulises Leonel Xutuc López**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 27 de junio de 2012.

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Creador del cielo y el universo, por darnos bendiciones cada día.
- Mis padres** Alfredo Xutuc Villatoro y Rosario López Piedrasanta, con amor y cariño.
- Mis hermanos** José Alfredo, Ingrid Rosario, Edgar Raúl, Peter Estuardo y su esposa Nancy Elizabeth, por brindarme su cariño y comprensión durante todos estos años.
- Mis sobrinos** Valeria Maribel, Luis Alfredo y Victoria del Rosario, con cariño.
- Mi familia** Por estar siempre pendiente de mí.
- Mis amigos** Por su amistad y apoyo.

AGRADECIMIENTOS A:

- | | |
|---|--|
| Dios | Por darme la vida y fortaleza para terminar mi trabajo de graduación y mi carrera. |
| Mis padres | Por brindarme amor, apoyo, comprensión y cariño durante el transcurso de mi vida y mi carrera. |
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por abrirme sus puertas, y brindarme el conocimiento necesario muy útil en el transcurso de mi vida. |
| Mis profesores | Por su dedicación y las horas invertidas en formar profesionales, útiles para la patria. |
| El pueblo de Guatemala | Por financiar nuestra entidad educativa, para formar profesionales. |

1.2.1.	Voltaje de paso	10
1.2.2.	Voltaje de contacto	12
1.2.3.	Procedimiento general de medición de voltaje de paso y contacto	14
1.2.3.1.	Características del equipo de medición	16
1.2.3.2.	Fuente de alimentación del equipo de medición	16
1.2.3.3.	Fuente de inyección de corriente	16
1.2.3.4.	Electrodos de inyección de corriente	17
1.2.3.5.	Electrodos de medición de voltaje	18
1.2.3.6.	Cables del equipo de medición	19
1.2.3.7.	Inyección de corriente	19
1.2.3.8.	Medición de voltaje de paso.....	20
1.2.3.9.	Medición de voltaje de contacto.....	21
1.2.3.10.	Tensiones erráticas.....	22
1.2.3.11.	Medidores en el mercado	23
1.2.3.12.	Normativa relacionada con el instrumento	24
2.	EL TRANSFORMADOR.....	25
2.1.	Principio de funcionamiento.....	25
2.1.1.	Transformador con núcleo de hierro	26
2.2.	Circuito equivalente del transformador real	29
2.2.1.	Determinación de los parámetros del transformador	31
2.2.1.1.	Ensayo de circuito abierto.....	31
2.2.1.2.	Ensayo de corto circuito.....	33
2.3.	Diagrama fasorial del transformador con carga.....	34
2.4.	Potencia del transformador monofásico ideal.....	36
2.5.	Eficiencia del transformador	37
2.6.	Relación entre la frecuencia y voltaje en un transformador	37

2.7.	Corriente de irrupción	38
2.8.	Regulación de voltaje.....	39
2.9.	El autotransformador	39
2.9.1.	Autotransformador variable de regulación continua (variac).....	43
3.	DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO	47
3.1.	Factores que intervienen en el diseño de un transformador	47
3.1.1.	Especificaciones	47
3.2.	Elementos físicos del diseño.....	49
3.2.1.	Núcleo del transformador	49
3.2.2.	Tipos de núcleo.....	50
3.2.2.1.	Lamina normalizada	51
3.2.3.	Conductor esmaltado de cobre o aluminio	53
3.2.3.1.	Dimensiones de los conductores de cobre.....	56
3.2.3.2.	Resistencia del conductor	58
3.2.4.	Aislamiento.....	59
3.2.4.1.	Clasificación de los aislamientos para transformadores	60
3.2.4.2.	Entre capas	61
3.2.4.2.1.	Papel prensado presspan	62
3.3.	Obtención de datos preliminares para los cálculos.....	62
3.3.1.	Algoritmo de cálculo	63
3.3.1.1.	Área de la ventana	63
3.3.1.2.	Área transversal de la columna central	65
3.3.1.3.	Ancho de la columna central	66
3.3.1.4.	Cálculo de las dimensiones del conductor	72
3.3.1.5.	Cálculo del número de espiras por devanado	73

3.3.1.6.	Comprobación del número de espiras por devanado	73
3.3.1.7.	Cálculos dieléctricos	74
3.3.1.7.1.	Aislamientos menores.....	75
3.3.1.7.2.	Aislamientos mayores.....	77
3.3.1.8.	Comprobación del espacio de ventana.....	77
3.3.1.9.	Longitud del conductor.....	81
3.3.1.10.	Cálculo del peso del conductor	82
3.3.1.11.	Volumen del transformador.....	83
3.4.	Procedimiento de ensamblado	83
3.4.1.	Colocación del carrete en la bobinadora.....	83
3.4.2.	Preparación de las terminales del conductor	84
3.4.3.	Enrollado del devanado primario	84
3.4.4.	Enrollado del devanado secundario.....	85
3.4.5.	Aislamiento y colocación de las chapas.....	86
3.5.	Pruebas posteriores al ensamblado	87
3.6.	Acabados y fijación.....	87
4.	SISTEMA DE MEDICIÓN	89
4.1.	Conceptos básicos de metrología	89
4.2.	Propiedades generales de los instrumentos de medida	91
4.2.1.	Respuesta o curva de calibración	91
4.2.2.	Intervalo nominal, amplitud nominal y valor nominal	91
4.2.3.	Incertidumbre instrumental, exactitud, respetabilidad, resolución, sensibilidad, movilidad, zona muerta e histéresis.....	92
4.2.4.	Estabilidad y deriva.....	96

4.2.5.	Velocidad de muestreo, ancho de banda, memoria, impedancia de entrada, discreción y tiempo de respuesta.	96
4.2.6.	Error de un instrumento de medida	97
4.3.	Especificaciones de un instrumento de medida	98
4.3.1.	Interpretación de especificaciones técnicas	99
4.4.	Calibración, verificación, ensayo y certificación	100
4.5.	Instrumentos de medición digital.....	101
4.5.1.	Voltímetro digital de corriente alterna.....	103
4.5.1.1.	Funcionamiento de un voltímetro digital tipo rampa	103
4.5.1.2.	Convertidor analógico digital TC7107A.....	105
4.5.1.2.1.	Especificaciones máximas absolutas.....	106
4.5.1.3.	Convertidor de corriente alterna a corriente directa AD636.....	106
4.5.1.3.1.	Especificaciones absolutas máximas.....	111
4.6.	Amperímetro de corriente alterna	114
5.	DISEÑO GENERAL DEL INSTRUMENTO	117
5.1.	Diseño del sistema de inyección de corriente.....	117
5.1.1.	Determinación de las especificaciones del <i>variac</i>	123
5.1.2.	Diseño del transformador T1 5kVA	124
5.1.2.1.	Datos preliminares para los cálculos.....	125
5.1.2.2.	Cálculo del área del producto.....	125
5.1.2.3.	Densidad de corriente del conductor.....	128
5.1.2.4.	Cálculo de las dimensiones del conductor ...	128

5.1.2.5.	Cálculo del número de espiras por devanado	129
5.1.2.6.	Cálculo de voltios por espira	130
5.1.2.7.	Cálculo de los aislamientos	130
5.1.2.8.	Cálculo de la longitud total del conductor	135
5.1.2.9.	Cálculo del peso del conductor (ver página 85)	136
5.1.3.	Diseño del transformador con múltiples derivaciones (T2)	139
5.1.3.1.	Datos del transformador para los cálculos ...	140
5.1.3.2.	Cálculo del ancho de la columna central	141
5.1.3.3.	Cálculo de la densidad de corriente del conductor	143
5.1.3.4.	Cálculo de las dimensiones del conductor ..	143
5.1.3.5.	Cálculo del número de espiras por devanado	145
5.1.3.6.	Cálculo del número de voltios por espiras ...	145
5.1.3.7.	Cálculo de los aislamientos	146
5.1.3.8.	Determinación de la longitud del conductor	150
5.1.3.9.	Cálculo del peso del conductor (ver página 85)	151
5.2.	Diseño del sistema de medición	154
5.2.1.	Diseño del voltímetro digital de corriente alterna	154
5.2.2.	Diseño del amperímetro digital de corriente alterna	157
5.3.	Sistema de protección	158
5.3.1.	Seccionadores o interruptores	160
5.3.2.	Disyuntor termomagnético	160
5.3.3.	Contactador electromagnético	161

5.3.4.	Disyuntor motor magnético	162
5.3.4.1.	Circuito de arranque del instrumento de medición	163
5.4.	Panel de control y visualización de datos	167
5.4.1.	Pulsadores y visualizadores.....	168
5.4.2.	Conmutadores tipo leva	168
5.4.3.	Conexionado y cableado.....	169
5.4.4.	Disposición final del panel.....	171
5.5.	Montaje de los componentes del instrumento.....	171
5.6.	Caja del instrumento	171
5.7.	Seguridad de las máquinas.....	174
5.8.	Evaluación de costos del instrumento.....	176
CONCLUSIONES		185
RECOMENDACIONES.....		187
BIBLIOGRAFÍA.....		189
ANEXO		193

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Disposición de tierra radial, un electrodo	2
2.	Disposición en anillo de la red de tierra.....	3
3.	Distribución de los electrodos método de una capa	8
4.	Esquema de medición de resistencia para una puesta a tierra.....	9
5.	Tensión de paso cerca de una estructura conectada a tierra.....	11
6.	Tensión de contacto a una estructura conectada a tierra.....	12
7.	Electrodos usados para la medición del voltaje de paso y contacto	18
8.	Colocación de los electrodos para la medición de voltaje de paso y contacto.....	20
9.	Esquema de conexión del aparato y los electrodos	22
10.	Funcionamiento del transformador.....	26
11.	Circuito equivalente de un transformador con carga	30
12.	Conexión del transformador para el ensayo de circuito abierto	31
13.	Conexión de los medidores para el ensayo de circuito abierto.	33
14.	Conexión de los medidores para el ensayo de corto circuito	33
15.	Diagrama fasorial de un transformador con carga	35
16.	Autotransformador elevador.....	40
17.	Autotransformador variable de regulación continua (variac)	44
18.	Circuito eléctrico de un variac	45
19.	Núcleo magnético para transformador monofásico tipo columnas.....	51
20.	Núcleo magnético para transformador monofásico tipo acorazado	51
21.	Chapa normalizada E/I de hierro al silicio para transformador tipo acorazado	51

22.	Núcleo arrollado (tipo Wescor).....	52
23.	Cable transpuesto con pletinas rectangulares	58
24.	Núcleo laminado del transformador	64
25.	Aislamiento en un transformador	74
26.	Vista de la sección de espacio de ventana	79
27.	Corte transversal del los debandados primario y secundario con sus aislamientos	82
28.	Sistema de medida, control y adquisición de datos de temperatura ..	102
29.	Diagrama de bloques de un voltímetro digital.....	103
30.	Conversión de voltaje a tiempo mediante compuerta con pulsos de reloj.....	104
31.	Diagrama de bloques de un voltímetro digital tipo rampa	105
32.	Configuración de pines del convertidor analógico digital TC7106	110
33.	Configuración de pines AD636 encapsulado SBDIP	111
34.	Resistencia en derivación para alta corriente	115
35.	Diagrama de bloques del instrumento	117
36.	Elementos del sistema de inyección de corriente	117
37.	Circuito del sistema de inyección de corriente.....	120
38.	Corriente en las ramas primario y secundario del los transformadores conectados a una resistencia de $R_t = 60\Omega$	122
39.	Chapa normalizada E/I240	126
40.	Chapa normalizada E/I510	142
41.	Alimentación de corriente directa 9V	155
42.	Circuito del voltímetro digital de 3 ½ dígitos con el a/d TC7107	156
43.	Etapa inicial del amperímetro de AC de 0-50A	158
44.	Circuito de arranque del instrumento (potencia)	164
45.	Circuito de control del instrumento.....	165
46.	Disposición aproximada del panel frontal	170
47.	Caja metálica del instrumento.....	172

48.	Disposición interna aproximada de los transformadores.....	174
-----	--	-----

TABLAS

I.	Valores sugeridos de resistencia por la norma IEC 60364-4-442, ANSI/IEEE 80, NTC 2050 y NTC 4552	5
II.	Valores de resistividad para terrenos comunes	6
III.	Efectos de la corriente eléctrica en el ser humano.....	10
IV.	Máxima tensión de contacto para un ser humano.....	14
V.	Eficiencias mínimas permitidas de los transformadores de distribución (en porcentaje).....	38
VI.	Presencia del silicio en el hierro.....	50
VII.	Algunas propiedades del cobre y aluminio.....	54
VIII.	Características del alambre de cobre esmaltado	55
IX.	Dimensiones del alambre magneto cuadrado	56
X.	Dimensiones normalizadas y sección neta de las pletinas de cobre desnudas.....	57
XI.	Propiedades de algunos materiales aislantes	59
XII.	Clasificación térmica de los aislamientos sólidos.....	60
XIII.	Tensión de perforación para presspan papel clase térmica B	62
XIV.	Tensión de perforación para presspan cartón clase térmica B	63
XV.	Tensiones nominales preferentes	77
XVI.	Distancias mínimas para aislamientos menores	78
XVII.	Aumento del diámetro debido al aislamiento en hilos conductores....	80
XVIII.	Aumento del lado de las barras de cobre debido al aislamiento	81
XIX.	Características eléctricas del TC7107.....	107
XX.	Descripción de los pines del a/d TC7106-TC6107	108
XXI.	Especificación del circuito integrado AD636 (A 25 °C, +Vs=3V y -Vs=-5 V)	112

XXII.	Descripción de las funciones de los pines AD636	114
XXIII.	Voltaje, corriente, resistencia de salida del inyector	124
XXIV.	Especificaciones del autotransformador requeridas para el instrumento.	123
XXV.	Dimensiones del núcleo normalizado E/I 300	126
XXVI.	Resumen de los resultados de los cálculos T 5kVA	137
XXVII.	Voltajes de salida y relación de transformación de T2.....	140
XXVIII.	Dimensiones del núcleo normalizado E/I 510	142
XXIX.	Resumen de los resultados de los cálculos	152
XXX.	Simbología utilizada en los esquemas.....	166
XXXI.	Especificaciones técnicas del instrumento de medición	175
XXXII.	Cotización del autotransformador	176
XXXIII.	Costos de materiales para el transformador de 5kVA	177
XXXIV.	Costo de materiales para el transformador de 45kVA	178
XXXV.	Costos de los elementos del circuito de arranque y protecciones ...	179
XXXVI.	Elementos de medición y ensamble	180
XXXVII.	Costo aproximado de la caja	180
XXXVIII.	Costo total en materiales	181
XXXIX.	Costo total del instrumento	182

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
av	<i>Average</i> (promedio)
CA	Corriente alterna
DVM	Digital <i>voltmeter</i> (voltímetro digital)
\$	Dólar estadounidense
STD	Estándar
Hz	Hertzio
kA	Kilo amperios
kg	Kilogramo
kVA	Kilo voltios amperios
MPC	Medidor de voltaje de paso y contacto
m	Metro
MCM	Milésima circular multiplicada por mil
mA	Miliamperio
Ω	Ohmio
Q	Quetzales
RMS	<i>Root mean square</i> (raíz cuadrada media)
V	Voltio
W	Watt (vatio)
Wb	Weber

GLOSARIO

Algoritmo	Conjunto ordenado y finito de operaciones, que permite hallar la solución a un problema.
ANSI	American National Standards Institute, instituto dedicado al desarrollo de normas, para el comercio y las comunicaciones.
Bucle	Camino de circulación de una corriente eléctrica, también conocido como lazo en un circuito eléctrico.
CEI	La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI o <i>IEC</i> por sus siglas en inglés <i>International Electrotechnical Commission</i>) es una organización de normalización en los campos eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas.
Certificado	Documento empleado para constatar la adecuación de un objeto a una norma.
Copperweld	Varilla de acero cubierta con una capa externa de cobre. La capa de cobre brinda protección contra la corrosión del terreno, y el elemento de acero le brinda rigidez al conjunto.

Corriente de falla	Corriente que se produce cuando se genera una falla en un circuito eléctrico o sistema eléctrico de potencia, debido a fenómenos como pérdida de aislamiento, descargas eléctricas, cortos circuitos, etc.
Homologación	Verificación del cumplimiento de ciertas especificaciones o características por una autoridad oficial.
IEEE	Acrónimo de <i>Institute of Electric and Electronics Engineers, Inc.</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. Se encarga de definir estándares para las comunicaciones, la industria eléctrica, las aplicaciones biomédicas o la electrónica profesional y de consumo.
LED	<i>Light emission diode</i> (diodo emisor de luz)
LCD	<i>Liquid crystal display</i> (pantalla de cristal líquido)
MW	<i>Magnetic wire</i> (Alambre magnético)
NBR	Norma Brasileña.
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i> (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos) es una asociación industrial norteamericana responsable de numerosos estándares industriales para encapsulados de equipamientos eléctricos.
NTC	Norma técnica colombiana.

Proceso de rolado	Consiste en pasar un material por unos rodillos con una forma determinada, para que al aplicar presión, el material metálico adquiera la forma que necesita.
Prototipo	Cualquier tipo de máquina en pruebas, o un objeto diseñado para una demostración de cualquier tipo.
RETIE	Reglamento técnico de instalaciones eléctricas, fija las condiciones técnicas que garanticen la seguridad en los procesos de generación, transmisión, transformación, distribución y utilización de la energía eléctrica en la república de Colombia.
Telurómetro	Instrumento usado para medir la resistencia de una puesta a tierra y la resistividad por el método Wenner.
Tensiones transferidas	Es un caso especial de tensión de contacto, donde un potencial es conducido hasta un punto remoto respecto de la subestación o de una puesta a tierra.
Toroidal	Relativo a una superficie de revolución engendrada por una curva cerrada y plana que gira alrededor de una recta fija de su plano, que no la corta.
UNE	Una Norma Española, son un conjunto de normas tecnológicas creadas por los Comités Técnicos de Normalización.

RESUMEN

Para casi todos son conocidos los efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano, que pueden ir desde un hormigueo en el punto de contacto, hasta la muerte causada por fibrilación ventricular.

Una de las pruebas exigidas por organizaciones nacionales e internacionales en una subestación es la medición de los voltajes de paso y contacto, estos voltajes algunas veces pueden causar daños a una persona que transita en una subestación o cerca de una subestación.

La medición de voltaje de paso y contacto se realiza por medio de un instrumento que inyecta una corriente en la tierra de magnitud menor a la de una falla real; de esta manera se simula el estado peligroso al que se expone una persona en una subestación o cerca de una subestación cuando ocurre una falla o una descarga atmosférica. Después se miden los voltajes a través de dos pesas de acero y se comparan con voltajes de paso y contacto máximos permitidos por una persona.

Para esta prueba es necesario contar con instrumentos apropiados, de bajo costo, y características específicas, que simplifiquen y simulen a una persona en reposo o caminando en una subestación o cerca de una subestación sin necesidad de ponerla en riesgo.

Con el diseño de un inyector de corriente para comprobación de voltajes de paso y contacto se pretende ver si es factible su construcción y dejar la pauta abierta para la construcción de un prototipo, en laboratorio de Metrología

de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

OBJETIVOS

General

Diseñar un inyector de corriente para comprobación de voltajes de paso y contacto en un sistema de puesta a tierra.

Específicos

1. Desarrollar una descripción de la norma relacionada, características y formas de uso del inyector de corriente para comprobación de voltajes de paso y de contacto.
2. Determinar los factores que intervienen en el diseño de un transformador.
3. Realizar, describir y explicar los elementos que forman el instrumento de medición por medio de circuitos eléctricos y diagramas de bloques.
4. Realizar un presupuesto y cálculo de materiales para la construcción del instrumento de medición a diseñar.
5. Sugerir nuevos estudios en Guatemala, de metodología de fabricación de instrumentación de medición, que solo se realiza en otros países.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo consiste en la presentación del diseño de un inyector de corriente para comprobación de voltajes de paso y de contacto en un sistema de puesta a tierra.

Desde la antigüedad se han observado y estudiado los fenómenos eléctricos, observaciones que se han ido documentando en el transcurso de la historia; y que en la actualidad han llegado a evolucionar enormemente.

En el primer capítulo del presente trabajo de graduación se da una descripción de diseño de las redes de tierra sin ahondar demasiado en el tema, se continúa con una descripción de la norma relacionada con la seguridad de las personas en una subestación.

En el segundo capítulo se analiza el transformador monofásico con carga, por medio del circuito equivalente del transformador y el diagrama vectorial con carga. Se usa el modelo del transformador ideal para simplificar algunos cálculos.

En los últimos tres capítulos se explica el algoritmo de diseño y el proceso de ensablado para un transformador monofásico. Se calculan sus protecciones, calibre del alambre y tipos de aislamiento.

Se describen las características y funcionamiento de los elementos de los sistemas de inyección, sistema de medición, sistema de protección y control, tales como el autotransformador variable de regulación continua, voltímetro,

amperímetro, elementos de señalización, luces indicadores, botones de control, interruptor de levas, bornes y elementos de cableado.

Por último se da una descripción de la clase de aislamiento usada en la caja del instrumento, con la inclusión de algunas tablas, diagramas eléctricos y figuras. Se realiza un cálculo aproximado de los costos de materiales usados en el instrumento.

Cada vez ha ido en aumento el manejo de mayores masas de energía y mayores voltajes para transferirla. A su vez se han mejorado las técnicas de protección para las personas que trabajan con voltajes y corrientes elevadas.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1. Puesta a tierra

Uno de los aspectos más importantes para la seguridad de las personas que trabajan en una subestación, es el contar con una red de tierras diseñada correctamente, de tal forma que el personal que transita en el área no se vea sometida a voltajes y corrientes peligrosas que pongan en riesgo su vida, además de la protección brindada al equipo localizado sobre la red de tierras. Estas tensiones peligrosas se pueden dar debido a sobretensiones por descargas atmosféricas, por operación de interruptores o por corrientes elevadas de corto circuito, debidas a alguna falla en la subestación o fuera de la subestación.

1.1.1. Disposiciones básicas de redes de tierra

Entre las disposiciones más importantes se tiene:

- Radial
- En anillo
- De malla

1.1.1.1. Disposición radial

Este sistema es el más económico pero el menos seguro, debido a que pueden existir gradientes de potencial elevados. Es muy utilizado para instalaciones donde existan corrientes de tierra bajas.

El sistema consiste en varillas conductoras enterradas y conectadas mediante conductores apropiados al equipo a proteger.

La resistencia del terreno se calcula por medio de la expresión

$$R_T = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right)$$

Donde:

R_T = resistencia del terreno en Ω

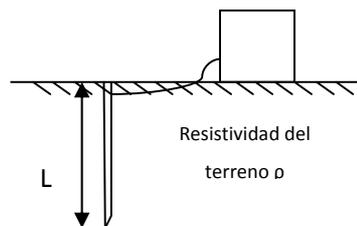
ρ = resistividad del terreno en $\Omega\text{-cm}$

L = longitud del electrodo en cm

d = diámetro de la barrilla cm

Este sistema también se puede trabajar con más de un electrodo, para cuyo cálculo se deberán usar expresiones más elaboradas.

Figura 1. **Disposición de tierra radial, un electrodo**



Fuente: elaboración propia.

1.1.1.2. **Disposición de anillo**

Consiste en instalar un anillo alrededor de los elementos a proteger. El anillo puede ser cuadrado o circular, generalmente se usa cable de cobre de

1000 MCM en el cual se conectan los aparatos con cable 4/0 AWG. Algunas veces es necesario instalar varias varillas enterradas a cierta distancia bajo el anillo, para disminuir la resistencia de tierra. Esta disposición se utiliza en corrientes de corto circuito intermedias.

La resistencia de tierra en esta configuración se calcula con la expresión:

$$R_t = \frac{\rho}{\pi D} \left(\ln \frac{4D}{d} + \frac{4D}{H} \right)$$

Donde:

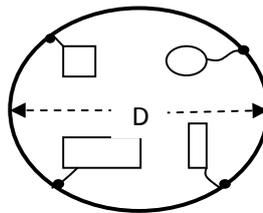
ρ = resistividad del terreno

d = diámetro del cable del anillo (1000 MCM)

D = diámetro del anillo en m

H = profundidad del anillo en cm

Figura 2. **Disposición en anillo de la red de tierra**



Fuente: elaboración propia.

1.1.1.3. **Disposición de malla**

Consiste en una retícula formada por cable generalmente, de calibre 4/0 AWG, la cual se conecta a electrodos de *copperweld* que se encuentran a mayor profundidad. Este sistema se utiliza en subestaciones donde existen

corrientes de falla muy grandes y la protección del equipo debe ser mejor; luego, por tener más elementos, es más caro que los anteriores.

La profundidad de la retícula puede estar entre 20 y 120 cm del suelo.

1.1.2. Elementos de la red de tierra

La red de tierra esta formada por varios elementos; juntos forman el sistema de protección de aparatos y personas.

1.1.2.1. Conductores

Generalmente se utiliza cable de cobre por su resistencia a la corrosión y de un calibre 4/0, se escoge este por razones mecánicas, pero puede usarse otro calibre menor, dependiendo de las corrientes de falla.

1.1.2.2. Electrodo

Son varillas de hierro enfundadas en una capa de cobre. Se acostumbra colocar los electrodos a cada tercera conexión y se aumenta la cantidad conforme se aumenta la densidad de carga en la subestación.

1.1.2.3. Conectores

Son elementos que sirven para ensamblar la red de tierras, además de unir los neutros de los aparatos. Los conectores de los electrodos con la retícula pueden ser atornillados a presión o soldados. Se aconseja unir las conexiones que van bajo la tierra mediante soldadura exotérmica o algún conector certificado, como lo determina la norma guía IEEE 837 o la norma NTC 2206.

1.1.3. Valores de resistencia de una red de tierra

En un buen diseño de puesta a tierra se tiene que medir valores pequeños de resistencia de tierra, para mantener los voltajes de paso y contacto a niveles bajos.

Tabla I. **Valores sugeridos de resistencia por la norma IEC 60364-4-442, ANSI/IEEE 80, NTC 2050 y NTC 4552**

APLICACIÓN	VALORES MÁXIMOS DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA
Estructuras de líneas de transmisión o torrecillas metálicas de distribución con cable de guarda	20 Ω
Subestaciones de alta y extra alta tensión.	1 Ω
Subestaciones de media tensión.	10 Ω
Protección contra rayos.	10 Ω
Neutro de acometida en baja tensión.	25 Ω

Fuente: Ministerio de Minas y Energía, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, p. 99.

1.1.4. Mediciones en una puesta a tierra

En una red de tierras deberá de realizarse distintas mediciones para garantizar que los valores obtenidos en el diseño correspondan a los valores reales de la instalación. Entre las más importantes están las siguientes:

- Medición de la resistividad del terreno
- Medición de la resistencia de tierra
- Medición de voltajes de paso
- Medición de voltaje de contacto

1.1.4.1. Medición de la resistividad del terreno

La resistividad eléctrica del suelo describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él.

Para la medición de la resistividad del terreno debe de tomarse en cuenta la humedad del terreno, temperatura, profundidad de los electrodos, composición del terreno, además de comprobar la homogeneidad del terreno. Se debe tomar varias mediciones en distintos lugares y a distintas profundidades. La medición preferiblemente debe realizarse en la época más seca del año.

Tabla II. **Valores de resistividad para terrenos comunes**

Tipo de terreno	Resistividad Ω -m
Agua de mar	1
Tierra orgánica mojada	10
Tierra húmeda	100
Tierra seca	1000
Concreto	10000
Roca	100000

Fuente: MARTÍN, José, Diseño de subestaciones eléctricas, p. 246

La tabla II muestra los valores medios de la resistividad de algunos terrenos; sin embargo, para el diseño real no se consideran estos valores, más bien se miden con aparatos especiales para tal efecto.

1.1.4.1.1. Método de una capa o método Wenner

Consiste en clavar cuatro electrodos (ver figura 3) con una separación que en la práctica suele ser diez veces la profundidad del electrodo enterrado; después se inyecta una corriente con el aparato de medición en los electrodos exteriores y se mide la caída de voltaje en los electrodos internos.

La resistividad se calcula ingresando los datos en la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{4\pi Ra}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4l^2}} - \frac{a}{\sqrt{4a^2 + 4l^2}}}$$

Donde:

ρ = resistividad en ohmios por metro

a = separación entre los electrodos en metros

l = profundidad de la varilla en metros

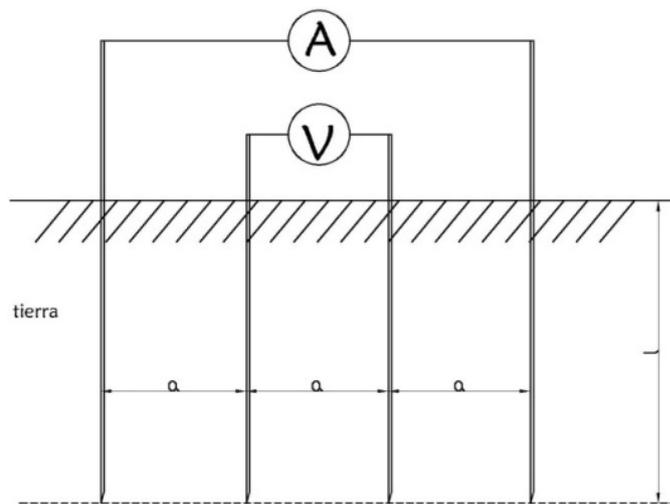
R = cociente de V/I

1.1.4.2. Medición de la resistencia de tierra

La medición de resistencia a tierra se debe realizar antes de poner en funcionamiento la red de tierra. Se puede usar el método de caída de tensión que consiste en colocar dos electrodos auxiliares, uno de tensión y otro de corriente, como se muestra en la figura 4. El electrodo corriente se coloca aproximadamente a 6.5 veces la longitud de la diagonal máxima del sistema de puesta a tierra a medir. El electrodo de tensión se coloca a una distancia de 61.8 % de la distancia del electrodo de corriente, para lograr una precisión de

95% en el cálculo del valor de la resistencia (según la IEEE 81). Después se inyecta con el telurómetro una corriente alterna de frecuencia mayor a 50 Hz y se mide la tensión resultante entre el electrodo común y el electrodo de tensión.

Figura 3. **Distribución de los electrodos método de una capa**

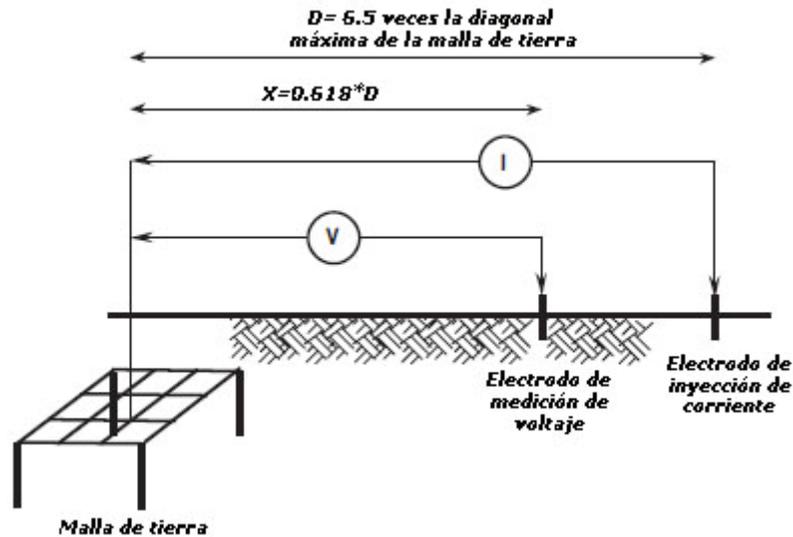


Fuente: MARTÍN, José, Diseño de subestaciones eléctricas, p. 247.

La resistencia de tierra es el valor del cociente entre el voltaje medido en el electrodo central y la corriente inyectada. El telurómetro indica la resistencia de tierra directamente. La disposición de los electrodos aparece en la figura 4.

Cuando existen descargas atmosféricas o fallas, existen corrientes a tierra muy grande, que provocan elevados gradientes de voltaje cerca de los puntos de contacto a tierra; si algún ser vivo hace contacto con algún punto en el cual sobrepase el límite tolerable por su organismo puede provocar fibrilación muscular y su caída; o provocarle la muerte si esta corriente elevada pasa por órganos vitales. Los efectos de la corriente en el cuerpo dependen de la magnitud, tiempo y frecuencia.

Figura 4. Esquema de medición de resistencia para una puesta a tierra



Fuente: Ministerio de Minas y Energía, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, p. 100.

1.2. Límites máximos de voltaje y corriente tolerados por el cuerpo humano

Según investigaciones del Dr. Charles Dalziel, una ecuación empírica que liga la intensidad de corriente tolerable con el tiempo que el organismo la puede soportar y que aparece en la norma IEEE-80 establece que para un cuerpo de 50 kg.

$$I_c = \frac{0.116}{\sqrt{t}} \text{ (A)}$$

y para una persona de 70 kg:

$$I_c = \frac{0.157}{\sqrt{t}} \text{ (A)}$$

Donde:

I_c = valor efectivo de la corriente que soporta el ser humano en amperios

t = duración del choque eléctrico en segundos

Es necesario tomar en cuenta la forma en que el ser humano puede hacer contacto con las superficies a diferentes potenciales.

En la tabla III se observa el efecto que puede causar una corriente a través del cuerpo humano.

1.2.1. Voltaje de paso

Es la diferencia de potencial que recibe una persona al estar parada sobre un terreno con los pies separados una distancia de un metro, debido a la circulación de corriente de falla.

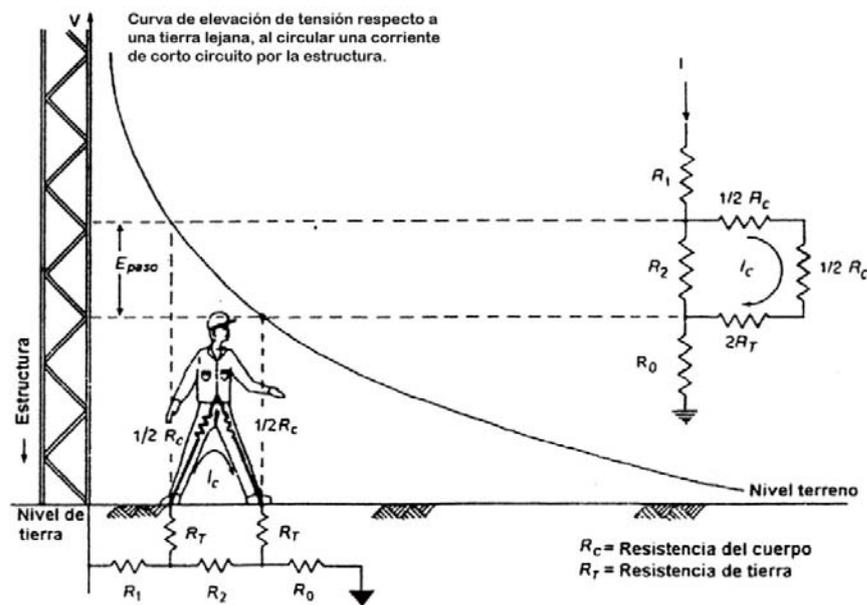
Tabla III. **Efectos de la corriente eléctrica en el ser humano**

Magnitud de corriente (mA)	Efecto
1 a 2	Es el umbral de percepción (hormigueo)
2 a 9	Contracción muscular involuntaria, pero se puede soltar los objetos
9 a 25	Dolor, no se pueden soltar los objetos
25 a 60	Se dificulta la respiración. El valor máximo que puede soportar un corazón sano
60 a 100	Inicia fibrilación cardíaca
mayor a 100	Peligro de muerte

Fuente: MARTIN, José, Diseño de subestaciones eléctricas, p. 240.

En la figura 5 se presenta a una persona que es sometida a una corriente que circula a través de sus piernas que están separadas 1m.

Figura 5. Tensión de paso cerca de una estructura conectada a tierra



Fuente: MARTÍN, José, Diseño de subestaciones eléctricas, p. 241.

Al observar el circuito en el lado derecho de la figura 5, se puede ver que el voltaje de paso para una persona de 50 kg es:

$$E_{paso} = (R_C + 2R_T)I_c = (1000 + 6\rho_S) \frac{0.116}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0.696\rho_S}{\sqrt{t}} [V]$$

Donde:

E_{paso} = voltaje o tensión de paso

R_c = resistencia del cuerpo que incluye la resistencia de brazos, tronco y piernas, que en este caso es de 1000Ω .

R_T = resistencia del terreno y zapatos, que para usos prácticos se toma tres veces la resistividad del terreno.

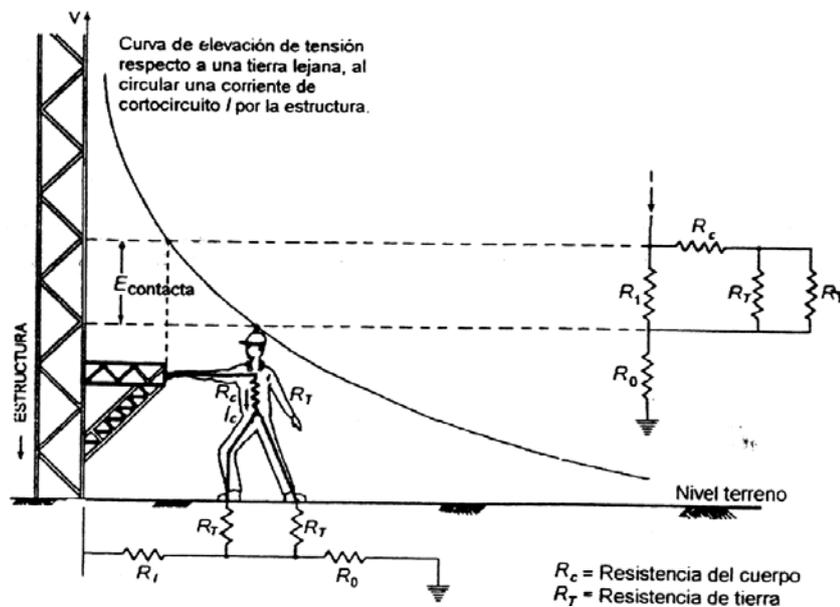
ρ_s = resistividad del suelo en $\Omega\text{-m}$, ver tabla III.

I_c = valor efectivo de la corriente que soporta el ser humano en amperios.

1.2.2. Voltaje de contacto

Es la diferencia de potencial que recibe una persona al tocar una estructura que está sometida a corrientes de falla; esta diferencia de potencial se mide entre la base de la estructura y un metro de distancia sobre el suelo.

Figura 6. Tensión de contacto a una estructura conectada a tierra



Fuente: MARTÍN, José, Diseño de subestaciones eléctricas, p. 242.

El voltaje de contacto se calcula con el producto de la corriente que circula a través de la resistencia del cuerpo, más la resistencia del terreno y zapatos, (ver figura 6). Dando como resultado la siguiente expresión:

$$E_{\text{contacto}} = (R_c + R_T/2) I_c = (1000 + 1.5\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0.174\rho_s}{\sqrt{t}} [V]$$

Donde:

E_{contacto} = voltaje o tensión de contacto

R_c = resistencia del cuerpo que incluye la resistencia de brazos, tronco y piernas, que en este caso es de 1000 Ω .

R_T = resistencia del terreno y zapatos, que para usos prácticos se toma tres veces la resistividad del terreno.

ρ_s = resistividad del suelo, ver tabla III.

I_c = valor efectivo de la corriente que soporta el ser humano en amperios.

Si la resistencia del cuerpo es baja, la tensión aplicada ocasionará la circulación de una corriente elevada muy peligrosa. El valor límite de la tensión de seguridad debe ser tal, que aplicada al cuerpo humano no supere el valor de corriente que ponga en riesgo al individuo.

La máxima tensión de contacto aplicada al ser humano (o a una resistencia equivalente de 1000 Ω), está dada en función del tiempo de liberación de la falla, de la resistividad del suelo y de la corriente de falla y no debe de superar los valores dados en la tabla IV.

La tabla IV toma como referencia una resistencia o impedancia promedio del cuerpo humano de 1000 Ω ; sin embargo la impedancia del cuerpo puede

variar por factores tales como superficie de contacto, presión de contacto, dureza de la epidermis, humedad del cuerpo y piel, temperatura del cuerpo, etc.

Tabla IV. **Máxima tensión de contacto para un ser humano**

Tiempo de despeje de la falla	Máxima tensión de contacto admisible (rms c.a.) según IEC para 95% de la población. (Público en general)	Máxima tensión de contacto admisible (rms c.a.) según IEEE para 50 kg (Ocupacional)
Mayor a dos segundos	50 voltios	82 voltios
Un Segundo	55 voltios	116 voltios
700 milisegundos	70 voltios	138 voltios
500 milisegundos	80 voltios	164 voltios
400 milisegundos	130 voltios	183 voltios
300 milisegundos	200 voltios	211 voltios
200 milisegundos	270 voltios	259 voltios
150 milisegundos	300 voltios	299 voltios
100 milisegundos	320 voltios	366 voltios
40 milisegundos	500 voltios	518 voltios

Fuente: Ministerio de Minas y Energía, Reglamento Técnico de instalaciones eléctricas, p. 93.

1.2.3. Procedimiento general de medición de voltaje de paso y contacto

El diseño de puesta a tierra debe garantizar que no existan gradientes de potencial que excedan los límites permitidos por las normas internacionales, ni umbral de soportabilidad del ser humano. El diseñador de sistema de tierra deberá comprobar su diseño con algún método de cálculo reconocido.

En el reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE se da una descripción de los requerimientos para una correcta puesta a tierra, y la importancia de mantener los voltajes de paso y contacto en sus límites.

Las tensiones de paso y contacto deberán comprobarse tanto en la subestación, como en los lugares aledaños que estén a menos de 20 metros. En estructuras o postes deben comprobarse a un metro de estas. Para la medición se deben seguir los lineamientos de la norma, adoptados por la IEEE 81.2 u otra reconocida como la IEC 61936-1.

En la metodología de medición de voltaje de paso y contacto, se simula la inyección de la corriente de falla, en una proporción menor, inyectando corriente primaria entre 0 y 50 amperios, 60 Hz entre un punto de la malla de tierra de la subestación (vea figura 8) y un punto alejado de la red de tierra (electrodo de tierra remota).

Se miden los voltajes sobre dos bases que simulan los pies de una persona parada sobre el suelo (ver figura 7). Esta medición se corrige en función de la corriente de corto circuito real de la subestación (ver página 22), los valores obtenidos se comparan con los voltajes de paso y contactos permitidos por la norma y se determina si la red de tierra es segura o no.

Antes de realizar la medición deben tomarse todas las medidas de precaución, como colocación de mallas, cintas que eviten el paso de cualquier persona ya que cerca de las partes energizadas pueden existir gradientes de potencial de hasta 600 V que podrían poner en peligro a cualquier persona o animal que transite por el lugar; además, es recomendable que el personal que opere el equipo tenga buen aislamiento respecto del suelo.

Si bien los límites de paso y contacto son excedidos, se debe revisar el diseño de la red de tierras. Estas revisiones pueden incluir la reducción de los espacios entre las varillas conductoras, agregar más barras de tierra, etc.

1.2.3.1. Características del equipo de medición

Se emplean fuentes de alimentación de potencia adecuada para simular la falla, de tal forma que la corriente inyectada sea suficientemente alta; además debe de emplearse el método de inversión de polaridad para que la medición no quede falseada con corrientes parásitas que podrían circular en el terreno. Se procurará que la corriente inyectada sea al menos 1% de la corriente a la cual ha sido diseñada el sistema de tierra, y preferentemente, no menor a 50 amperios para subestaciones de alto voltaje y no menor a 5 amperios para subestaciones de media tensión.

1.2.3.2. Fuente de alimentación del equipo de medición

La energía del equipo se puede tomar de la red con un alimentador de 200 voltios o 440 voltios monofásicos; la potencia debe ser mayor a la potencia que se usa en la prueba, debido a las pérdidas en los transformadores y demás dispositivos. Para pruebas en baja tensión se usan alimentadores de 7 kVA, para media tensión alimentadores de 12 kVA o 25 kVA y para pruebas en alta tensión, alimentadores de 65 kVA o más kVA.

1.2.3.3. Fuente de inyección de corriente

Existen distintos equipos de prueba en el mercado con potencias nominales desde 5kVA hasta 60kVA, dependiendo de la corriente y voltaje de salida. Se requiere corrientes mínimas de 5A y voltajes entre 400 V y 600 V para sistemas de tierra de media tensión. Un mínimo 50 A con una variación de

voltaje entre 600 V y 1000 V para sistemas de tierra de alta tensión, debido a las resistencias bajas de tierra y corriente de falla elevada que se manejan. Si la tensión de prueba es muy baja se requiere instalar mayor cantidad de electrodos en la prueba para disminuir la resistencia del lazo de corriente entre el electrodo auxiliar y la malla de tierra, y así aumentar de esta forma la corriente de prueba.

Los transformadores del instrumento se construyen con devanados independientes para aislar la corriente de prueba con la referencia de tierra local, además de permitir la inversión de polaridad 180° .

1.2.3.4. Electrodo de inyección de corriente

Los electrodos de inyección de corriente deberán colocarse (ver figura 4) a una longitud de 6.5 veces la diagonal de la malla donde se van a medir los voltajes, que aproximadamente es de 30 a 100 metros en el sistema de tierra de media tensión, y de 2000 metros en sistema de tierra de alta tensión.

El electrodo de tierra remota debe tener baja resistencia, para no limitar al instrumento de medición. El reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE recomienda para subestaciones de media tensión, resistencia de tierra menor a 10Ω y que la resistencia del lazo de corriente (resistencia de la red de tierra, más la resistencia de electrodos auxiliares, más la resistencia del terreno) sea baja, para que con voltajes entre 400 V y 600 V exista una circulación de corriente mínima de prueba de 5 amperios.

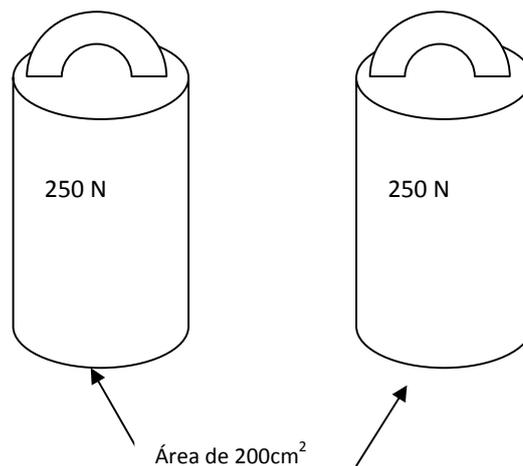
Para subestaciones de alta tensión y extra alta tensión se recomienda una resistencia de tierra menor a 1 Ohm, una resistencia de bucle baja, para que con voltajes de prueba entre 600V y 1000 V exista una corriente de al menos 50 amperios, que se establece como corriente mínima para la prueba.

Si no se alcanzan los valores de resistencia recomendados puede requerirse la instalación de más electrodos conectados o humedecerse el terreno.

1.2.3.5. Electrodo de medición de voltaje

Para efectos de diseño se deben calcular los voltajes de paso, voltaje de contacto y tensiones transferidas, tomando como valor la resistencia del cuerpo humano de 1000 ohm y sus pies como dos electrodos circulares de acero de 200 cm² (16 cm de diámetro). Se debe aplicar una fuerza vertical hacia abajo de 250N (aproximadamente de 25 kg) que establece la norma IEEE Std 80-1986 como área del pie promedio de un adulto. Los electrodos se pueden cubrir con una capa de material conductor resistente a la corrosión.

Figura 7. **Electrodos usados para la medición del voltaje de paso y contacto**



Fuente: elaboración propia.

1.2.3.6. Cables del equipo de medición

Deben elegirse de tal forma que la capacidad de corriente sea la apropiada, la caída de voltaje sea mínima y el aislamiento sean los adecuados. Tomar en cuenta que la longitud debe incluir la distancia de separación del equipo y la tierra a medir que será como mínimo de 20 m más la distancia entre electrodos de 100m. Estas distancias pueden aumentarse o disminuirse según la capacidad del instrumento manteniendo siempre la seguridad de la persona.

Deberán tener en sus extremos terminales apropiados de conexión y sujeción, según corresponda su funcionamiento.

1.2.3.7. Inyección de corriente

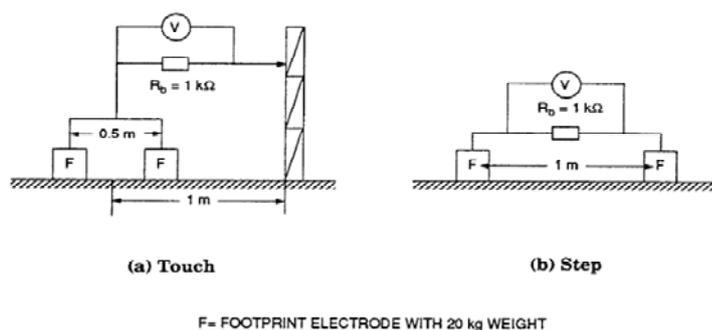
La inyección de corriente se aplica con un transformador de voltaje variable con potencia apropiada entre el electrodo auxiliar y el de tierra (ver figura 8) y se regula con dos controles de giro continuo. El primero permite incrementar o disminuir la corriente de forma continua desde 0 a 100 %, en el escalón de tensión apropiado (ver tabla XXIV). La variación continua se realiza por medio de un autotransformador variable de regulación continua (*variac*). El segundo control permite escalones constantes de voltaje que se obtienen por medio de un conmutador de tensiones por pasos.

La inyección de corriente es controlada manualmente y medida por medio de un amperímetro conectado en serie con la salida del instrumento (ver figura 37).

1.2.3.8. Medición de voltaje de paso

Se deberá realizar varias mediciones en la periferia de la red de tierra y cerca de encerramiento de la red de tierra. Colocar dos electrodos (ver figura 7) simulando los pies de una persona, separados una distancia de un metro (ver figura 8b), conectados entre sí por una resistencia R_c de 1000 Ohm 1 W ($P=V \cdot I= 0.02 \text{ A} \cdot 50 \text{ A} = 1\text{W}$), equivalente a la resistencia promedio del cuerpo humano.

Figura 8. Colocación de los electrodos para la medición de voltaje de paso y contacto



Fuente: Norma IEEE Std. 81.2 1991

Se aplica corriente gradualmente con los controles fino y por pasos del inyector (ver figura 37) hasta alcanzar la corriente nominal para la prueba (5 A, 20 A o 50 A según el tipo de subestación).

La corriente se aplica entre el electrodo de tierra auxiliar y el electrodo de tierra a medir (ver figura 9) y debe controlarse con la lectura de un amperímetro digital o analógico que lleva el instrumento.

Entre los electrodos que simulan los pies de una persona se conectan las terminales del voltímetro con cables y cocodrilos. Se procede a medir el voltaje V_m con la ayuda del voltímetro en el instrumento. El voltaje obtenido en la medición V_m debe corregirse en función de la corriente de corto circuito monofásica, para obtener el voltaje de paso que realmente circulará durante la falla, que se obtiene de:

$$V_p = \frac{I_f}{I_m} * V_m$$

Donde:

V_p = Voltaje de paso

I_f = Corriente de falla monofásica (se toma del diseño de la red).

I_m = corriente de nominal para la prueba (5 A, 20 A o 50 A)

V_m Voltaje tomado de la medición

Después se determina si este voltaje está por debajo del valor seguro para una persona, (ver tabla IV). Es preciso tomar varias mediciones a lo largo y ancho del recinto, y en la cercanía del lugar para asegurarse de que no existen tensiones de paso peligrosas.

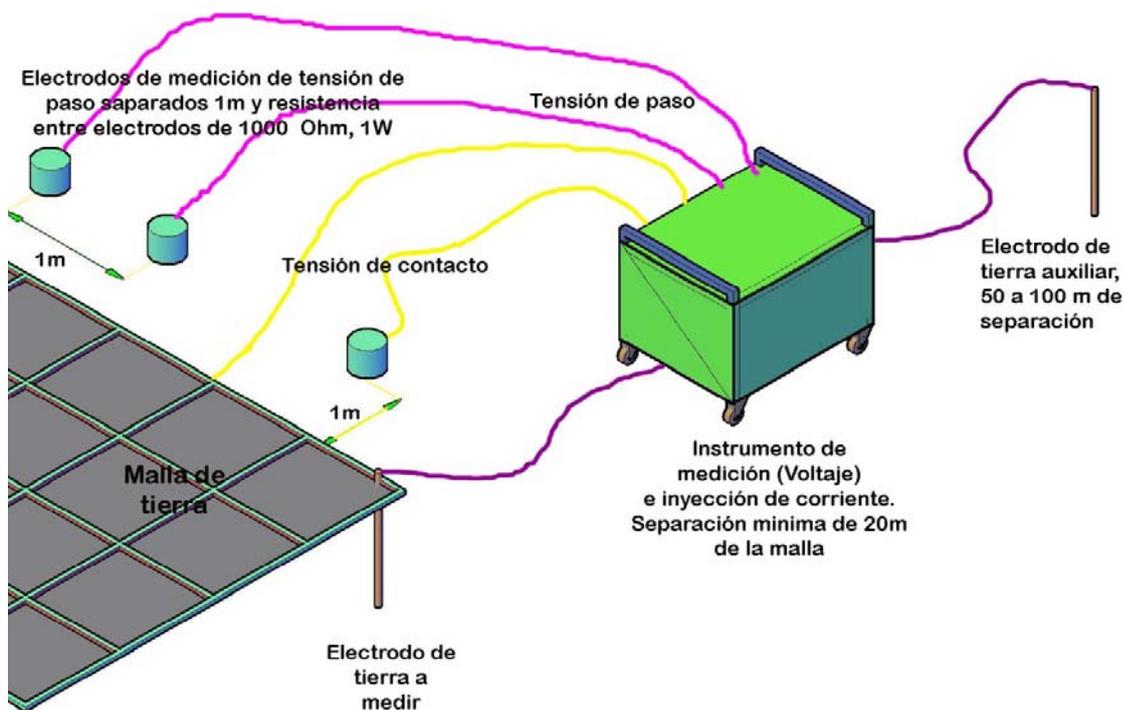
1.2.3.9. Medición de voltaje de contacto

El procedimiento para la medición del voltaje de contacto es igual al de la medición del voltaje de paso, con la única diferencia de que los electrodos se colocan juntos a un metro de la estructura energizada, como se muestra en la figura 8a, se debe conectar la estructura con los electrodos de medición con una resistencia de 1000 Ohm, 1W.

1.2.3.10. Tensiones erráticas

Antes de realizar las mediciones de los voltajes de paso y contacto, se debe comprobar que no existan tensiones vagabundas o parásitas en los electrodos de medición. Esta comprobación se realiza midiendo el voltaje V_m sin aplicar corriente al los electrodos de inyección. Si el valor de V_m es 0 V queda descartada la presencia de corrientes o tensiones erráticas.

Figura 9. Esquema de conexión del aparato y los electrodos



Fuente: elaboración propia.

Si existen tensiones mayores al 10% de las mediciones obtenidas, se debe contrastar con las corrientes nominales de prueba y corregirse con el procedimiento siguiente:

Se mide el voltaje V_1 , con polaridad normal (0°), después se desconecta la fuente, se invierte la polaridad (180°) y se procede a tomar la medición del V_2 ; los valores obtenidos se corrigen con la siguiente ecuación.

$$V_{p/c} = \sqrt{\frac{(V_1 0^\circ)^2 + (V_2 180^\circ)^2}{2}} - V_e^2$$

Donde:

$V_{p/c}$ = Voltaje de paso y contacto corregido

$V_1 0^\circ$ = Voltaje medido con polaridad normal

$V_2 180^\circ$ = Voltaje medido con polaridad invertida

V_e = Voltaje errático debido a las corrientes parásitas; este voltaje se mide sin aplicar corriente a los electrodos inyectoros.

1.2.3.11. Medidores en el mercado

Existen varios medidores en el mercado como el de marca HT2051 y HT2052 con potencias de salida de 3.5 kVA, regulación de voltaje entre 0-400 voltios. El medidor de marca LET-60-VPC con potencia de salida de 6kVA, regulación de voltaje entre 0 y 1000 voltios. El medidor marca LET-500-VPC con potencia de salida de 50 KVA, regulación de voltaje entre 0 a 1000V y corriente máxima de 50 A.

Existen también en el mercado instrumentos de marca CIRCUTOR MPC 5, CIRCUTOR MPC 20 y CIRCUTOR MPC 50, con potencias de salida de 2.5 kVA, 12 kVA y 20 kVA respectivamente; voltajes entre 0V y 500V para el MPC 5; voltajes entre 0 y 600V para el MPC 20 y para el MPC 50 voltajes entre 0 y 400V. Además, hay en el mercado de otras marcas y no precisamente para el mismo fin, como OMICRON y HS-3/2 de 3kVA.

Cada instrumento viene con su sistema de medición, sus protecciones y accesorios secundarios como cables y electrodos de medición.

1.2.3.12. Normativa relacionada con el instrumento

Existe diferente información sobre las normas relacionadas con el instrumento, entre las cuales está la norma de la IEEE *Std. 80-2000 (IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding)*, la norma IEEE *Std. 81.2-1991 (Guide for measuring of impedance)*, normas españolas como MIE-RAT-01, 13 y 19 y otros reglamentos colombianos como el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) en su artículo 15.5.3.

2. EL TRANSFORMADOR

Un transformador es una máquina eléctrica que cambia un nivel de voltaje en otro, por medio de la acción de un campo magnético, variante con el tiempo; el transformador elemental está compuesto por dos bobinas de alambre aislado, las cuales están enrolladas sobre un núcleo de hierro laminado. Una de estas bobinas está conectada a la fuente fuerza eléctrica que se llama devanado primario y la otra llamada devanado secundario que alimenta la carga. En algunos casos estas bobinas pueden tener varias derivaciones para obtener distintos niveles de voltajes y capacidades de corriente.

2.1. Principio de funcionamiento

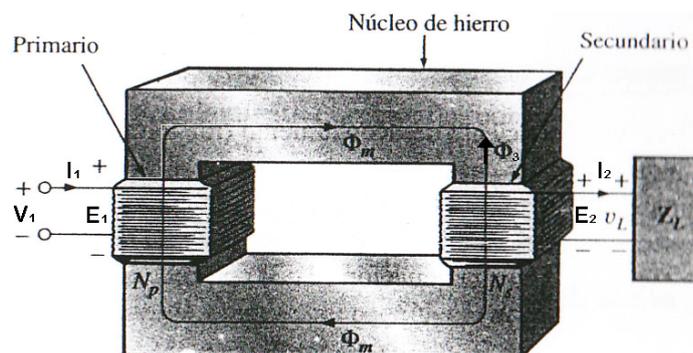
El voltaje de la línea V_1 (ver figura 10) produce una corriente en el bobinado primario I_1 que crea un campo magnético oscilante dentro del núcleo ferromagnético Φ_m ; este flujo magnético pasa dentro de las espiras del primario como secundario del transformador (flujo mutuo $\Phi_m = \Phi_1 = \Phi_2$). Por la ley de inducción de Faraday ($e_{ind} = N \frac{d\phi}{dt}$); se induce un voltaje en la bobina secundaria E_2 .

Si se cierra el circuito secundario mediante una carga, circulará una corriente I_2 , que por la ley de Lenz, resultará un flujo Φ_3 para oponerse al flujo original. El flujo producido provoca una disminución del flujo mutuo ($\Phi_m - \Phi_3$) y por lo tanto, una reducción en las fuerzas magneto-motrices inducidas E_1 y E_2 .

Al disminuir E_1 se aumenta la diferencia entre el voltaje de entrada V_1 y E_1 , haciendo que circule una corriente mayor, que origina el restablecimiento del flujo original Φ_m . Cualquier aumento o disminución en la carga, será compensado con un aumento o disminución de la corriente en el primario I_1 .

Esta regulación automática de amperios-vueltas primario y secundario, permite conservar prácticamente constantes los voltajes inducidos, y por lo tanto los voltajes en terminales.

Figura 10. **Funcionamiento del transformador**



Fuente: BOYLESTAD, R. L., Introducción al análisis de circuito eléctricos, p. 938.

2.1.1. Transformador con núcleo de hierro

El núcleo de hierro sirve para incrementar el coeficiente de acoplamiento entre el primario y el secundario, de tal forma que se aproxime a uno y que casi no exista flujo disperso ($\frac{\Phi_{mutuo}}{\Phi_{primario}} \cong 1$) cuando la corriente I_1 en el primario del transformador con núcleo de hierro es un máximo, el flujo mutuo Φ_m que enlaza ambas bobinas es también máximo. Entonces la magnitud del flujo mutuo es directamente proporcional a la corriente, a través de devanado primario. Tanto

el flujo mutuo Φ_m como la corriente I_1 en el primario varían en función senoidal respecto del tiempo, es decir:

$$i_1 = I_1 \text{sen } \omega t$$

Para el flujo mutuo Φ_{mutuo} que está en fase con la corriente i_1 se tiene:

$$\Phi_{mutuo} = \Phi_{m\acute{a}ximo} \text{sen } \omega t$$

Entonces el voltaje inducido en el primario por la ley de inducción de Faraday es:

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi_{mutuo}}{dt} = N_1 \frac{d}{dt} (\Phi_{m\acute{a}ximo} \text{sen } \omega t)$$

$$e_1 = \omega N_1 \Phi_{m\acute{a}ximo} \cos \omega t$$

Donde:

e_1 = voltaje inducido en el primario

N_1 = número de espiras en el primario

ω = frecuencia angular

Y el valor eficaz *RMS* es:

$$E_1 = \frac{2\pi f N_1 \Phi_{m\acute{a}ximo}}{\sqrt{2}}$$

$$E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_{m\acute{a}ximo}$$

Un análisis similar se puede realizar para el circuito secundario:

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_{m\acute{a}ximo}$$

Dividiendo el voltaje inducido en el primario dentro del voltaje inducido en el secundario:

$$\frac{E_1 = 4.44fN_1\Phi_{m\acute{a}ximo}}{E_2 = 4.44fN_2\Phi_{m\acute{a}ximo}}$$

Se obtiene:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

Donde:

a = relación de transformación

N_1 = número de espiras del primario

N_2 = número de espiras del secundario

Bajo condiciones de carga los amperios-vueltas netos sobre el núcleo, producida por el primario y secundario; deben permanecer sin cambio para el mismo Φ_{mutuo} por ser establecida en el núcleo.

Entonces:

$$N_1I_1 = N_2I_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

Si se despeja N_1 de la ecuación anterior para el valor eficaz E_1 se tiene:

$$N_1 = \frac{E_1}{4.44f\Phi_{m\acute{a}ximo}}$$

Sabiendo que el flujo máximo es la densidad magnética B multiplicada por el área transversal de la columna metálica del devanado ($\Phi_{m\acute{a}ximo} = B * A$) se tiene que:

$$N_1 = \frac{E_1}{4.44 * f * B * A}$$

Donde:

N_1 = número de espiras del devanado primario del transformador

N_2 = número de espiras del devanado secundario del transformador

E_1 = el voltaje inducido en el primario

f = frecuencia eléctrica (60 Hz)

B = densidad magnética

A = área transversal de la columna central o núcleo del transformador

La ecuación para calcular el número de espiras del primario y secundario en función del voltaje en terminales, frecuencia de la fuente, densidad magnética del núcleo, y el área transversal del núcleo, se tratará detenidamente en las siguientes secciones.

2.2. Circuito equivalente del transformador real

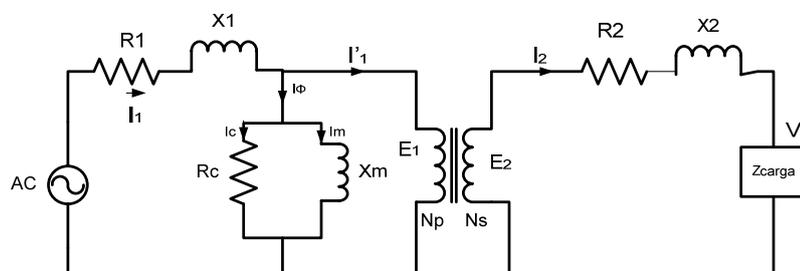
En los transformadores reales existen diversas pérdidas que pueden modelarse dentro de un circuito como el de la figura 10; tales pérdidas se modelan como inductancias y resistencias conectadas en serie-paralelo, las cuales se describen a continuación:

- Pérdidas en el cobre I^2R , son pérdidas que se presentan por calentamiento por efecto Joule al circular cierta corriente en los alambres

de los devanados del transformador tanto en el primario como en el secundario, y se representan como la potencia que se consume en dos resistencias R_1 y R_2 .

- Pérdidas por corrientes parásitas o corrientes de Foucault: estas son debidas a las corrientes inducidas en el núcleo del transformador y son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado al transformador y se modelan por medio de una R_c en paralelo.
- Pérdidas por histéresis: están relacionadas, con el acomodamiento de los dominios magnéticos y son función compleja, no lineal del voltaje aplicado al transformador. Se representan por medio de una reactancia inductiva X_m en paralelo.
- Pérdidas por flujo magnético de dispersión: son las pérdidas debidas al flujo que se pierde al no lograr enlazarse con el bobinado opuesto. Estos flujos producen una autoinductancia tanto en el primario y secundario. En el circuito equivalente se modelan por una reactancia inductiva X_1 y X_2 tanto en las bobinas primarias como secundarias.

Figura 11. **Circuito equivalente de un transformador con carga**



Fuente: elaboración propia.

2.2.1. Determinación de los parámetros del transformador

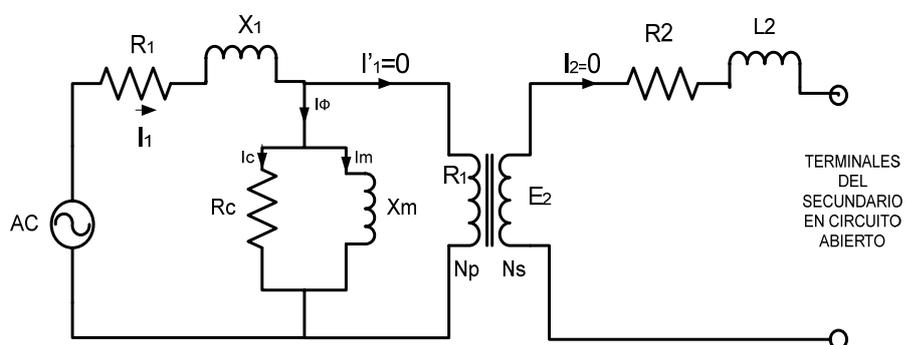
A continuación se explica el ensayo de corto circuito y el de circuito abierto, usados para obtener los valores de las inductancias y resistencias del modelo real del circuito de un transformador que se muestra en la figura 11.

2.2.1.1. Ensayo de circuito abierto

Al dejar abiertas las terminales del devanado secundario del transformador, la corriente en el secundario I_2 es igual a cero y la corriente inducida en el primario I'_1 es igual a cero; entonces casi toda la corriente fluye a través de la rama de excitación R_c paralelo a X_m como se muestra en la Figura 12.

Las caídas de tensión en la resistencia R_1 y X_1 son demasiado pequeñas en comparación con R_c y X_m entonces se puede despreciar el efecto de estos dos componentes.

Figura 12. Conexión del transformador para el ensayo de circuito abierto



Fuente: elaboración propia.

Para hacer la medición se debe conectar el circuito que se muestra en la figura 13, de modo que pueda encontrarse la magnitud de la impedancia de excitación y su factor de potencia, con este valor se despeja R_c y jX_m aplicando las siguientes ecuaciones.

$$|Z_{oc}| = \frac{V_{oc}}{I_{oc}}$$

$$\theta = \cos^{-1}FP = \cos^{-1} \frac{P_{oc}}{V_{oc} * I_{oc}}$$

$$Z_{oc} = \frac{V_{oc}}{I_{oc}} \angle \cos^{-1} \left(\frac{P_{oc}}{V_{oc} * I_{oc}} \right)$$

$$Z_{oc} = R_c + jX_m$$

Donde:

Z_{oc} = impedancia obtenida en la prueba del transformador en circuito abierto

V_{oc} = voltaje de obtenido por el voltímetro (ver figura 13)

I_{oc} = corriente obtenida con el amperímetro

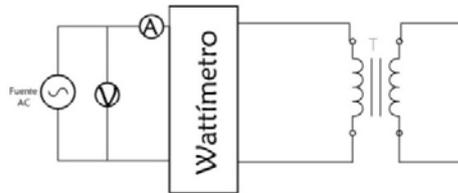
FP = factor de potencia

P_{oc} = potencia obtenida con el wattímetro

R_c = resistencia en la rama de excitación

X_c = reactancia en la rama de excitación

Figura 13. **Conexión de los medidores para el ensayo de circuito abierto**

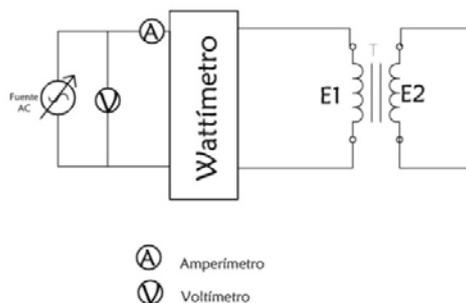


Fuente: CHAPMAN, Stephen J., Máquinas eléctricas, p. 72.

2.2.1.2. **Ensayo de corto circuito**

Se cortocircuitan las terminales del devanado secundario, y el voltaje de alimentación se ajusta hasta que la corriente en la bobina en corto circuito sea igual a la corriente nominal, de tal forma que no se queme el transformador, como se muestra en la figura 14.

Figura 14. **Conexión de los medidores para el ensayo de corto circuito**



Fuente: CHAPMAN, Stephen J., Maquinas eléctricas, p. 73.

Puesto que el voltaje de alimentación es tan bajo durante el ensayo, una corriente muy baja fluye a través de la rama de excitación de tal manera que se puede ignorar estos componentes.

Se puede encontrar la impedancia en serie referida al primario ($R_1 + a^2 R_2$) $+j(X_1 + a^2 X_2)$ con las siguientes ecuaciones:

$$|Z_{sc}| = \frac{V_{sc}}{I_{sc}}$$

$$\theta = \cos^{-1} FP = \cos^{-1} \frac{P_{sc}}{V_{sc} * I_{sc}}$$

$$Z_{sc} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} < \cos^{-1} \frac{P_{sc}}{V_{sc} * I_{sc}}$$

$$Z_{sc} = (R_1 + a^2 R_2) + j(X_1 + a^2 X_2)$$

Donde:

Z_{sc} = impedancia obtenida en la prueba del transformador en corto circuito.

V_{sc} = voltaje de obtenido por el voltmetro de la figura 14

I_{sc} = la corriente obtenida con el ampermetro

FP = factor de potencia

P_{sc} = potencia obtenida con el wattmetro

R_1 y R_2 = resistencias de pérdidas por efecto joule

X_1 y X_2 = reactancias de dispersión en el primario y secundario a relación de transformación.

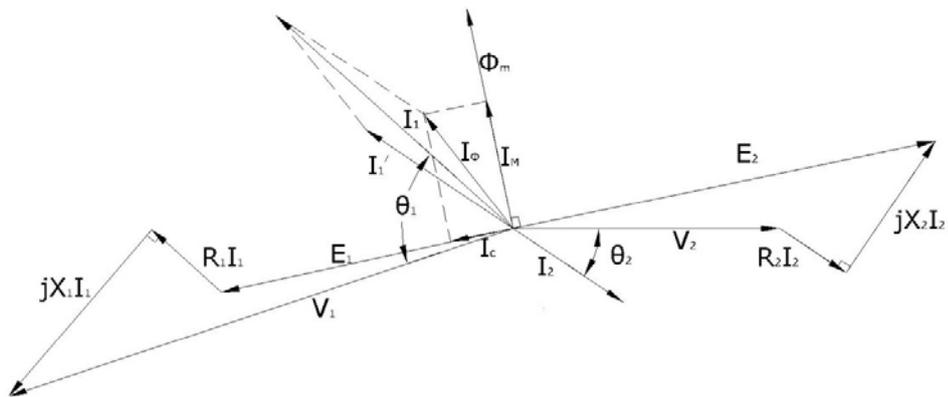
2.3. Diagrama fasorial del transformador con carga

Del circuito equivalente de transformador de la figura 11 se puede dibujar el diagrama fasorial con carga del transformador como el de la figura 15, en la

cual V_2 es el voltaje en la carga, e I_2 es la corriente que circula en la malla del secundario y en la impedancia de carga.

Suponiendo que la carga es inductiva, la corriente en la carga I_2 retrasa en fase al voltaje V_2 en θ_2^0 . La caída de voltaje en la resistencia dos $V_{R2} = (I_2 \cdot R_2)$ está en fase con la corriente en la carga I_2 . La caída de voltaje en la inductancia de dispersión del secundario $V_{L2} = (I_2 jX_2)$ está 90^0 grados fuera de fase con la corriente I_2 . Por la ley de voltajes de Kirchhoff, en el lazo cerrado del circuito secundario, se tiene que $E_2 = R_2 I_2 + jX_2 I_2 + V_2$.

Figura 15. **Diagrama fasorial de un transformador con carga**



Fuente: elaboración propia.

Para el lazo cerrado del circuito primario se tiene una ecuación semejante a la ecuación para el circuito secundario $V_1 = R_1 I_1 + jX_1 I_1 + E_1$, además en el nodo de la rama de excitación, la corriente en el devanado primario I_1 es igual a la suma de la corriente de excitación I_0 más la corriente inducida en el primario I_1' multiplicada por la relación de transformación a ($I_1 = I_0 + a \cdot I_1'$).

El flujo mutuo Φ_m es perpendicular al voltaje inducido E_1 y E_2 en el primario y secundario, además el flujo mutuo Φ_m está en fase con la corriente de magnetización I_M .

2.4. Potencia del transformador monofásico ideal

El análisis de un transformador ideal es aquel que se realiza con ecuaciones sencillas, se idealiza como un transformador sin pérdidas, donde la potencia de entrada es igual a la de salida.

$$P_{entrada} = V_1 * I_1 \cos \theta_1$$

$$P_{salida} = V_2 * I_2 \cos \theta_2$$

Donde:

θ_1 = Ángulo entre el voltaje y corriente del primario

θ_2 = Ángulo entre el voltaje y corriente del secundario.

Como los ángulos entre el voltaje y corriente θ_1 y θ_2 no se afectan en un transformador ideal, las bobinas del primario y secundario tienen el mismo factor de potencia.

$$\cos \theta_1 = \cos \theta_2 = \cos \theta$$

$$V_1 * I_1 \cos \theta = V_2 * I_2 \cos \theta$$

$$P_1 = P_2$$

Las mismas relaciones se aplican para la potencia reactiva y aparente.

$$Q_1 = Q_2$$

$$S_1 = S_2$$

2.5. Eficiencia del transformador

Para un transformador, no toda la energía que le llega se convierte en energía aprovechable en la salida; por lo dicho anteriormente puede verse que existen pérdidas dentro del transformador, que se convierten en calor. Si se relacionan la potencia de entrada con la de salida, se tiene que la eficiencia se encuentra de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_{Sal}}{P_{Ent}} * 100\%$$

Las capacidades nominales de potencia y las clases de aislamiento están normalizadas según normas NOM-J-116-1989, NMX-J-116- ANCE, NOM-002-SEDE-1999, esta clasificación puede verse en la tabla V.

2.6. Relación entre la frecuencia y voltaje en un transformador

De la ecuación:

$$\Phi_{m\acute{a}ximo} = \frac{V_{m\acute{a}ximo}}{\omega * N}$$

Se puede observar que el flujo máximo que soporta el transformador está en relación directa con el voltaje máximo aplicado al transformador y en relación inversa con la frecuencia y el número de espiras del transformador. Por ejemplo si se aumenta en 10% el voltaje que alimenta el transformador con respecto a su voltaje nominal (siempre que el aislamiento del transformador lo permita), hay que aumentar en 10% la frecuencia para mantener el flujo máximo $\Phi_{m\acute{a}ximo}$ constante, no saturamos el núcleo del transformador y evitar así calentamiento.

Tabla V. **Eficiencias mínimas permitidas den los transformadores de distribución (en porcentaje)**

Tipo de alimentación	Capacidad (KVA)	Voltaje máximo que soporta el aislamiento		
		Hasta 15 kV	Hasta 25 kV	Hasta 34,5 kV
Monofásico	5	97,90	97,80	97,70
	10	98,25	98,15	98,05
	15	98,40	98,30	98,20
	25	98,55	98,45	98,35
	37.5	98,65	98,55	98,45
	50	98,75	98,65	98,55
	75	98,90	98,80	98,70
	100	98,95	98,85	98,75
	167	99,00	98,90	98,80
Trifásico	15	97,95	98,85	97,75
	30	98,25	98,15	98,05
	45	98,35	98,25	98,15
	75	98,50	98,40	98,30
	112.5	98,60	98,50	98,40
	150	98,70	98,60	98,50
	225	98,75	98,65	98,55
	300	98,80	98,70	98,60
	500	98,90	98,80	98,70

Fuente: PÉREZ, Pedro Avelino, Transformadores de distribución. p. 96.

2.7. Corriente de irrupción

Un problema que se da al conectar un transformador, es la enorme corriente de magnetización que demanda el transformador en los primero ciclos. Al principio, como una inductancia, el transformador se comporta como corto circuito hasta que se forma dentro del núcleo un flujo que se oponga al original.

Este flujo puede llegar a ser hasta de dos veces el flujo en funcionamiento normal. Esta corriente es mayor si el ángulo del voltaje aplicado empieza con un desfase de 0^0 para una onda coseno; además, debe de tomarse en cuenta al elegir las protecciones y al diseñar el transformador, de tal manera que sea capaz de soportar dicha corriente.

2.8. Regulación de voltaje

Puesto que el transformador presenta una impedancia en serie en su interior, su voltaje de salida varía con el aumento o disminución de la carga, aun manteniendo la tensión de la fuente constante.

A la relación entre el cambio de voltaje en la salida debido a la colocación de una carga en el transformador y el voltaje a plena carga, se le llama regulación de voltaje. Cuando existe buena regulación de voltaje, este valor es muy pequeño.

$$\text{Regulación de voltaje} = \frac{V_{\text{sin carga}} - V_{\text{a plena carga}}}{V_{\text{a plena carga}}}$$

2.9. El autotransformador

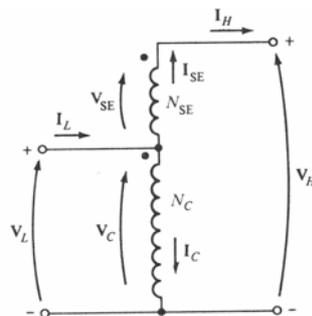
El autotransformador es una máquina eléctrica con características similares a las de un transformador, pero a diferencia de este, existe un punto de conexión eléctrica entre ambas bobinas, como se muestra en la figura 16.

El autotransformador es recomendable para cambiar niveles de voltaje en una mínima cantidad, y muy útiles para regular pequeñas caídas de tensión en los sistemas eléctricos de potencia, en los cuales sería un desperdicio utilizar

un transformador convencional con dos bobinas independientes, en el presente caso, en el diseño se utilizará para regular el voltaje de salida del medidor.

En la figura 16 se ilustra el diagrama de un autotransformador elevador, con las variables que intervienen en el análisis de sus ecuaciones. En un autotransformador existen una bobina común y una bobina en serie.

Figura 16. **Autotransformador elevador**



Fuente: CHAPMAN, Stephen J., Maquinas eléctricas, p. 94.

Donde:

V_C = voltaje en la bobina común

V_{SE} = voltaje en la bobina en serie

V_L = voltaje en las terminales de bajo voltaje

V_H = voltaje en las terminales de alto voltaje

I_C = corriente en la bobina común

I_{SE} = corriente en la bobina serie

I_L = corriente en las terminales de bajo voltaje

I_H = corriente en las terminales de alto voltaje

N_{SE} = número de espiras en la bobina en serie

N_C = número de espiras en la bobina común

Los voltajes y las corrientes en las bobinas se relacionan por

$$\frac{V_C}{V_{SE}} = \frac{N_C}{N_{SE}}$$

$$I_C N_C = I_{SE} N_{SE}$$

Las tensiones y las corrientes en las bobinas están relacionadas con las tensiones en las terminales

$$V_L = V_C$$

$$V_H = V_C + V_{SE}$$

$$I_H = I_{SE}$$

$$I_L = I_C + I_{SE}$$

Los voltajes y corrientes de las dos bobinas tienen la siguiente relación:

$$V_H = V_C + V_{SE}$$

$$V_H = V_C + \frac{N_{SE}}{N_C} V_C$$

$$V_H = \left(\frac{N_{SE} + N_C}{N_C} \right) V_L$$

$$\frac{V_L}{V_H} = \frac{N_C}{N_{SE} + N_C}$$

Haciendo un análisis similar para las corrientes se tiene

$$\frac{I_L}{I_H} = \frac{N_{SE} + N_C}{N_C}$$

Para la potencia aparente S en la entrada y en la salida en un autotransformador se tiene:

$$S_{entrada} = V_L I_L$$

$$S_{salida} = V_H I_H$$

$$S_{entrada} = S_{salida} = S$$

La potencia aparente que realmente circula a través de los bobinados (en ingles *winding*) del autotransformador S_w es:

$$S_w = I_C V_C = I_{SE} V_{SE}$$

$$S_w = V_C I_C$$

$$S_w = V_L (I_L - I_H)$$

$$S_w = V_L I_L - V_L I_H$$

$$S_w = V_L I_L - V_L I_L \left(\frac{N_C}{N_{SE} + N_C} \right)$$

$$S_w = V_L I_L \frac{(N_{SE} + N_C) - N_C}{N_{SE} + N_C}$$

$$S_w = S \frac{N_{SE}}{N_{SE} + N_C}$$

$$\frac{S}{S_w} = \frac{N_{SE} + N_C}{N_{SE}}$$

Lo que quiere decir que hay una ventaja en potencia nominal aparente S que pasa del primario al secundario, que no pasa a través de los devanados del autotransformador. Esto permite usar autotransformadores con menor potencia nominal S_w y de menor tamaño para desempeñar la misma función de un transformador de cierta potencia nominal S .

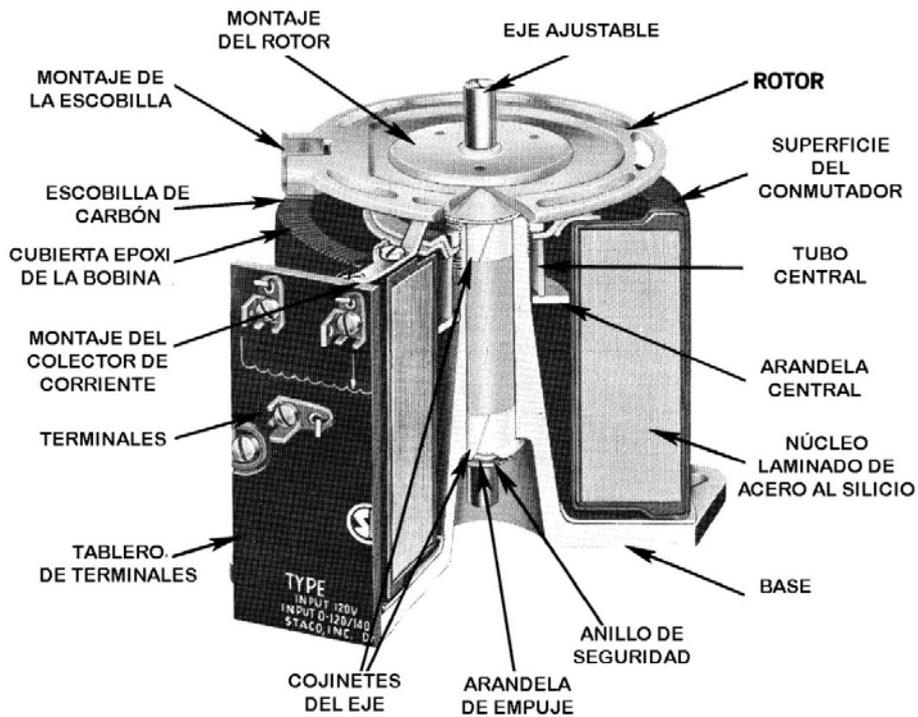
La desventaja de un autotransformador, es que existe una conexión física directa entre ambos devanados, lo que implica la pérdida del aislamiento eléctrico entre el primario y el secundario; además el devanado secundario se debe diseñar para soportar el máximo voltaje del autotransformador. Los autotransformadores generalmente se usan con relaciones de transformación cercanas a uno.

2.9.1. Autotransformador variable de regulación continua (variac)

Un autotransformador variable de regulación continua es aquel en el cual se puede obtener voltajes de salida desde 0 V hasta el valor de la fuente o un poco mayor del valor de esta. Está constituido por un núcleo toroidal sobre el cual se arroja el alambre conductor.

Sobre una pista del toroide se elimina el aislamiento del conductor y se toma la derivación de voltaje variable; mediante una escobilla con rodillo de carbono, atado a un eje central como mando.

Figura 17. **Autotransformador variable de regulación continua (variac)**



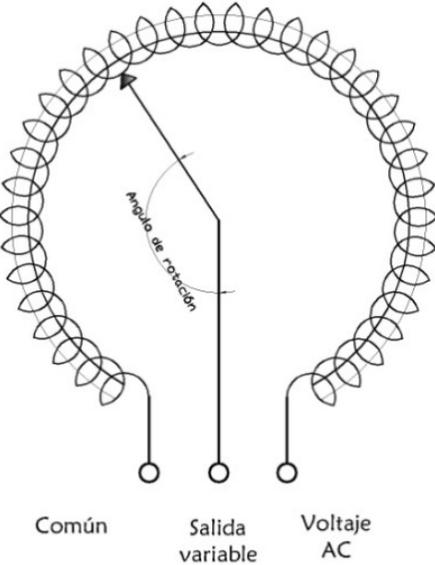
Fuente: STACO, (Hoja de datos de ingeniería) Transformadores variables.

En la práctica un variac funciona como una fuente de corriente alterna variable regulable en voltaje y su diagrama eléctrico es parecido al de un potenciómetro (ver figura 17); en algunos *variac* se puede obtener voltajes mayores al de la fuente.

Los variac están diseñados para determinadas frecuencias, generalmente, 50 o 60 Hz. También se diseñan para manejar potencias bajas (uso en electrónica) y potencias altas (usados en sistemas eléctricos de potencia). Pueden estar montados en alguna caja o estar atados a dispositivos como fusibles, interruptores, medidores de corriente y voltaje. Además, en sistemas eléctricos de potencia, se pueden encontrar configuraciones trifásicas

y pertenecer a algún sistema de control gobernados por motores, microprocesador, o controles a distancia.

Figura 18. **Circuito eléctrico de un variac**



Fuente: elaboración propia.

3. DISEÑO DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

3.1. Factores que intervienen en el diseño de un transformador

Existen varios factores que intervienen en el diseño del transformador, que determinarán si realmente es factible construir el transformador con determinado diseño, o si deberá elegirse otro más apropiado.

Entre los factores más importantes que intervienen en el diseño, se tienen los factores económicos, que implican el costo de los materiales, de equipamiento de fabricación, costo en el proceso de fabricación y de operación.

El mejor diseño es el que minimice costos desde su fabricación y durante toda su vida útil.

También intervienen en el diseño del transformador las limitaciones técnicas y económicas de los materiales, recordando que ciertos tipos de materiales no se comportan como realmente desearía que se comportaran, siempre se manejan ciertas tolerancias, que están dentro del modelo ideal del material.

3.1.1. Especificaciones

El diseño del transformador debe de regirse a normalización de entidades nacionales e internacionales como IEEE, NEMA, IEC, etc., que establecen requerimientos mínimos de materiales, metodologías de medición, tamaños normalizados, tensiones mecánicas, composiciones químicas de los materiales, especificaciones que se deben cumplir para obtener diseños

seguros. Tales especificaciones son tensiones y corrientes de medición, diámetros del conductor, espesor y clase de aislamiento, tamaños y tipos de laminaciones. Salirse de estas normas implicaría aumentos en los costos de fabricación, y disminución de la confiabilidad del instrumento.

La elaboración del diseño de la maquina eléctrica está involucrado en el análisis de las siguientes características:

- Las características eléctricas indican ciertas magnitudes y parámetros eléctricos que debe tenerse en cuenta en el diseño, por ejemplo sus corrientes y voltajes nominales, frecuencia; pérdidas eléctricas y circuitos eléctricos.
- Características magnéticas, incluye circuitos magnéticos, cálculo de densidades magnéticas, límites magnéticos admitidos por los materiales, formas y pérdidas magnéticas, corrientes de magnetización, efectos en la frontera y entrehierros.
- Características dieléctricas: como el tipo de aislamientos del conductor, aislamiento sólido y espacio de aire entre capas de devanados, número de conductores por espira, espaciamiento entre componentes y tamaño del bastidor.
- Características térmicas: son las que determinan el tamaño de la caja que aloja los componentes, cantidad de agujeros de ventilación (si es necesario insertar ventiladores), tipo de protecciones térmicas y disipadores de calor.

- Características mecánicas: son las que determinan la resistencia de los materiales a los diversos tipos de esfuerzos a los que se someterán, por ejemplo, vibración, ruido, fuerzas entre bobinados y transporte.

Además, se toma otro tipo de características como: humedad y presión; estas características y otras más, deben observarse y tomarse en cuenta en el diseño, recordando que existen algunas cuyos modelos son muy complicados de resolver, por lo tanto es más fácil observar estas características con la máquina construida y probada. Algunas veces es necesario repetir el proceso de diseño y fabricación, de tal manera que se vayan incluyendo mejoras en el instrumento y en las técnicas de fabricación.

3.2. Elementos físicos del diseño

Se refiere a todos los elementos físicos que componen el transformador como el núcleo, el alambre conductor magnético, aislamientos y demás elementos necesarios para construirlo.

3.2.1. Núcleo del transformador

El núcleo es el circuito magnético por el cual circula el campo magnético oscilante. Funciona como acople magnético para hacer la transferencia de energía entre devanados. Está formado por láminas de hierro al cual se le ha agregado un pequeño porcentaje de silicio, para aumentar su resistencia y disminuir de esta forma las pérdidas por corrientes parásitas.

La mayoría de aceros para núcleo están rolados en láminas de 0.35 mm y 0.5 mm, recubiertas con una capa de material aislante. Actualmente, se están utilizando aceros con granos orientados que soportan inducciones de hasta 1.7 Wb/m² o mayores, algunos trabajan altas frecuencias.

También se van disminuyendo aun más las pérdidas por histéresis, algunos de los cuales tienen pérdidas de hasta 0.4 vatios por kilogramo. En la tabla VI se observa cómo las pérdidas disminuyen cuando se aumenta el contenido de silicio en el hierro; sin embargo, no conviene superar el 4.5% de silicio en el hierro debido a que se torna quebradizo, lo cual afecta en el proceso de maquinado.

Tabla VI. **Presencia del silicio en el hierro**

% de Si	ρ ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	Pérdida W/Kg. a 10 KGs. y 50 Hz
1,25	28	1,5 a 2
2,75	43	1,25 a 1,35
3,25	50	1,0 a 1,25
4	60	0,7 a 0,8

Fuente: GONZÁLEZ, Adolfo, Materiales magnéticos, p. 25.

3.2.2. Tipos de núcleo

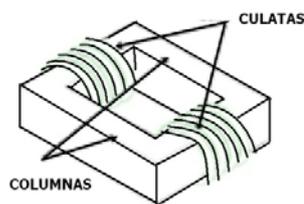
Existen varios tipos de núcleo según su forma y disposición de los devanados, tales como el tipo núcleo o de columnas y el tipo acorazado.

El núcleo tipo columnas (ver figura 19) consiste en una sencilla pieza de acero laminado, rectangular, con los embobinados envueltos sobre los lados laterales del rectángulo; este tipo de construcción presenta un flujo disperso ligeramente mayor al núcleo tipo acorazado.

El núcleo tipo acorazado (ver figura 20) reduce la dispersión del flujo magnético debido a que este puede circular por medio de dos circuitos laterales. La columna central deberá tener el doble de sección de las columnas

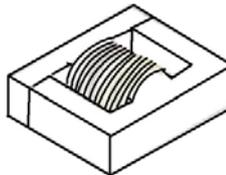
laterales ya que los flujos que se distribuyen por las columnas laterales convergen en el núcleo central.

Figura 19. **Núcleo magnético para transformador monofásico tipo columnas**



Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Núcleo magnético para transformador monofásico tipo acorazado**



Fuente: elaboración propia.

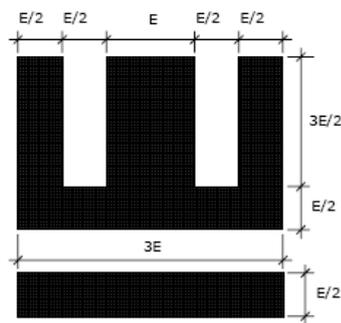
Las juntas entre las columnas y las culatas se pueden realizar por medio de junta lisa recta o en ángulo y junta ensamblada o traslapada.

3.2.2.1. Lamina normalizada

Las laminaciones de los transformadores se especifican, según la forma, tamaño, grosor de la lámina, peso y tolerancia.

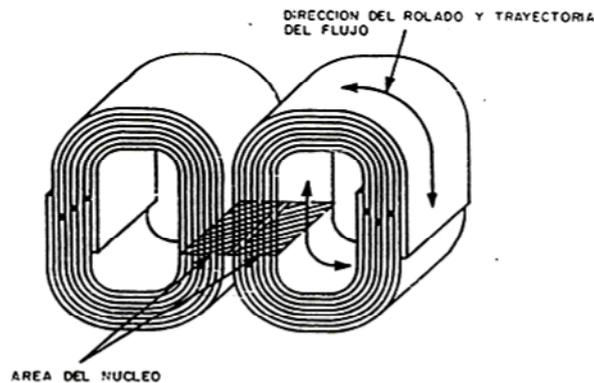
Para los transformadores monofásicos de pequeña potencia, se utilizan núcleos apilados con formas de corte específicas (M, E/I y U/I).

Figura 21. **Chapa normalizada E/I de hierro al silicio para transformador tipo acorazado**



Fuente: Escuela Superior de Ingenieros de San Sebastián. Diseño y fabricación de un transformador monofásico, p. 4.

Figura 22. **Núcleo arrollado (tipo Wescor)**



Fuente: Centro de capacitación CELAYA. Operación y mantenimiento de transformadores de potencia. p. 3.

En los transformadores de mediana potencia se prefiere usar núcleo con lámina enrollada, como el de la figura 22; debido a que este tipo de construcción resulta más eficiente en la manipulación del laminado.

3.2.3. Conductor esmaltado de cobre o aluminio

Para el proceso de fabricación de transformadores se utiliza alambre redondo, alambre cuadrado o pletina de cobre esmaltado.

El conductor de cobre esmaltado debe de tener ciertas propiedades, como resistencia mecánica, maleabilidad y dúctibilidad. El aislamiento debe soportar temperaturas elevadas; según la clasificación NEMA; poseer bajo coeficiente de fricción, ser resistente a la abrasión, tener compatibilidad con diversos barnices en el mercado, resistente a los solventes, tener alta resistencia a los fluidos refrigerantes y ser resistente a la humedad.

Para los devanados también se emplea el aluminio en menor escala, con algunas ventajas y desventajas. El aluminio posee menor densidad que el cobre, menor conductividad aproximadamente 60% de la conductividad del cobre; lo que implicaría mayor aumento en el tamaño del transformador. El aluminio es menos dúctil que el cobre, lo cual no permite hacer hilos conductores muy delgados.

El conductor de cobre esmaltado se calcula y comercializa por su diámetro para conductor redondo, ancho y largo, para conductor cuadrado o pletina rectangular. Además se comercializa por voltaje nominal, clase térmica (temperatura máxima), peso en libras o kilogramos y tipo de carrete.

Tabla VII. **Algunas propiedades del cobre y aluminio**

Características	Cobre	Aluminio
Peso específico (kg/m ³)	8.89	2.70
Punto de fusión (°C)	1083	658
Resistividad @ 20 °C (Ωm)	1.17e-8	2.87e-8
Coefficiente de temperatura (α)	0.0039	0.004
Coefficiente de expansión lineal	17e-3	23e-3

Fuente: TAPIA, Juan A., Introducción al diseño de máquinas eléctricas, p. 14.

Algunos fabricantes ofrecen alambres redondos con las características siguientes:

- Alambre con aislamiento de poliuretano: se fabrica con diámetros de 44 a 30 AWG y es usado en componentes electrónicos, bobinas para telefonía, micromotores, reostatos y relés, con normas de fabricación NEMA MW 79-C, IEC 60317- 20, NBR 13950, es soldable a bajas temperaturas.
- Alambre con doble aislamiento: uno de polyester imídico y el otro de poliamidaimida. Se fabrica con diámetros de 29 a 6 AWG y es usado en motores eléctricos, herramientas eléctricas, motores de electrodomésticos, bobinas de ignición, reactores para lámparas y transformadores tipo seco. Se fabrica con normas como la NEMA MW 35 - C, IEC 60317-13, NBR 13937.

Tabla VIII. **Características del alambre de cobre esmaltado**

AWG	Diámetro		Área		Resistencia a 20°C	Peso
	(in)	(mm)	[mm ²]	[in ²]	[Ω/m]	[kg/m]
12	0,0808	2,05	3,31	0,0635	0,00521	0,0294
13	0,0720	1,83	2,62	0,0565	0,00657	0,0233
14	0,0641	1,63	2,08	0,0503	0,00829	0,0185
15	0,0571	1,45	1,65	0,0448	0,0105	0,0147
16	0,0508	1,29	1,31	0,0399	0,0132	0,0116
17	0,0453	1,15	1,04	0,0355	0,0166	0,00923
18	0,0403	1,02	0,823	0,0317	0,0210	0,00732
19	0,0359	0,912	0,653	0,0282	0,0264	0,00580
20	0,0320	0,812	0,518	0,0251	0,0333	0,00460
21	0,0285	0,723	0,410	0,0224	0,0420	0,00365
22	0,0253	0,644	0,326	0,0199	0,0530	0,00289
24	0,0201	0,511	0,205	0,0158	0,0843	0,00182
25	0,0179	0,455	0,162	0,0141	0,106	0,00144
26	0,0159	0,405	0,129	0,0125	0,134	0,00114
27	0,0142	0,361	0,102	0,0111	0,169	0,000908
28	0,0126	0,321	0,0810	0,00993	0,213	0,000720
29	0,0113	0,286	0,0642	0,00884	0,269	0,000571
30	0,0100	0,255	0,0509	0,00787	0,339	0,000453

Fuente: TAPIA, Juan A., Introducción al diseño de máquinas eléctricas, p. 14.

Algunos fabricantes ofrecen pletinas empapelada con *kraft*, usada en transformadores de aceite de gran capacidad y tensiones elevadas; pletina empapelada con Nomex®, usada en transformadores secos y motores con elevadas exigencias térmicas; pletinas esmaltadas con polivinil acetal, usadas en transformadores de aceite, donde se requiere gran resistencia a la abrasión

y pletinas esmaltadas con poliéster, usadas para altas temperaturas, alta rigidez dieléctrica.

3.2.3.1. Dimensiones de los conductores de cobre

Para conductor redondo, el diámetro se especifica por estándares como el de *American Wire Gauge (AWG)* o la *Standard Wire Gauge (SWG)*. En la tabla VIII pueden verse los diámetros, calibre, área, resistencia y otros datos para los alambres normalizados por la IEC 182-1.

Tabla IX. Dimensiones del alambre magneto cuadrado

SIZE (AWG)	BARE COPPER								
	DIMENSIONS (INCHES)			RESISTANCE* (OHMS PER 1000 FT. AT 20°C)			SQUARE MILS	CORNER RADIUS	POUNDS PER 1000 FT.
	MIN.	NOM.	MAX.	MIN.	NOM.	MAX.	NOM.	NOM.	
1	.2864	.2893	.2922	.09627	.09895	.1020	82320	.040	317.2
2	.2550	.2576	.2602	.1217	.1253	.1295	64980	.040	250.4
3	.2271	.2294	.2317	.1539	.1589	.1648	51250	.040	197.5
4	.2023	.2043	.2063	.1949	.2018	.2100	40370	.040	155.6
5	.1801	.1819	.1837	.2470	.2568	.2689	31710	.040	122.2
6	.1604	.1620	.1636	.3101	.3211	.3345	25360	.032	97.75
7	.1429	.1443	.1457	.3929	.4084	.4277	19940	.032	76.86
8	.1272	.1285	.1298	.4981	.5210	.5501	15630	.032	60.25
9	.1133	.1144	.1155	.6267	.6513	.6812	12510	.026	48.20
10	.1009	.1019	.1029	.7951	.8309	.8757	9803	.026	37.78
11	.0897	.0907	.0917	.9914	1.033	1.085	7883	.020	30.38
12	.0798	.0808	.0818	1.254	1.317	1.397	6185	.020	23.84
13	.0710	.0720	.0730	1.565	1.641	1.734	4964	.016	19.13
14	.0631	.0641	.0651	1.980	2.094	2.239	3889	.016	14.99

Fuente: *MWS Wire Industries*, Catálogo del fabricante. p.9.

En la tabla IX se observan las características para el alambre de cobre cuadrado del fabricante *MWS Wire Industries* y en la tabla X se observa la sección neta de las pletinas rectangulares, cabe notar que el área de los

conductores cuadrados y la pletina es menor al producto del ancho por la altura, debido a que sus esquinas están redondeadas.

Tabla X. **Dimensiones normalizadas y sección neta de las pletinas de cobre desnudas**

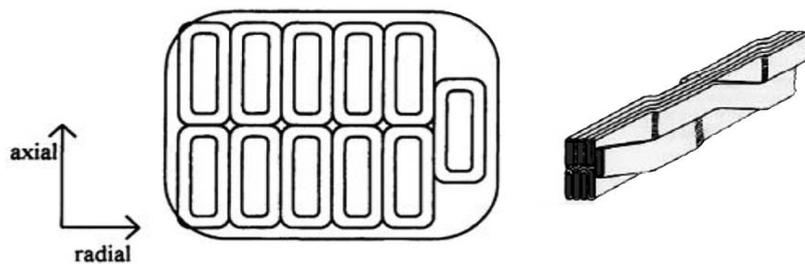
Ancho (mm)	Espesor (mm)																	
	0,80	0,90	1,00	1,12	1,25	1,40	1,60	1,80	2,00	2,24	2,50	2,80	3,15	3,55	4,00	4,50	5,00	5,60
2,00	1,463	1,626	1,785	2,025	2,285	2,585												
2,24	1,655	1,842	2,025	2,294	2,585	2,921	3,369											
2,50	1,863	2,076	2,285	2,585	2,910	3,285	3,785	4,137										
2,80	2,103	2,346	2,585	2,921	3,285	3,705	4,265	4,677	5,237									
3,15	2,383	2,661	2,935	3,313	3,723	4,195	4,825	5,307	5,937	6,693								
3,55	2,703	3,021	3,335	3,761	4,223	4,755	5,465	6,027	6,737	7,589	8,326							
4,00	3,063	3,426	3,785	4,265	4,785	5,385	6,185	6,837	7,637	8,597	9,451	10,65						
4,50	3,463	3,876	4,285	4,825	5,410	6,085	6,985	7,737	8,637	9,717	10,70	12,05	13,03					
5,00	3,863	4,326	4,785	5,385	6,036	6,785	7,785	8,637	9,637	10,64	11,95	13,45	15,20	17,20				
5,60	4,343	4,866	5,385	6,057	6,785	7,625	8,745	9,717	10,84	12,018	13,45	15,13	17,09	19,33	21,54			
6,30	4,903	5,496	6,085	6,841	7,660	8,606	9,865	10,96	12,24	13,75	15,20	17,09	19,30	21,62	24,34	27,49		
7,10		6,216	6,885	7,737	8,660	9,725	11,15	12,42	13,84	15,54	17,20	19,33	21,82	24,60	27,54	31,09	34,64	
8,00			7,785	8,745	9,785	10,99	12,59	14,04	15,64	17,56	19,45	21,85	24,65	27,85	31,14	35,14	38,14	43,94
9,00				9,865	11,04	12,39	14,19	15,84	17,64	19,60	21,95	24,65	27,80	31,40	35,14	39,64	44,14	49,54
10,00					12,29	13,79	15,79	17,64	19,64	22,04	24,45	27,45	30,95	34,95	39,14	44,14	49,14	55,14
11,20						15,47	17,71	19,80	22,04	24,73	27,45	30,81	34,73	39,21	43,94	49,54	55,14	61,86
12,50							19,79	22,14	24,64	27,64	30,70	34,45	38,83	43,83	49,14	55,39	61,64	69,14
14,00								24,84	27,64	31,00	34,45	38,65	43,55	49,15	55,14	62,14	69,14	77,54
16,00									31,64	35,48	39,45	44,25	49,85	56,25	63,14	71,14	79,14	88,74

FUENTE: SÁNCHEZ Blázquez, Francisco, Diseño de un transformador de 5MVA, 33/11kV Dyn11, p. 33.

Para transformadores con corrientes elevadas se utiliza cables conductores formados por múltiples hilos de cobre transpuestos recubiertos de esmalte, dispuestos en forma rectangular, como se muestra en figura 23. Las transposiciones otorgan mayor rigidez al grupo de hilos, además de conseguir que el grupo de pletinas tengan aproximadamente la misma longitud, evitando de esta manera la variación de la resistencia entre las pletinas y menores pérdidas debido a que su reactancia es menor.

El grupo de pletinas es encintado con papel *presspan*, *kraft*, *nomex* de manera que otorgue mayor rigidez al grupo y soporte mayores esfuerzos de corto circuito y tensiones elevadas.

Figura 23 . **Cable transpuesto con pletinas rectangulares**



FUENTE: SÁNCHEZ Blázquez, Francisco, Diseño de un transformador de 5MVA, 33/11kV
Dyn11, p. 33.

3.2.3.2. Resistencia del conductor

Se puede calcular la resistencia del conductor para una resistividad del cobre de $\rho_{Cu} = 1.77 * 10^{-8} \Omega m$ y para el aluminio de $\rho_{Al} = 2.83 * 10^{-8} \Omega m$ sustituyéndola en la siguiente expresión, o bien obtenerla directamente de la tabla VIII.

$$R = \frac{\rho * L}{A}$$

Donde:

ρ = resistividad del cobre o aluminio

L = longitud del alambre de la bobina

A = área transversal del conductor

Se debe tomar en cuenta en el diseño, que la temperatura afecta tanto a la resistencia del cobre como su longitud debido a la dilatación.

3.2.4. Aislamiento

Se fabrican diversos materiales aislantes para uso en transformadores, con una gran variedad de nombres comerciales como resultado de diferentes fabricantes, entre los cuales están: cartón comprimido *presspan*, papel *kraft*, *kraft board*, *crepé*, *press board*, *coreco* y *maylar*, tela cambray (amarilla), tela de fibra de vidrio (amarilla), poliéster, asbesto, cintas de algodón, aislantes termoplásticos, porcelana, tubos aislantes de fibra de vidrio; cada uno con diversas propiedades dieléctricas.

Tabla XI. **Propiedades de algunos materiales aislantes**

	Densidad gr/cm ³ a 20°C	Permitividad Relativa ϵ_r 50 Hz y 20°C	Rigidez Dieléctrica (kV/mm) a 50 Hz	Temperatura Máxima °C
Baquelita (tipo A)	1.3	5-10	16-20	70
Vidrio pyrex	2.5	4.8	40-45	500
Porcelana	2.4	5-6.5	34-38	1000
Esteatita	2.7	6	20-40	1000
Mylar	1.4	3	400	150
Policloruro de vinilo (PVC)	1.4	3.5-7	20-40	70
Polietileno reticulado	1.1	2.5-5	30	90
Neopreno	1.3	4-8	20-30	150
Goma butílica	0.95	2.5	15-20	65
Aceite de transformador	0.88	2.2	30	70
Pyraleno 1467	1.56	3.9	200	70

Fuente: Escuela Superior de Ingenieros de San Sebastián. Diseño y fabricación de un transformador monofásico, p. 4.

3.2.4.1. Clasificación de los aislamientos para transformadores

Los materiales aislantes para máquinas eléctricas se clasifican según normas UNE 21-305 y CEI 85. Estas especifican una clasificación de los aislantes atendiendo su temperatura máxima “mancha más caliente” que el aislamiento puede soportar, sin que pierda sus propiedades dieléctricas ni se presente algún deterioro progresivo.

La vida de un aislamiento depende de la temperatura ambiente, los ciclos de sobrecarga, condiciones de trabajo, vibraciones y del mantenimiento.

Tabla XII. Clasificación térmica de los aislamientos sólidos

Clase de aislamiento	Temperatura ambiente máxima en °C)	Aumento medio de temperatura sobre el ambiente °C	Temperatura media admisible en servicio (°C)	Temperatura Admisible en el punto mas caliente en °C
Y (90 °C)	40	45	85	90
A (105 °)	40	60	100	105
E (120 °)	40	75	115	120
B (130 C°)	40	80	120	130
F (155 C°)	40	100	140	155
H (180 C°)	40	125	165	180
C (>180 C °)	40	-	-	-

Fuente: Intecap. Mantenimiento de máquinas eléctricas, p.14.

A continuación se describen los materiales aislantes según su clase.

- Clase Y: algodón, seda, papel y materiales orgánicos similares, que no estén impregnados, ni sumergidos en líquido dieléctrico.
- Clase A: algodón seda, papel y materiales orgánicos similares, que estén impregnados en líquidos dieléctricos. Materiales moldeados y laminados con celulosa, resinas fenólicas y otras resinas de propiedades análogas: barnices, hojas de acetato de celulosa.
- Clase E: fibras orgánicas sintéticas y otros materiales.
- Clase B: comprende materiales a base de poliéster y polimídicos, aglutinados con materiales orgánicos o saturados con estos.
- Clase F: comprende materiales a base de mica, amianto, fibra de vidrio, aglutinados con materiales sintéticos, en general siliconados, poliéster o epóxidos.
- Clase H: materiales a base de mica, asbestos o fibra de vidrio, aglutinados típicamente con siliconas de alta estabilidad térmica.
- Clase C: mica, porcelana, vidrio, cuarzo y materiales inorgánicos análogos, sin aglutinante.

3.2.4.2. Entre capas

Son las capas de material aislante de grosor adecuado que se coloca entre bobinados primario y secundario, o donde sea necesario un aislamiento

con mayor rigidez dieléctrica, para evitar cortos circuitos internos entre espiras. Son de papel prensado, poliéster u otro material.

3.2.4.2.1. Papel prensado presspan

Es un material aislante a base de celulosa. Básicamente es un papel con alta rigidez dieléctrica y alta capacidad de impregnación con aceite dieléctrico; es un material aislante en la case B que no pierde sus propiedades hasta una temperatura mayor a 130 °C. Se encuentra en el mercado bajo diversas presentaciones (papel y cartón) y con distintos espesores (0.1 hasta 80 mm). Algunas veces está recubierto con resina sintética en ambos lados.

En la tabla XIII y XIV se puede ver la tensión de perforación del papel y del cartón presspan case térmica B.

Tabla XIII. **Tensión de perforación para *presspan* papel clase térmica B**

Espesor [mm]	En aire [KV]	En aceite [KV]
0,1	1,3	10
0,2	2,8	14
0,3	3,9	18
0,4	4,5	22
0,5	5,0	25

Fuente: PÉREZ., J. P., & Saravia E., J. Materiales eléctricos: papel aislante. p. 13.

3.3. Obtención de datos preliminares para los cálculos

Antes de la comprar los componentes y el ensamblado de transformador, se selecciona el material apropiado que cumpla los requerimientos del diseño, según las especificaciones del transformador.

Tabla XIV. **Tensión de perforación para presspan cartón clase térmica B**

Espesor [mm]	Tensión de perforación [KV]
0,8	17
1	20
1,5	26
2	32
3	40

Fuente: PÉREZ C., J. P., & Saravia E., J. Materiales eléctricos: Papel aislante. p. 13.

Se debe realizar un listado de las especificaciones y datos del transformador como la potencia nominal del transformador en VA, voltaje nominal del primario V_1 , voltaje nominal para el secundario V_2 , relación de transformación (n), corriente del primario I_1 , corriente del secundario I_2 , temperatura ambiente de trabajo del transformador T_a , definir el tipo de aislamiento y todas aquellos datos que se usan para el cálculo en el diseño.

3.3.1. Algoritmo de cálculo

En el diseño de un transformador monofásico tipo acorazado debe de tomarse en cuenta dos áreas; el área de la ventana A_v y el área transversal de la columna central o del núcleo del transformador A_c .

3.3.1.1. Área de la ventana

El área de la ventana es donde se alojan la bobina primaria y secundaria, los aislamientos y el carrete (ver figura 24). El área de la ventana esta dado por:

$$A_v = C * D$$

Donde:

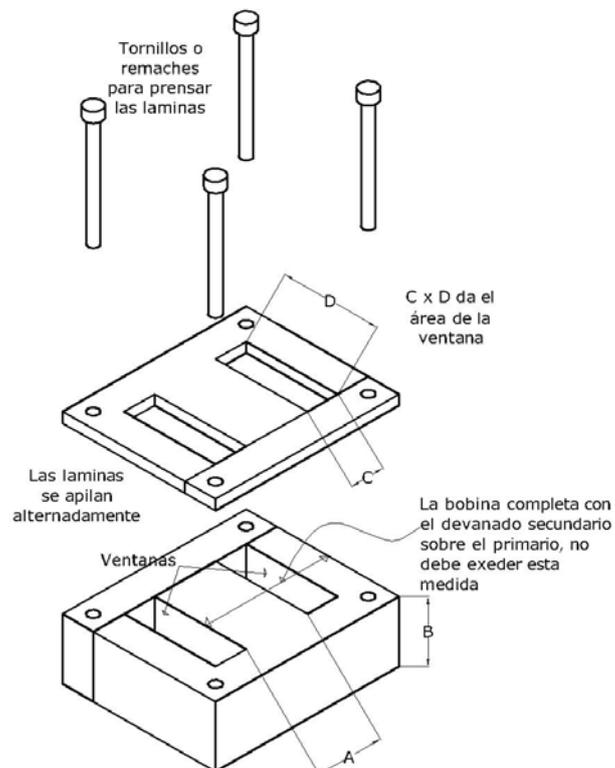
C = ancho de la ventana igual $A/2$ para un núcleo E/I normalizado

D = largo de la ventana igual a $1.5 A$

Dejando el área de la ventana en función de A se tiene que:

$$A_v = \frac{3}{4} A^2$$

Figura 24. **Núcleo laminado del transformador**



Fuente: elaboración propia.

3.3.1.2. Área transversal de la columna central

El área transversal de la columna central tiene una relación con la potencia del transformador, mientras más grande sea el área, más potencia puede soportar el transformador.

El área de la columna central está determinada por el producto del ancho A y la profundidad B.

$$A_c = A * B$$

El ancho A se puede tomar de un valor definido por el fabricante de la chapa. Si se hace A=B se tiene una columna cuadrada; magnitudes usadas para minimizar el largo del conductor usado en la bobina. Se tiene que el área de la columna central es:

$$A_c = A^2$$

La cantidad de láminas que componen la columna central está determinada por:

$$N_l = B/\delta$$

Donde:

N_l = número de láminas del transformador

δ = grosor o espesor de la lámina

B = profundidad del núcleo laminado

3.3.1.3. Ancho de la columna central

Para calcular el ancho de la columna se usa la siguiente expresión, la cual se tomó del artículo Diseño y fabricación de un transformador monofásico de la escuela de ingenieros de San Sebastián, artículo de la Universidad de Navarra. La deducción de esta ecuación se tratará a continuación.

De la ecuación para el voltaje inducido en el primario se tiene que (véase página 26):

$$E_1 = 4.44f N_1 \Phi_{\text{máximo}}$$

$$E_1 = 4.44f N_1 B_m A_h$$

$$E_1 = 4.44f N_1 B_m K_h A_c$$

Donde:

E_1 = voltaje inducido en el primario

f = frecuencia eléctrica en Hz

N_1 = número de espiras del primario

$\Phi_{\text{máximo}}$ = flujo máximo que soporta el núcleo metálico

B_m = densidad magnética

A_c = Área de la columna central de hierro.

A_h = área neta de hierro sin incluir el aislamiento de barniz y espacios de aire entre las laminaciones y es igual al producto de factor de apilamiento K_h por el área de la columna central A_c .

Para el diseño del transformador se debe calcular la densidad de corriente para el conductor primario y el conductor secundario. La densidad de

corriente en el primario J_1 no siempre es igual a la densidad de corriente en el secundario J_2 , especialmente si los conductores son de distintos materiales, por ejemplo de cobre o aluminio. En los cálculos, las densidades de corriente se relacionan por medio del factor x quedando:

$$J_1 = xJ_2$$

$$J_2 = J$$

Donde:

J = densidad de corriente media de los bobinados primario y secundario

J_1 = densidad de corriente para el bobinado primario

J_2 = densidad de corriente para el bobinado secundario

La suma del área de paquete de conductores de cobre $A_{conductores}$ no ocupa totalmente el área de la ventana A_v (ver figura 24); el resto es ocupado por espacios de aire y material aislante. Entonces, el área de la ventana se multiplica por el factor de relleno K_v para obtener el área neta de los conductores. Este factor toma valores entre 0.3 y 0.7.

$$A_{conductores} = K_v * A_v$$

$$N_1 A_1 + N_2 A_2 = K_v * A_v$$

Donde:

A_v = área de la ventana

K_v = factor de aprovechamiento

A_1 = área del conductor del devanado primario

A_2 = área del conductor del devanado secundario

N_1 = número de espiras del primario

N_2 = número de espiras del secundario

El área del conductor para el primario y el secundario está dado por:

$$A_1 = \frac{I_1}{J}$$

$$A_2 = \frac{I_2}{x * J}$$

Sustituyendo las áreas de los conductores primario y secundario en la ecuación anterior, se tiene:

$$N_1 \frac{I_1}{J} + N_2 \frac{I_2}{x * J} = K_v * A_v$$

Como los amperios vueltas del primario son iguales a los amperios vueltas del secundario, se tiene en el numerador $N_1 I_1 = N_2 I_2$

$$N_1 \frac{I_1}{J} + N_2 \frac{I_1}{x * J} = K_v * A_v$$

Sacando factor común N_1 :

$$N_1 \frac{I_1}{J} * \left(1 + \frac{1}{x}\right) = K_v * A_v$$

Despejando I_1 de la ecuación anterior:

$$I_1 = \frac{K_v A_v J}{\left(1 + \frac{1}{x}\right) N_1}$$

Para relacionar la potencia nominal del transformador S_t con el área transversal del núcleo A_c se tiene que:

$$S_t = E_1 * I_1$$

$$S_t = 4.44fN_1B_mK_kA_c * \frac{K_vA_vJ}{\left(1 + \frac{1}{x}\right)N_1}$$

$$S_t = 4.44 * f * B_m * K_h * K_v * A_v * A_c * J * \left(\frac{x}{x+1}\right)$$

Se despeja $A_v * A_c$ en la ecuación anterior:

$$A_v * A_c = \frac{S_t}{4.44 * \left(\frac{x}{x+1}\right) * J * K_h * K_v * f * B_m}$$

Llamándose área del producto a:

$$A_p = A_v * A_c$$

$$A_p = \frac{S_t}{4.44 * \left(\frac{x}{x+1}\right) * J * K_h * K_v * f * B_m}$$

En la ecuación anterior la densidad de corriente está dada en A/m^2 . Si se quiere la densidad de corriente A/cm^2 , debe hacerse la siguiente conversión

$$\frac{1A}{m^2} * \frac{m^2}{10000 cm^2} = \frac{0.0001A}{cm^2}$$

Esto indica que se tiene que multiplicar por 10000 en el numerador, para ingresar la densidad de corriente en A/cm² quedando la ecuación:

$$A_p = \frac{10000 * S_t}{4.44 * \left(\frac{x}{x+1}\right) * J * K_h * K_v * f * B_m}$$

La densidad de corriente que puede soportar el alambre de cobre depende del tipo de refrigeración del transformador, de la calidad y tipo del esmalte aislante (resistencia al calor), de la calidad y pureza del cobre y de la temperatura ambiente. La densidad de corriente puede estar entre 2.5 a 3.5 A/mm² para transformadores sumergidos en aceite y de 1.5 a 2.5 A/mm² para transformadores secos.

El factor de calentamiento K_J, es el factor que relaciona la densidad de corriente J de los devanados con las dimensiones del transformador (área del producto A_p) y toma los siguientes valores: 366 para 25 °C, 534 para 50 °C y 603 para 60 °C.

$$J = K_J * A_p^{-\frac{1}{8}}$$

Sustituyendo la densidad de corriente en la ecuación del área del producto se tiene:

$$A_p = \frac{10000 * S_t}{4.44 * \left(\frac{x}{x+1}\right) * K_J * A_p^{-\frac{1}{8}} * K_h * K_v * f * B_m}$$

$$A_p^{\frac{7}{8}} = \frac{10000 * S_t}{4.44 * \left(\frac{x}{x+1}\right) * K_J * K_h * K_v * f * B_m}$$

$$A_p = \left(\frac{10000 * S_t}{4.44 * \left(\frac{x}{x+1} \right) * K_J * K_h * K_v * f * B_m} \right)^{\frac{8}{7}}$$

Donde:

A = ancho de la columna central del núcleo tipo acorazado E/I en cm²

S_t = potencia nominal del transformador en VA

X = coeficiente de densidad de corriente, se toma 1 como primera instancia

K_h = factor de apilamiento toma valores entre 0.90 y 0.98

K_v = factor de ventana toma valores entre 0.3 y 0.7

K_J = factor de calentamiento que toma un valor de 366 para 25 °C, 534 para 50 °C y 603 para 60 °C.

f = frecuencia nominal (50 o 60Hz)

B_m = densidad del campo eléctrico toma valores entre 0.9 y 1.8 Teslas.

Se puede tomar 1T para 0.5mm y 1.36 T para bajas pérdidas.

Si se supone que el área transversal del núcleo es una columna cuadrada y se iguala el ancho con la profundidad (A=B), se tiene para el área del producto:

$$A_p = A_v * A_c$$

$$A_p = \frac{3}{4} A^2 * A^2 = \frac{3}{4} A^4$$

Si se despeja A para el ancho de la columna central, entonces se tiene:

$$A = \left(\frac{4}{3} A_p \right)^{\frac{1}{4}}$$

3.3.1.4. Cálculo de las dimensiones del conductor

El calibre del conductor se selecciona de tal manera que soporte la corriente a plena carga del transformador. Para los transformadores de potencia media y baja, se seleccionan conductores en su mayoría redondos, cuyo diámetro puede calcularse de la siguiente manera:

$$A_{cd} = \frac{I}{J}$$

$$A_{cd} = \pi \frac{D^2}{4}$$

Igualando áreas y despejando D se tiene:

$$D = \sqrt{\frac{4 * I}{\pi * J}}$$

Donde:

A_{cd} = área del conductor mm^2

D = diámetro del conductor en mm

I = corriente del devanado en amperios

J = densidad de corriente en amperios por mm^2

En el caso de que el diámetro del conductor sea superior a 3.5 mm, se debe seleccionar un conductor cuadrado o una pletina rectangular de área igual al conductor redondo, debido a que el espacio de aire entre conductores es menor y se consiguen mejores resultados en el factor de relleno.

Se calcula el área de los conductores para el devanado primario y secundario, después se elige el diámetro aproximado de la tabla VI de calibres normalizados o la pletina normalizada de la tabla VII.

3.3.1.5. Cálculo del número de espiras por devanado

El número de espiras para el primario y secundario está dado por las siguientes ecuaciones:

$$N_1 = \frac{E_1}{4.44 * f * B * K_h * A_c}$$

$$N_2 = \frac{E_2}{4.44 * f * B * K_h * A_c}$$

Se debe compensar el número de espiras del secundario con un aumento del 4% por pérdidas y del 2% por regulación.

3.3.1.6. Comprobación del número de espiras por devanado

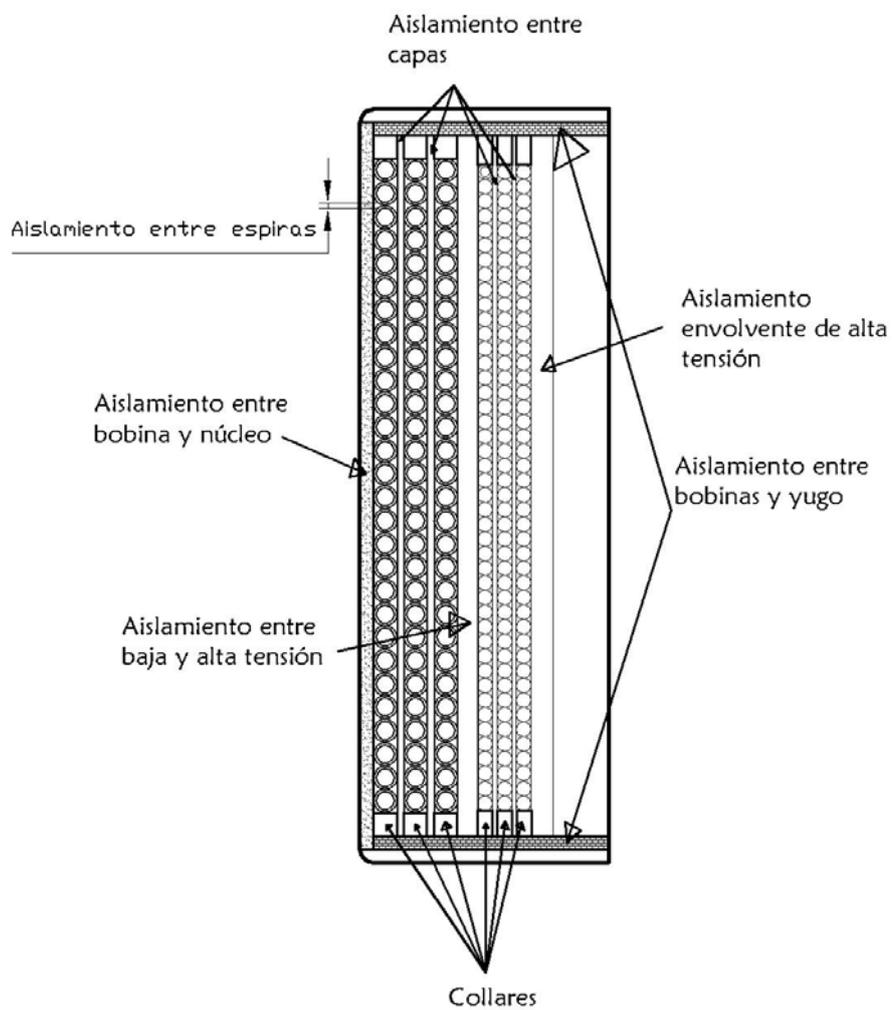
Debe de comprobarse que la relación de voltios por espira del primario sea aproximadamente igual a la relación voltios por espira del secundario; este valor puede estar entre 0.1 y 10 voltios por espira; deberá verificarse con el tipo del aislamiento.

$$\frac{V_1}{N_1} \cong \frac{V_2}{N_2}$$

3.3.1.7. Cálculos dieléctricos

El diseño dieléctrico de un transformador consiste en determinar las características y dimensiones de cada uno de los aislamientos.

Figura 25. **Aislamiento en un transformador**



Fuente: elaboración propia.

Para los transformadores que se van a diseñar interesa el aislamiento entre los siguientes elementos:

- Bobina y núcleo del transformador
- Entre espiras
- Entre capas
- Para collares
- Entre devanados de baja y alta tensión
- Entre envolvente para del devanado de alta tensión
- Entre bobinas y yugo
- Entre devanados exteriores y núcleo, tanque o herrajes.

3.3.1.7.1. Aislamientos menores

Los aislamientos menores son los aislamientos entre espiras, capas y secciones de devanado; se determinan según el tipo de construcción de las bobinas.

Como referencia se describirá el caso para una bobina tipo capas.

En transformadores de distribución el aislamiento entre vueltas no constituye mayor problema debido a que los conductores se fabrican con barniz o esmalte de una, dos o tres capas; además se pueden reforzar con distintas capas de papel o algodón a hélice a tope o solapado a $\frac{1}{2}$, según el espesor que convenga obtener para conseguir el aislamiento necesario. Este aislamiento puede verificarse tanto en baja frecuencia como para impulso, mediante la siguiente expresión:

$$V_e = \frac{V}{N} * F_s$$

Donde:

V_e = esfuerzo dieléctrico entre vueltas (este valor debe ser menor al valor de ruptura del aislamiento empleado “barniz o papel)

V = tensión aplicada al devanado

N = número de vueltas del devanado

F_s = factor de seguridad (se puede usar 1.8 en baja frecuencia y 1.5 para impulso)

El aislamiento entre capas hechas de espiras puede estimarse con la siguiente expresión:

$$V_c = \frac{2V * N_{e/capa}}{N} * F_s$$

Donde:

V_c = esfuerzo dieléctrico entre capas (este valor debe ser menor al valor de ruptura del aislamiento empleado)

V = tensión aplicada al devanado

$N_{e/capa}$ = número de espiras por capa

N = número de vueltas del devanado

F_s = factor de seguridad (se puede usar 1.8 en baja frecuencia, 1.8 para impulso en bobinas de 15 kV y menores; 2.5 para impulsos de bobinas de 25 y 34.5 kV)

Para el aislamiento en zona de derivaciones se deberá verificar el esfuerzo con el modelo anterior, además de reforzar las capas con aislamiento adicional.

3.3.1.7.2. Aislamientos mayores

Para seleccionar los aislamientos mayores puede referirse a las tablas XV y XVI.

3.3.1.8. Comprobación del espacio de ventana

No toda la superficie de la ventana está ocupada por el conductor de cobre, sino que existen espacios de aire y aislamiento entre conductores.

Tabla XV. Tensiones nominales preferentes

Clase de aislamiento kV	Tensiones en voltios
1,2	120/240 240/120 220/127 440/254 480/277
5	4160
8,7	7620
15	13200 13800
25	19050 20000 22860 23000
34,5	33000 34500
46	46000
69	66000

Fuente: PÉREZ, Pedro Avelino, Transformadores de distribución, p. 96.

Se debe comprobar si las bobinas y el aislante entre bobinas y carrete, caben en el espacio de la ventana elegido; si no caben se rehacerse los cálculos aumentando el área o disminuyendo el número de conductores con un aumento del área de la columna central lo cual podría tener alguna variación en el costo del transformador.

Tabla XVI. **Distancias mínimas para aislamientos menores**

Clase de Aislamiento	Pruebas dieléctricas		Aislamiento entre bobinas de alta y baja tensión, aislamiento radial alta tensión y núcleo				Collar	Aislamiento del yugo	Aislamiento entre fases	Claro bobina-tanque
	Impulso (NBI)	Potencial aplicado	Tubo de papel	Ducto de aceite	Envolvente	Total tolerancia				
kV			Milímetros							
1.2	30	10	1.5	-	-	1.7	6.5	1.5	1.7	15
5	60	19	-	3	1.0	4.5	6.5	2.0	4.7	20
8.7	75	26	0.4	3	1.0	4.9	10	2.0	5	25
15	95	34	0.9	3	1.0	5.5	13	2.0	6	28
15	110	34	1.4	3	1.0	6.0	20	3.0	8	30
25	150	50	2.5	3	1.8	8.3	32	4.5	10	40
34.5	200	70	4.8	3	1.8	10.8	51	4.5	13	50

Fuente: PÉREZ, Avelino, Transformadores de distribución, p. 96.

El área de la ventana se relaciona con el área de las secciones transversales del aislamiento, secciones transversales de los conductores, y sección transversal de los aislamientos.

De la figura se pueden deducir las siguientes expresiones:

- Altura efectiva del devanado

$$h_s = D - 2(d_a + r_c)$$

Donde:

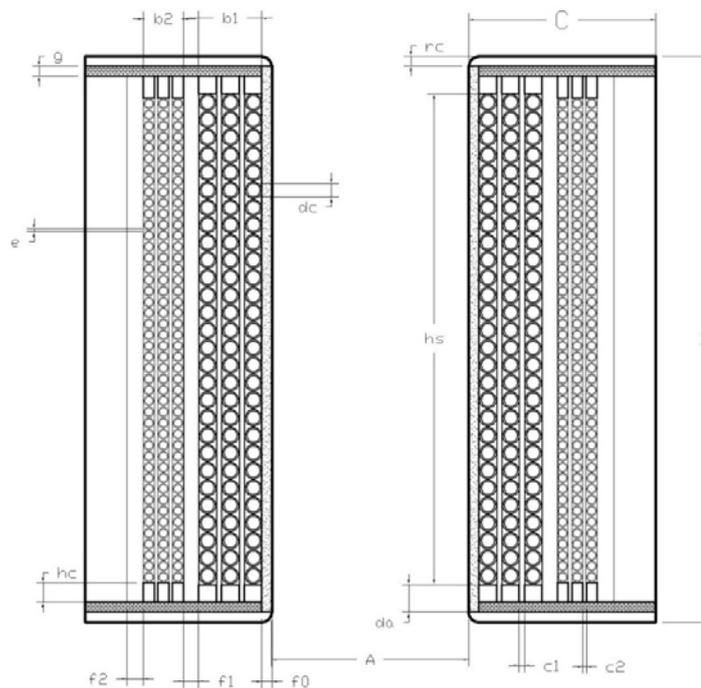
h_s = Altura efectiva del devanado

D = Altura de la ventana del núcleo

d_a = Distancia axial del aislamiento (collar + aislamiento del yugo)

r_c = Radio de curvatura para núcleo enrollado (3.17mm)

Figura 26. **Vista de la sección de espacio de ventana**



Fuente: elaboración propia.

- El número de espiras por capa

$$N_{e/cap} = \frac{h_s}{d_c + e}$$

Donde:

d_c = Diámetro o la altura del conductor

e = Espesor de aislante entre hilos contiguos según la tabla XVII y XVIII

Tabla XVII. **Aumento del diámetro debido al aislamiento en hilos conductores**

Tipo de aislamiento	mm
Hilos esmaltados	0,05
Esmalte y una capa de algodón	0,15
Dos capas de seda	0,15
Dos capas de algodón	0,30
Dos capas de papel solapado	0,30
Dos capas de papel a tope	0,15

Fuente: SÁNCHEZ BLÁSQUEZ, F.I., Diseño de un transformador de 5MVA, p. 69.

- El ancho del devanado k ($k=1, 2, 3, \dots$) b_k en función del diámetro del conductor k ($k=1, 2, 3, \dots$) d_{ck} ; el aislante del conductor e y el grosor del aislante entre capa k ($k=1, 2, 3, \dots$) c_k y el número de capas por devanado k ($k=1, 2, 3, \dots$) $N_{cap/dev k}$ es:

$$b_k \cong N_{cap/dev k}(d_{ck} + e + c_k)$$

Tabla XVIII. **Aumento del lado de las barras de cobre debido al aislamiento**

Tipo de aislamiento	mm
Dos capas de algodón (en hélice)	0.40
Dos capas de papel en hélice a tope	0.40
Una cinta de papel solapado a 1/2	0.70
Una cinta de algodón solapado a 1/2	0.80

Fuente: SÁNCHEZ BLÁSQUEZ, F.I., Diseño de un transformador de 5MVA, p. 69.

- El número de capas por devanado k (k=1, 2, 3, ...) en función de número total de espiras y la cantidad de espiras que tiene cada capa es:

$$N_{\text{capas/devk}} = \frac{N_{\text{total espiras por devanado k}}}{N_{\text{espiras/capK}}}$$

- Número de total espiras que tiene el devanado k en función del número de espiras que tiene cada capa y el número de capas que tiene cada devanado

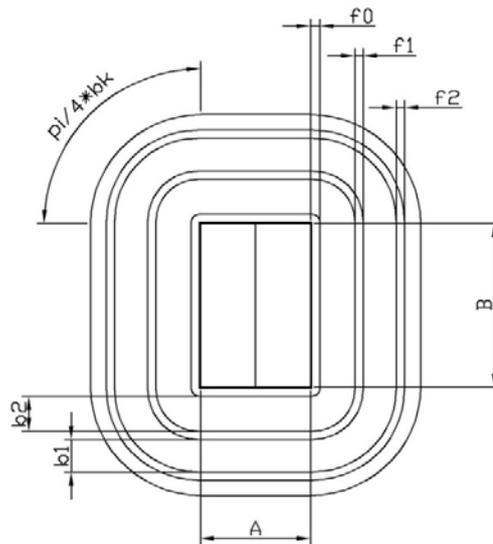
$$N_{\text{total de espiras por devando k}} = N_{\text{espiras/capk}} * N_{\text{cap/devanado}}$$

3.3.1.9. Longitud del conductor

De la figura 27 se puede deducir la longitud media total del conductor por espira k (k=1, 2, ...) LME_k tanto en el devanado primario como en el secundario se calcula con:

$$LME_k \cong 2(A + B) + \pi(f_k + b_k)$$

Figura 27. **Corte transversal del los devanados primario y secundario con sus aislamientos**



Fuente: elaboración propia.

Para la longitud total de la bobina se multiplica la longitud media por espira LME por el número de espiras por devanado N_k y se aumenta la longitud del conductor por los dobleces y unión de las terminales; para que no haga falta en la fabricación.

Si se aumenta un 10% a la longitud se tiene:

$$L_{bobinak} = N_k * LME * 1.1$$

3.3.1.10. Cálculo del peso del conductor

El peso se da en la tabla V o se calcula hallando el volumen del cilindro conductor y se multiplica por la densidad del cobre (8890 kg/m³)

$$m = \rho * \pi * \frac{D^2}{4} * L$$

Donde:

m = Masa del cobre en kg

ρ = Densidad del cobre con 99 % de pureza 8890 kg/m³

L = Longitud del conductor en m

D = Diámetro del conductor en m

3.3.1.11. Volumen del transformador

El volumen para un transformador acorazado con núcleo normalizado de tipo E/I, incluyendo cobre, hierro y aislamientos, es aproximadamente de 10.5 A³ donde A = al ancho de la columna central del núcleo del transformador.

3.4. Procedimiento de ensamblado

El procedimiento de ensamblado o construcción del transformador, se realiza con base en el diseño del transformador, después de que se han realizado los cálculos y se ha comprado todos los materiales. Se realiza en talleres especiales y con maquinaria apropiada para tal efecto.

3.4.1. Colocación del carrete en la bobinadora

Conseguir en el mercado un carrete prefabricado de tamaño apropiado o si no, fabricar uno de cartón o papel impregnado con cola epóxica.

Colocar el carrete sobre la bobinadora con ayuda de un bloque cuadrado de madera, el cual deberá agujerarse en los extremos. Si no se cuenta con

bobinadora colocarlo sobre las mordazas de un torno o taladro de bajas revoluciones o enrollarse a mano, siempre y cuando se pueda manipular el alambre conductor.

Para transformadores de gran tamaño, se aconseja usar maquinaria especial como bobinadoras con sistemas automáticos.

3.4.2. Preparación de las terminales del conductor

Retirar una pequeña cantidad de esmalte al extremo del alambre, unir el alambre con los cables de salida con algún tipo de soldadura.

Proteger la soldadura con espagueti termoencogible o de fibra de vidrio de diámetro apropiado, y dirigirlo hacia afuera del carrete por medio de los orificios para tal propósito. Si es necesario reforzar las salidas, deberá hacerse tubos de cartón prensado con mayor resistencia mecánica.

Asegurar el ducto de salida a la formaleta con cinta de enmascarar o de fibra de vidrio térmica, de modo que durante el bobinado no se desprendan los cables.

La longitud del cable de salida debe ser la apropiada para evitar que no haga falta después.

3.4.3. Enrollado del devanado primario

Enrollar primero el alambre de bajo voltaje, contando el número de vueltas, usando un tacómetro o algún mecanismo especial.

El devanado de bajo voltaje se enrolla primero porque el aislamiento que se requiere es menor; además, el alambre es más grueso y da más consistencia al iniciar el bobinado.

Si el alambre es muy grueso o va a tener varias derivaciones, se pueden enrollar alambres paralelos. Se empieza a enrollar la primera capa de alambre esmaltado de abajo hacia arriba y de izquierda a derecha, viendo el carrete del lado de frente en giro antihorario. Sobre la primera capa se enrolla la segunda capa de alambre esmaltado hasta que se consiga la cantidad de vueltas requeridas; si es necesario se va identificando la cantidad de vueltas de cien en cien, colocando una cinta con el número de espiras.

Al finalizar el enrollado soldar su respectivo cable de salida con el procedimiento antes mencionado.

3.4.4. Enrollado del devanado secundario

Aislar el devanado primario del secundario con las capas necesarias de cinta de enmascarar y papel parafinado o papel prensado.

Enrollar el devanado de alto voltaje con el procedimiento antes mencionado, de tal forma que las espiras queden bien apretadas sin espacios de aire, de forma ordenada y pulcra. Colocar los cables de salida al devanado.

Si es necesario colocar capas de aislamiento de papel entre devanados, asegurarlas con cinta. Si el transformador tuviera varias derivaciones centrales deben unirse correctamente las terminales de las bobinas, siguiendo las marcas de polaridad de la fuerza magnetomotriz inducida. Si por ejemplo, se realizara el embobinado para dos derivaciones centrales y se enrollaran tres alambres conductores a la vez, se tiene que unir el inicio del primer devanado con el final

del segundo; el inicio del segundo con el final del tercero, siempre respetando las polaridades.

Si el transformador tiene más de dos capas, se realiza el mismo procedimiento para las demás capas o devanados.

3.4.5. Aislamiento y colocación de las chapas

Reforzar los cables de salida con papel prensado y cinta, colocando las terminales separadas con una capa de papel prensado, de modo que las soldaduras queden bien protegidas y evitar algún cortocircuito o circuito abierto.

Al finalizar el enrollado de todas las bobinas, se aísla la última capa con papel adhesivo o papel contacto.

Si la bobina no cuenta con carrete, deben de amarrarse las bobinas con cáñamo y cinta de aislar y sumergirse en barniz aislante.

Si las bobinas no tienen la forma rectangular apropiada puede usarse martillo, prensa de banco y un bloque de madera para darle la forma correcta.

Colocar intercaladas las chapas de acero magnético de forma, hasta que la cavidad del carrete quede completamente llena y compacta; si es necesario ajustarlas con martillo.

Si es un núcleo enrollado, las chapas ya vienen diseñadas para tal objetivo y se aseguran bien con abrazaderas de cinta de acero.

3.5. Pruebas posteriores al ensamblado

Comprobar si no existe corto circuito o circuitos abiertos entre devanados, medir aislamiento entre espiras; verificar los voltajes de salida y la relación de transformación.

3.6. Acabados y fijación

Para que el transformador tenga una buena apariencia y buena protección contra la humedad, debe cubrirse el núcleo con pintura sintética a base de aceite. Ajustar las chapas en las cuatro esquinas con tornillos, roldana y tuercas. Además, se le colocarán escuadras o pie de amigos para sujetar el transformador a la base.

En algunos transformadores de potencia, el conjunto de bobinado y núcleo del transformador se calientan en un horno durante ocho horas a 135°C con el objetivo de derretir la cola epóxica del papel, e inmovilizar los componentes; además de secar cualquier rastro de humedad que pudiera tener el transformador.

Por último se debe proteger el transformador con alguna carcasa metálica o tanque de acero, conectar las terminales de salida con bornes termoplásticos y conectar el cable de masa. Algunos transformadores se sumergen en aceite para su refrigeración, se tapan herméticamente y se les aplica vacío para eliminar cualquier residuo de humedad. Realizar las pruebas de rigidez dieléctrica del aceite y del aislante, entre otras.

4. SISTEMA DE MEDICIÓN

Este capítulo trata lo relacionado con el sistema de medición, ya que en el diseño general del instrumento se deben incluir ciertos parámetros metroológicos y cumplir algunas especificaciones. Por ejemplo, en los ensayos de los transformadores y en la calibración de los instrumentos de medición como el voltímetro y amperímetro, usados para la medición de los voltajes de paso y la corriente que se inyecta en la tierra.

4.1. Conceptos básicos de metrología

En la industria moderna la medición, conjuntamente con la experimentación y todas las herramientas del método científico, son elementos esenciales para lograr mayor rendimiento en la productividad y para alcanzar la calidad de los bienes y servicios.

Según el enfoque clásico, una medición se realiza con el fin de determinar un valor tan próximo como sea posible al valor verdadero único, de una magnitud, llegándose a la conclusión que no es posible jamás conocer el valor verdadero de una medición. Sin embargo en el enfoque actual de la incertidumbre, el fin no es determinar el mejor valor verdadero, sino atribuir un intervalo de valores al mesurando.

También se puede decir que la medición es la comparación del valor de una magnitud y otra tomada como referencia, o un conteo de entidades.

El procedimiento de medida es el conjunto de operaciones, descrito específicamente, para realizar mediciones particulares de acuerdo con un método determinado, basado en los conceptos siguientes:

- Resolución es una medida del cambio más pequeño posible en la salida (indicación).
- La sensibilidad: relaciona al cambio más pequeño en la entrada (estímulo) que causa un cambio discernible en la salida.
- Exactitud en el enfoque actual o enfoque de la incertidumbre: se define como la proximidad entre el promedio de un número infinito de valores medidos repetidos y un valor de referencia. Dicho valor de referencia puede ser un valor verdadero del mesurando o valor asignado mediante un patrón de medida, cuya incertidumbre de medida es despreciable.
- La precisión de medida: se define como la proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto o de objetos similares, bajo condiciones especificadas.
- Actualmente, se utiliza incertidumbre en lugar de exactitud: el vocablo incertidumbre significa duda sobre la validez del resultado de la medición. La incertidumbre de medida es consecuencia de la imperfección en la realización de las mediciones, y se le define como un parámetro asociado al resultado (de la medición) que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos al mesurando [8], con base en la información usada.
- Error de medida: se define como la diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia.

- Tolerancia: es la máxima variación permitida o mínima variación posible en una característica de calidad de un producto manufacturado.
- Las especificaciones: sencillamente son los límites de aceptación que se han elegido para un proceso o un producto, considerado un sistema constante de causas aleatorias y mantenido dentro de control estadístico.

4.2. Propiedades generales de los instrumentos de medida

Algunos términos que se utilizan para describir los instrumentos de medida; son igualmente aplicables a un dispositivo de medida, un transductor de medida o un sistema de medida y por analogía, también pueden ser aplicados a una medida materializada o a un material de referencia.

4.2.1. Respuesta o curva de calibración

La característica de respuesta de un instrumento de medida es la relación existente entre una señal de entrada y la respuesta correspondiente del instrumento de medida y se puede expresar por medio de una ecuación, una tabla o gráfica.

4.2.2. Intervalo nominal, amplitud nominal y valor nominal

El intervalo nominal o intervalo nominal de indicaciones (algunos le llaman campo de medida; otros, rango; en inglés *range*); es el conjunto de valores comprendidos entre dos indicaciones externas redondeadas o aproximadas, que se obtiene para una configuración particular de los intervalos de la escala, por una posición dada de los controles del instrumento o controles de medida y que sirve para designar dicha configuración.

El valor nominal es el valor redondeado o aproximado de una característica de un instrumento de medida que proporciona una guía para su uso.

Ajuste es la operación de llevar un instrumento de medida a un estado de funcionamiento adecuado para su uso, como cuando se ajusta un instrumento de medida después de una calibración para lograr que su indicación se acerque al valor de referencia.

4.2.3. Incertidumbre instrumental, exactitud, respetabilidad, resolución, sensibilidad, movilidad, zona muerta e histéresis

Los términos que se definieron antes fueron términos generales en metrología; a continuación se definen los términos específicos para un instrumento de medida:

- La incertidumbre instrumental es la componente de la incertidumbre de medida que proviene del instrumento de medida o del sistema de medida utilizado, y se obtiene mediante su calibración. Esto significa que el instrumento o sistema de medida es causa de una componente más de la incertidumbre de medida.
- La exactitud de un instrumento de medida es la habilidad que él tiene para hacer mediciones con pequeña incertidumbre, considerándose como un concepto meramente cualitativo. Al revisar las especificaciones técnicas de instrumentos de medida o sistemas de medida de diversos fabricantes, se constata que hay aún confusión del término exactitud del instrumento de medida con el término precisión del instrumento de medida. En fin, al día de hoy no hay un acuerdo sobre la definición del

concepto referido a instrumentos de medida. A pesar de lo indicado, hay autores que toman la especificación anterior como la incertidumbre instrumental.

Incertidumbre instrumental

$$= \pm(\% \text{ de la lectura} + \% \text{ del intervalo nominal})$$

- La respetabilidad o precisión de un instrumento de medida es la aptitud de este para proporcionar indicaciones próximas entre sí por aplicaciones repetidas del mismo mesurando, bajo las mismas condiciones de medición. Nótese que precisión de medida y precisión de un instrumento de medida son conceptos similares, pero representan cosas diferentes. La precisión de medida contiene dentro de ella la precisión del instrumento de medición utilizado para llevarla a cabo.
- La resolución de un instrumento de medida o de un sistema de medida es la más pequeña variación de la magnitud de medida que produce una variación, perceptible de la indicación correspondiente.

Para un dispositivo indicador, la resolución normalmente se especifica para cada intervalo nominal de un instrumento de medida y se le considera como la diferencia más pequeña entre las indicaciones de un dispositivo indicador, que puede ser distinguido significativamente.

Para un DMM, libre de ruido, la resolución es el cambio más pequeño en una señal de entrada que produce un cambio perceptible en la señal de salida, es el cambio en la indicación cuando el dígito significativo más pequeño cambia un paso (o da un salto); por ejemplo si la indicación más pequeña es de 0.001V, la resolución es de 0.001 V es decir 1mV.

La resolución puede representarse en términos de bits, dígitos o unidades absolutas, las que pueden relacionarse entre sí. La cantidad de bits, determina el desempeño del convertidor analógico-digital. Las siguientes ecuaciones pueden ser útiles cuando se desea especificar la resolución de un dispositivo indicador digital. La primera ecuación relaciona el número de bit con el número de palabras que puede mostrar el ADC, incluyendo el 0. La segunda ecuación sirve para trasladar el número de cuentas a dígitos de resolución, y la ecuación tres representa la resolución en decibeles:

$$\text{Número de LSB} = 2^{\# \text{ de bits}}$$

$$\text{Dígitos de resolución} = \log_{10}(\text{número de LSB})$$

$$\text{Decibeles} = 20\log_{10}(\text{número de LSB})$$

El número de cuentas es análogo a los LSBs para un ADC. Una cuenta representa un valor de una señal que puede ser digitalizada y es equivalente a un salto o una etapa en un contador.

Para instrumentos de medida digitales más sofisticados, particularmente instrumentos virtuales, los dígitos de resolución no aplican directamente a los dígitos desplegados en el indicador. Por tanto, debe tenerse cuidado si se especifica el número de dígitos de estos instrumentos.

El paso de una cuenta o el tamaño de un salto se llaman la unidad absoluta de resolución, definida como:

$$\text{Unidad absoluta de resolución} = \frac{\text{Amplitud de medida o span}}{\text{Número de cuentas}}$$

- La sensibilidad de un instrumento de medida es el cambio en su respuesta, dividido por el correspondiente cambio del estímulo; o el cociente de la variación de la indicación y la variación correspondiente del valor de la magnitud de medida.

$$Sensibilidad = \frac{\Delta \text{indicación}}{\Delta \text{estímulo}}$$

La sensibilidad puede depender del valor de la magnitud medida (mesurando) y, por otro lado, la variación del valor de la magnitud medida debe ser grande en relación con la resolución del instrumento de medida.

Como ejemplos de sensibilidad se puede tener mm/mA, 2.5 cm/°C. Para un voltímetro digital, una sensibilidad de 10 nV significa que el voltímetro es capaz de detectar un cambio de 10 nV de voltaje de entrada. De este modo se puede decir que la sensibilidad del instrumento de medida digital es la unidad más pequeña de un parámetro dado que puede ser significativamente detectado con el instrumento, cuando se usa bajo condiciones razonables.

En realidad, en el caso de instrumentos de medida o sistemas digitales, la sensibilidad se define como la relación entre el menor intervalo nominal de medida y la resolución en cuentas.

$$Sensibilidad = \frac{\text{Amplitud de medida}}{\text{Resolución en cuentas}}$$

Puede observarse que la resolución no es lo mismo que la sensibilidad, pero que entre más pequeña es la resolución; más sensible es el instrumento de medida.

- El umbral de discriminación o movilidad: se define como la variación más grande en la señal de entrada o valor de magnitud medida que no produce ninguna variación detectable de la respuesta de un instrumento de medida o de la indicación correspondiente.
- Histéresis: es la propiedad de un instrumento de medida mediante la cual la indicación del valor de una magnitud, cuando se toma en forma creciente difiere del mismo cuando se toma en forma decreciente.
- La linealidad: ocurre cuando la magnitud medida y la indicación tienen una relación lineal.

4.2.4. Estabilidad y deriva

Lo ideal de un instrumento de medida sería que la incertidumbre permaneciera invariable a lo largo de los años de uso del instrumento. La estabilidad de un instrumento de medida o de un sistema de medida es la aptitud de este para mantener constante en el tiempo, sus propiedades metrológicas.

La deriva se considera como una variación lenta en función del tiempo de uso de las propiedades metrológicas del instrumento de medida.

4.2.5. Velocidad de muestreo, ancho de banda, memoria, impedancia de entrada, discreción y tiempo de respuesta

La velocidad de muestreo representa el número de muestras de una forma de onda que el instrumento de medida es capaz de tomar en un periodo de tiempo determinado.

El ancho de banda se refiere al intervalo de frecuencia en el que puede variar la magnitud que se va a medir.

La capacidad de almacenamiento o profundidad de memoria es la capacidad de memoria que posee el instrumento de medida, que le es útil para registrar valores de magnitudes. Para el instrumento de medida no se requerirá, para no complicarse en el diseño.

La impedancia de entrada se especifica en $k\Omega$ o en $M\Omega$, típicamente $10 M\Omega$; además se puede acompañar de un valor de capacitancia.

El tiempo de respuesta es el intervalo de tiempo que comprende el instante en el cual una señal de entrada es sometida a un cambio brusco especificado y el instante en el cual la señal de salida alcanza dentro de los límites especificados un valor en régimen estable sostenido.

4.2.6. Error de un instrumento de medida

El error máximo permitido o límite de error, también llamado error máximo tolerado, es el valor del error de medida respecto de un valor de referencia conocido, que es permitido por las especificaciones o reglamentos para una medición, un instrumento de medida o sistema de medida dado.

El error absoluto es la diferencia entre el valor medido y el valor de referencia y se representa en las unidades de magnitud de medida.

Si x es el valor medido y X_0 el valor de referencia, entonces el error absoluto Δ es:

$$\Delta = x - X_0$$

Este error surge debido al mal ajuste de los instrumentos de medida, la influencia de campos externos, construcciones defectuosas, deriva, etc.

Para el error relativo se tiene:

$$\delta = \frac{x - X_0}{X_0}$$

4.3. Especificaciones de un instrumento de medida

Las especificaciones escritas son el medio del cual disponen los usuarios para la determinación, selección y adquisición del equipo adecuado para una aplicación particular.

El usuario debe de comprobar que tales especificaciones sean ciertas y solicitar certificados de los ensayos a los que ha sido sometido el instrumento de medida o sistema de medida, por parte de laboratorios acreditados en dichos ensayos.

Las especificaciones de los instrumentos de medida son únicas y normalmente están acompañadas de una declaración de las condiciones de medición que el fabricante observa durante la fabricación y calibración de su instrumento, antes de ponerlo a la venta. Sin embargo, para asegurar que el instrumento se comporta de acuerdo con las especificaciones técnicas, es necesario que el usuario lo opere dentro de las mismas condiciones de medición seguidas por el fabricante.

Entre algunas especificaciones se tiene la temperatura nominal de calibración, temperatura ambiente de operación, humedad relativa, valor nominal de tensión de alimentación, frecuencia nominal, límites máximos de

temperatura para operación, límites máximos de temperatura para almacenaje, factores de corrección por temperatura, aislamiento eléctrico, requisitos de potencia eléctrica, peso y dimensiones, etc.

Se debe recordar que las condiciones eléctricas y ambientales del lugar donde se va usar el instrumento sean compatibles con las condiciones especificadas por el fabricante.

4.3.1. Interpretación de especificaciones técnicas

Un calibrador es un instrumento que suministra una magnitud de salida altamente estable, con un valor de incertidumbre apropiadamente pequeño donde el valor de partes por millón (ppm) se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{Valor ppm} = \frac{\text{Valor porcentual \%} * 10^6 \text{ ppm}}{100\%}$$

En el siguiente ejemplo se analizan las especificaciones de un calibrador de tensión y corriente continua.

Amplitud o *span* = 10V

Resolución = 10uV

Incertidumbre instrumental por 1 año en \pm (20 ppm puesta o lectura +8 ppm amplitud + 25uV).

Suponiendo que el calibrador esté proporcionando una tensión de salida de 5V, la especificación quedaría \pm (20 ppm de 5V + 8pp de 10V + 25uV) igual a \pm (100 uV + 80 uV + 25uV) entonces el voltaje de salida sería 5 \pm 205 uV.

El responsable de la calibración no puede afirmar nada respecto del futuro comportamiento del medidor; sin embargo, con las cartas de control se puede ayudar a estimar el posible comportamiento de los medidores después de su calibración.

4.4. Calibración, verificación, ensayo y certificación

Se entiende por calibración el conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores de una magnitud, indicados por un instrumento de medida o sistema de medida; o los valores representados por una medida materializada y los correspondientes de la magnitud, realizados por patrones.

La calibración puede servir para saber si el instrumento de medida está bueno, se le debe aplicar correcciones, requiere ajustes o hay que desecharlo.

El resultado de una calibración puede ser consignado en un documento, llamado certificado de calibración o informe de calibración, adhiriéndose un *sticker* al instrumento, que informa su estado, la fecha de calibración y la fecha en que tiene que calibrarse nuevamente.

La verificación, en cambio incluye la calibración de un instrumento de medida y por medio de ella se constata el cumplimiento de especificaciones por parte del instrumento de medida. En metrología legal, la verificación es el procedimiento que incluye examen, sellaje y/o emisión de certificado de verificación que determina y confirma que un instrumento de medida cumple con los requisitos regulatorios (legales).

Un ensayo es una operación técnica que consiste en la determinación de una o más características de un producto, proceso o servicio dado, de acuerdo con un procedimiento especificado.

El instrumento que se diseña en este trabajo de graduación debe de pasar varios ensayos realizados por un laboratorio, con competencia para ensayos y calibración. Dicho laboratorio deberá ser acreditado; esto significa que el laboratorio ha cumplido con un procedimiento mediante el cual se reconoce la competencia técnica y la idoneidad para realizar dichos ensayos.

Además, el instrumento de medición deberá cumplir con una certificación, que consiste en el procedimiento por el cual una tercera parte asegura por escrito que un producto, proceso o servicio cumple con los requerimientos especificados y es merecedor de confianza de conformidad con una norma u otro documento normativo especificado, asegurando que cumple con características definidas y se basa en el resultado de pruebas, inspecciones y auditorías realizadas en la empresa certificada, mediante la intervención sistemática de la entidad de certificación.

Entre algunos beneficios de la certificación se pueden mencionar los siguientes: introducir los productos y servicios a otros mercados, evidenciar frente a los clientes la conformidad con las normas, reconocimiento y diferenciación del producto y el cumplimiento de reglamentación.

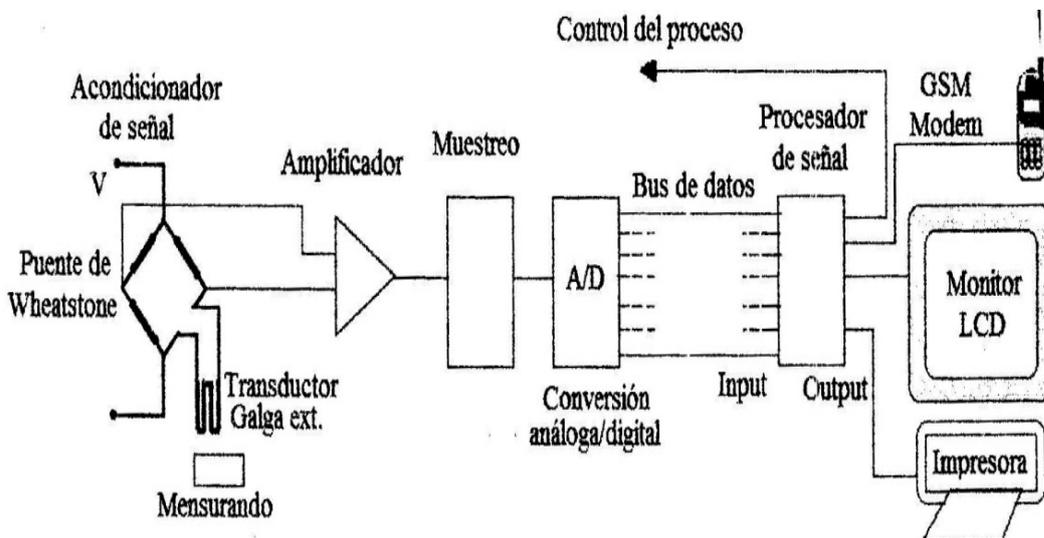
4.5. Instrumentos de medición digital

Los instrumentos de medición digital brindan una indicación discreta o digital que representa una ventaja respecto de los instrumentos con indicador de aguja, debido a que la presentación digital de las mediciones elimina errores como el paralelaje y errores por interpolación. La lectura es más rápida y en

algunos casos el instrumento se puede conectar con una interface de salida con dispositivos de almacenamiento y grabación de datos como un computador.

Un sistema de medida esta formado por los elementos de la figura 28, de los cuales solo se describirán los más importantes para nuestra finalidad.

Figura 28. **Sistema de medida, control y adquisición de datos de temperatura**



Fuente: GONZÁLEZ LÓPEZ, Francisco Javier, Metrología, p. 51.

Un mesurando: se define como la magnitud que se desea medir.

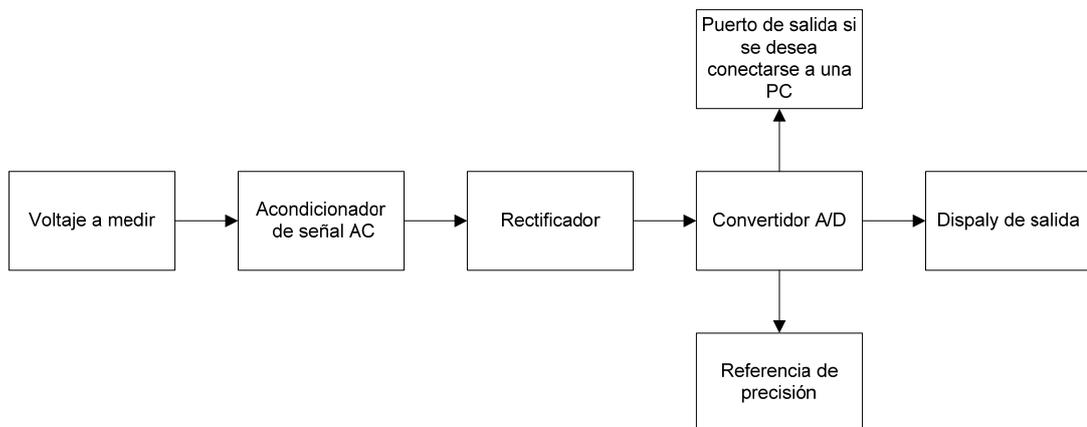
Respecto del amplificador, este sirve para amplificar los pequeños voltajes que se obtienen de los transductores, además incrementan la impedancia en la entrada aumentando la sensibilidad y disminuyendo el efecto de carga. Uno de los amplificadores más usados como etapa inicial en instrumentos de medición es el amplificador de instrumentación, debido a que poseen mejores características para la medición que los de uso común.

Si se necesita amplificar voltajes muy pequeños se puede añadir más etapas de amplificación, con ganancias mayores a uno.

4.5.1. Voltímetro digital de corriente alterna

Un voltímetro electrónico de estado sólido, tiene los elementos que se muestran en la figura 29. Los voltímetros digitales se clasifican según la forma como procesan la señal, entre los cuales están los DVM tipo rampa, los DVM tipo integrador, los de balance continuo y los de aproximaciones sucesivas. Se describirá únicamente DVM tipo rampa.

Figura 29. Diagrama de bloques de un voltímetro digital



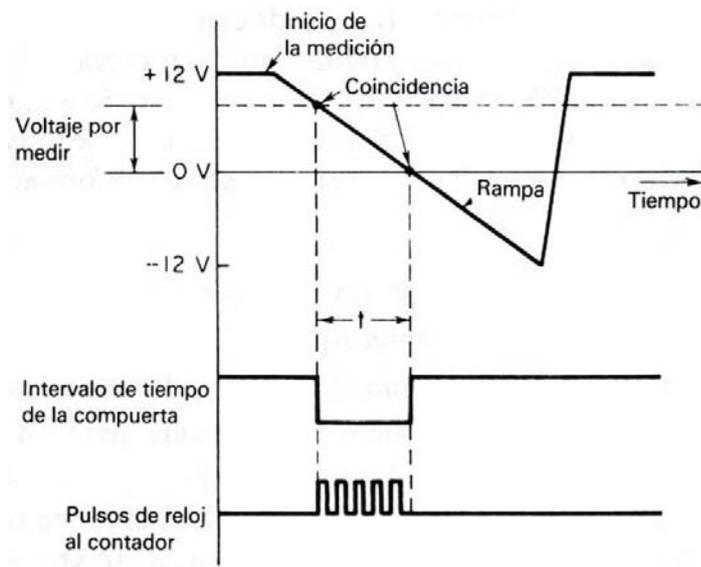
Fuente: elaboración propia.

4.5.1.1. Funcionamiento de un voltímetro digital tipo rampa

Básicamente un voltímetro digital tipo rampa trabaja a base de medir el tiempo que tarda en elevarse un voltaje lineal tipo rampa, desde 0 hasta el

voltaje a medir. Este intervalo de tiempo se mide con una serie de contadores electrónicos, la cual exhibe los resultados en pantallas de cristal líquido o *display* tipo *led*.

Figura 30. **Conversión de voltaje a tiempo mediante compuerta con pulsos de reloj**



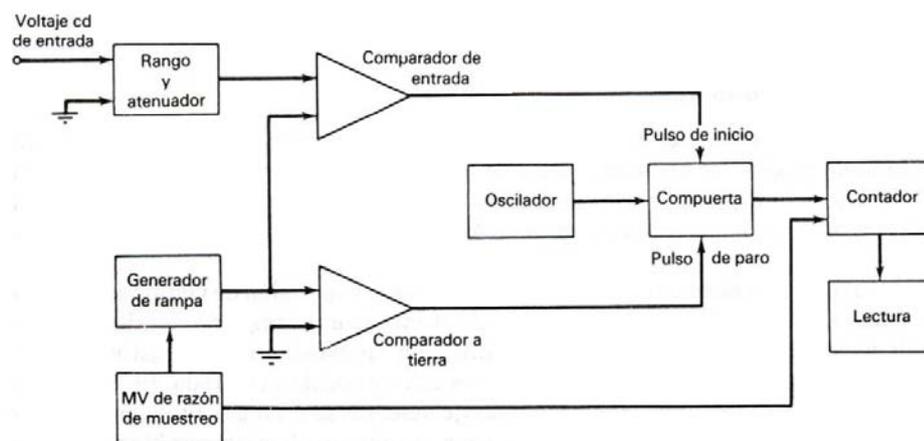
Fuente: COOPER, William D. y Albert D. Helfrick, Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición, p. 81.

La gráfica de la figura 30 muestra que una rampa negativa de voltaje generada con un integrador, se compara con el voltaje desconocido de entrada por medir, ver figura 31. En el preciso instante de coincidencia, el comparador envía un pulso de inicio a una compuerta, permitiendo el paso cierta cantidad de pulsos de reloj hacia el contador. Cierta cantidad de pulsos es cortada con otro pulso de disparo proveniente de otro comparador (comparador a tierra), cuando la rampa cruza por cero. Los pulsos de reloj que pasan a través de la

compuerta activan varias unidades de conteo, en décadas que totalizan el número de pulsos para después ser exhibidos en una pantalla.

El circuito de relación de muestreo genera un pulso para reinicio de otro nuevo ciclo de medición, activando la nueva rampa y restableciendo a cero las unidades de conteo en décadas; eliminando momentáneamente la exhibición de los datos en pantalla.

Figura 31. Diagrama de bloques de un voltímetro digital tipo rampa



Fuente: COOPER, William D. y Albert D. Helfrick. Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición, p. 81.

4.5.1.2. Convertidor analógico digital TC7107A

El convertidor analógico digital TC7107 es un convertidor para conectarse en un *display* de 3 ½ dígitos. Este dispositivo tiene una precisión de referencia con un coeficiente de temperatura máximo de 20 ppm / C°. Esto representa una mejora de 4 a 7 veces respecto de convertidores similares. El TC7107A maneja un *display* de diodos emisores de luz de ánodo común de 8

mA por segmento. Es un convertidor de bajo costo y alta resolución. El indicador de la medición requiere de únicamente un *display*, cuatro resistencias, y cuatro capacitores. Se reduce el error de linealidad a menos de una cuenta. Tiene alta impedancia diferencial de entrada con corriente de fuga de 1pA e impedancia de entrada de $10^{12} \Omega$.

4.5.1.2.1. Especificaciones máximas absolutas

Suministro de voltaje	V+ = 6V, V- = -9V
Disipación de potencia	(T _A ≤ 70 °C) 40-pin DIP plástico=1.23 W
Temperatura de operación	Dispositivos "C" 0 °C a 70 °C
Temperatura de almacenamiento	-65 °C a 150 °C
Temperatura de soldadura por 10 segundos	+300 °C

El dispositivo deberá protegerse de descargas y campos estáticos, además deberá almacenarse en material conductor.

En la tabla XIX se describe las características eléctricas del circuito integrado TC7107; en la tabla XX se describe los pines y en la figura 32 se encuentra la configuración.

4.5.1.3. Convertidor de corriente alterna a corriente directa AD636

El circuito integrado monolítico AD636 permite convertir el valor verdadero de señales de corriente baja RMS a CD. El circuito integrado se

especifica para un rango de señales de entrada RMS entre 0 y 200 mV. A factores de cresta de hasta 6 se le puede hacer frente con 0.5% de error adicional. Permitiendo mediciones precisas de formas de onda de entrada complejas.

Tabla XIX. Características eléctricas del TC7107

Parameters	Test Conditions	TC7106/A & TC7107/A			Unit
		Min	Typ	Max	
Zero Input Reading	$V_{IN} = 0.0\text{ V}$ Full-Scale = 200.0mV	-000.0	±000.0	+000.0	Digital Reading
Ratiometric Reading	$V_{IN} = V_{REF}$ $V_{REF} = 100\text{ mV}$	999	999/1000	1000	Digital Reading
Roll-Over Error (Difference in Reading for Equal Positive and Negative Reading Near Full-Scale)	$V_{IN} = +V_{IN}^{\pm} = 200\text{mV}$	-1	±0.2	+1	Counts
Linearity (Max. Deviation From Best Straight Line Fit)	Full-Scale = 200mV or Full-Scale = 2.000 V	-1	±0.2	+1	Counts
Common-Mode Rejection Ratio (Note 4)	$V_{CM} = \pm 1\text{V}$, $V_{IN} = 0\text{V}$, Full Scale = 200.0 mV	—	50	—	μV/V
Noise (Pk – Pk Value Not Exceeded 95% of Time)	$V_{IN} = 0\text{ V}$ Full-Scale = 200.0mV	—	15	—	μV
Leakage Current @ Input	$V_{IN} = 0\text{ V}$	—	1	10	pA
Zero Reading Drift	$V_{IN} = 0\text{ V}$ "C" Device = 0°C to +70°C $V_{IN} = 0\text{ V}$ "I" Device = -25°C to +85°C	—	0.2	1	μV/°C
Scale Factor	$V_{IN} = 199.0\text{mV}$, "C" Device = 0°C to +70°C (Ext. Ref = 0ppm/°C)	—	1	5	ppm/°C
Temperature Coefficient	$V_{IN} = 199.0\text{mV}$ "I" Device = -25°C to +85°C	—	—	20	ppm/°C
Supply Current (Does Not Include LED Current For TC7107/A)	$V_{IN} = 0$	—	0.8	1.8	mA
Analog Common Voltage (With Respect to Pos. Supply)	25kΩ Between Common and Pos. Supply	2.7	3.05	3.35	V
Temp. Coeff. of Analog Common (With Respect to Pos. Supply)	25kΩ Between Common and Pos. Supply 0°C ≤ T _A ≤ +70°C ("C", Commercial Temp. Range Devices)	7106A/7A 7106/7	20 80	50 —	ppm/°C ppm/°C
Temp. Coeff. of Analog Common (With Respect to Pos. Supply)	25kΩ Between Common and Pos. Supply -25°C ≤ T _A ≤ 85°C ("I", Industrial Temp. Range Devices)	—	—	75	ppm/°C
TC7106A ONLY Pk – Pk Segment Drive Voltage (Note 5)	$V^+ \text{ to } V^- = 9\text{V}$	4	5	6	V
TC7106A ONLY Pk – Pk Backplane Drive Voltage (Note 5)	$V^+ \text{ to } V^- = 9\text{V}$	4	5	6	V
TC7107A ONLY Segment Sinking Current (Except Pin 19)	$V^+ = 5.0\text{V}$ Segment Voltage = 3V	5	8.0	—	mA
TC7107A ONLY Segment Sinking Current (Pin 19)	$V^+ = 5.0\text{V}$ Segment Voltage = 3V	10	16	—	mA

Fuente: TELCOM SEMICONDUCTOR, INC, Hoja de datos 7106-7107, 184.

Tabla XX. Descripción de los pines del a/d TC7106-TC6107

PIN	DESCRIPCIÓN
1	Suministro de voltaje positivo
2 - 8	Activa los segmentos de unidades
9-14, 25	Activa los segmentos de decenas
15 - 18, 22- 24	Activa los segmentos de centenas
19	Activa el segmento a y b para un millar
20	Activa el despliegue de polaridad negativa
21	Tierra digital
26	Suministro de voltaje negativo
27	Salida del integrador, punto de conexión para el capacitor del integrador
28	Conexión del resistor del integrador, use 47k Ω para un rango de escala completa de 200 mV y 470k Ω para un rango de escala completa de 2V
29	El tamaño del condensador auto-cero influye en el ruido del sistema. Usar un capacitor de 0.47 μ F para escala completa de 200mV, y un capacitor de 0.047 μ F para escala completa de 2V
30	Entrada analógica BAJA
31	Señal de entrada analógica ALTA

Continuación de la tabla XX.

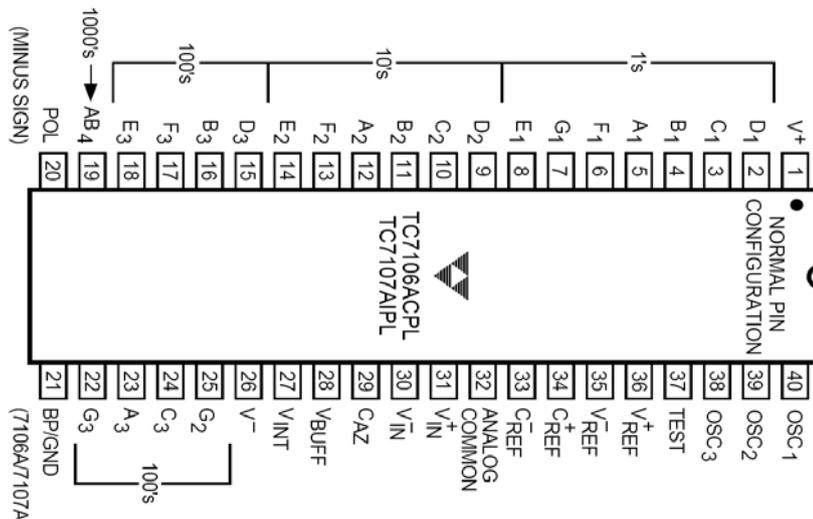
32	Este pin principalmente es usado para fijar el modo común del voltaje analógico para operación con baterías o en sistemas donde la señal de entrada está referida a la fuente de suministro. Este actúa como referencia de la fuente de voltaje.
33, 34	Generalmente se conecta un capacitor de 0.1 μ F. Si existe un gran voltaje de modo-común (por ejemplo, el pin 30 no es el analógico común), y se usa una escala de 200 mV, se recomienda un capacitor de 1 μ F y mantener el margen de error dentro de 0.5.
35, 36	La entrada analógica requerida para obtener una salida de escala máxima (1999 conteos). Para una salida de escala máxima de 199.9mV colocar en los pines 35 y 36 100mv. Para una salida de escala máxima de 2V colocar en los pines 35 y 36 1V.
37	Prueba de lámpara. Cuando se lleva a estado alto, todos los segmentos se encienden y el display deberá mostrar -1888. Este pin también puede ser usado como suministro negativo para generación externa de puntos decimales

Continuación de la tabla XX.

38, 39 y 40	Los pines 38, 39 y 40 interactúan con la sección del oscilador, para un reloj de 48kHz (3 lecturas por segundo), conectar al pin 40 un resistor de 100 kΩ y un capacitor de 100 pF, el resistor de 100kΩ se conecta al pin 39, y el capacitor de 100 pF se une al pin 38.
----------------	---

Fuente: *TelCom Semiconductor, Inc.*, Hoja de datos 7106-7107. p. 3.

Figura 32. **Configuración de pines del convertidor analógico digital TC7106**



Fuente: TELCOM SEMICONDUCTOR, INC., Hoja de datos 7106-7107. p. 186.

El circuito integrado monolítico, requiere de baja corriente para funcionar, un valor típico de 800 uA. Este opera con un amplio rango de fuentes de potencia con voltajes de +2.5V a +16.5V o de +5 V a +24 V.

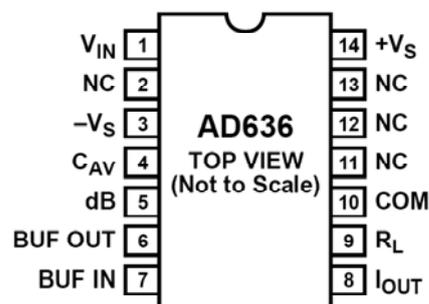
Las terminales de entrada y salida vienen protegidas para sobre niveles de voltaje que puedan dañar el integrado.

El AD636 incluye una salida auxiliar en dB, obtenida por un circuito interno que representa el logaritmo de la entrada.

4.5.1.3.1. Especificaciones absolutas máximas

Voltaje de suministro doble:	+/-16.5V
Voltaje de suministro simple:	24V
Disipación interna de potencia:	500 mW
Voltaje máximo de entrada:	+/-12Vpico
Rango de temperatura de almacenamiento:	-55 °C a +150 °C
Rango de temperatura de operación:	0 °C a 150 °C
Temperatura por soldadura 60 segundos:	300 °C
Rango ESD:	1000V

Figura 33. Configuración de pines AD636 encapsulado SBDIP



Fuente: ANALOG DEVICES. Hoja de datos AD636, p. 6.

Tabla XXI. Especificación del circuito integrado AD636 (A 25 °C, +Vs=3V y -Vs=-5 V)

Model	AD636J			AD636K			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
TRANSFER FUNCTION	$V_{OUT} = \sqrt{avg \times (V_{IN})^2}$			$V_{OUT} = \sqrt{avg \times (V_{IN})^2}$			
CONVERSION ACCURACY							
Total Error, Internal Trim ^{2, 3}	±0.5 ± 1.0			±0.2 ± 0.5			mV ± % of reading
vs. Temperature, 0°C to +70°C	±0.1 ± 0.01			±0.1 ± 0.005			mV ± % of reading/°C
vs. Supply Voltage	±0.1 ± 0.01			±0.1 ± 0.01			mV ± % of reading/V
DC Reversal Error at 200 mV	±0.2			±0.1			% of reading
Total Error, External Trim ²	±0.3 ± 0.3			±0.1 ± 0.2			mV ± % of reading
ERROR VS. CREST FACTOR ⁴							
Crest Factor 1 to 2	Specified Accuracy			Specified Accuracy			
Crest Factor = 3	-0.2			-0.2			% of reading
Crest Factor = 6	-0.5			-0.5			% of reading
AVERAGING TIME CONSTANT	25			25			ms/μF of C _{AV}
INPUT CHARACTERISTICS							
Signal Range, All Supplies	0 to 200			0 to 200			mV rms
Continuous RMS Level							
Peak Transient Inputs							
+3 V, -5 V Supply	±2.8			±2.8			V p-p
±2.5 V Supply	±2.0			±2.0			V p-p
±5 V Supply	±5.0			±5.0			V p-p
Maximum Continuous Nondestructive Input Level (All Supply Voltages)	±12			±12			V p-p
Input Resistance	5.33	6.67	8	5.33	6.67	8	kΩ
Input Offset Voltage	±0.5			±0.2			mV
FREQUENCY RESPONSE ^{3, 5}							
Bandwidth for 1% Additional Error (0.09 dB)							
V _{IN} = 10 mV	14			14			kHz
V _{IN} = 100 mV	90			90			kHz
V _{IN} = 200 mV	130			130			kHz
±3 dB Bandwidth							
V _{IN} = 10 mV	100			100			kHz
V _{IN} = 100 mV	900			900			kHz
V _{IN} = 200 mV	1.5			1.5			MHz
OUTPUT CHARACTERISTICS ³							
Offset Voltage, V _{IN} = COM	±0.5			±0.2			mV
vs. Temperature	±10			±10			μV/°C
vs. Supply	±0.1			±0.1			mV/V
Voltage Swing							
+3 V, -5 V Supply	0.3	0 to 1.0		0.3	0 to 1.0		V
±5 V to ±16.5 V Supply	0.3	0 to 1.0		0.3	0 to 1.0		V
Output Impedance	8	10	12	8	10	12	kΩ

Continuación de la tabla XXI.

Model	AD636J			AD636K			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
dB OUTPUT							
Error, $V_{IN} = 7 \text{ mV to } 300 \text{ mV rms}$		± 0.3	± 0.5		± 0.1	± 0.2	dB
Scale Factor		-3.0			-3.0		mV/dB
Scale Factor Temperature Coefficient		0.33			0.33		% of reading/ $^{\circ}\text{C}$
		-0.033			-0.033		dB/ $^{\circ}\text{C}$
I_{REF} for 0 dB = 0.1 V rms	2	4	8	2	4	8	μA
I_{REF} Range	1		50	1		50	μA
I_{OUT} TERMINAL							
I_{OUT} Scale Factor		100			100		$\mu\text{A/V rms}$
I_{OUT} Scale Factor Tolerance	-20	± 10	+20	-20	± 10	+20	%
Output Resistance	8	10	12	8	10	12	k Ω
Voltage Compliance		$-V_S$ to ($+V_S - 2 \text{ V}$)			$-V_S$ to ($+V_S - 2 \text{ V}$)		V
BUFFER AMPLIFIER							
Input and Output Voltage Range	$-V_S$ to ($+V_S - 2 \text{ V}$)			$-V_S$ to ($+V_S - 2 \text{ V}$)			V
Input Offset Voltage, $R_S = 10 \text{ k}\Omega$		± 0.8	± 2		± 0.5	± 1	mV
Input Bias Current		100	300		100	300	nA
Input Resistance		10^8			10^8		Ω
Output Current	(+5 mA, -130 μA)			(+5 mA, -130 μA)			
Short-Circuit Current		20			20		mA
Small Signal Bandwidth		1			1		MHz
Slew Rate ⁶		5			5		V/ μs
POWER SUPPLY							
Voltage, Rated Performance		+3, -5			+3, -5		V
Dual Supply	+2, -2.5		± 16.5	+2, -2.5		± 16.5	V
Single Supply	5		24	5		24	V
Quiescent Current ⁷		0.80	1.00		0.80	1.00	mA
TEMPERATURE RANGE							
Rated Performance	0		+70	0		+70	$^{\circ}\text{C}$
Storage	-55		+150	-55		+150	$^{\circ}\text{C}$
TRANSISTOR COUNT							
		62			62		

Fuente: ANALOG DEVICES. Hoja de datos AD636, p. 3.

Tabla XXII. **Descripción de las funciones de los pines AD636**

PIN	DESCRIPCIÓN
1	Entrada de voltaje
2	No conectado
3	Suministro de voltaje negativo
4	Capacitor del promedio
5	Voltaje de salida en (dB)
6	Salida del buffer
7	Entrada del buffer
8	Corriente de salida RMS
9	Resistor de carga
10	Común
11	No conectado
12	No conectado
13	No conectado
14	Suministro de voltaje positivo

Fuente: *ANALOG DEVICES*. Hoja de datos AD636, p, 7.

4.6. Amperímetro de corriente alterna

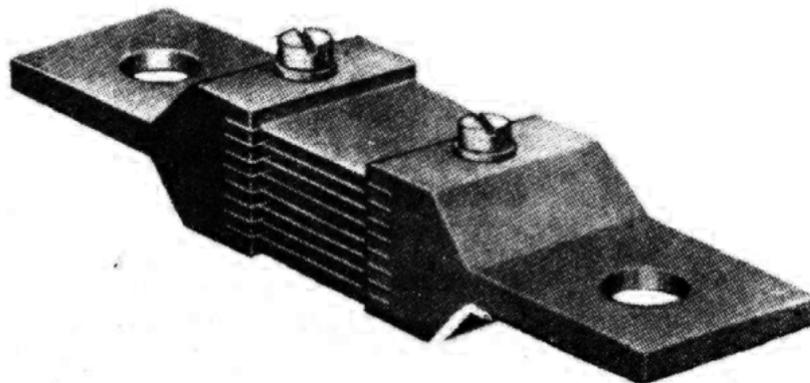
El amperímetro es un instrumento para medir intensidad de corriente eléctrica, existen de varios tipos, dependiendo de cómo se tome la muestra de corriente a medir, entre los cuales están los de resistencia en derivación *shunt*, y los de transformadores de corriente CT. Los primeros son más usados para corriente directa. También se puede usar una resistencia en derivación para corriente alterna de baja frecuencia con cierta calibración, siempre tomando en cuenta que puede existir una impedancia que está en función de la frecuencia a la cual funciona el instrumento.

Para amperímetros de corriente alterna es más conveniente usar el principio de inducción electromagnética, principio usado en los transformadores de corriente y pinzas amperimétricas.

La resistencia en derivación o *shunt* de medición es una resistencia que deriva cierta cantidad de corriente para usarla para la medición. Estas resistencias se fabrican con valores fijos menores a 1Ω , para que tengan una insignificante caída de tensión.

La resistencia *shunt* está construida con cuatro terminales de tal forma de obtener un puente Kelvin de cuatro hilos, dos en los cuales puede circular una gran cantidad de corriente y los otros dos para tomar la muestra ya sea de voltaje o de corriente que se usará en la medición. Esta señal de muestra puede amplificarse, rectificarse y acoplar, con el objetivo de tomar la medida de la corriente. Sirve para ampliar el alcance de medición para el amperímetro.

Figura 34. **Resistencia en derivación para alta corriente**

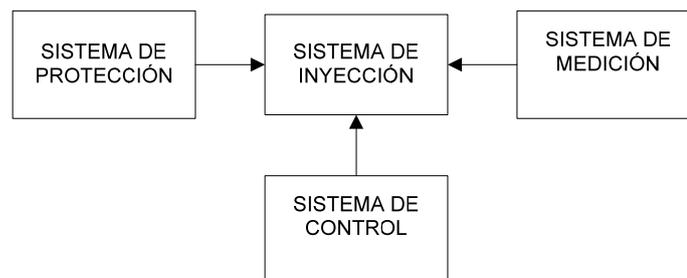


Fuente: COOPER, William D. y Albert D. Helfrick, Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición, p. 58.

5. DISEÑO GENERAL DEL INSTRUMENTO

El inyector de corrientes para medición del los voltajes de paso y contacto está formado por cuatro sistemas, los cuales se muestran en la figura 35.

Figura 35. **Diagrama de bloques del instrumento**



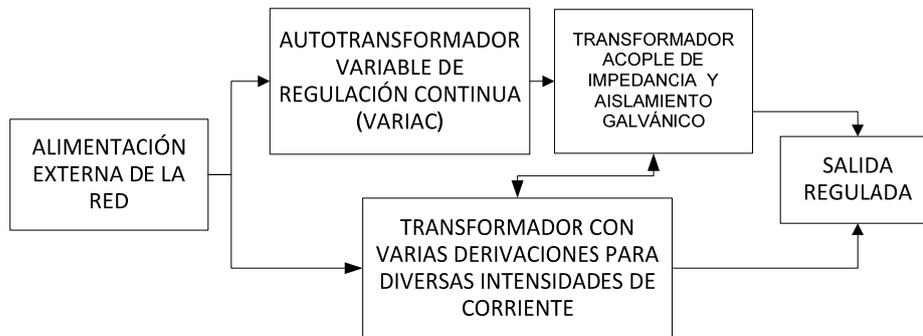
Fuente: elaboración propia.

5.1. Diseño del sistema de inyección de corriente

Los elementos principales del sistema de inyección se muestran en la figura 36.

Se desea diseñar una fuente de inyección de corriente variable de 50 kVA, con alimentación monofásica 230V de 60 Hz. La fuente de alimentación de corriente estará formada por un autotransformador variable de regulación continua (variac) que se alimenta directamente desde los cables de entrada de 230 V, como se muestra en el circuito de la figura 37.

Figura 36. **Elementos del sistema de inyección de corriente**



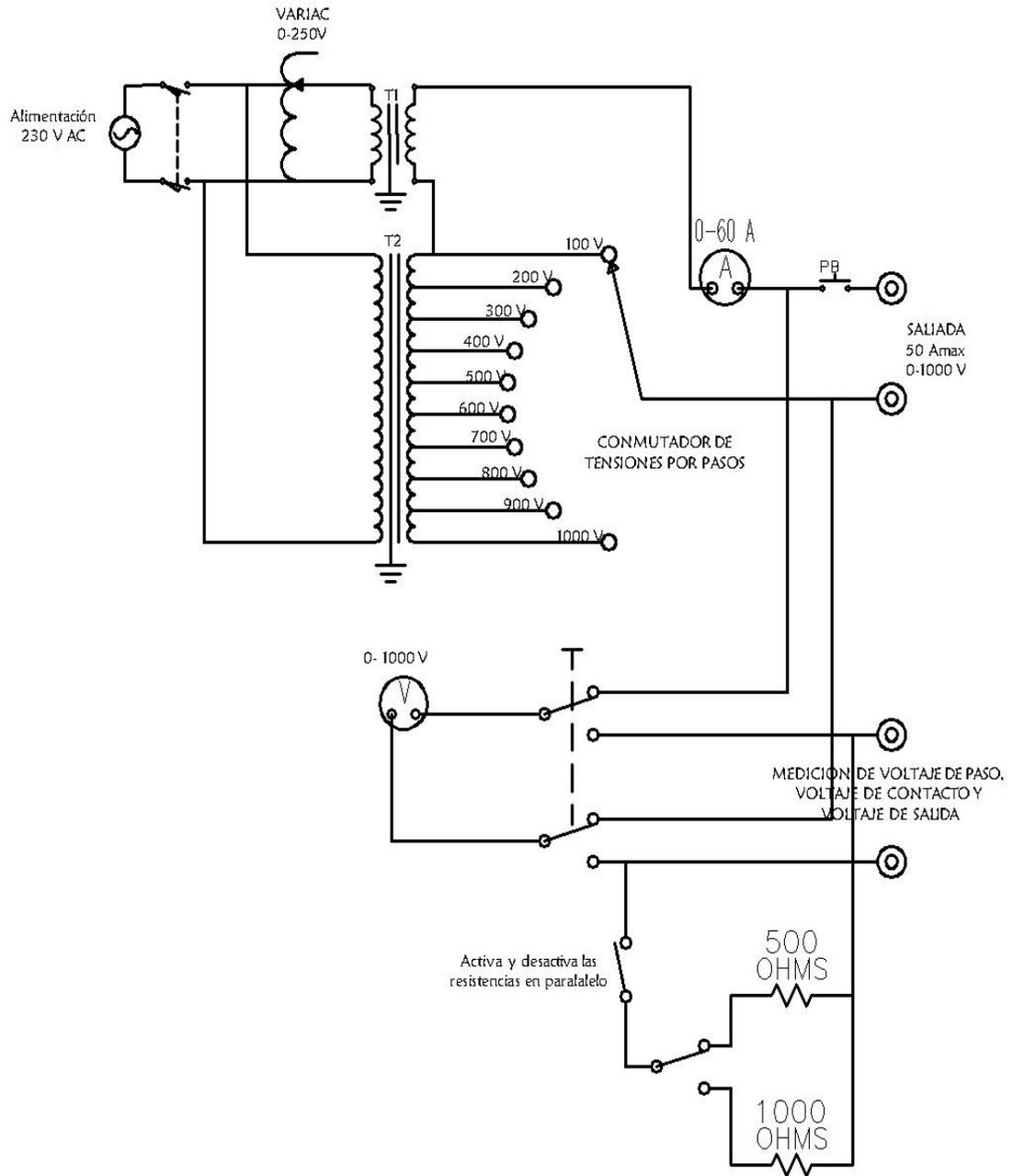
Fuente: elaboración propia.

La salida variable de un autotransformador; según la posición de su eje es de 0 a 250V; se conecta en paralelo a la entrada de un transformador T1. El transformador T1 aísla galvánicamente al autotransformador; además funciona como acople de la impedancia de carga.

La magnitud del voltaje de salida variable del transformador T1 es de un máximo de 100 V, que es igual al voltaje de salida de una derivación central del otro transformador T2.

La salida de T1 se conecta en serie con T2, como se muestra en el circuito de la figura 37. El voltaje de salida máximo del transformador con ocho derivaciones (T2) es de 900 V; de tal manera que los voltajes en la salida se sumen con los del otro transformador, obteniendo voltajes de salida escalonados y variables entre 0 y 1000 V.

Figura 37. Circuito del sistema de inyección de corriente



Fuente: elaboración propia.

Las relaciones de transformación para los dos transformadores es la siguiente (ver figura 38):

$$n_1 = \frac{V_{21}}{V_{11}} = \frac{100}{250} = 0.4$$
$$n_2 = \frac{V_{22}}{V_{12}} = \frac{900}{230} = 3.91$$

Como las salidas de ambos transformadores están conectadas en serie, la corriente que circula por los devanados secundarios será la misma (50 A).

Si la salida de 1000 V está conectada a una resistencia de 20 Ω (bucle cerrado de la circulación de corriente), la corriente en la salida sería 1000 V/20= 50 A. La potencia de salida sería 50A*1000V = 50 kVA, que es la potencia exigida por la norma para medición de voltaje de paso y contacto, para subestaciones de alta tensión (ver página 16).

El instrumento está formado de dos transformadores, cuya potencia total suma 50kVA (T1= 5 kVA más T2= 45 kVA).

Si se toma 97.90% para la eficiencia de T1 para la potencia de salida de 5 kVA (ver tabla V), la potencia que toma T1 de la red es:

$$S_{entrada1} = \frac{S_{salida1} * 100}{\eta_1} = \frac{5000 * 100}{97.90} = 5107.2 \text{ kVA}$$

La corriente en la entrada de T1 sería:

$$I_{entrada1} = \frac{S_{entrada1}}{V_{entrada1}} = \frac{5107}{250} = 20.43 \text{ A}$$

Para un transformador T2 de 45 kVA se toma una eficiencia de 98.75%; entonces la potencia que toma de la red sería:

$$S_{entrada2} = \frac{S_{salida2} * 100}{\eta_2} = \frac{45000 * 100}{98.75} = 45569.6 \text{ kVA}$$

La corriente de entrada:

$$I_{entrada2} = \frac{S_{entrada2}}{V_{entrada2}} = \frac{45570}{230} = 198.13 \text{ A}$$

La corriente en la salida del variac ($I_H = 20.43 \text{ A}$) es la misma que la del devanado primario de T1

El voltaje en la entrada del variac es 230 V y el voltaje en la salida es de 250 V:

$$\frac{V_{SE}}{V_C} = \frac{N_{SE}}{N_C} = \frac{20}{230}$$

La corriente en la entrada del variac sería:

$$\frac{I_L}{I_H} = \frac{N_{SE} + N_C}{N_C}$$

$$I_L = \left(\frac{N_{SE}}{N_C} + 1 \right) * I_H = \left(\frac{20}{230} + 1 \right) * 20.43 = 22.21 \text{ A}$$

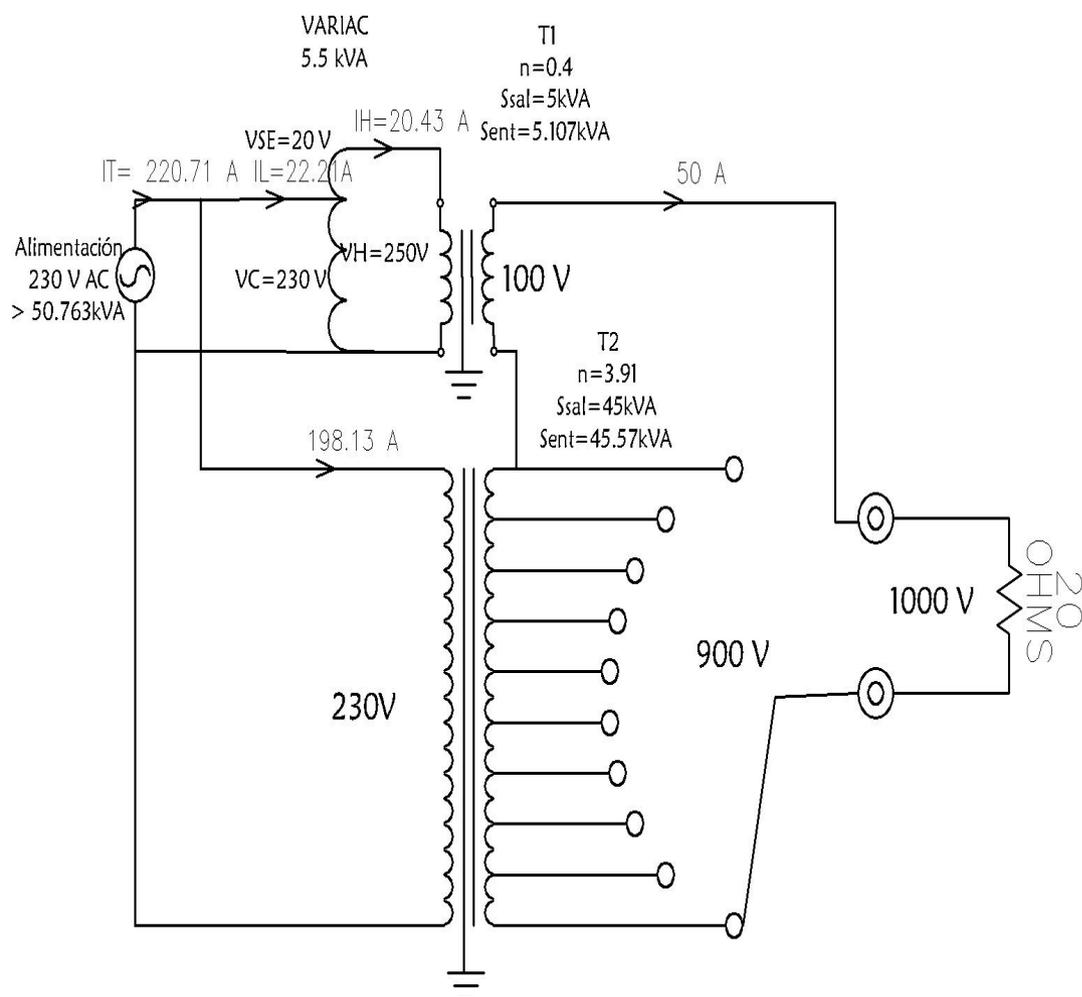
La corriente total que demanda el instrumento de la red es:

$$I_T = 22.21 + 198.5 = 220.71 \text{ A}$$

Por tanto, la potencia de entrada será:

$$SE = 220.71 \cdot 230 = 50.763 \text{ kVA}$$

Figura 38. **Corriente en las ramas primario y secundario del los transformadores conectados a una resistencia de $R_t = 60\Omega$**



Fuente: elaboración propia.

Los calibres de los conductores para las fases para conexión con la red se calculan sobre un 25% de la potencia según norma ANSI C57.12.50-1981

$$I=220.71*1.25 = 275A$$

Por la tabla de capacidad de amperios para conductores en tubo (véase anexos) se tiene un conductor de 300 kcmil para 285 A THHW.

Para el conductor neutro con el 70 % de ampacidad $0.7*275= 192.5$ A se elige un conductor THHW AWG 3/0 para 150 A.

Para los conductores en la salida para $50 *1.25 = 62.5$ se elige dos cables número 6 AWG THHW para 65 A.

5.1.1. Determinación de las especificaciones del variac

Entre las especificaciones del variac se incluyen: la frecuencia, voltaje de entrada y salida, la potencia y la corriente de carga constante.

Tabla XXIII. **Especificaciones del autotransformador requeridas para el instrumento**

VARIAC ARC 9-2				
Frecuencia (Hz)	Ventrada (V)	V salida (V)	Potencia (VA)	Corriente de carga constante (A)
50-60	230	0-250	5500	22

Fuente: elaboración propia.

En la figura 38 se muestra el circuito eléctrico del instrumento con la magnitud de corriente por cada rama; en la tabla XXIII se presenta el voltaje y la corriente de salida del instrumento y en la tabla XXIV se muestran las especificaciones del variac.

Tabla XXIV. **Voltaje, corriente, resistencia de salida del inyector**

SALIDA DEL SISTEMA DE INYECCIÓN		
V de salida= VT1+VT2 (V)	I salida	R mínima conectada entre electrodos (Ω)
0	50	0
100	50	2
200	50	4
300	50	6
400	50	8
500	50	10
600	50	12
700	50	14
800	50	16
900	50	18
1000	50	20

Fuente: elaboración propia.

5.1.2. Diseño del transformador T1 5kVA

Para el diseño del transformador en este trabajo de graduación, se utilizará el procedimiento del capítulo 3 de un transformador tipo acorazado, con núcleo E-I para simplificar los cálculos, aunque esto repercuta en los costos del transformador.

5.1.2.1. Datos preliminares para los cálculos

Potencia nominal	$S_t = 5000 \text{ VA}$
Voltaje en el primario	$V_1 = 250 \text{ V}$
Voltaje en el secundario	$V_2 = 100 \text{ V}$
Eficiencia (ver tabla XV)	$\eta = 97.90 \%$
Corriente en el primario	$I_1 = 20.43 \text{ A}$
Corriente en el secundario	$I_2 = 50 \text{ A}$
Frecuencia	$f = 60 \text{ Hz}$
Relación de transformación	$n = 0.4$
Tipo de chapa (véase anexo)	Grano orientado C140-30
Densidad de flujo magnético	$B = 1.5 \text{ Tesla}$
Pérdidas máximas de la chapa	1.21 W/kg
Espesor de la chapa	$\delta = 0.3 \text{ mm}$
Factor de apilamiento (véase página 66)	$K_h = 0.95$
Factor de ventana (véase página 67)	$K_v = 0.5$
Coefficiente de densidad de corriente	$X = 1$
Factor de calentamiento para 25°C	$K_j = 366$

5.1.2.2. Cálculo del área del producto

Para calcular el área del producto, se procede de la siguiente manera:

$$A_p = \left(\frac{10000 * S_t}{4.44 * \left(\frac{x}{x+1} \right) * K_j * K_h * K_v * f * B_m} \right)^{\frac{8}{7}}$$

$$A_p = \left(\frac{10000 * 5000}{4.44 * \left(\frac{1}{1+1} \right) * 0.95 * 0.5 * 366 * 60 * 1.5} \right)^{\frac{8}{7}} = 4067.1 \text{ cm}^4$$

El ancho de la columna seria (ver página 66)

$$A = \left(\frac{4}{3} A_p \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$A = \sqrt[4]{\frac{4}{3} * 4067.1} = 8.58[\text{cm}]$$

$$A = 85.8 \text{ mm}$$

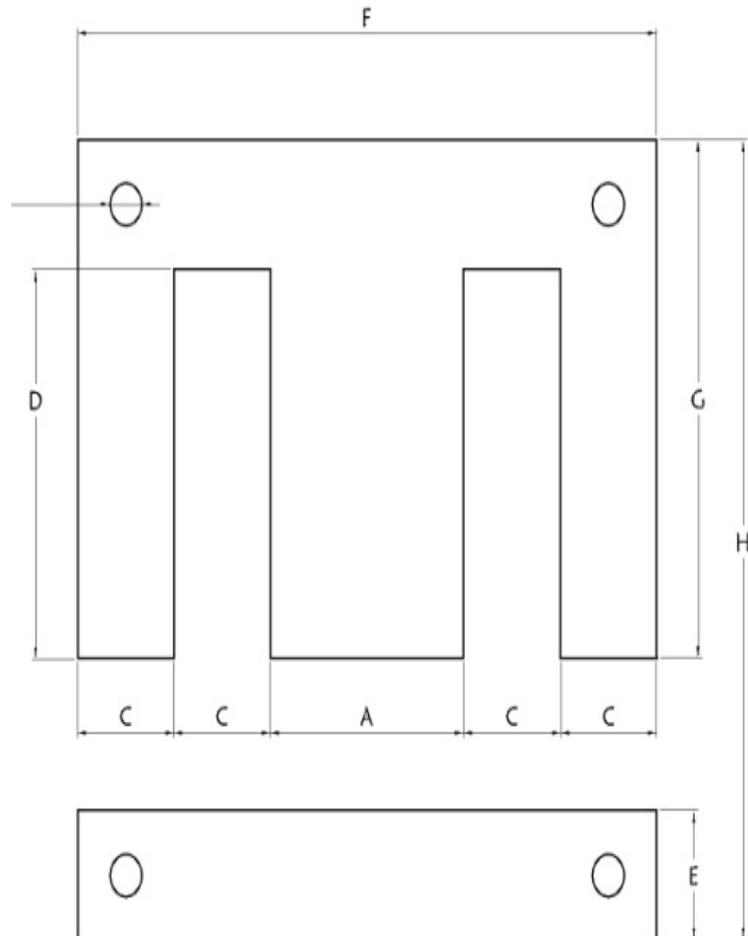
Se elige la lámina para el núcleo, con las dimensiones presentadas en la siguiente tabla:

Tabla XXV. **Dimensiones del núcleo normalizado E/I 300**

A	100	mm
C	50	mm
D	150	mm
E7	50	mm
F	300	mm
G	200	mm
H	250	mm
Agujero de Φ	10	mm

Fuente: elaboración propia.

Figura 39. Chapa normalizada E/I240



Fuente: elaboración propia.

El área de la columna central sería:

$$A_c = 8.58^2 = 73.65 \text{ cm}^2 = 7.365 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

La profundidad B sería $73.65 / 10 = 7.36 \text{ cm}$.

La cantidad de chapas apiladas:

$$\#de\ chapas = \frac{B}{\delta} = \frac{7.36}{0.3} = 24.5 \cong 25$$

5.1.2.3. Densidad de corriente del conductor

Para su cálculo se procede así:

$$J = K_J * A_p^{-\frac{1}{8}}$$

$$J = 366 * 4067.1^{-\frac{1}{8}} = 129.51 \left[\frac{A}{cm^2} \right] = 1.3 \left[\frac{A}{cm^2} \right]$$

Como $x=1$, se tiene que la densidad de corriente para el devanado primario es igual a la densidad de corriente para el secundario.

5.1.2.4. Cálculo de las dimensiones del conductor

Para calcular las dimensiones en el caso del conductor primario, con corriente de 20.43 A, se tiene que el área del mismo es:

$$A_{cond} = \frac{I}{J} = \pi \frac{D^2}{4}$$

$$A_{cond} = \frac{I}{J} = \frac{20.43}{1.3} = 15.71 \text{ mm}^2$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{A_{cond} * 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{15.71 * 4}{\pi}} = 4.47 \text{ mm}$$

Como el diámetro es mayor a 3.5, se elige un alambre cuadrado o pletina rectangular; de la tabla IX se observa que para un área de:

$$15.71 \text{ mm}^2 * \frac{1 * 10^6 \text{ mils cuadradas}}{645.6 \text{ mm}^2} = 24350 \text{ mil cuadradas},$$

Se elige un alambre de cobre de 25360 mils cuadradas, equivalente a un AWG #6 con doble capa, clase H para 180° C, debido a que es un transformador tipo seco (ver anexos).

Para el devanado secundario tenemos se tiene:

$$Acd = \frac{I}{J} = \frac{50}{1.3} = 38.46$$

$$38.46 \text{ mm}^2 * \frac{1 * 10^6 \text{ mils cuadradas}}{645.6 \text{ mm}^2} = 59572.5 \text{ mils cuadradas}$$

Se elige un alambre de cobre # 2 AWG de 64980 mils cuadradas con doble capa, clase H para 180° C.

5.1.2.5. Cálculo del número de espiras por devanado

Para este cálculo, se procede de la siguiente manera:

Primario

$$N_1 = \frac{E_1}{4.44 * f * B * Kh * A_c} = \frac{250}{4.44 * 60 * 1.5 * 0.95 * 7.365 * 10^{-3}} = 89.41$$

$$N_1 \cong 90 \text{ espiras}$$

Secundario

$$N_2 = \frac{E_2}{4.44 * f * B * Kh * A_c} = \frac{100}{4.44 * 60 * 1.5 * 0.95 * 7.365 \times 10^{-3}} = 35.76$$

Al aumentar 6% por pérdidas y regulación se tiene:

$$N_2 = 35.76 * 1.06 = 37.9 \cong 38$$

5.1.2.6. Cálculo de voltios por espira

Para el cálculo del número de voltios por espira, se procede de la siguiente manera:

Voltios por espira para el primario:

$$\frac{V_1}{N_1} = \frac{250}{90} = 2.78 V$$

Voltios por espira para el secundario:

$$\frac{V_2}{N_2} = \frac{100}{38} = 2.63 V$$

Sus valores dentro de un pequeño margen de diferencia.

5.1.2.7. Cálculo de los aislamientos

Para el cálculo de aislamientos, el procedimiento es el siguiente:

En el aislamiento entre espiras primario, para frecuencia nominal, y voltaje nominal con un factor de seguridad de 1.8 se tiene:

$$V_e = \frac{V}{N} * F_s = \frac{250}{90} * 1.8 = 5.0 \text{ V}$$

Para encontrar el voltaje entre espiras, con un factor de seguridad de 1.5 y un BIL de 30kV (ver tabla XVI), se tiene:

$$V_e = \frac{V}{N} * F_s = \frac{30000}{90} * 1.5 = 500 \text{ V}$$

El aislamiento secundario entre espiras para frecuencia nominal, y voltaje nominal con un factor de seguridad de 1.8, se tiene:

$$V_e = \frac{V}{N} * F_s = \frac{100}{38} * 1.8 = 4.74 \text{ V}$$

Para determinar el voltaje entre espiras con un factor de seguridad de 1.5 y un BIL de 30kV (ver tabla XVI), se tiene:

$$V_e = \frac{V}{N} * F_s = \frac{30000}{38} * 1.5 = 1184.2 \text{ V}$$

Consultando las características del aislamiento del conductor se observa que el voltaje calculado (500V), está por debajo de la especificación del fabricante (rigidez dieléctrica esmalte con doble capa 1500 V).

Para calcular el aislamiento entre capas se debe encontrar primero el número de espiras por capas con la altura efectiva del devanado; con estos datos se calcula el voltaje entre capas para frecuencia nominal e impulso, y se elige el grosor de aislamiento adecuado de papel prensado u otro material.

Se tiene que para una tensión de 250 V (ver tabla XV) se elige la clase de aislamiento, que es de 1.2 kV. De la tabla XVI se tiene un BIL de 30 kV, con las siguientes distancias mínimas para aislamientos mayores:

- Distancia axial (da) = aislamiento de yugo (1.5mm) + aislamiento de collares (6.5 mm) = 8 mm.
- Radio de curvatura para un núcleo laminado $E/I = 0$ porque es ortogonal
- La altura efectiva para los devanados

$$hs = D - 2(da + rc) = 150 - 2 * (8 + 0) = 134mm$$

Con la altura de un conductor cuadrado #6 AWG, de la tabla IX se tiene que es de 0.1620 pulgadas equivalente a 4.11 mm y de la tabla XVII, $e=0.05*2=0.1$ mm.

El número de espiras por capa para el primario se encuentra así:

$$N_{e/capK} = \frac{hs}{d_c + e} = \frac{134}{4.115 + 0.1} = 31.79 \cong 32 \text{ espiras por capa}$$

El número de capas para el primario sería:

$$\frac{N_{capas}}{dev1} = \frac{N_{total \text{ espiras por devanado } 1}}{N_{espiras/capa}} = \frac{90}{32} = 2.81 \cong 3 \text{ capas}$$

Equivalente a dos capas de 32 espiras cada una y una capa de 26 espiras.

Con los datos anteriores ya se puede calcular el voltaje entre capas para seleccionar el grosor y tipo de aislamiento.

Para encontrar el voltaje entre capas, en el devanado primario, para frecuencia y voltaje nominal con un factor de seguridad de 1.8 se tiene:

$$V_c = \frac{2V * N_{e/capak}}{N} * Fs = \frac{2 * 250 * 32}{90} * 1.8 = 320V$$

El voltaje entre capas para impulso (30kV) y con un factor de seguridad de 1.8 corresponde a:

$$V_c = \frac{2V * N_{e/capak}}{N} * Fs = \frac{2 * 30000 * 32}{90} * 1.8 = 38400V$$

Se puede usar para aislamiento entre capas de devanado de baja tensión (250V) un cartón *presspan* clase térmica B (ver tabla XIV) de un grosor de 2 mm, con rigidez dieléctrica de 32kV.

Para hallar el número de espiras por capa para el secundario se procede así:

La altura de un conductor cuadrado (dc) #2 AWG, de la tabla IX, se tiene que es de 0.2576 pulgadas equivalente a 6.543 mm y de la tabla XVII $e = 0.05 * 2 = 0.1\text{mm}$

$$N_{e/capak} = \frac{hs}{d_c + e} = \frac{134}{6.543 + 0.1} = 20.17 \cong 21 \text{ espiras por capa}$$

El número de capas para el secundario sería (ver página 29):

$$\frac{\text{capas}}{\text{dev2}} = \frac{N_{\text{total espiras por devanado 2}}}{N_{\text{espiras/capa}}} = \frac{38}{21} = 1.81 \cong 2 \text{ capas}$$

Equivalente a una completa con 21 espiras y otra capa con 17 espiras

Con los datos anteriores se calcula el voltaje entre capas para el secundario. El voltaje entre capas para frecuencia nominal y voltaje nominal con un factor de seguridad de 1.8 tenemos se tiene:

$$V_c = \frac{2V * N_{e/capak}}{N} * Fs = \frac{2 * 100 * 21}{38} * 1.8 = 199 \text{ V}$$

Para el voltaje entre capas para impulso (30kV) y un factor de seguridad de 1.8 se tiene:

$$V_c = \frac{2V * N_{e/capak}}{N} * Fs = \frac{2 * 30000 * 21}{38} * 1.8 = 59684 \text{ V}$$

Se puede usar para aislamiento entre capas para el devanado de alta tensión (1000 V) y un aislante con rigidez dieléctrica de mayor a 46kV. Para el presente caso, se utilizará un cartón *presspan* de un grosor de 4 mm.

Los aislamientos mayores se pueden obtener de la tabla XVI, con los valores siguientes:

- Aislamiento entre baja tensión y núcleo $f_0=1.7$ (usaremos 2mm de *presspan*)
- Aislamiento entre fases $f_1=1.7\text{mm}$ (usaremos 4mm por esfuerzos mecánicos)

- Aislamiento entre alta tensión y núcleo $f_2=1.7$ mm (se usan 2mm de *presspan*)
Claro entre bobina y tanque de 15 mm

Para comprobar si los devanados y aislamientos entran en la ventana, se enrolla primero el de mayor corriente, en este caso es el devanado primario.

Ancho de la bobina interior (ver figura 26)

$$b_1 \cong N_{cap/dev1}(dc_1 + e + c_1) = 3(4.115 + 0.1 + 2) = 18.64 \text{ mm}$$

Ancho de la bobina exterior

$$b_2 \cong N_{cap/dev2}(dc_2 + e + c_2) = 2(6.546 + 0.1 + 4) = 21.29 \text{ mm}$$

El ancho del empaquetamiento formado por aislamientos, la bobina 1, bobina 2 y aislamiento externos:

$$b = f_0 + b_1 + f_1 + b_2 + f_2 = 2 + 18.64 + 4 + 21.29 + 2 = 47.93$$

Como el ancho de la ventana (D) es mayor que el ancho del empaquetamiento b por 2 milímetros, se puede decir que ambos devanados caben dentro de la ventana y se puede proceder a calcular la longitud de los conductores.

5.1.2.8. Cálculo de la longitud total del conductor

Para el cálculo de la longitud total del conductor, debe tomarse en cuenta que el devanado secundario con calibre mayor es el arrollamiento interno.

La longitud media por espira se obtiene así:

$$LME_1 \cong 2(A + B) + \pi(f_0 + b_1)$$

$$LME_1 \cong 2 * (100 + 73.6) + \pi * (2 + 18.64) = 412.04 \text{ mm}$$

Longitud total de la bobina 1 más 10%

$$L_{bobina1} \cong N_2 * LME_1 * 1.1 \cong 38 * 412 * 1.1 = 17221 \text{ mm} = 17.2 \text{ m}$$

Para el devanado primario arrollamiento exterior, se procede así:

La longitud media por espira:

$$LME_2 \cong 2(A + B) + 8(f_0 + f_1) + \pi((b_1 + b_2))$$

$$LME_2 \cong 2 * (100 + 73.6) + \pi * (2 + 18.64 + 4 + 21.29) = 491.49 \text{ mm}$$

Longitud total de la bobina 2 más 10%

$$L_{bobina2} \cong N_1 * LME_2 * 1.1 \cong 90 * 491.49 * 1.1 = 48657 \text{ mm} = 48.657 \text{ m}$$

5.1.2.9. Cálculo del peso del conductor

Para el cálculo del peso del conductor, debe tomarse en cuenta que: para 18 metros de alambre cuadrado #2 AWG, de la tabla IX, se tiene que el peso es de 250.4 libras/1000 pies, convirtiendo al SI de unidades se tiene:

$$18 \text{ m} * \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} * \frac{1 \text{ pie}}{30.48 \text{ cm}} * \frac{250.4 \text{ lb}}{1000 \text{ pies}} = 14.79 \text{ lb}$$

En kilogramos:

$$14.79 \text{ lb} * \frac{1 \text{ kg}}{2.2046 \text{ lb}} = 6.71 \text{ kg}$$

Para 49 metros de alambre cuadrado # 6 AWG de la tabla IX, se tiene que el peso es de 97.75 libras/1000 pies; convirtiendo al SI de unidades se tiene:

$$49 \text{ m} * \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} * \frac{1 \text{ pie}}{30.48 \text{ cm}} * \frac{97.75 \text{ lb}}{1000 \text{ pies}} = 15.71 \text{ lb}$$

En kilogramos:

$$15.71 \text{ lb} * \frac{1 \text{ kg}}{2.2046 \text{ lb}} = 7.13 \text{ kg}$$

Tabla XXVI. **Resumen de los resultados de los cálculos T 5Kva**

NÚCLEO	
Área del producto Ap	4067,91 cm ⁴
Ancho de la columna central A (calculado)	8,58 cm
Área de la columna central Ac	73,65 cm ²
Núcleo normalizado EI	300
Ancho A (elegido)	10,00 cm
Profundidad B	7,36 cm
Número de laminaciones o chapas	25 chapas
Peso aproximado del núcleo	34 kg

Continuación de la tabla XXVI.

DEVANADO PRIMARIO	
Densidad de corriente J1	1,30 A/mm ²
Área del conductor primario A1	15,71 mm
Diámetro del conductor primario dc1	4,47 mm
Ancho del conductor primario (cuadrado)	4,11 mm
Número de espiras para el primario N1	90 espiras
Número de espiras por capa primario	32 e/capa
Número de capas primario	3 capas
Longitud total del conductor + 20% interior	18,79 m
Peso del alambre interior	7,08 kg
VOLTAJES MÁXIMOS	
Voltaje por espira para el primario V1/N1	2,78 V
Voltaje entre espiras primario (Frec. Nom.)	5,0 V
BIL primario	30000,0 V
Voltaje entre espiras primario (Impulso)	500,0 V
Voltaje entre capas primario (Frec. Nom.)	320,00 V
Voltaje entre capas primario (Impulso)	38400,00 V
DEVANADO SECUNDARIO	
Densidad de corriente J2	1,30 A/mm ²
Área del conductor secundario A2	38,46 mm ²
Diámetro del conductor secundario dc2	7,00 mm
Ancho del conductor secundario (cuadrado)	6,54 mm
Número de espiras para el secundario N2	38 espiras
Número de espiras por capa secundario	21 e/capa
Número de capas secundario	2 capas
Longitud del conductor + 20 % exterior	53,09 m
Peso del alambre exterior	7,86 kg
VOLTAJES MÁXIMOS	
Voltaje por espira para el secundario V2/N2	2,63 V
Voltaje entre espiras secundario (Frec. Nom.)	4,74 V
BIL secundario	30000,0 V
Voltaje entre espiras secundario (impulso)	1184,21 V
Voltaje entre capas secundario (Frec Nom)	198,95 V
Voltaje entre capas secundario (Impulso)	59684,21 V

Continuación de la tabla XXVI.

AISLAMIENTOS	
ESPESOR DE LOS AISLAMIENTOS	
Aislamiento entre baja tensión y núcleo f0	2,00 mm
Aislamiento entre baja tensión y alta tensión f1	4,00 mm
Aislamiento del devanado de alta tensión f2	2,00 mm
Aislamiento entre capas del primario c1	2 mm
Aislamiento entre capas del secundario c2	4 mm
Ancho de la bobina primaria b1	18,64 mm
Ancho de la bobina secundaria b2	21,29 mm
Ancho total del empaquetamiento b	47,93 mm
Claro entre bobina de lata tensión y columna	2,07 mm
Ancho de la ventana D	50 mm
LONGITUD DE LOS AISLAMIENTOS	
Entre capas primario	1,98 m
Entre capas secundario	1,77 m
Cartucho del núcleo	0,41 m
Entre capas primario y secundario	0,49 m
Aislamiento del devanado secundario	0,59 m
Altura efectiva de los devanados (hs)	134,00 mm
Altura de collares (hc) (tabla XV)	6,5 mm
Claro entre bobina y tanque	15,00 mm

Fuente: elaboración propia.

5.1.3. Diseño del transformador con múltiples derivaciones (T2)

Se desea diseñar un transformador T2 (ver figura 37) con alimentación monofásica 230, con ocho derivaciones centrales, voltajes de salida de 100 V por derivación, potencia de salida de 45 kVA y relación de transformación variable como aparece en la tabla XXVII.

Tabla XXVII. **Voltajes de salida y relación de transformación de T2**

Transformador 2			
V _{entrada} (V)	Cable de salida	V _{salida} (V)	Relación de transformación $n=V_2/V_1$
230	0	0	0,00
230	1	100	0,43
230	2	200	0,87
230	3	300	1,30
230	4	400	1,74
230	5	500	2,17
230	6	600	2,61
230	7	700	3,04
230	8	800	3,48
230	9	900	3,91

Fuente: elaboración propia.

El procedimiento de cálculo es el mismo que se usó para calcular el transformador anterior.

5.1.3.1. Datos del transformador para los cálculos

Potencia nominal (ver página 117)	$S_t = 45000 \text{ VA}$
Voltaje en el primario	$V_1 = 230 \text{ V}$
Voltaje en el secundario	$V_2 = 900 \text{ V}$
Eficiencia (ver tabla XV)	$\eta = 98.75 \%$
Corriente en el primario	$I_1 = 198.13 \text{ A}$
Corriente en el secundario	$I_2 = 50 \text{ A}$
Frecuencia	$f = 60 \text{ Hz}$
Relación de transformación	$n = 3.91$

Tipo de chapa (véase apéndice)	Grano orientado C140-30
Densidad de flujo magnético	B= 1.5 Tesla
Perdidas máximas de la chapa	1.21 W/kg
Espesor de la chapa	$\delta=0.3\text{mm}$
Factor de apilamiento	$K_h=0.95$
Factor de ventana	$K_v= 0.5$
Coeficiente de densidad de corriente	$X=1$
Factor de calentamiento para 25°C	$K_j=366$

5.1.3.2. Cálculo del ancho de la columna central

Para el cálculo del ancho de la columna central, se procede así:

$$A_p = \left(\frac{10000 * 45000}{4.44 * \left(\frac{1}{1+1} \right) * 0.95 * 0.5 * 366 * 60 * 1.5} \right)^{\frac{8}{7}} = 50111 \text{ cm}^4$$

El ancho de la columna central sería (ver página 65):

$$A = \left(\frac{4}{3} A_p \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$A = \sqrt[4]{\frac{4}{3} * 50111} = 16.08[\text{cm}]$$

A = 160.8 mm

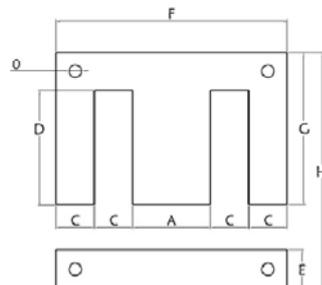
Se elige la lámina para el núcleo con las siguientes dimensiones:

Tabla XXVIII. Dimensiones del núcleo normalizado E/I 510

A	170	Mm
C	85	Mm
D	255	Mm
E	85	Mm
F	510	Mm
G	340	Mm
H	425	Mm
Agujero de Φ	20	Mm

Fuente: elaboración propia.

Figura 40. Chapa normalizada E/I510



Fuente: elaboración propia.

El área de la columna central sería $A_c = 16.08^2 = 258.49 \text{ cm}^2 = 0.02585 \text{ m}^2$

La profundidad B sería $258.49 / 16.08 = 15.21 \text{ cm}$

La cantidad de chapas apiladas:

$$\# \text{ de chapas} = \frac{B}{\delta} = \frac{15.21}{0.3} = 50.07 \cong 51$$

5.1.3.3. Cálculo de la densidad de corriente del conductor

Para el cálculo de la densidad de corriente del conductor se procede de la siguiente manera:

$$J = K_J * A_p^{-\frac{1}{8}}$$

$$J = 366 * 50111^{-\frac{1}{8}} = 94.62 [A/cm^2] \cong 0.95 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$$

Haciendo $x=1$, se tiene que la densidad de corriente para el devanado primario es igual a la densidad de corriente del devanado secundario.

5.1.3.4. Cálculo de las dimensiones del conductor

Al calcular las dimensiones del conductor, se hace lo siguiente:

Para hallar el área del conductor primario con corriente de 198.13 amperios, se tiene que:

$$A_{cond} = \frac{I}{J} = \frac{198.13}{0.95} = 208.56 \text{ mm}^2$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{A_{cond} * 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{208.56 * 4}{\pi}} = 16.30 \text{ mm}$$

Como el diámetro es mayor a 3.5, se elige un alambre cuadrado o pletina rectangular, de la tabla X; se observa que para una área de 208.56 mm², no existen pletinas tan grandes y se debe de construir un cable traspuesto.

Usando varias pletinas de 9 mm de ancho por 3.15 mm de espesor, con un área transversal de 27.80 mm², la cantidad de pletinas N_p que formará el cable será:

$$N_p = \frac{\text{Área del cable}}{\text{Área de la pletina}} = \frac{208.56}{27.8} = 7.50 \cong 8 \text{ pletinas}$$

El área de 8 pletinas sería 8 * 27.80 = 222 mm²

El espesor del esmalte entre pletinas sería de 0.10, según tabla XVII y el espesor de la envoltura de papel con ½ de solapa, según tabla XVIII, sería de 0.7 dado una longitud radial total del cable (H_r) de:

$$H_r = 4 * (3.15 + 0.1) + 0.7 = 13.70 \text{ mm}$$

Y una longitud axial total del cable (H_a) de

$$H_a = 2 * (9 + 0.1) + 0.7 = 18.90 \text{ mm}$$

Las pletinas deben estar empapeladas con nomex 220° C con un traslape de ½, debido a que es un transformador tipo seco.

Para el devanado secundario con una corriente para 50 A y una densidad de corriente de 0.95 A/mm², el área del conductor (A_{cd}) será de:

$$A_{cd} = \frac{I}{J} = \frac{50}{0.95} = 52.63 \text{ mm}^2 = 81579 \text{ mils cuadradas}$$

Se elige de la de la tabla IX, un alambre de cobre # 1 AWG de 82320 mils cuadradas con doble capa, clase H para 180° C.

5.1.3.5. Cálculo del número de espiras por devanado

Para el cálculo del número de espiras por devanado, se procede así:

Para el devanado primario:

$$N_1 = \frac{E_1}{4.44 * f * B * Kh * A_c} = \frac{230}{4.44 * 60 * 1.5 * 0.95 * 0.2584} = 23.44 \cong 24 \text{ espiras}$$

Para el devanado secundario:

$$N_2 = \frac{E_1}{4.44 * f * B * Kh * A_c} = \frac{1000}{4.44 * 60 * 1.5 * 0.95 * 0.2584} = 91.71$$

Se aumenta 6% por pérdidas y regulación, entonces se tiene que:

$$N_2 = 91.71 * 1.06 = 97.22 \cong 98$$

El transformador tendrá 8 derivaciones equivalentes a 9 bobinas, con 11 espiras cada una, haciendo un total de 99 espiras.

5.1.3.6. Cálculo del número de voltios por espiras

El numero de voltios por espira se obtiene de

$$230/24= 9.58 \text{ voltios/ espira}$$

$$900/99=9.09 \text{ voltios / espira}$$

Los valores se aproximan uno al otro.

5.1.3.7. Cálculo de los aislamientos

Para el cálculo de los aislamientos, se procede de la siguiente manera:

- Aislamiento entre espiras primario: para frecuencia y voltaje nominal, con un factor de seguridad de 1.8 se tiene:

$$V_e = \frac{V}{N} * Fs = \frac{230}{24} * 1.8 = 17.3 \text{ V}$$

Para el voltaje entre espiras, con un factor de seguridad de 1.5 y un BIL de 30kV (ver tabla XVI) se tiene:

$$V_e = \frac{V}{N} * Fs = \frac{30000}{24} * 1.5 = 1875 \text{ V}$$

- Aislamiento entre espiras secundario

Para frecuencia y voltaje nominal, con un factor de seguridad de 1.8 se tiene:

$$V_e = \frac{V}{N} * Fs = \frac{900}{99} * 1.8 = 16.36 \text{ V}$$

Para el voltaje entre espiras con un factor de seguridad de 1.5 y un BIL de 30kV (ver tabla XVI) se tiene:

$$V_e = \frac{V}{N} * Fs = \frac{30000}{99} * 1.5 = 454.55 \text{ V}$$

Consultando las características del aislamiento del conductor, se observa que el voltaje calculado está por debajo de la especificación del fabricante.

- Aislamiento entre capas

Para calcular el aislamiento se debe encontrar primero el número de espiras por capas con la altura efectiva del devanado; con estos datos se calcula el voltaje entre capas para frecuencia nominal e impulso y se elige el grosor de aislamiento adecuado de papel prensado u otro material.

Se tiene que para una tensión de 230 V (ver tabla XV) se elige la clase de aislamiento de 1.2 kV. De la tabla XVI se tiene un BIL de 30 kV con las siguientes distancias mínimas para aislamientos mayores:

- Distancia axial (da) = aislamiento de yugo (1.5mm) + aislamiento de collares (6.5 mm) = 8 mm
- Radio de curvatura para un núcleo laminado $E/I = 0$ porque es ortogonal
- La altura efectiva para los devanados se obtiene de la siguiente manera

$$h_s = D - 2(da + rc) = 255 - 2 * (8 + 0) = 239mm$$

Con la altura axial (Ha) del cable transpuesto de 18.90 mm y de la altura efectiva de los devanados, se obtiene el número de espiras por capa para el primario, de la siguiente manera:

$$N_{e/capK} = \frac{h_s}{Ha} = \frac{239}{18.90} = 12.65 \cong 13 \text{ espiras por capa}$$

El número de capas para el primario sería:

$$\frac{N_{cpas}}{dev1} = \frac{N_{total \text{ espiras por devanado } 1}}{N_{espiras/capa}} = \frac{24}{13} = 1.85 \cong 2 \text{ capas}$$

Equivalente a una capas de 12 espiras y una capa de 11 espiras.

Con los datos anteriores ya se puede calcular el voltaje entre capas para seleccionar el grosor y tipo de aislamiento.

Para encontrar el voltaje entre capas para el primario, para frecuencia y voltaje nominal con un factor de seguridad de 1.8 se tiene:

$$V_c = \frac{2V * N_{e/capak}}{N} * F_s = \frac{2 * 230 * 13}{24} * 1.8 = 448.5 \text{ V}$$

El voltaje entre capas para impulso (30kV) y un factor de seguridad de 1.8 sería:

$$V_c = \frac{2V * N_{e/capak}}{N} * F_s = \frac{2 * 30000 * 32}{90} * 1.8 = 38400 \text{ V}$$

Se puede usar para aislamiento entre capas de devanado de baja tensión (230V) un cartón *presspan* clase térmica B (verla tabla XIV) de un grosor de 4 mm con rigidez dieléctrica de mayor a 32kV.

Para hallar el número de espiras por capa para el secundario, se toma en cuenta lo siguiente: la altura de un conductor cuadrado (dc) #1 AWG, de la tabla IX se tiene que es de 0.2883 pulgadas equivalentes a 7.35 mm y de la tabla XVII $e = 0.05 * 2 = 0.1 \text{ mm}$.

$$N_{e/capK} = \frac{hs}{d_c + e} = \frac{239}{7.35 + 0.1} = 32.09 \cong 33 \text{ espiras por capa}$$

El número de capas para el secundario sería (ver página 29):

$$\frac{N_{capas}}{dev2} = \frac{N_{total \text{ espiras por devanado } 2}}{N_{espiras/capa}} = \frac{99}{33} = 3 \text{ capas}$$

Con los datos anteriores se calcula el voltaje entre capas para el secundario. El voltaje entre capas para frecuencia y voltaje nominal, con un factor de seguridad de 1.8 se obtiene así:

$$V_c = \frac{2V * N_{e/capak}}{N} * Fs = \frac{2 * 900 * 33}{99} * 1.8 = 1080V$$

Voltaje entre capas para impulso (30kV) y un factor de seguridad de 1.8.

$$V_c = \frac{2V * N_{e/capak}}{N} * Fs = \frac{2 * 30000 * 33}{99} * 1.8 = 36000 V$$

Se puede usar para aislamiento entre capas para el devanado de alta tensión (900V), un aislante con rigidez dieléctrica de mayor a 36 kV. Para el presente caso se utilizará un cartón *presspan* de un grosor de 3 mm.

Los aislamientos mayores se pueden obtener de la tabla XVI con los valores siguientes:

- Aislamiento entre baja tensión y núcleo $f_0=1.7$ (usaremos 2 mm de *presspan*)
- Aislamiento entre fases $f_1=1.7\text{mm}$ (usaremos 4 mm por esfuerzos mecánicos)

- Aislamiento entre alta tensión y núcleo $f_2=1.7$ mm (usamos 2 mm de presspan)
- Claro entre bobina y tanque 15 mm

Para comprobar si los devanados y aislamientos entran en la ventana, se enrolla primero el de mayor corriente, en este caso es el devanado primario:

Ancho de la bobina interior (ver figura 26)

$$b_1 \cong N_{cap/dev1}(Hr + c_1) = 2(13.70 + 4) = 35.4 \text{ mm}$$

Ancho de la bobina exterior

$$b_2 \cong N_{cap/dev2}(dc_2 + e + c_2) = 3(7.35 + 0.1 + 3) = 31.35 \text{ mm}$$

El ancho del empaquetamiento (b) formado por aislamientos, la bobina 1, bobina 2 y aislamiento externo se encuentra así:

$$b = f_0 + b_1 + f_1 + b_2 + f_2 = 2 + 35.40 + 4 + 31.34 + 2 = 74.74 \text{ mm}$$

Como el ancho de la ventana (D) es mayor que el ancho del empaquetamiento b por 10.26 milímetros, se puede decir que ambos devanados caben dentro de la ventana y se procede a calcular la longitud de los conductores.

5.1.3.8. Determinación de la longitud del conductor

Para hallar la longitud del conductor en el devanado secundario, se toma en cuenta que el calibre mayor es el arrollamiento interno.

La longitud media por espira se encuentra aplicando la fórmula siguiente:

$$LME_1 \cong 2(A + B) + \pi(f_0 + b_1) \cong 2 * (170 + 152) + \pi * (2 + 35.40) = 762 \text{ mm}$$

La longitud total de la bobina 1 más 10%:

$$L_{bobina1} \cong N_2 * LME_1 * 1.1$$

$$L_{bobina1} \cong 24 * 762 * 1.1 = 20106 \text{ mm} = 21 \text{ m} * 8 \text{ pletinas} = 168 \text{ m}$$

En el devanado primario arrollamiento exterior, se encuentra:

La longitud media por espira:

$$LME_2 \cong 2(A + B) + 8(f_0 + f_1) + \pi((b_1 + b_2))$$

$$LME_2 \cong 2 * (170 + 152) + \pi * (2 + 35.40 + 4 + 31.34) = 872.63 \text{ mm}$$

La longitud total de la bobina 2 más 20% por las salidas de las derivaciones:

$$L_{bobina2} \cong N_1 * LME_2 * 1.2 \cong 99 * 872.63 * 1.2 = 103669 \text{ mm} = 103.67 \text{ m}$$

5.1.3.9. Cálculo del peso del conductor

Para realizar el cálculo del peso del conductor de 21 metros de cable, con área transversal de 222 mm² se procede:

$$m = \rho * A * L = 8890 * 22 * 222 * 10^6 = 41.52 \text{ Kg} = 91.53 \text{ lb}$$

En 104 metros de alambre cuadrado AWG #1 de 317.2 libras/ 1000 pies con 108.23 lb equivalente a 49.09 kg.

Tabla XXIX. **Resumen de los resultados de los cálculos**

CARACTERÍSTICAS DEL NÚCLEO	
Área del producto A_p	50111,12 cm^4
Ancho de la columna central A (calculado)	16,08 cm
Área de la columna central A_c	258,49 cm^2
Núcleo normalizado E_I	510
Ancho A (elegido)	17,00 cm
Profundidad B	15,21 cm
Número de laminaciones o chapas	51 chapas
Peso aproximado del núcleo	201,70 kg
DEVANADO PRIMARIO	
Densidad de corriente primario J_1	0,95 A/mm^2
Área del conductor primario A_1	208,56 mm^2
Diámetro del conductor primario d_{c1}	16,30 mm
Longitud radial del cable transpuesto H_r	13,70 mm
Longitud axial del cable transpuesto H_a	18,90 mm
Número de pletinas del cable compuesto	8 pletinas
Área de las N pletinas	222 mm^2
Número de espiras para el primario N_1	24 espiras
Número de espiras por capa primario	13 e/capa
Número de capas primario	2 capas
Longitud total N conductores + 20% interior	175,47 m
Peso del alambre interior	347,98 kg
VOLTAJES MÁXIMOS	
Voltaje por espira para el primario V_1/N_1	9,58 V
Voltaje entre espiras primario (Frec. Nom.)	17,3 V
BIL primario	30000,0 V
Voltaje entre espiras primario (Impulso)	1875,0 V
Voltaje entre capas primario (Frec. Nom.)	448,50 V
Voltaje entre capas primario (Impulso)	58500,00 V

Continuación de la tabla XXIX.

DEVANADO SECUNDARIO	
Densidad de corriente secundario J2	0,95 A/mm ²
Área del conductor secundario A2	52,63 mm ²
Diámetro del conductor secundario dc2	8,19 mm
Longitud radial del cable transpuesto Hr	7,35 mm
Longitud axial del cable transpuesto Ha	7,35 mm
Número de espiras para el secundario N2	99 espiras
Número de espiras por capa secundario	33 e/capa
Número de capas secundario	3 capas
Longitud total del conductor + 20 % exterior	103,67 m
Peso del alambre exterior	49,09 kg
VOLTAJES MÁXIMOS	
Voltaje por espira para el secundario V2/N2	9,09 V
Voltaje entre espiras secundario (Frec. Nom.)	16,36 V
BIL secundario	30000,0 V
Voltaje entre espiras secundario (impuso)	454,55 V
Voltaje entre capas secundario (Frec. Nom.)	1080,00 V
Voltaje entre capas secundario (Impuso)	36000,00 V
AISLAMIENTOS	
ESPESOR DE AISLAMIENTOS	
Aislamiento entre baja tensión y núcleo f0	2,00 mm
Aislamiento entre baja tensión y alta tensión f1	4,00 mm
Aislamiento del devanado de alta tensión f2	2,00 mm
Aislamiento entre capas del primario c1	4,00 mm
Aislamiento entre capas del secundario c2	3,00 mm
Ancho de la bobina primaria b1	35,40 mm
Ancho de la bobina secundaria b2	31,34 mm
Ancho total del empaquetamiento b	74,74 mm
Claro entre bobina de alta tensión y columna	10,26 mm
Ancho de la ventana D	85,00 mm

Continuación de la tabla XXIX.

LONGITUDES DE LOS AISLAMIENTOS	
Entre capas primario	2.74 M
Entre capas secundario	4.19 M
Cartucho del núcleo	0.76 M
Entre capas primario y secundario	0.87 M
Aislamiento del devanado secundario	1.04 M

Altura efectiva de los devanados (hs)	239.00 mm
Altura de collares (hc) (tabla XV)	6.5 mm
Claro entre bobina y tanque	15.00 mm

Fuente: elaboración propia.

5.2. Diseño del sistema de medición

Para el sistema de medición se conectará en paralelo a la salida del instrumento, un voltímetro digital con un rango de 0 y 1000 V. También se conectará en serie un amperímetro con rango de medición entre 0 y 50 A. El despliegue de datos será por medio de un display de salida de 3 ½ dígitos, cada uno de siete segmentos tipo led y punto decimal.

5.2.1. Diseño del voltímetro digital de corriente alterna

El diseño se trabaja para una señal de entrada alterna con voltaje RMS de 1000 V. La señal de entrada se atenúa y se filtra con capacitores en la entrada como se indica en la figura 42. Se debe recordar que la señal máxima del convertidor analógico digital TC 7106 no deberá exceder los 200 mV RMS.

Para calcular el divisor de voltaje tomando una resistencia predeterminada de $1k\ \Omega$, se procede así:

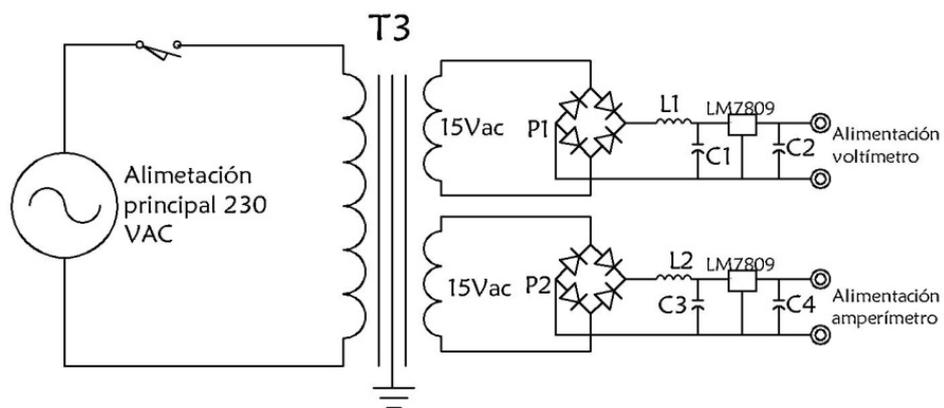
$$\frac{RX + 1000}{1000} = \frac{1000}{0.100}$$

$$RX \cong 9999k\Omega$$

Esta resistencia se puede formar con cuatro más en serie de los siguientes valores $9M+900k+90k+9k$, con tolerancia de 1%.

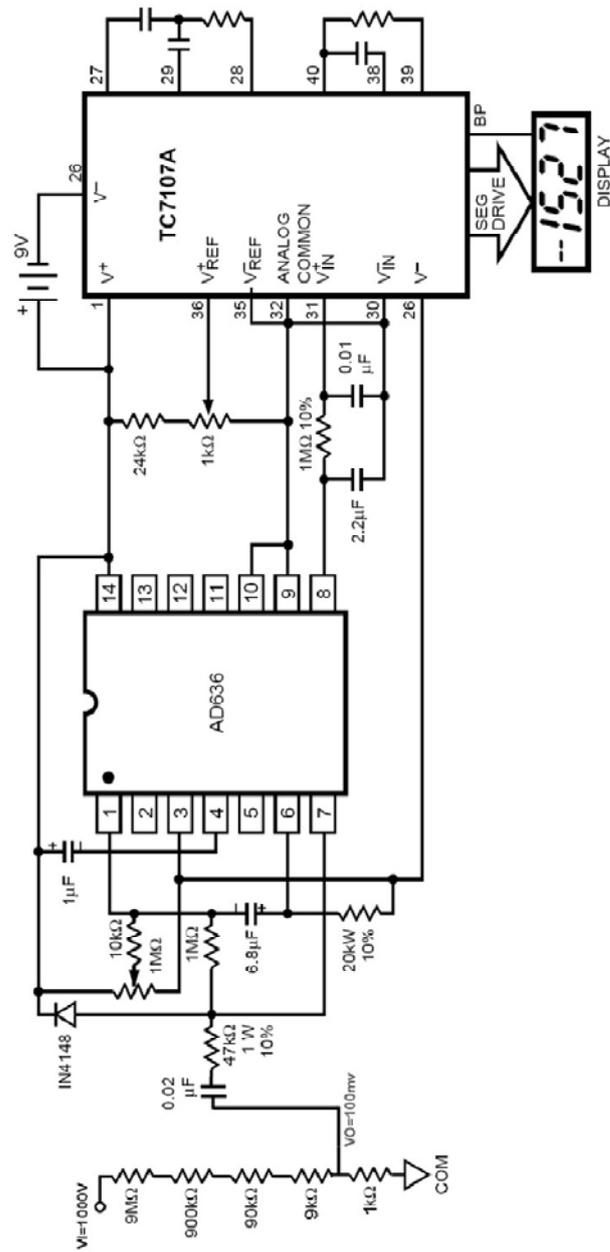
La alimentación de los integrados tanto del voltímetro como del amperímetro, se obtiene con un transformador de reductor de voltaje, dos puentes rectificadores de onda completa, capacitores e inductores usados como filtros y dos reguladores de voltaje LM7809 con voltaje de salida de 9 V, (como se muestra en la figura siguiente):

Figura 41. **Alimentación de corriente directa 9V**



Fuente: elaboración propia.

Figura 42. Circuito del voltímetro digital de 3 ½ dígitos con el a/d TC7107



Fuente: TELCOM SEMICONDUCTOR, INC, Hoja de datos 7106-7107, p.199.

5.2.2. Diseño del amperímetro digital de corriente alterna

Para el diseño del amperímetro, debido a que se medirá corriente alterna de baja magnitud y baja frecuencia, se usará un amperímetro con *shunt* de medición.

Una resistencia en derivación *shunt* se conectará en paralelo con un transformador de relación de transformación uno, a manera de crear un aislamiento galvánico entre el primario y secundario (ver figura 43). El aislamiento galvánico tiene como objetivo no poner en riesgo a los dispositivos electrónicos del amperímetro, por algún alto voltaje o corrientes estáticas que puedan existir en la salida del inyector.

La corriente del secundario del transformador pasa a través de un potenciómetro y una resistencia, creando un divisor de tensión proporcional a la corriente que circula en el *shunt*. Esta caída de voltaje será convertida por el AD636 a corriente directa con un valor RMS verdadero, proporcional al voltaje en la entrada. Después se introduce esta señal directa al convertidor analógico digital TC7106, obteniendo la lectura la medición de corriente.

El reóstato deberá de graduarse con cierto valor de tal forma que en la resistencia de $1\text{M } \Omega$ exista una caída de tensión como máximo de 0.05 V para 50 A , circulando en el *shunt*. El reóstato es el que compensa algunas variaciones por las pérdidas en el transformador y resistencias.

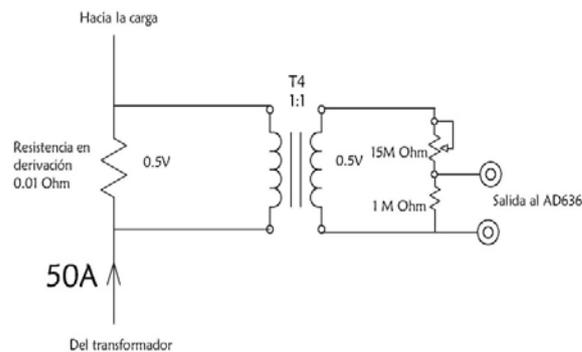
Suponiendo que los elementos son ideales, el valor de reóstato debe estar en:

$$\frac{RX + 1 * 10^6}{0.5} = \frac{1 * 10^6}{0.05}$$

$$RX \cong 9M\Omega$$

Se puede elegir un reóstato de 15 M Ω , con tolerancia de 1%.

Figura 43. **Etapa inicial del amperímetro de AC de 0-50A**



Fuente: elaboración propia.

Ya contruidos tanto el amperímetro como el voltímetro, deberán de calibrarse con el procedimiento adecuado.

5.3. Sistema de protección

Se debe elegir las protecciones adecuadas del instrumento, tales como: protección para sobrecarga y protección contra cortocircuito, además de tener todos sus componentes aterrizados.

La asociación de un contactor y un relé de protección térmica protegen al transformador de sobrecargas. De acuerdo con la norma vigente, todas las salidas irán protegidas contra corto circuito mediante cortacircuitos o fusibles, o un disyuntor, situados antes de dichas salidas.

Los dispositivos de protección se deben seleccionar para interrumpir toda la corriente de sobrecarga en los conductores del circuito, antes de que esta provoque calentamiento y pueda dañar las conexiones internas, externas y el aislamiento.

La coordinación de las protecciones consiste en asociar un dispositivo de protección contra los cortos circuitos con un contactor y un dispositivo de protección contra sobrecargas, con el fin de interrumpir las corrientes de sobrecarga o de corto circuito lo más rápido posible y sin riesgo para las personas e instalaciones.

La norma IEC 947 exige que la coordinación sea ambivalente para:

- Una corriente de corto circuito asignada convencional “ I_q ”, que define el fabricante del material para un arrancador con fusibles más contactor más relé térmico.
- Una corriente de corto circuito presumible “ r ”, que depende del calibre de empleo AC-3 del aparato, donde $r < I_q$.

Los tipos de coordinación que indican el grado de deterioro tolerable para el aparellaje después de un corto circuito son:

- Coordinación de tipo 1: cuando se produce un cortocircuito, es necesario evitar que el material ocasione daños a las personas e instalaciones. Después del corto circuito, es posible que dicho material no pueda seguir funcionando a menos que se repare o se reemplace ciertas piezas.
- Coordinación tipo 2: cuando se produce un cortocircuito, es necesario evitar que el material ocasione daños a las personas e instalaciones.

Después del corto circuito, dicho material no debe presentar desperfectos o desajustes de ningún tipo. Solo se admiten riesgos de soldadura de los contactos del contactor, a condición de que puedan separarse fácilmente. Durante la prueba, no se podrá sustituir ninguna pieza, a excepción de los fusibles, que se deben sustituir en su totalidad.

5.3.1. Seccionadores o interruptores

Son dispositivos para manipular las instalaciones o las máquinas eléctricas y sus respectivos equipos electrónicos con total seguridad, permitiendo aislar eléctricamente los equipos de potencia y de control de la red de alimentación general.

5.3.2. Disyuntor termomagnético

La protección para cortocircuito la realiza una bobina cuando una corriente de varias veces su valor nominal, crea un campo magnético que activa el mecanismo de apertura de los contactos. Los disyuntores termomagnéticos se fabrican con ciertas características y parámetros, entre los cuales están: la corriente nominal, tensión de trabajo, poder de corte, poder de cierre y número de polos.

Dependiendo del circuito que se desea proteger, el umbral de disparo se sitúa entre tres y quince veces la corriente térmica I_{th} . En algunos disyuntores, el umbral de disparo se encuentra fijo o puede ser graduado por el usuario. El poder de corte es el valor máximo estimado de corriente de corto circuito que el disyuntor puede interrumpir, sin que se produzcan fenómenos de arco voltaico, fusión y soldadura de los contactos, de tal forma que se impida la apertura del circuito. Esta corriente se expresa en kiloamperios eficaces simétricos.

El poder de cierre es la corriente máxima que puede circular por el disyuntor a determinada tensión en el momento de cierre, sin provocar daños por choque eléctrico.

Las dos características anteriores son determinadas por el elemento magnético. El elemento térmico le da otras características al disyuntor, como protección contra sobrecargas débiles y prolongadas.

Algunos disyuntores cuentan con bimetálicos de compensación de temperatura ambiente y detección de pérdida de alguna de las fases.

Los relés se regulan con una rueda graduada que determina la corriente límite de disparo que puede estar entre 1.05 y 1.20 el valor nominal; esta rueda modifica el recorrido angular del extremo bimetálico para liberar el mecanismo de apertura de los contactos.

El disyuntor debe de permitir durante el arranque que pase la sobrecarga que provoca el pico de corriente inicial. La norma IEC94 7-4-1-1 define tres tipos de disparo según la duración de arranque del dispositivo: relés de clase 10, clase 20 y clase 30. El tiempo de arranque en segundos debe ser menor al número especificado por la clase.

5.3.3. Contactor electromagnético

Es un aparato mecánico de conexión controlado mediante electroimán y con funcionamiento de todo o nada. Cuando la bobina del electroimán está bajo tensión, el contactor se cierra, estableciendo a través de los polos un circuito entre la red de alimentación y el receptor.

El contactor posee ciertas ventajas entre las cuales se tienen las siguientes:

- Es capaz de interrumpir corrientes monofásicas o polifásicas elevadas accionando un auxiliar de mando, recorrido por una corriente de baja intensidad.
- Funciona bajo uso intermitente o continuo
- Control a distancia de forma manual o automática
- Robustes y fiabilidad, se puede cambiar la bobina
- Garantiza la seguridad del personal contra arranques inesperados en caso de interrupción de corriente momentánea
- Facilita la distribución de los puestos de paro de emergencia y de los puestos esclavos, impidiendo que la máquina se ponga en marcha sin que se hayan tomado todas las precauciones necesarias.

5.3.4. Disyuntor motor magnético

Es un dispositivo de protección contra los cortos circuitos con corte omnipolar. Puede considerarse apto para el seccionamiento de acuerdo con la norma IEC 947.

Normalmente estos aparatos se asocian con un contactor y un relé de protección térmica para formar un arrancador.

Los enlaces mecánicos y eléctricos entre el contactor y el disyuntor facilitan la conexión y permiten obtener un equipo más compacto, que se puede montar en un fondo de armario con mando sobre puerta.

5.3.4.1. Circuito de arranque del instrumento de medición

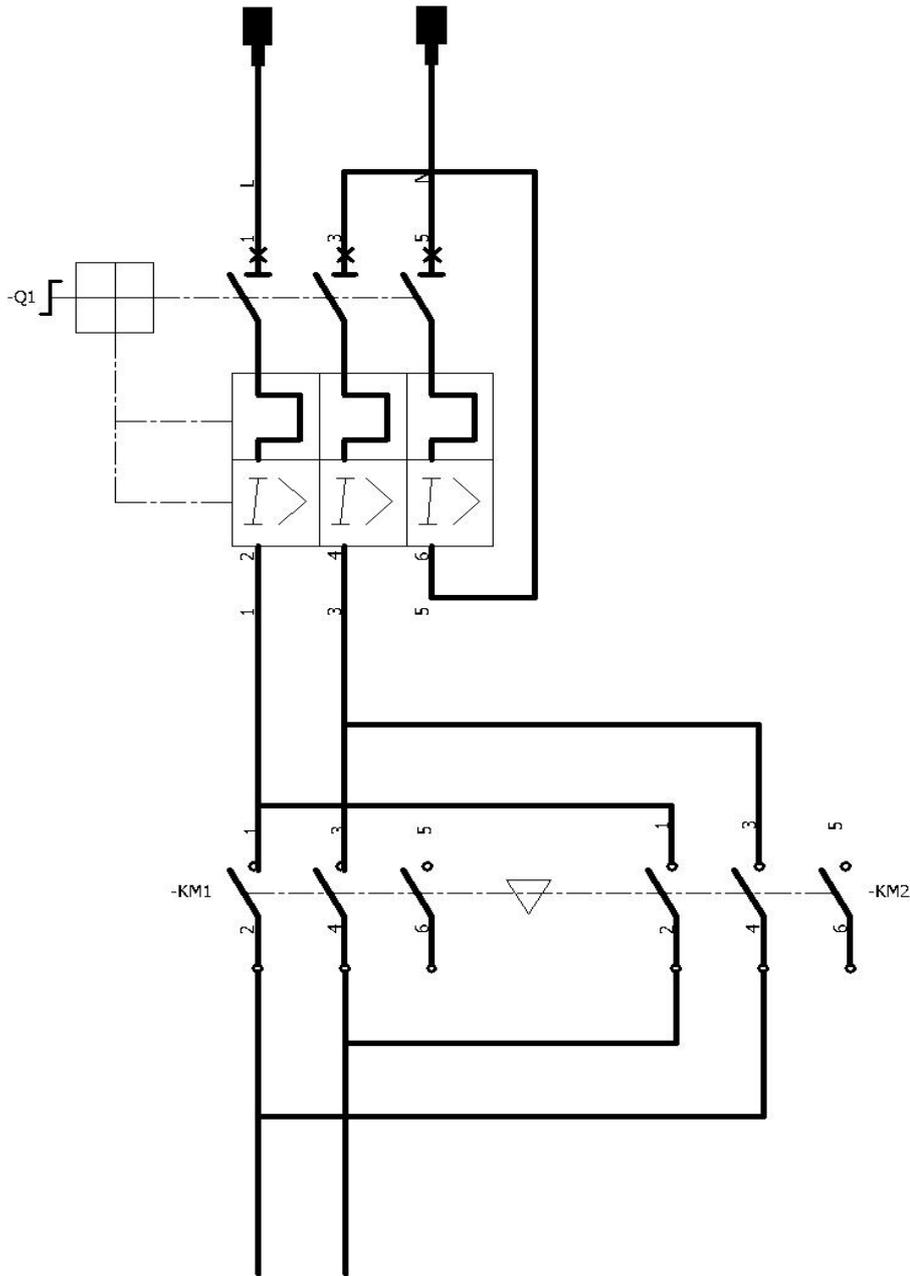
El circuito de arranque del instrumento de medición está formado por un disyuntor motor magnetotérmico que es un aparato de protección tripolar de corte omnipolar.

La protección térmica tiene compensación de temperatura y sensibilidad a una ausencia de fase; además, es apto para seccionamientos, existen versiones con pulsadores de control marcha-paro y con mando de control giratorio. El dispositivo de mando de ambos modelos se puede enclavar en posición apagado.

A la salida del disyuntor motor magneto-térmico se coloca un inversor de polaridad formado por dos contactores cableados de potencia con enclavamiento mecánico y eléctrico, como se muestra en la figura 44.

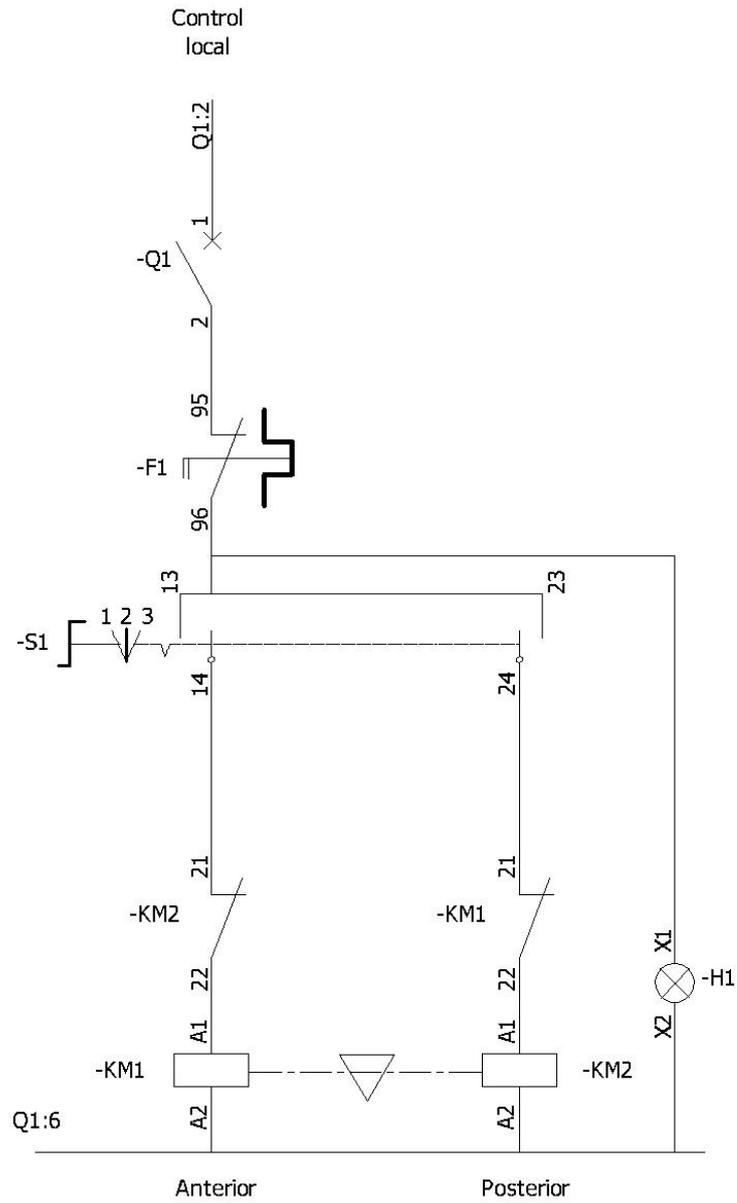
En la figura 45 se observa el circuito de control, al cual se le añade un indicador luminoso de la puesta bajo tensión del instrumento.

Figura 44. Circuito de arranque del instrumento (potencia)



Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Circuito de control del instrumento**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. Simbología utilizada en los esquemas

	Contactor		Contacto "NA" de cierre. Principal y auxiliar		Enganche de pulsador de desenganche automático		Mando electromagnético contactor
	Seccionador		Contacto "NC" de apertura. Principal y auxiliar		Mando mecánico manual rotativo (de desenganche)		Lampara de señalización o de alumbrado
	Disyuntor		Interruptor		Mecanismo de desactivación libre		Retorno no automático
	Interruptor		Relé de sobrecorriente de efecto térmico		Clavija		Enlace mecánico
	Interruptor seccionador		Relé de máxima corriente		Enclavamiento mecánico		Tierra
Letras de referencia							
A	Conjuntos, subconjuntos funcionales de serie						
F	Dispositivos de protección						
H	Dispositivos de señalización						
K	Relés de automatismo y contactos						
KA	Relés de automatismo y contactos exiliares						
KM	Contactores de potencia						
Q	Aparatos mecánicos de conexión para circuitos de potencia						
S	Aparatos mecánicos de conexión para circuitos de control						
X	Bornes, clavijas, zócalos.						

Fuente: TELEMECANIQUE. Manual electrotécnico telesquemario. p. 169.

Durante el arranque de un transformador, el pico de corriente magnetizante puede llegar a ser de 25 a 30 veces la corriente nominal (ver página 38), es necesario tomarla en cuenta para la selección de las protecciones y los contactores.

Tensión nominal	240 V
Potencia consumida por los transformadores	55 kVA
Corriente nominal absorbida total (ver página 55)	220.71 A
Polos	3
Corriente de cresta en la primera mitad de onda ($I_n \cdot \text{pico}$) = $271.71 \cdot 30 =$	
8151.3 A	

La corriente obtenida al multiplicar el poder asignado de cierre del contactor por $\sqrt{2}$ debe ser igual o superior a este valor. Por lo tanto, se necesita un contactor con un poder asignado de cierre mayor o igual a:

$$\frac{8151.4}{\sqrt{2}} = 5763.8 \text{ A}$$

- Especificación del dispositivo disyuntor motor magneto-térmico

Corriente nominal	250 A
Voltaje nominal	240 V
Capacidad interruptiva > I_{cc}	65 kA
Número de polos	2 o 3 polos
Tipo	(fabricante)

5.4. Panel de control y visualización de datos

Es el panel donde se encuentran todos los elementos que permiten al usuario interactuar con el instrumento, vigilar el funcionamiento, realizar las operaciones de control, selección, además en el panel se encuentran de los dispositivos que proporcionan la información de la medición como los *display* de los voltímetros y amperímetros. Cuenta además con pulsadores, visualizadores y conmutadores.

5.4.1. Pulsadores y visualizadores

Son interfaces de diálogo entre el operador y la máquina que se limitan a señales de todo o nada; son componentes electromecánicos de fácil instalación, robustos y fiables; se encuentran disponibles en el mercado con diámetros de 16, 22 y 30 mm, su identificación se realiza por medio de un código de colores normalizados.

La norma IEC 60204-1 establece los códigos de colores para los pulsadores y visualizadores.

- Piloto rojo: indica emergencia, condición que requiere una acción inmediata (presión o temperatura fuera del límite, rotura de acoplamiento, falla en alguna barra, etc.).
- Piloto amarillo: indica alguna anomalía que puede llevar a una situación peligrosa (activación de algún dispositivo de protección, alarma activada, niveles cerca de su límite, etc.).
- Piloto blanco indica una acción neutra, como presencia de tensión de red en algún aparato.
- Pulsador rojo indica emergencia (accionamiento en caso de emergencia).
- Pulsador amarillo indica acción en caso de condiciones anormales.

5.4.2. Conmutadores tipo leva

Los conmutadores tipos levas se diseñan para activar circuitos de mando y selección para diversos aparatos como pueden ser voltímetros, amperímetros,

selectores de derivaciones para transformadores, control de motores, entre otros.

Se fabrican para diversidad de voltajes y corrientes. Cerrado sobre una o varias posiciones, con polos simples o dobles. Se encuentra en el mercado desde 2 posiciones con 2 contactos, hasta un máximo de 16 posiciones y 20 contactos, con o sin interrupción entre dos posiciones.

A continuación se describen las especificaciones del conmutador tipo leva:

- Para la salida conmutada de las derivaciones centrales del transformador, se utiliza un conmutador especial tipo levas de 10 polos, con voltaje nominal de 1000 V, corriente nominal de 50 amperios y con maneta con extensión para mejor aislamiento.
- Para el conmutador en el circuito de control para cambiar la polaridad, se utiliza un conmutador de tres posiciones con bloqueo de llave en apagado, con una corriente para activación de relé 10 A, voltaje nominal de 240 V.

5.4.3. Conexión y cableado

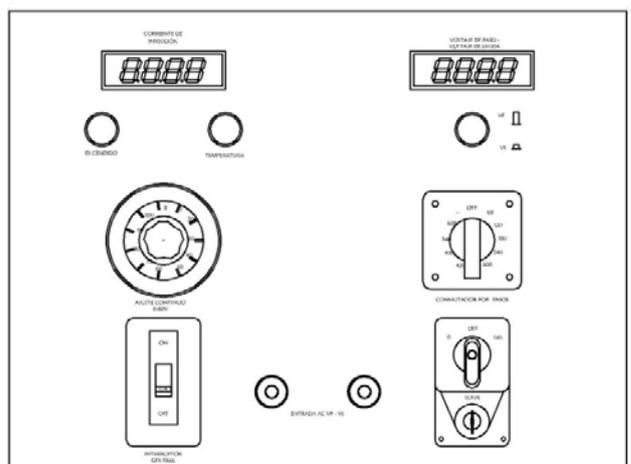
Los bornes de conexión sirven para conectar conductores de 250 mm² de sección máxima. Existen con bloques unipolares y multipolares fijas o desenchufables, conexiónados por medio de tornillo, tuerca, clip o soldadura, resistentes a las vibraciones. Los tornillos de apriete se encuentran dentro de una cavidad cilíndrica, impidiendo que la cabeza del destornillador se resbale.

En el instrumento de medición sirven para conectar los cables de medición del voltaje de paso y contacto, permiten conectar los cables de inyección de corriente a la salida y conectan los cables a los contactores e instrumentos de protección. Se eligen con aislamiento apropiado (para 1000 V) y se separan la distancia apropiada según normas.

Las terminales de cableado simplifican el cableado ya que el encapsulado de la funda de cobre se realiza automáticamente al apretar la conexión en la borna. Existen terminales pre asiladas con distintos colores y referenciadas según normas NF C63-023 y DIN 46228.

Las canaletas guían los cables de tal manera que no se encuentren sueltos dentro del gabinete o caja, poseen hendiduras laterales de ventilación. Hay de varios tamaños y se fijan a las placas o perfiles con tornillos o pies especiales de enganche. También se pueden usar cinchos plásticos para empaquetar el conjunto de cables dentro de las canaletas.

Figura 46. **Disposición aproximada del panel frontal**



Fuente: elaboración propia.

Los cables de salida deben tener el aislamiento y calibre apropiado para las condiciones de trabajo del instrumento; se conectan a los electrodos de medición con lagartos. Para la toma de corriente del alimentador se puede usar algún elemento de conexión certificado con conexión a tierra.

5.4.4. Disposición final del panel

La disposición aproximada que tendrá el panel frontal se presenta en la figura 46; donde se tienen que tomar en cuenta las distancias de cada elemento para manipulación segura del sistema control.

5.5. Montaje de los componentes del instrumento

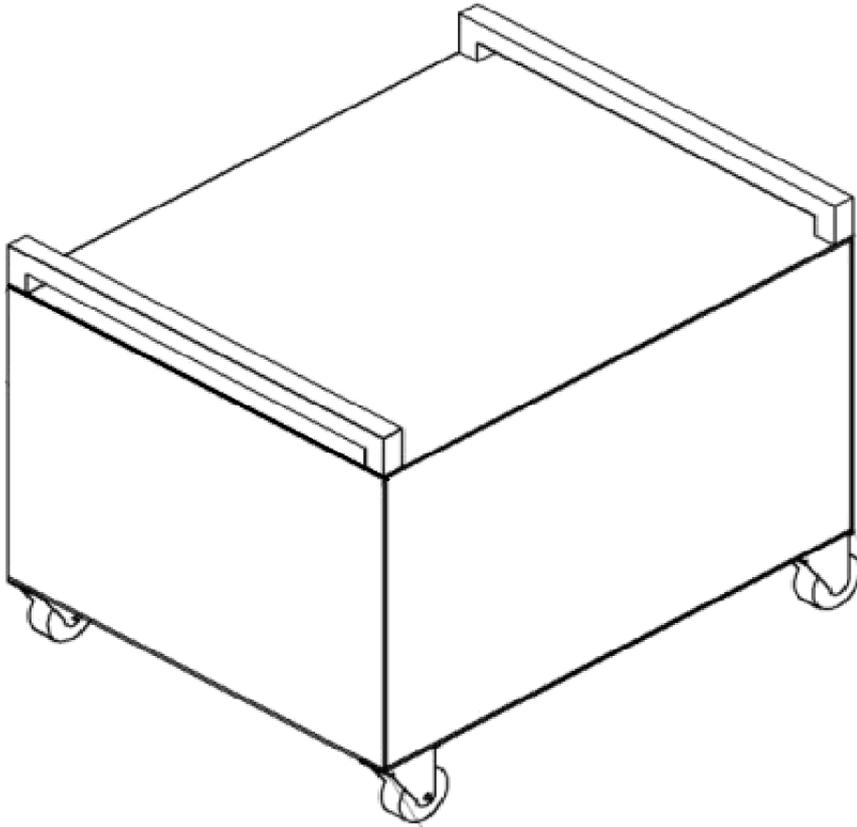
Existe una gama de productos diseñados para fijar correctamente los componentes tanto de control como de potencia dentro del instrumento, tales como rieles DIN normalizados con formas y tamaños que se adaptan bien para fijar contactores y elementos de control, tuercas deslizantes con muescas de enganche y centrado rápido, perfiles de distintas medidas, placas compactas y perforadas.

Para la conexión de los cables a los electrodos de medición se usan lagartos de sujeción con corriente nominal de 32 A.

5.6. Caja del instrumento

Las cubiertas de los equipos eléctricos tienen determinado grado de protección, tanto para los componentes internos del instrumento de medición como para las personas que manipulan el instrumento.

Figura 47. **Caja metálica del instrumento**



Fuente: elaboración propia.

La norma IEC define el grado de protección de los equipos eléctricos con las letras IP, seguidas de dos números: el primero indica el grado de protección contra la penetración de cuerpos sólidos extraños y contacto accidental. El segundo número del código indica el grado de protección contra penetración de líquidos que se determina según el ambiente al cual estará expuesto el instrumento. Algunas veces se especifica solo el primer número y el segundo se deja marcado con una X.

Para el instrumento de medición que se especifica con grado de protección IP 2X. El primer dígito 2 indica que el instrumento debe de protegerse contra el contacto accidental de dedos con partes internas energizadas y en movimiento. También indica que el instrumento está protegido contra la penetración de cuerpos sólidos extraños de tamaño medio. La X indica que no se especifica la protección del instrumento contra líquidos.

Para proteger el instrumento se puede usar una protección IP 2X, esta se obtiene con una caja metálica con chapa de hierro o aluminio con pintura de acabado durable y resistente a la corrosión, con agujeros circulares para ventilación en la parte posterior del instrumento, cuya cantidad dependerá del calentamiento que se determinará en las pruebas de la máquina.

El grosor de la lámina dependerá del peso y esfuerzos al cual estará sometido el instrumento y puede reforzarse con alguna armadura apropiada; las laminas pueden ser soldadas o atornilladas, a las que deberá de hacerse un análisis mejor, el cual no se encuentra al alcance en el presente trabajo de graduación.

Pueden proponerse algunos grosores empíricos para las láminas:

- Grosor de 4mm en para la parte inferior y 2 mm para las demás caras incluyendo el panel frontal, reforzándolo con una armadura con tubo cuadrado de $\frac{1}{2}$ pulgada, como aparece en la figura 47 y 48.
- La medida de la caja respetará las dimensiones de cada componente, espacios de ventilación, distancias mínimas de seguridad, especialmente para el transformador con salida máxima de 900 V (ver tabla XVI). Para el transporte puede añadirse cuatro rodos en la parte

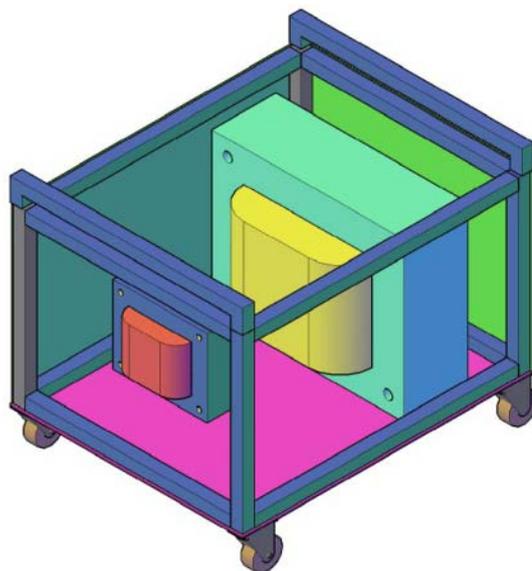
inferior y algún mango para sujeción del instrumento como se muestra en la figura 47.

5.7. Seguridad de las máquinas

Los fabricantes han de ser aptos para someter su producción a la prueba de conformidad con las normas a las que han decidido ajustarse, a través de su sistema de garantía de calidad. Debe presentar, cuando se les requiera y según los casos.

Una declaración de conformidad (ISO IEC, Guía 22), certificados de conformidad, certificados de homologaciones, o autorizaciones, en aquellos países que tengan establecido este procedimiento, o para especificaciones particulares como la de la marina mercante.

Figura 48. Disposición interna aproximada de los transformadores



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Especificaciones técnicas del instrumento de medición**

Voltaje de alimentación	230 ± 10 % V monofásico
Potencia de alimentación	60 kVA
Voltaje de salida	0 a 1000V, 10 escalones de 100 y ajuste fino (variac)
Potencia de salida	50 kVA
Corriente de salida	0 - 50 A
Corriente máxima de salida	50 A
Frecuencia	50/60 Hz
Resistencia mínima para medir (1000V)	20Ω (Tierra a medir mas tierra auxiliar)
Magneto-térmico	250 A
Cable de alimentación	THHW 300 kcmil
Método de medición	Inyección de corriente Ip o Ic Medición de el voltaje en la superficie Vp o Ip Calcular con la siguiente ecuación $V_p/c = V_m * Max/I_p$
Amperímetro digital	Corriente máxima 60 A Precisión: 0.5% medida ± 2 dígitos Lectura mínima: 20 mA Resolución: 10 mA
Voltímetro digital	Campos de medida: 0.2 V, 2V, 20, 200 V, 1000V Cambio de escala: Manual Precisión: 0,5% medida ± 2 dígitos Lectura mínima: 20 mV Impedancia de entrada: 1000 Ω o 500 Ω (conmutador) Resolución: 10 mV
Lectura máxima del medidor	9999
Control de parada y marcha	Con selector con llave (ON 0°-OFF- ON 180°)
Medición por tensiones erráticas	Control del voltímetro por pulsador

Fuente: elaboración propia.

5.8. Evaluación de costos del instrumento

A continuación se hace una evaluación de los costos en que se incurren para la fabricación del instrumento de medición.

Las tablas XXXII, XXXIII, XXXIV, XXXV, XXXVI, XXXVII y XXXVIII presentan los costos los materiales del instrumento, dichos costos se obtuvieron de distintos sitios de internet de las empresas fabricantes del material y los dispositivos.

Se debe tomar en cuenta que los costos por compra de material realizadas en otros países, se ven afectados por aranceles de importación, transporte de mercadería, tasas de cambio de un país a otro, lugar donde se realicen las compras, calidad de los elementos, tiempo, inflación y otros factores.

El costo por impuestos de importación para Guatemala oscila aproximadamente entre 5 y 20% del costo del producto y dependerá del tipo de producto que ingrese, el país de origen, etc.

Tabla XXXII. **Cotización del autotransformador**

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio por unidad	Total
Variac, entrada 240V, salida 0-240 V I nominal 3,5 A	unidad	1	\$1.579,00	\$1.579,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Costos de materiales para el transformador de 5kVA**

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio por unidad	Total
Alambre esmaltado de cobre #2 AWG (cuadrado)	kg	7,08	\$25,65	\$181,60
Alambre esmaltado de cobre #6 AWG (cuadrado)	kg	7,86	\$35,65	\$280,21
Chapa normalizada E-I 300 0,3 mm de grosor (246)	kg	34	\$21,00	\$714,00
Papel aislante <i>presspan</i> 0,001*0,150 o Nomex	metro	18	\$36,00	\$648,00
Tornillos con roldana y tuerca $\Phi=18\text{mm}$	unidad	4	\$10,00	\$40,00
Angular de 3/4 "	m	1,2	\$8,00	\$9,60
Escuadras de fijación con agujeros de 2*2 "	unidad	2	\$4,00	\$8,00
Barniz para transformador	litro	3	\$40,00	\$120,00
Pintura acrílica negra	litro	2	\$40,00	\$80,00
Solvente para barniz y pintura	litro	2	\$40,00	\$80,00
Cinta de enmascarar 3M <i>Scotch</i> 234-3/4",60 yd	unidad	5	\$5,99	\$29,95
Espaguete de fibra de vidrio $\Phi=3\text{mm}$	metro	2	\$0,60	\$1,20
Cable THHW # 6 AWG	metro	6	\$4,21	\$25,26
Estaño	carrete	5	\$5,00	\$25,00
Pegamento súper <i>bonder</i> azul	unidad	10	\$4,00	\$40,00
Costos transformador 1				\$2.282,82

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Costo de materiales para el transformador de 45kVA**

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio por unidad	Total
Pletina esmaltada de cobre de 9*3,15 mm	kg	350	\$45,00	\$15.750,00
Alambre cuadrado AWG #1	kg	50	\$35,65	\$1.782,50
Chapa normalizada E-510 espesor 0,3mm (507)	kg	202	\$21,00	\$4.242,00
Papel aislante presspan 0,001*0,255*2,000m	metro	31,6	\$36,00	\$1.137,60
Collares de 6,5mm de presspan	metro	10	\$10,00	\$100,00
Tornillos con roldana y tuerca $\Phi=20$ mm	unidad	4	\$15,00	\$60,00
Angular de 2 "	metro	2,5	\$10,00	\$25,00
Escuadras con agujeros de 4" * 4"	unidad	2	\$5,00	\$10,00
Barniz para transformador	litro	10	\$40,00	\$400,00
Pintura acrílica negra	litro	3	\$40,00	\$120,00
Solvente para barniz y pintura	litro	5	\$40,00	\$200,00
Cable THHW 300 kcmil	metro	6	\$49,00	\$294,00
Estaño	carrete	20	\$5,00	\$100,00
Pegamento súper <i>bonder</i> azul	unidad	20	\$4,00	\$80,00
Costo transformador 2				\$24.301,10

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Costos de los elementos del circuito de arranque y protecciones**

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio por unidad	Total
Visualizador 3 1/2 dígitos con punto decimal	unidad	2	\$108,00	\$216,00
Resistencia de derivación 50 A 1000V	unidad	1	\$40,00	\$40,00
Lámpara de señalización blanco Φ 20 mm 240 V	unidad	1	\$14,93	\$14,93
Lámpara de señalización rojo Φ 20 mm 240 V	unidad	1	\$14,93	\$14,93
Botón pulsador polo simple doble tiro con enclavamiento color verde	unidad	1	\$15,00	\$15,00
Conmutador de levas de 10 posiciones 100V 50A	unidad	1	\$300,00	\$300,00
Conmutador de levas 3 posiciones maniobra por llave 690V 25 A	unidad	1	\$50,00	\$50,00
Disyuntor motor magnético 250A, 240V, 65kA, polos 3, tipo (fabricante)	unidad	1	\$1,591,54	\$1,591,54
Bloques de contactos auxiliares instantáneos	unidad	2	\$13,37	\$26,74
Contactador cableado de potencia con enclavamiento mecánico y eléctrico, sin seccionador porta fusibles, tipo (fabricante), 240V, Ie = 221A, Ic 5800A, polos 3	unidad	2	\$825,00	\$1,650,00
Accesorios varios para aparatos y cofres	unidad	1	\$25,00	\$25,00
Borneras de conexión para medición de voltaje 1000V	unidad	2	\$10,00	\$20,00
Borneras de conexión para salida de corriente 50A 1000V	unidad	2	\$25,00	\$50,00
Terminales de cableado "fast on" hembra 6,3mm	unidad	25	\$5,00	\$125,00
Terminal de cableado "fast on" macho 6,3mm	unidad	25	\$5,00	\$125,00
Terminal de cableado anilla Φ interior=5mm Φ del cable 1,5-2,5mm	unidad	25	\$5,00	\$125,00
Costo del circuito de arranque y protecciones				\$4.389,14

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Elementos de medición y ensamble**

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio por unidad	Total
Cinchos plástico	unidad	25	\$0,80	\$20,00
Riel DIN, Canaletas	unidad	1	\$20,00	\$20,00
Cinta de aislar 3M Scotch 33+	rollo	2	\$5,00	\$10,00
Cinta de aislar 3M Scotch 23	rollo	2	\$5,00	\$10,00
Pesas de 25kg	unidad	2	\$15,00	\$30,00
Cable THHW #14 AWG (cableado de control)	m	5	\$1,00	\$5,00
Cable THHW # 6 AWG (inyección de corriente)	metro	200	\$4,21	\$842,00
Cable THHW # 12 AWG (medición de voltaje)	metro	200	\$1,70	\$340,00
Cable THHW 300 kcmil (alimentación)	metro	30	\$49,00	\$1,470,00
Costos de materiales varios				\$2.747,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Costo aproximado de la caja**

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio por unidad	Total
Chapa de hierro 3mm de grosor	m2	6	\$40,00	\$240,00
Refuerzo de tubo de hierro cuadrado 3/4 pulgada	metro	6	\$5,00	\$30,00
Ensamble con torillos, tuercas, remache o soldadura (tuerca de 5/32 pulgada)	unidad	100	\$0,50	\$50,00
Pintura acrílica blanca	litro	2	\$20,00	\$40,00
Solvente para barniz y pintura	litro	2	\$20,00	\$40,00
Rodos de 2 1/2 pulgada	unidad	4	\$3,00	\$12,00
Lija	unidad	25	\$1,00	\$25,00
Total				\$437,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Costo total en materiales**

Autotransformador variable	\$1.579,00
Transformador 5kVA	\$2.282,82
Transformador 45kVA	\$24.301,10
Circuito de arranque y protecciones	\$4.389,14
Elementos de ensamble y medición	\$2.747,00
Caja	\$437,00
Total	\$35.736,06

Fuente: elaboración propia.

El costo de transporte dependerá del lugar donde se realice la compra, y la empresa de paquetería (*courrier*) que se contrate, tiempo de transporte, peso de la mercadería, tamaño de la mercadería, tipo de transporte, etc. Existen sitios web donde se puede obtener un cálculo aproximado del costo en transporte.

Para tener un panorama de los costos, se solicitó una cotización por correo al fabricante (MWS Wire Industries), cuyos datos proporcionados fueron los siguientes: el costo aproximado en transporte de 62 kilogramos de alambre de California, Estados Unidos hacia Guatemala con DHL es \$580.20 Sin embargo el pago de transporte debe ser de distintos lugares del mundo, incluyendo el mismo país, dependiendo de donde se realice la compra. Para simplificar los cálculos se agregó al costo del material un 20% como rubro de transporte equivalente a \$ 7,147.21 (ver tabla XXXIX).

Tabla XXXIX. **Costo total del instrumento**

Materiales	\$35.736,06
Transporte (20%)	\$7.147,21
Impuestos (15%)	\$5.360,41
Mano de obra (20%)	\$7.147,21
Imprevistos (10%)	\$3.573,61
Total	\$58.964,50

Fuente: elaboración propia.

En el análisis económico se debe de tomar en cuenta el gasto de alquiler, de algún taller industrial que cuente con la maquinaria y el equipo necesario para la construcción, ensamble y pruebas del instrumento. Si no se cuenta con este equipo, se incurrirá en un gasto mayor para poder fabricar el instrumento.

Para el ensamble de los componentes se usará herramienta básica como destornilladores, alicates, llaves, remachadoras, limas, pela cables, navajas, lijas, taladros, pulidoras, climpadoras, equipo de soldadura blanda, brocas, buriles, machuelos, etc.

Para la construcción del la caja es necesario contar con herramienta de herrería, equipo de soldadura, equipo de pintura, equipo troquelado, equipo de corte y otros.

En el caso de la construcción del transformador, se utilizarían bobinadoras, tornos, equipo de soldadura, carretes, rodillos, horno (si el transformador es encapsulado en resina), etc.

Para las pruebas eléctricas básicas tanto de los transformadores, se debe de contar con equipo especial como multímetros, meggers, vatímetros, TTRs, etc.

Además, se debe incluir los costos por certificaciones y homologaciones.

Banco de Guatemala, tipo de cambio de referencia vigente para el jueves 28 de julio de 2011 Q 7.78213.

El costo total aproximado del instrumento es de \$ 58,964.50 igual a Q 458,869.40. Comparando el costo del instrumento obtenido en el análisis económico anterior, con el precio de venta en el mercado de un instrumento con características similares de \$39, 245.00, se observa un incremento en el costo, que es de aproximadamente 50% más del valor en el mercado. Esto podría ser debido a que el costo de producción disminuye cuando se fabrican varios instrumentos de la misma clase; además, en el análisis anterior podrían haberse sobrevalorado algunos costos, por lo cual se presentaría en una rebaja en el costo, cuando el instrumento estuviera construido.

CONCLUSIONES

1. En el diseño y construcción de un transformador interviene un conjunto ordenado y finito de operaciones, factores y variables, que son usadas en el cálculo. Estas variables se introducen en modelos físicoeléctricos para obtener las características del material que se usará.
2. La comprobación del proceso de diseño se hace cuando se construye el instrumento y se pone en funcionamiento; si alguna característica hace falta en el primer diseño, en posteriores diseños deben tomarse en cuenta, de tal manera que se vaya mejorando el instrumento y acoplarlo cada vez más a la operación que realizará.
3. El instrumento está formado por tres sistemas, el sistema de inyección de corriente, de medición y de protección y control.
4. El instrumento es una fuente variable de gran magnitud de corriente con sus protecciones, amperímetro y voltímetro, elementos que están integrados dentro de una caja metálica para su protección.
5. El costo aproximado del instrumento es de Q 458,869.40 aproximadamente, 50% más que el precio de los medidores en el mercado; sin embargo se debe recordar que el costo del instrumento disminuye cuando el proceso de producción se realiza a gran escala y se usa tecnologías automatizadas para el proceso.

6. Se puede disminuir el costo del instrumento si el diseño se realiza para un instrumento de medición de voltajes de paso y contacto, para subestaciones de media y baja tensión, debido a que la potencia requerida en la medición es menor y por lo tanto el tamaño del instrumento sería menor.

RECOMENDACIONES

1. En la construcción del transformador se pueden usar otros materiales y métodos de cálculo más simplificados o más elaborados, recordando siempre tener en cuenta que en cada método interviene mayor o menor inversión económica y de tiempo.
2. Los procedimientos y datos de este trabajo de graduación pueden ser comprobados con la construcción del instrumento. El instrumento se puede realizar con propósito experimental para el laboratorio de Metrología Eléctrica de la Escuela de Mecánica Eléctrica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
3. Antes de poner en uso el instrumento deberán de hacerse las pruebas necesarias, certificarse y homologarse con el objetivo de verificar el funcionamiento apropiado y no represente algún riesgo para el operador.
4. Puede ser más factible utilizar elementos ya fabricados, como por ejemplo con la compra del transformador se evitaría gastos en inversión de maquinaria para su fabricación, gastos de mano de obra, entre otros. Lo único que quedaría es determinar las características de los elementos a adquirir, juntarlos y ensamblarlos para que realicen la función de medición.

BIBLIOGRAFÍA

1. American National Standards Institute. *Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*. Std 81-1983, New York: ANSI/IEEE, 1983. 200 p.
2. BOYLESTAD, R. L. *Introducción al análisis de circuitos eléctricos*. 10 ed. México: Pearson Educación, 2004. 1248 p.
3. Centro de Capacitación Celaya. Subdirección de Generación. *Operación y mantenimiento de transformadores de potencia*. México: Comisión Federal de Electricidad, 1999. 275 p.
4. CHAPMAN, S. J. *Máquinas eléctricas*. 2ª ed. México, D. F.: McGraw-Hill, 1995. 740 p.
5. CIRCUTOR. *Medidor de tensión de paso y contacto, medidor de resistencia de tierra*. [en línea] <http://www.circutor.es>, [Consulta: 16 de mayo de 2011]
6. COOPER, William D.; HELFRICK Albert D. *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*. México: Prentice Hall Hispanoamericana, 1991. 450 p.
7. GONZÁLEZ LÓPEZ, Francisco. J. *Metrología eléctrica*. Guatemala: Centro de Investigaciones, USAC, 2011. 113 p.

8. Institute of Electric and Electronics Engineers. *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. Std 80-2000, New York: IEEE, 2000. 135 p.
9. Instruments, D. *Energy and power measurement solution*. [en línea] http://www.dentstruments.com/media/Mini_Hinged_CT_Specs.pdf [Consulta: 8 de septiembre de 2011].
10. JARAMILLO SALAZAR, A. F. *Mediciones de tensiones de paso y contacto*. [en línea] <http://www.docstoc.com> [Consulta: 26 de mayo de 2011].
11. MALVINO, A. P. *Principios de electrónica*. 6ª ed. Madrid: McGraw-Hill Hispanoamericana, 2000. 1111 p.
12. Ministerio de Energía y Minas. *Reglamento técnico de instalaciones eléctricas* [en línea]. <http://desolcon.com/Documents/RETIE.pdf> [Consulta: 24 de mayo de 2011]
13. NAVARRA, U. D. *Diseño y fabricación de un transformador monofásico*. [en línea] http://www.tecnun.es/asignaturas/SistElec/Practicas/Trabajo_09_10.pdf [Consulta: 11 de junio de 2011].
14. PÉREZ, P. A. *Transformadores de distribución, teoría, cálculo, construcción y pruebas*. 2ª ed. México: Reverté. 165 p.
15. PÉREZ LONDOÑO, S. M.; MORA FLÓREZ, J. J.; RUEDA AUGUSTO, C. *Herramienta alternativa de diseño para transformadores secos*. [en línea] de Universidad Tecnológica de Pereira. <http://s3.amazonaws.com/ppt-download/diseodetransformadores-101028134106-phpapp01.pdf> [Consulta: 29 de agosto de 2011].

16. RAÚLL MARTÍN, José. *Diseño de subestaciones eléctricas*. 2ª ed. México: UNAM, Facultad de Ingeniería, 2000. 545 p.
17. ROMO LÓPEZ., J. *Diseño de transformadores monofásicos*. [en línea] Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemática. https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/EL57C/1/material_docente/ [Consulta: 11 de junio de 2011]
18. SÁNCHEZ BLÁZQUEZ, Francisco. I. *Diseño de un transformador de 5MVA, 33/11 kV Dyn11*. Trabajo de graduación de Ing. Electrico. Madrid: Universidad Carlos III, 2009. 113 p.
19. TAPIA, Juan. A. *Introducción al diseño de máquinas eléctricas*. España: Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2003. 150 p.
20. TELEMECANIQUE. *Manual electrotécnico Telesquemario*. [en línea] 1999. <http://www.sebyc.com/descargas/telesquemario/ManualElecTeleme.pdf>. [Consulta: 13 de octubre de 2011]

ANEXO

(a) *Características del Proveedor de Esmaltes. La Norma es referencial para los Ensayos de Calidad. Elecon no procesa pletinas con sobrecapa de Amida Imide*

<i>Rigidez Dieléctrica</i>	
<i>Capa</i>	<i>Mínimo</i>
<i>Doble</i>	1.500 V
<i>Triple</i>	2.000 V
<i>Cuádruple</i>	2.500 V

<i>Elongación del conductor</i>
<i>Mínimo</i>
32 % (*)

Tabla 310-16

Capacidades de corriente permisibles para los conductores aislados para tensión nominal de 0 a 2000 voltios, 60° a 90°. No más de tres conductores en canalización o cable, o directamente enterrados, tomando como base una temperatura ambiente de 30°C

Calibre	Régimen de temperatura del conductor, véase la tabla 310 -13								Calibre
	60° C (140° F)	75° C (167° F)	85° C (185° F)	90° C (194° F)	60° C (140° F)	75° C (167° F)	85° C (185° F)	90° C (194° F)	
AWG	TIPOS				TIPOS				AWG
	+TW, +UF	+FEPW, +RFM +RHW, +THW, +THWN, +XHHW, +USE+ ZW	V	TA, TBS, SA, AVB, SIS, +FEP, +FEPB, +RHH, +THHN, +XHHW*	+TW, +UF	+RH, +RHW, +THW, +THWN, +XHHW, +USE	V	TA, TBS, SA, AVB, SIS, +RHH, +THHN, +XHHW*	
MCM	COBRE				ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO CON COBRE				MCM
18	--	--	--	14	--	---	--	--	
16	--	--	18	18	--	---	--	--	
14	20+	20+	25	25+	--	---	--	--	
12	25+	25+	30	30+	20+	20+	25	25+	12
10	30+	35+	40	40+	25+	30+	30	35+	10
8	40	50	55	55	30	40	40	45	8
6	55	65	70	75	40	50	55	60	6
4	70	85	95	95	55	65	75	75	4
3	85	100	110	110	65	75	85	85	3
2	95	115	125	130	75	90	100	100	2
1	110	130	145	150	85	100	110	115	1
1/0	125	150	165	170	100	120	130	135	1/0
2/0	145	175	190	195	115	135	145	150	2/0
3/0	165	200	215	225	130	155	170	175	3/0
4/0	195	230	250	260	150	180	195	205	4/0
250	215	255	275	290	170	205	220	230	250
300	240	285	310	320	190	230	250	255	300
350	260	310	340	350	210	250	270	280	350
400	280	335	365	380	225	270	295	305	400
500	320	380	415	430	260	310	335	350	500
600	355	420	460	475	285	340	370	385	600
700	385	460	500	520	310	375	405	420	700
750	400	475	515	535	320	385	420	435	750
800	410	490	535	555	330	395	430	450	800
900	435	520	565	585	355	425	465	480	900
1000	455	545	590	615	375	445	485	500	1000
1250	495	590	640	665	405	485	525	545	1250
1500	520	625	680	705	435	520	565	585	1500
1750	545	650	705	735	455	545	595	615	1750
2000	560	665	725	750	470	560	610	630	2000
FACTORES DE CORRECCIÓN									
Temp . Amb. °	Para temperatura ambiente sobre 30°C multiplique la corriente indicada en la tabla por el factor de corrección adecuado para determinar la máxima corriente permitida								
21-25	1.08	1.05	1.04	1.04	1.08	1.05	1.04	1.04	
26-30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
31-35	0.91	0.94	0.95	0.96	0.91	0.94	0.95	0.96	
36-40	0.82	0.88	0.90	0.91	0.82	0.88	0.90	0.91	
41-45	0.71	0.82	0.85	0.87	0.71	0.82	0.85	0.87	
46-50	0.58	0.75	0.80	0.82	0.58	0.75	0.80	0.82	
51-55	0.41	0.67	0.74	0.76	0.41	0.67	0.74	0.76	
56-60	---	0.58	0.67	0.71	---	0.58	0.67	0.71	
61-70	---	0.33	0.52	0.58	---	0.33	0.52	0.58	
71-80	---	---	0.30	0.41	---	---	0.30	0.41	

Fuente: Código eléctrico de Costa Rica

+ El régimen nominal de corriente y la protección contra sobrecorriente para estos conductores no debe exceder de 15A para el calibre #14, 20 A para el calibre #12 y 30 Amperios para el #10 (cobre) o 15A para el #12 y 25A para el #10 de aluminio o aluminio con recubrimiento de cobre.

* Para lugares secos y húmedos solamente. Véase la columna de 75°C para lugares mojados.