



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

**MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO ACADEMICO A TRAVEZ DE LA ESTRUCTURACIÓN
VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS: INTRODUCCIÓN Y ANÁLISIS DEL
FUNCIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES, DEL CURSO CONVERSIÓN DE ENERGÍA
ELECTROMECAÁNICA 2, EN LA ESCUELA DE MECÁNICA ELÉCTRICA, FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Miguel José Pérez López

Asesorado por el Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira

Guatemala, marzo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO ACADEMICO A TRAVEZ DE LA ESTRUCTURACIÓN
VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS: INTRODUCCIÓN Y ANÁLISIS DEL
FUNCIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES, DEL CURSO CONVERSIÓN DE ENERGÍA
ELECTROMECAÁNICA 2, EN LA ESCUELA DE MECÁNICA ELÉCTRICA, FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MIGUEL JOSÉ PÉREZ LÓPEZ

ASESORADO POR EL ING. FERNANDO ALFREDO MOSCOSO LIRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MARZO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO ACADEMICO A TRAVEZ DE LA ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS: INTRODUCCIÓN Y ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES, DEL CURSO CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA 2, EN LA ESCUELA DE MECÁNICA ELÉCTRICA, FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 21 de mayo de 2019.

Miguel José Pérez López

Guatemala, 3 de enero de 2022

Coordinador Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero

Por este medio hago de su conocimiento que he concluido la revisión del trabajo de graduación del estudiante Miguel José Pérez López, titulado:

**MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO ACADEMICO A TRAVEZ DE LA ESTRUCTURACIÓN
VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS: INTRODUCCIÓN Y ANÁLISIS DEL
FUNCIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES, DEL CURSO CONVERSIÓN DE ENERGÍA
ELECTROMECAÁNICA 2, EN LA ESCUELA DE MECÁNICA ELÉCTRICA, FACULTAD DE
INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

El referido trabajo cumple, en mi criterio, con los objetivos que se propusieron para su elaboración, por lo que el estudiante y este servidor, en mi calidad de asesor, somos responsables de su contenido.



Fernando Alfredo Moscoso Lira
Ingeniero Mecánico Electricista
Colegiado 6386

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, 3 de enero de 2022

Ingeniero
Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Rivera:

Por este medio, con base a lo indicado en el REGLAMENTO DE TRABAJOS DE GRADUACION vigente, tengo a bien proponer la aprobación del trabajo de graduación titulado:

**MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO ACADEMICO A TRAVEZ DE LA ESTRUCTURACIÓN
VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS: INTRODUCCIÓN Y ANÁLISIS DEL
FUNCIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES, DEL CURSO CONVERSIÓN DE ENERGÍA
ELECTROMECAÁNICA 2, EN LA ESCUELA DE MECÁNICA ELÉCTRICA, FACULTAD DE
INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

del estudiante MIGUEL JOSÉ PÉREZ LÓPEZ, habiendo cumplido con los requisitos establecidos en el referido reglamento y conforme la aprobación del asesor.

Sin otro particular

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Una firma manuscrita en tinta que parece decir "F. Moscoso Lira".

Ingeniero Fernando Alfredo Moscoso Lira
Coordinador Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería



REF. EIME 30.2022.

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 Miguel José Pérez López: MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO A TRAVÉS DE LA ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS: INTRODUCCIÓN Y ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES, DEL CURSO DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA 2, EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA , procede a la autorización del mismo.



Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Guatemala, 15 de febrero de 2022.

La Decana 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: **MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO ACADEMICO A TRAVEZ DE LA ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS: INTRODUCCIÓN Y ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES, DEL CURSO CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA 2, EN LA ESCUELA DE MECÁNICA ELÉCTRIC**, presentado por: **Miguel José Pérez López**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, marzo de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme amor, salud, paciencia y por brindarme la Sabiduría y acamparme en todo momento.
- Mis padres** José Pérez y Vilma de Pérez, por darme la vida y por cada esfuerzo que ha hecho por mí, por darme todo su amor, paciencia y apoyo incondicional durante toda mi vida. Por ser mi motivo de superación.
- Mis hermanos** Maylin, Dennis y Jonathan Pérez, por los consejos, por el apoyo constante y único a lo largo de mi carrera. Por todas las ocurrencias que pasamos en la vida.
- Mis abuelos** Felina de López, por ser una segunda madre, por el amor y apoyo a lo largo de mi vida. Rufino López (q. e. p. d.), por cada una de tus enseñanzas los consejos y por motivación a alcanzar este logro, dedicado a ti.
- Tío y primos** Marco, Karen y Guillermo López, por su apoyo y alegrías a lo largo de mi vida.

Mis amigos

Manuel Rojas, Pablo abad, José Monroy, Edson Marcial, Marcos Miranda, Pablo López, Jonathan Medina, Laura Díaz, Mynor Darío, y demás amigos; que también forman parte de este logro; gracias por el constante apoyo, los consejos y alegrías que me ayudaron a seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS A:

Mi Familia	Los Pérez López, que siempre me brindaron su amor incondicional y me mostraron su apoyo en toda mi carrera, pero especialmente en mi vida.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por todas las enseñanzas brindadas y poder formarme como profesional.
Facultad de Ingeniería	Por guiarme y darme los conocimientos a lo larga de la carrera del área que me apasiona.
Mis amigos de la Facultad	Pablo abad, José Monroy, Edson Marcial, Marcos Miranda, Pablo López, Jonathan Medina, Laura Díaz, por el apoyo, ánimo y alegrías que me dieron durante todos los momentos fáciles y sobre todo en los difíciles.
Mis amigos de la vida	Manuel Rojas y Mynor Darío, por el constante animo que me dieron en todo momento, por estar al pendiente de mi carrera y por mostrarme su cariño en todo momento.
Mi asesor	Ing. Fernando Moscoso, por creer en mí, su apoyo, su tiempo, su paciencia, sus concejos y por motivarme a alcanzar la meta como un profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIII
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. CONSTRUCTIVISMO Y TIC.....	1
1.1. Constructivismo.....	1
1.1.1. Introducción y objetivos.....	1
1.2. Las TIC.....	2
1.3. Características del constructivismo y las TIC.....	3
1.3.1. Características del constructivismo.....	3
1.3.2. Características de las TIC.....	4
1.4. Importancia del Constructivismo y las TIC.....	5
1.4.1. Constructivismo.....	5
1.4.2. TIC.....	6
1.4.3. Enlace de visualizaciones de los videos.....	7
2. CONCEPTO A DIGITALIZAR.....	9
2.1. Introducción a los transformadores.....	9
2.1.1. Definición.....	9
2.1.1.1. Composición del transformador.....	9
2.1.2. Tipos y construcción de transformadores.....	10
2.1.2.1. Diseño de transformadores.....	10

2.1.2.2.	Según su número de fases	17
2.1.2.2.1.	Monofásicos	17
2.1.2.2.2.	Trifásicos	17
2.1.2.3.	Según la operación	18
2.1.2.3.1.	Potencia.....	18
2.1.2.3.2.	Distribución	18
2.1.2.4.	Según su construcción.....	18
2.1.3.	Tipo según la utilización de los transformadores	20
2.1.3.1.	Según su utilización dentro del sistema eléctrico	20
2.1.3.1.1.	En generación.....	20
2.1.3.1.2.	En distribución	20
2.1.3.1.3.	En subestación	21
2.1.3.2.	Transformadores especiales.....	21
2.1.3.2.1.	De aislamiento	21
2.1.3.2.2.	De alimentación	21
2.1.3.2.3.	De medida	22
2.1.3.3.	Transformadores de instrumento	25
2.1.3.3.1.	Parámetros de los transformadores de Corrientes	26
2.1.3.3.2.	Parámetros de los transformadores de potencial	30
2.1.4.	Normas aplicadas a los transformadores.....	32
2.1.4.1.	IEC	33
2.1.4.2.	IEEE	34
2.2.	Análisis del funcionamiento del transformador	36
2.2.1.	Transformador ideal	36

	2.2.1.1.	Transformador ideal en vacío	38
	2.2.1.2.	Transformador ideal en carga	39
2.2.2.		Transformador real	42
2.2.3.		Circuito equivalente del transformador	45
	2.2.3.1.	Circuito equivalente aproximado	50
	2.2.3.2.	Ensayos para parámetros del circuito equivalente.....	51
		2.2.3.2.1. Diagrama fasorial de tensiones y corrientes ...	56
2.2.4.		Diagrama vectorial del Transformador	59
	2.2.4.1.	De acuerdo al circuito equivalente aproximado	59
	2.2.4.2.	De acuerdo al circuito equivalente reducido	64
2.2.5.		Regulación de voltaje del transformador	67
2.2.6.		Eficiencia del transformador.....	67
	2.2.6.1.	Pérdidas en el transformador	67
		2.2.6.1.1. IEEE C57.123-2002	69
		2.2.6.1.2. IEEE C57.120-1991	69
2.2.7.		Valores por unidad para un transformador	70
2.2.8.		Curva de daño del transformador.....	71
2.3.		Proyecto de instalación de transformador	75
	2.3.1.	Esquema de protección	75
		2.3.1.1. Protección diferencial del transformador.....	75
		2.3.1.2. Protección contra sobrecorriente.....	82
		2.3.1.2.1. Protección según la Norma IEEE C37.91- 2000	84

2.3.2.	El transformador como parte del sistema eléctrico de potencia.....	85
2.3.2.1.	Descripción del sistema eléctrico de potencia.....	85
2.3.2.2.	Función del transformador en el sistema de potencia.....	87
2.3.2.2.1.	El transformador en la parte de transmisión	87
2.3.2.2.2.	El transformador en la parte distribución	88
3.	APLICACIÓN DE CONCEPTOS.....	91
3.1.	Aplicación de introducción a los transformadores.....	91
3.1.1.1.	Ejercicios de comparación de transformadores.....	91
3.1.2.	Ejercicios de tipos y construcción de transformadores	92
3.1.2.1.	Ejercicio de diseño de un transformador	93
3.1.2.2.	Ejercicio para identificar el número de fases.....	94
3.1.2.3.	Ejercicios para identificar el tipo de operación.....	98
3.1.2.4.	Ejercicio para identificar el tipo de construcción	101
3.1.3.	Ejercicio para identificar el tipo de utilización de los transformadores.....	105
3.1.3.1.	Ejercicio de transformador dentro del sistema eléctrico	105

	3.1.3.2.	Ejercicio de transformador especiales	106
	3.1.4.	Ejemplo de aplicación de las normas IEC e IEEE .	111
3.2.		Aplicación de análisis del funcionamiento de un transformador	112
	3.2.1.	Transformador ideal	112
	3.2.1.1.	Ejercicio del funcionamiento en vacío y en carga	113
	3.2.2.	Transformador real	115
	3.2.2.1.	Ejercicio de funcionamiento en vacío y en carga	115
	3.2.2.2.	Ejercicio transformador ideal y transformador real	116
	3.2.3.	Circuito equivalente del transformador	118
	3.2.3.1.	Ejercicio del circuito equivalente aproximado	118
	3.2.3.2.	Ejercicio del circuito equivalente reducido	119
	3.2.3.3.	Ejercicio de ensayo de parámetros	120
	3.2.4.	Diagrama vectorial del transformador	122
	3.2.4.1.	Ejercicio de acuerdo al circuito equivalente aproximado	122
	3.2.4.2.	Ejercicio de acuerdo al circuito equivalente reducido	124
	3.2.5.	Ejercicio de regulación de voltaje	127
	3.2.6.	Eficiencia del transformador	131
	3.2.7.	Ejercicio de valores por unidad para un transformador.....	131
	3.2.8.	Ejercicio para la curva de daño del transformador	135

3.3.	Proyecto de instalación de un transformador	136
3.3.1.	Esquema de protección de un transformador	136
3.3.1.1.	Ejercicio para la protección diferencial	137
3.3.1.2.	Ejercicio para protección de sobrecorriente.....	138
3.3.2.	El transformador como parte de un sistema de potencia.....	139
3.3.2.1.	Ejercicio de las partes del sistema de potencia	140
3.3.2.2.	Ejercicio en la transmisión del sistema de potencia.....	141
3.3.2.3.	Ejercicio en la distribución del sistema de potencia.....	142
4.	EVALUACIÓN DE CONCEPTOS	145
4.1.	Problemas sobre introducción a los transformadores	145
4.1.1.	Problemas de la composición de un transformador	145
4.1.2.	Tipos y construcción de transformadores	145
4.1.2.1.	Problemas de aplicación de diseño de un transformador	146
4.1.2.2.	Problemas para identificar el número de fases	147
4.1.2.3.	Problemas para identificar el tipo de operación.....	147
4.1.2.4.	Problemas para identificar el tipo de construcción	147

4.1.3.	Problema para identificar el transformador dentro del sistema eléctrico de potencia	148
4.1.3.1.	Problemas de los transformadores especiales	148
4.1.4.	Problemas de aplicación para las normas IEC e IEEE	149
4.2.	Problemas sobre el análisis del funcionamiento del transformador	149
4.2.1.	Transformador ideal	149
4.2.2.	Transformador real	150
4.2.3.	Circuito equivalente del transformador	150
4.2.3.1.	Problema del circuito equivalente aproximado y reducido	150
4.2.3.2.	Problema de ensayo para los parámetros	151
4.2.4.	Diagrama vectorial del transformador	151
4.2.4.1.	Problema según el circuito aproximado	151
4.2.4.2.	Problema según el circuito equivalente reducido	152
4.2.5.	Problema de aplicación regulación de voltaje del transformador.....	152
4.2.6.	Eficiencia del transformador.....	153
4.2.6.1.	Problemas de análisis de pérdidas del transformador	153
4.2.7.	Problemas de aplicación de valores por unidad para un transformador.....	153
4.2.8.	Problema de análisis de la curva de daño del transformador.....	154

4.3.	Proyecto de instalación del transformador.....	154
4.3.1.	Esquema de protección del transformador	154
4.3.1.1.	Problema de protección diferencial....	154
4.3.1.2.	Problema de protección de sobrecorriente.....	155
4.3.2.	El transformador como parte del sistema eléctrico de potencia.....	156
4.3.2.1.	Problema partes del sistema eléctrico de potencia	156
4.3.2.2.	Problemas de la función en la parte de transmisión	156
4.3.2.3.	Problemas de la función en la parte de distribución	157
	CONCLUSIONES	159
	RECOMENDACIONES	161
	BIBLIOGRAFÍA	163
	APÉNDICE.....	165

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figuras

1.	Composición del transformador.....	10
2.	Circuito magnético del transformador monofásico.....	11
3.	Uniones de chapas de transformadores.....	12
4.	Devanados concéntricos y alternados.....	12
5.	Aspectos constructivos de un transformador.....	13
6.	Rele buchholz en el transformador.....	15
7.	Símbolos empleados para designar un transformador	16
8.	Esquemas del transformador de medida de corriente	24
9.	Esquemas del transformador de medida de tensión.....	25
10.	Transformador monofásico con núcleo real.....	36
11.	Diagrama fasorial de tensiones y corrientes en vacío	39
12.	Impedancia reflejada en el transformador Ideal.....	41
13.	Transformador real con resistencias eléctricas y flujos de dispersión...42	
14.	Transformador real con bobinas ideales en el núcleo	43
15.	Circuito equivalente de un transformador real reducido al primario	46
16.	Circuito equivalente de un transformador real reducido al primario	49
17.	Circuito equivalente exacto reducido al primario	49
18.	Circuito equivalente exacto reducido al secundario.....	50
19.	Circuito equivalente aproximado reducido al primario	51
20.	Disposicion de los apartos de medida para determinar la polaridad	53
21.	Esquema eléctrico de ensayo en vacío	53
22.	Circuito equivalente en vacío y diagrama fasorial correspondiente	54
23.	Circuito equivalente del ensayo de cortocircuito.....	55

24.	Circuito equivalente de cortocircuito y esquema fasorial de tensiones.	56
25.	Circuito aproximado de un transformador referido al lado secundario.....	57
26.	Diagrama fasorial de un transformador que opera a un factor de potencia en atraso.	58
27.	Diagrama fasorial de un transformador que opera a factor de potencia unitario.	58
28.	Diagrama fasorial de un transformador que opera a factor de potencia en adelanto	59
29.	Transformador real en carga	60
30.	Transformador en carga	62
31.	Transformador en carga empleado bobina ideal en el secundario	62
32.	Diagrama vectorial del transformador de acuerdo al circuito equivalente	63
33.	Diagrama vectorial del transformador reducido.....	66
34.	Puntos de la curva de daño del transformador obtenida de la norma ANSI-IEEE C57.109-1993	74
35.	Esquema simplificado de un relé diferencial para transformador de potencia.....	76
36.	Principio de actuación de la protección diferencial de transformador ...	77
37.	Desplazamiento angular de los fasores de corriente de línea en transformadores conectados delta/estrella y estrella/delta.....	80
38.	Faseo relevador diferencial del transformador	81
39.	Relevador de corriente electromagnético.....	83
40.	Tipos de curvas de relevadores de sobrecorriente	84
41.	Ejemplo 1 de composición de un Transformador	92
42.	Ejemplo 2 de composición de un Transformador	92
43.	Figura Transformador monofásico.....	94

44.	Transformador monofásico de aislamiento.....	95
45.	Transformador monofásico tipo poste	95
46.	Transformador trifásico 75 kVA /12 KV	96
47.	Transformador trifásico de aislamiento.....	96
48.	Transformador trifásico alta tensión	97
49.	Transformador trifásico de potencia de alta tension	97
50.	Transformador de distribución trifásico en poste	98
51.	Transformador de distribución monofásico en poste	99
52.	Transformador de potencia en subestación 115kV.....	99
53.	Transformador de potencia #1	100
54.	Transformador de potencia #2	100
55.	Autotransformador típico	101
56.	Diagrama autotransformador trifásico	102
57.	Ejemplo de autotransformador	102
58.	Transformador con núcleo toroidal.....	103
59.	Transformador de grano orientado.....	103
60.	Transformadores de núcleo de aire.....	104
61.	Transformador piezoeléctrico	104
62.	Sistema eléctrico de potencia.....	106
63.	Diagrama de un transformador de aislamiento	107
64.	Transformador de alimentación.....	107
65.	Transformador de medida de potencial	108
66.	Circuito equivalente del transformador referido a los lados de alto voltaje y bajo voltaje	119
67.	Ejemplo de diagrama vectorial de Transformador	123
68.	Ejemplo Diagrama vectorial del transformador final	124
69.	Circuito equivalente reducido de un transformador	126
70.	Diagrama fasorial de un transformador de acuerdo al Circuito equivalente reducido	126

71.	Circuito para la prueba de (a) Circuito abierto y (b) de cortocircuito...	129
72.	Circuito equivalente del transformador de ejemplo referido al primario	129
73.	Circuito de Sistema de potencia ejercicio	132
74.	Circuito equivalente del sistema por unidad.....	134
75.	Circuito de ejercicio de regulación de voltaje	152

Tablas

I.	Símbolos de la naturaleza del refrigerante y modo de circulación.....	14
II.	Cargas aceptadas en transformadores de corriente	28
III.	Precisiones personalizadas en transformadores de corriente	29
IV.	Precisiones normalizadas en transformadores de potencial	31
V.	Precisión para aparatos de medición	32
VI.	Las f.m.m. del circuito equivalente con y sin reducción.....	65
VII.	Clasificación de los transformadores	72
VIII.	Ecuaciones para el cálculo de los puntos de la curva de daño	73
IX.	Impedancias mínimas.....	75
X.	Fasor del devanado secundario en fase con el fasor del devanado primario	79
XI.	Corrientes en fase con las corrientes de línea en lado de delta	79
XII.	Datos de pruebas del transformador lado primario	127
XIII.	Tabla de resultados para graficar la curva de daño	136
XIV.	Parámetros del ejemplo circuito equivalente del transformador	151

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Y	Admitancia
A	Amperios
φ	Angulo de desfase
L_d	Coefficientes de autoinducción
I	Corriente
η	Eficiencia
Φ	Flujo
f.m.m.	Fuerza magneto motriz
Z	Impedancia
ZL	Impedancia de carga
L	Inductancia
KW	Kilo vatios
KVA	Kilo voltio amperios
N	Número de espiras
Ω	Ohmio
P_{Fe}	Pérdidas en el hierro
P_o	Pérdidas en vacío
P	Potencia activa
S	Potencia aparente
Q	Potencia reactiva
X	Reactancia
VR	Regulación de voltaje
m	Relación de transformación

R	Resistencia
V	Tensión
E	Tensión eficaz

GLOSARIO

Amperio	Unidad de medida de la corriente eléctrica equivalente al paso de un Coulomb de carga, por un punto dado de un circuito eléctrico, en un segundo.
ANSI	Letras iniciales, en idioma inglés, del Instituto Nacional Norteamericano de Estándares.
Bobina	Conjunto de alambres enrollados en torno a un eje común utilizados para generar campos magnéticos.
Campo magnético	Es un campo fuerza creado como consecuencia del movimiento de cargas eléctricas.
Carga	Componente de un circuito que ofrece una mayor o menor resistencia al paso de la corriente, también se considera consumidor de energía eléctrica.
Corriente de excitación	Corriente que circula por el primario de un transformador de potencia en vacío, y sirve para inducir el campo magnético en su núcleo y suministrar la energía de pérdidas correspondiente
Cortocircuito	Conexión de muy baja resistencia producida entre dos puntos de un circuito que están a potenciales diferentes.

Electromecánica	Es la combinación de las ciencias del electromagnetismo de la ingeniería eléctrica y la ciencia de la mecánica.
Energía	Es la capacidad que poseen los cuerpos para poder efectuar un trabajo a causa de su constitución, de su posición o de su movimiento.
Factor de potencia	El factor de potencia mide la eficiencia de su consumo eléctrico, a la hora de convertirlo en potencia útil, como luz, calor o movimiento mecánico.
Falla	Una falla eléctrica es un evento anormal que provoca el mal funcionamiento de un circuito eléctrico.
Fasor	Representan las tensiones y corrientes en los circuitos eléctricos.
Fuerza electromotriz	Es toda causa capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito abierto o de producir una corriente eléctrica en un circuito cerrado.
Fuerza magnetomotriz	Es aquella capaz de producir un flujo magnético entre dos puntos de un circuito magnético.
Flujo magnético	Es el producto escalar del vector campo por el vector superficie, y nos indica la cantidad de magnetismo existente en un medio.

Impedancia	Es la oposición al paso de la corriente, cuando en un circuito de corriente alterna en el que se encuentran conectados, resistencias, condensadores y bobinas, circula una corriente eléctrica.
IEC	Letras iniciales, en idioma inglés, Comisión Electrotécnica Internacional.
IEEE	Letras iniciales, en idioma inglés, Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
Regulación de voltaje	Umbral alrededor del cual debe mantenerse el valor del voltaje, con cierta tolerancia para no afectar a los usuarios.
Subestación eléctrica	Es una instalación destinada a establecer los niveles de tensión adecuados para la transmisión y distribución de la energía eléctrica.
Valor eficaz	Valor de una tensión o corriente variable igual al de una tensión o corriente constante que produce la misma potencia sobre una resistencia dada.
Voltio	Unidad de medida de la Tensión.

RESUMEN

En la actualidad la mayor parte de sistemas eléctricos dependen de los transformadores en la mayoría de sus fuentes de alimentación y control de niveles de energía, debido a esto es un elemento que debe ser administrado de forma óptima. Al depender de este equipo para satisfacer el manejo de la energía eléctrica, en la Facultad Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se plantea adecuar la información para obtener los conocimientos que son adecuados para el estudiante en el trabajo con transformadores, desde su definición y constitución hasta en sus distintos lugares de aplicación.

Esta información se obtendrá a partir del curso de Conversión de Energía Electromecánica 2 de la Escuela de Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, el cual tiene planteados una serie de cinco unidades en donde se expone de manera ordenada las principales características y análisis de un transformador, el cual es de utilidad para el estudiante que desea iniciar con el aprendizaje desde un punto básico, en base a esto se ha planteado desarrollar, entorno al aprendizaje constructivista y TIC para esta investigación las primeras dos unidades, las cuales tienen como nombre establecido; Introducción a los transformadores para la unidad uno y análisis del funcionamiento un transformador para la unidad dos. En donde para el tema de introducción a los transformadores, se expondrán lo que se refiere a su definición, diseño y tipos que existen según algunas características de funcionamiento y aplicación. de igual forma para el tema de Análisis de un Transformador, se expondrá lo que se refiere a su construcción, el circuito equivalente, la puesta en operación, además se incluirá el tema del transformador como parte de un sistema eléctrico de

potencia. Además, en algunos temas del curso, se dará mención a lo que establecen las normas IEEE e IEC, que tienen forma de aplicación para cada concepto en lo que respecta a los transformadores.

A partir de completar la investigación se procederá a realizar como complemento de esta, una serie de videos en donde se expondrá de forma didáctica cada uno de los temas del curso con su respectiva aplicación para una mejor comprensión, con estas herramientas a disposición del estudiante se desea poder obtener un mejoramiento en lo que respecta al rendimiento académico en Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

OBJETIVOS

General

Mejorar el rendimiento académico a través de la estructuración de forma virtual constructivista de los temas: Introducción a los Transformadores y Análisis del Funcionamiento de un transformador, del curso de Conversión de Energía Electromecánica 2, en la Escuela De Ingeniería Mecánica Eléctrica, de la Universidad De San Carlos De Guatemala.

Específicos

1. Exponer y explicar el método constructivista de forma que el estudiante pueda comprenderlo, y así poder aplicarlo en el curso de Conversión de Energía Electromecánica 2.
2. Definir los temas de introducción a los transformadores y análisis de funcionamiento de un transformador, de forma que al estudiante se le facilite la comprensión.
3. Exponer las aplicaciones de los temas y subtemas de Introducción a los Transformadores y Análisis de Funcionamiento de un Transformador de manera que el estudiante puede comprender de manera más ejemplificada el curso.

4. Evaluar los conceptos comprendidos por el estudiante de los temas y subtemas de introducción a los transformadores y análisis de funcionamiento de un transformador.

5. Poder elaborar a partir de este documento una serie de videos que muestren los temas y subtemas expuestos de Introducción a los Transformadores y Análisis de un Transformador que permitan al estudiante comprender de forma clara los temas del curso.

INTRODUCCIÓN

El curso de Conversión de Energía electromecánica 2, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala está relacionado y centrado en el tema de los transformadores de energía, ya que son un elemento primordial para la formación de un ingeniero eléctrico, debido este se encuentra presente en una amplia variedad de aplicaciones y ramas en que puede desglosarse esta carrera. Una de las ramas en donde es muy importante es en los Sistemas eléctricos de potencia, debido a que en ellos es posible, de una manera práctica y económica, el transporte de energía eléctrica a grandes distancias, esto conlleva a poder entender las capacidades eléctricas, los tipos de operación, las utilidades especiales, de protección y medición, pero principalmente se debe entender y analizar su funcionamiento.

Los transformadores son máquinas capaces de cambiar la potencia eléctrica de un nivel de tensión hacia una potencia eléctrica de otro nivel de tensión, esto mediante la acción de un campo magnético. Estas máquinas están constituidas generalmente de dos o más devanados enrollados alrededor de un núcleo ferromagnético, estos devanados no están conectados en forma directa, la única conexión es el flujo magnético común, que se encuentra en el núcleo del transformador. Uno de los devanados del transformador se encarga de poder recibir la energía alterna o de la red y el otro se encarga de suministrar la energía transformada.

En los transformadores también existen las pérdidas que conllevan al análisis de otros aspectos relacionados a su funcionamiento, a partir de estos temas y en base al programa del curso, se ha desarrollado el presente trabajo, el

cual tiene como objetivo transmitir al estudiante los principales conocimientos del transformador de energía.

1. CONSTRUCTIVISMO Y TIC

El constructivismo y las TIC son métodos de estudio que beneficia a los estudiantes estén constantemente aprendiendo uno o varios temas a la vez. Por ejemplo, si un trabajo implica realizar un informe de las aplicaciones de un transformador, no solo está conociendo la aplicación de los transformadores, sino que también está aprendiendo qué es un informe y cómo se hace.

1.1. Constructivismo

Comenzando por el constructivismo se define la idea en que se centra este método, por lo que se exponen los objetivos.

1.1.1. Introducción y objetivos

El constructivismo es una corriente pedagógica creada por Ernst Von Glasersfeld, basándose en la teoría del conocimiento constructivista, que postula la necesidad de entregar al estudiante herramientas (generar andamiajes) que le permitan crear sus propios procedimientos para resolver una situación problemática, lo cual implica que sus ideas se modifiquen y siga aprendiendo.

El constructivismo educativo propone un paradigma en donde el proceso de enseñanza se percibe y se lleva a cabo como un proceso dinámico, participativo e interactivo del sujeto, de modo que el conocimiento sea una auténtica construcción operada por la persona que aprende (por el "sujeto cognoscente"). El constructivismo en pedagogía se aplica como concepto didáctico en la enseñanza orientada a la acción.

Como figuras clave del constructivismo cabe citar a Jean Piaget y a Lev Vygotsky. Piaget se centra en cómo se construye el conocimiento partiendo desde la interacción con el medio. Por el contrario, Vygotski se centra en cómo el medio social permite una reconstrucción interna.¹

1.2. Las TIC

Las tecnologías de información y comunicación, mayormente conocidas como "TIC", son aquellas cuya base se centra en los campos de la informática, la microelectrónica y las telecomunicaciones, para dar paso a la creación de nuevas formas de comunicación.

Se trata de un conjunto de herramientas o recursos de tipo tecnológico y comunicacional, que sirven para facilitar la emisión, acceso y tratamiento de la información mediante códigos variados que pueden corresponder a textos, imágenes, sonidos, entre otros.

Como es común en todo proceso de comunicaciones, existe la emisión de un mensaje, y en el caso de las TIC, este mensaje corresponde a datos e instrucciones enviadas de un usuario a otro por medio de un canal digital o hardware y definido por un código o software, en un contexto determinado por convenios internacionales.

Las TIC involucran una nueva forma de procesamiento de la información, en el que las tecnologías de la comunicación (TC), esencialmente compuestas por la radio, la telefonía convencional y la televisión, se combinan con las tecnologías de la información (TI), las cuales se especializan en la digitalización de las tecnologías de registro de contenidos.

Las TIC involucran además el desarrollo de las redes, por lo que permiten un mayor y más fácil acceso a la información.

De tal manera, podemos oír a distancia o ver escenas que ocurren lejos del espacio físico en el que nos encontramos, gracias al uso de la radio y la televisión, e incluso podemos trabajar y llevar a cabo actividades u operaciones de manera virtual y no presencial.²

¹ Instituto Wozniak. *Conductista – constructivista*. <https://wozniak.mx/?Seccion=ModeloEducativo#:~:text=El%20constructivismo%20es%20una%20corriente,una%20situaci%C3%B3n%20problem%C3%A1tica%2C%20lo%20cual.> Consulta: agosto 2019.

² Instituto Providencial De Administración Pública De Mendoza. *TIC: tecnologías de la información y la comunicación*. <https://www.mendoza.gov.ar/gobierno/wp-content/uploads/sites/19/2018/09/m4.-Resumen-TIC.pdf>. Consulta: agosto 2019.

1.3. Características del constructivismo y las TIC

Se describen en el siguiente apartado las principales características del constructivismo y las TIC.

1.3.1. Características del constructivismo

Las características del tema constructivista de la enseñanza y del aprendizaje se organiza en base a tres ideas principales:

El estudiante es el responsable último de su propio proceso de aprendizaje. Es él quien construye el conocimiento y nadie puede sustituirle en esa tarea. La importancia prestada a la actividad del estudiante no debe interpretarse en el sentido de un acto de descubrimiento o de invención sino en el sentido de que es él quien aprende y, si él no lo hace, nadie, ni siquiera el facilitador, puede hacerlo en su lugar. La enseñanza está totalmente mediatizada por la actividad mental constructiva del estudiante. El estudiante no es sólo activo cuando manipula, explora, descubre o inventa, sino también cuando lee o escucha las explicaciones del facilitador.

La actividad mental constructiva del estudiante se aplica a contenidos que ya poseen un grado considerable de elaboración, es decir, que es el resultado de un cierto proceso de construcción a nivel social.

Los estudiantes construyen o reconstruyen objetos de conocimiento que de hecho están contruidos. Los estudiantes construyen el sistema de la lengua escrita, pero este sistema ya está elaborado; los estudiantes construyen las operaciones aritméticas elementales, pero estas operaciones ya están definidas; los estudiantes construyen el concepto de tiempo histórico, pero este concepto forma parte del bagaje cultural existente; los estudiantes construyen las normas de relación social, pero estas normas son las que regulan normalmente las relaciones entre las personas.

El hecho de que la actividad constructiva del estudiante se aplique a unos contenidos de aprendizaje preexistente condiciona el papel que está llamado a desempeñar el facilitador. Su función no puede limitarse únicamente a crear las condiciones óptimas para que el estudiante despliegue una actividad mental constructiva rica y diversa; el facilitador ha de intentar, además, orientar esta actividad con el fin de que la construcción del estudiante se acerque de forma progresiva a lo que significan y representan los contenidos como saberes culturales³.

³ CALDERÓN SÁNCHEZ, Raymundo. *Constructivismo y aprendizajes significativos*. <https://www.monografias.com/trabajos7/aprend/aprend#:~:text=El%20alumno%20es%20el%20responsable,puede%20sustituirle%20en%20esa%20tarea.&text=El%20alumno%20no%20es%20s%C3%B3lo,escucha%20las%20explicaciones%20del%20facilitador>. Consulta: agosto 2019.

1.3.2. Características de las TIC

El uso de las TIC tiene ventajas en su comparación con las herramientas empleadas en la enseñanza de forma tradicional. La mayor parte de estas ventajas están relacionadas de manera directa con las propias características de las TIC. Entre ellas cabe destacar:

Información variada. Es posible acceder a gran cantidad de información sobre diferentes ámbitos. Esto permite que el alumno deba realizar un análisis de la misma que le permitan valorar la calidad y credibilidad de la misma.

Flexibilidad instruccional. El ritmo de aprendizaje y el camino por seguir durante el proceso puede ser diferente para los distintos alumnos adecuándose a las necesidades diversas que se presentan en el aula.

Complementariedad de códigos. Las aplicaciones multimedia, que utilizan diversos códigos de comunicación, permiten que estudiantes con distintas capacidades y habilidades cognitivas puedan extraer un mejor provecho de los aprendizajes realizados.

Aumento de la motivación. Diversos estudios muestran que los estudiantes se muestran más motivados cuando utilizan las TIC, este efecto que aún se produce, puede ser efecto de la novedad, aunque personalmente opino que el aumento de la motivación está muy relacionado, tanto con el mayor atractivo de las presentaciones multimedia sobre las tradicionales, como por la mayor implicación del alumno en su proceso de aprendizaje.

Actividades colaborativas. El uso adecuado de las TIC, en trabajos de grupo, puede potenciar las actividades colaborativas y cooperativas entre los alumnos y también la colaboración con otros centros o instituciones por medio de la red.

Potenciar la innovación educativa. La nueva sociedad utiliza nuevas tecnologías que favorecen nuevas metodologías. Si bien no es una relación causa-efecto, es indudable que los profesores que conocen nuevas tecnologías tienden a buscar nuevas formas de enseñar y nuevas metodologías didácticas más adecuadas a la sociedad actual y a los conocimientos y destrezas que deben desarrollar los estudiantes para su adaptación al mundo adulto.⁴

⁴ Latinoamericana De Ciencias Sociales, Niñez y Juventud. *Tendencias educativas con el uso de las TIC*. <https://sites.google.com/a/correo.unimet.edu.ve/tecnologia-herramienta-educativa/tendencia-educativas-con-el-uso-de-las-tic?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>. Consulta: agosto 2019.

1.4. Importancia del Constructivismo y las TIC

Ambos apoyan el sistema educativo en donde el desarrollo de la enseñanza se percibe y se lleva a cabo como un proceso dinámico, participativo e interactivo del estudiante, de manera que el conocimiento construido por la persona que aprende. Se describe entonces la importancia de estos temas.

1.4.1. Constructivismo

A los docentes constantemente se les menciona la importancia de establecer procesos constructivistas en nuestras aulas, con lo cual solemos estar de acuerdo; sin embargo, no les explican qué es el constructivismo y, sobre todo, cómo implementarlo.

El primer obstáculo por enfrentar es que la mayoría de nosotros aprendimos bajo lineamientos poco afines con esta propuesta educativa: nuestros maestros poco sabían del aprendizaje significativo y de la participación activa del educando, salvo alguna honrosa excepción que siempre ha habido.

Para comprenderlo mejor debemos plantear una pregunta que ha preocupado a los filósofos de todos los tiempos, ¿Cómo se adquiere el conocimiento?, a lo cual el constructivismo, como escuela del conocimiento, responde concibiendo el aprendizaje como un proceso único y personal que se da entre el sujeto y el objeto a conocer, y coloca al enseñante como facilitador de dicho proceso. Desde una postura psicológica y filosófica argumenta que los individuos forman o construyen gran parte de lo que aprenden y comprenden destaca la situación en la adquisición y perfeccionamiento de las habilidades y los conocimientos.

Desde el punto de vista del constructivismo el maestro no enseña en el sentido tradicional de pararse frente a la clase e impartir los conocimientos, sino que acuden a materiales con lo que los alumnos se comprometen activamente mediante manipulación e interacción social. Un supuesto básico del constructivismo es que los individuos son participantes activos y deben redescubrir los procesos básicos. El constructivismo exógeno recalca la fuerte influencia del exterior en la construcción del conocimiento.⁵

⁵ ECURED. *Constructivismo (Pedagogía)*. [https://www.ecured.cu/Constructivismo_\(Pedagog%C3%ADa\)](https://www.ecured.cu/Constructivismo_(Pedagog%C3%ADa)). Consulta: agosto 2019.

1.4.2. TIC

Las tecnologías de la información de la comunicación son muy importantes en la actualidad ya que gracias a estas estamos en contacto y comunicación con muchas otras personas de nuestra comunidad, nuestra región del país o tal vez de todo el mundo. Nos comunicamos a través de mensajes por ejemplo por el teléfono celular, imágenes y sonidos por ejemplo la televisión que día a día nos muestra los sucesos más importantes que pasan en nuestro alrededor (las noticias). Otra de estas tecnologías es el internet que esta entrelazada por millones de redes en todo el mundo y pues de esa manera y por medio de algunos programas conocidos como correo electrónico podemos enviar distintos tipos de información a algunos conocidos.

En línea con esto, el auge de las nuevas tecnologías, y en especial el advenimiento del “tercer entorno” (el mundo virtual) tiene importantes incidencias en educación. De entre ellas se destacan:

Exige nuevas destrezas. El “tercer entorno” es un espacio de interacción social en el que se pueden hacer cosas, y para ello son necesarios nuevos conocimientos y destrezas. Además de aprender a buscar y transmitir información y conocimientos a través de las TIC (construir y difundir mensajes audiovisuales), hay que capacitar a las personas para que también pueda intervenir y desarrollarse en los nuevos escenarios virtuales.

Seguirá siendo necesario saber leer, escribir, calcular, tener conocimientos de ciencias e historia, pero todo ello se complementará con las habilidades y destrezas necesarias para poder actuar en este nuevo espacio social telemático.

En el nuevo entorno social la presencia de las tecnologías de la información y la comunicación están demandando al ciudadano del siglo XXI el desarrollo de unas competencias individuales y colectivas que le permitan desenvolverse en los diferentes contextos académicos y profesionales haciendo un uso creativo de la información y el conocimiento al que se tiene acceso con la presencia del computador, la internet y las telecomunicaciones.

De otro lado, el mundo globalizado de hoy requiere profesionales que puedan trabajar con otros de manera colaborativa, no sólo desde la experiencia presencial, sino igualmente desde las nuevas plataformas tecnológicas virtuales que le permiten conectarse, interactuar con diferentes colectivos y personas para generar nueva información, nuevo conocimiento, nuevas relaciones para fortalecer su desempeño en su vida profesional y que impacte el entorno social.⁶

⁶ ESTEFANY289. *La importancia de las TIC en el mundo actual*. <https://estefany289.wordpress.com/la-importancia-de-las-tics-en-el-mundo-actual/>. Consulta: agosto 2019.

1.4.3. Enlace de visualizaciones de los videos

Conforme a lo descrito, se inicia con el capítulo 2, donde están definido los temas Introducción y análisis de transformador, del curso de Conversión de Energía Electromecánica 2, por lo que se han creado dieciocho videos como una herramienta de estudio que resumen en forma didáctica los temas mencionados, por lo que para una mayor comprensión de estos temas, el estudiante puede ir coordinando ambas herramientas, textual y audiovisual, para acceder a cada uno de los videos se comparte el siguiente enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/1ilPPb71DH6wHWnApzAKmmZqQdFohvDC7>.

2. CONCEPTO A DIGITALIZAR

2.1. Introducción a los transformadores

Los transformadores son elementos esenciales en el desarrollo de las industrias y funciones especiales para los que son diseñados, beneficiado de ellos se puede realizar, de manera económica y práctica, el transporte de la energía eléctrica, en diversas aplicaciones.

2.1.1. Definición

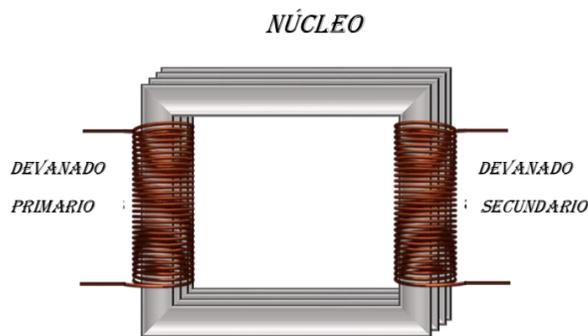
Un transformador es una máquina eléctrica estática que por medio de la acción del flujo magnético permite una variación de un nivel de voltaje a otro, esta máquina tendrá un lado primario y un lado secundario, manteniendo constante su potencia nominal.

2.1.1.1. Composición del transformador

Los transformadores cuentan de forma principal con dos devanados comúnmente de alambre de cobre esmaltado enrolladas, pero no conectadas de forma física entre sí, entorno de un núcleo de material ferromagnético. Es un flujo magnético generado a través del núcleo, la única conexión entre los devanados. Uno de los devanados, denominado primario o, de entrada, se conecta a una fuente alterna de energía eléctrica, y otro devanado se conectada a una o varias

cargas suministrándoles a su vez energía eléctrica, denominado devanado secundario o devanado de salida. Como se muestra en la figura 1.⁷

Figura 1. **Composición del transformador**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

2.1.2. Tipos y construcción de transformadores

El transformador está diseñado con un conjunto de elementos involucrados para su funcionamiento, a continuación, se describen los considerados principales.

2.1.2.1. Diseño de transformadores

Los transformadores constan de las siguientes partes principales para su diseño: núcleo, devanados, sistema de refrigeración y de aisladores pasantes de salida:

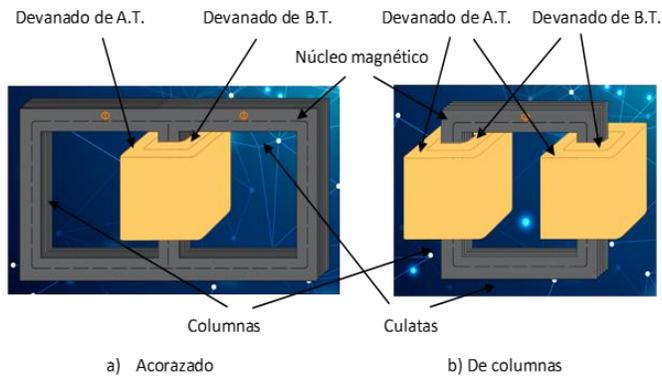
Núcleo: es la parte que forma el circuito magnético del transformador, constituido por chapas de acero al silicio, moderadamente laminadas en frío, que han sido sometidas a un tratamiento especial llamado Carlite, que recubre de una capa aislante muy delgada, de aproximadamente 0,01mm, lo que reduce las pérdidas en el hierro.⁸

⁷ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.161.

⁸ *Ibíd.* p.162.

El circuito magnético está compuesto por las columnas, que son las partes donde montan los devanados, y las culatas, que son las partes que unen las columnas. Según sea la posición relativa entre el núcleo y los devanados, los transformadores se clasifican en acorazados, como el de la figura 2a, los que tiene sus bobinadas abrazadas o acorazadas por el núcleo magnético, y en Columnas, como el de la figura 2b, en las cuales son las bobinas que abrazan al núcleo magnético.⁹

Figura 2. **Circuito magnético del transformador monofásico**



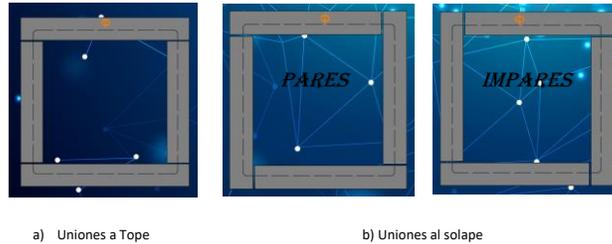
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Las uniones de las columnas con las culatas se denominan juntas, y deben tener un espesor lo más pequeño posible con el objeto de reducir al máximo la reluctancia del circuito magnético. La culata superior se debe poder abrir para poder colocar las bobinas y los aislantes. Las uniones o juntas pueden realizarse a tope o bien al solape. En la construcción a tope, figura 3a las columnas y las culatas se montan separadamente y luego se unen con piezas de sujeción. En la construcción al solape todo el núcleo magnético se construye de una vez, de tal forma que, como se muestra en la figura 3b, se van ensamblando las chapas con un desfase de posición entre capas sucesivas igual a la anchura de las chapas de la culata; este montaje, aunque es más complicado que el anterior, permite un aumento de la estabilidad mecánica del conjunto. En ambos casos, para evitar el calentamiento local debido al aumento de pérdidas en el hierro, ya que el flujo no sigue la dirección del laminado en algunas zonas, se realizan las uniones a 45°.¹⁰

⁹ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.162.

¹⁰ *Ibíd.* p.164.

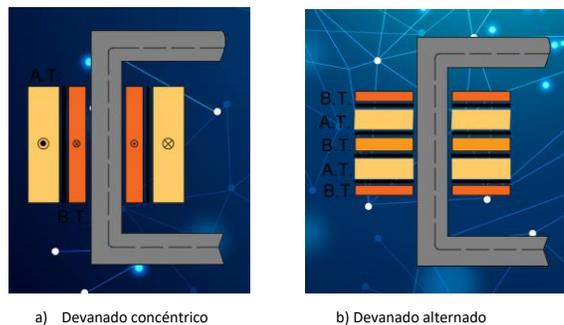
Figura 3. **Uniones de chapas de transformadores**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Devanados: constituyen el circuito eléctrico del transformador; se realizan por medio de conductores de cobre, en forma de hilos redondos o de sección rectangular cuando se requieren secciones mayores. Los conductores están recubiertos por una capa aislante, que suele ser de barniz en los pequeños transformadores y que en el caso de pletinas está formada por una o varias capas de fibra de algodón o cinta de papel. Los devanados pueden ser concéntricos o alternados, según la disposición relativa entre arrollamientos de A.T. y B.T., los devanados pueden ser concéntricos o alternados. En los devanados concéntricos los bobinados tienen forma de cilindros coaxiales, figura 4a, generalmente se coloca más cerca de la columna el arrollamiento de B.T., ya que es más fácil aislar que el devanado de A.T., entre ambos bobinados se intercala un cilindro de cartón o papel baquelizado. En los devanados alternados, figura 4b, los arrollamientos se dividen en secciones, de tal forma que las partes de los devanados de A.T. y B.T. se encuentra alternados a lo largo de la columna.¹¹

Figura 4. **Devanados concéntricos y alternados**

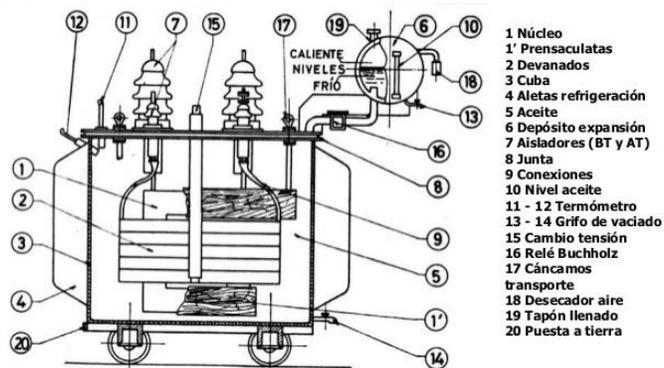


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

¹¹ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.165.

Sistemas de refrigeración: en un transformador, como en cualquier otro tipo de máquina eléctrica, existen una serie de pérdidas que se transforman en calor y que constituyen al calentamiento de la máquina. Para evitar que se consigan altas temperaturas que puedan afectar la vida de los aislamientos de los devanados es preciso dotar al transformador de un sistema de refrigeración adecuado. Para potencias pequeñas, la superficie externa de la máquina es suficiente para lograr la evacuación de calor necesaria, lo que da lugar a los llamados transformadores en seco. Para potencias elevadas se emplea como medio refrigerante el aceite, resultando los transformadores en baño de aceite. El aceite tiene doble misión refrigerante y aislante, ya que posee una capacidad térmica y una rigidez dieléctrica superior a la del aire. En estos transformadores, la parte activa se introduce en una cuba de aceite mineral, cuyo aspecto externo puede tener forma plana, ondulada, con tubos o con radiadores adosados, realizándose la eliminación del calor por radiación y convección natural. El aceite mineral empleado procede de un subproducto de la destilación fraccionada del petróleo y con el tiempo puede experimentar un proceso de envejecimiento, lo que induce que se oxida y polimeriza formando lodos, proceso que es activado por la temperatura, la humedad y el contacto con el oxígeno del aire; con ello, el aceite presenta una disminución de sus propiedades refrigerantes y aislantes. Para atenuar este efecto suelen añadirse al aceite productos químicos inhibidores, y también se dota a la cuba de un depósito de expansión o conservador colocado en la parte alta del transformador, en la figura 5 se puede observar esta parte junto a otros aspectos constructivos.¹²

Figura 5. Aspectos constructivos de un transformador



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. p.167.

La misión de este depósito es doble; por una parte se logra que la cuba principal esté llena de aceite, de tal forma que solo existe una superficie de contacto con el aire en el conservador, por otra parte, este depósito es el que absorbe las dilataciones del aceite al calentarse. Cuando el transformador se enfría, el aire penetra por él, y como el aire arrastra humedad, que es absorbida por el aceite, para evitarlo se coloca a la entrada un desecador de cloruro cálcico o un gel de sílice.¹²

¹² FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. p.166.

El tipo de refrigeración de un transformador se designa según las normas CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) por cuatro letras. Las dos primeras se refieren al tipo de refrigeración en contacto con los arrollamientos y a la naturaleza de su circulación y las otras dos letras se refieren al refrigerante en contacto con el sistema de refrigeración exterior y a su modo de circulación. Los símbolos empleados son los indicados en la tabla I.¹³

Aislantes pasantes y otros elementos: los bornes de los transformadores de media tensión se llevan al exterior de la cuba mediante unos aisladores pasantes de porcelana, rellenos de aire o aceite. Cuando se utilizan altas tensiones aparece un fuerte campo eléctrico entre el conductor terminal y el borde del orificio en la tapa superior de la cuba, y para evitar la perforación del aislador, este se realiza con una serie de cilindros que rodean la borna metálica dentro del espacio cerrado que contiene el aceite. Los pasantes de A.T. y B.T. por su altura sienten tanto más altos cuanto más alta es la tensión como se puede observar en la figura 5. Otro elemento que llevan los transformadores de gran potencia es el llamado rele de gas o rele Buchholz, figura 6, que protege la máquina de sobrecargas peligrosas, fallas de aislamiento, entre algunos.¹³

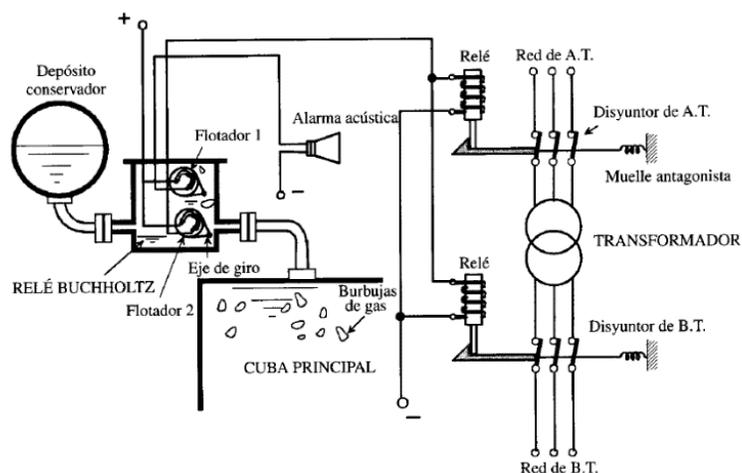
Tabla I. **Símbolos de la naturaleza del refrigerante y modo de circulación**

<i>Nombre del Refrigerante</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Naturaleza de la Circulación</i>	<i>Símbolo</i>
Aceite mineral	O	Natural	N
Pyraleno	L	Forzado	F
Gas	G		
Agua	W		
Aire	A		
Aislante sólido	S		

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

¹³ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.168.

Figura 6. **Rele buchholz en el transformador**



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas Eléctricas*. p.169.

Este rele se coloca en el tubo que une la cuba principal con el depósito de expansión y funciona por el movimiento del vapor de aceite producido por un calentamiento anómalo del transformador que hace bascular un sistema de dos flotadores: el primero (el No. 1 de la figura 6) es sensible a las sobrecargas ligeras, al descender de la posición mostrada en la figura provoca la activación de una alarma acústica; el segundo (el No. 2 de la figura 6) es sensible a las sobrecargas elevadas, que dan lugar a una formación tumultuosa de gas en la cuba principal, que al empujar al flotador provoca el cierre del circuito de unos relés que controlan el disparo de unos disyuntores de entrada y salida del transformador.¹⁴

Los principales símbolos empleados para representar los transformadores se muestran en la figura 7, el símbolo a, suele ser el más utilizado y en este caso representa un transformador trifásico de 100 KVA, conexión triángulo-estrella, 15 000 v/ 380-220 v (el doble valor secundario indica que la estrella tiene neutro). Cuando el transformador es monofásico las líneas de entrada y salida van cruzadas por dos barras en vez de tres barras, como lo indica la figura 7a.¹⁵

¹⁴ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*, p.169.

¹⁵ *Ibíd.* p.170.

Figura 7. **Símbolos empleados para designar un transformador**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Placa de características del transformador: La placa de características de un transformador es una cartulina metálica serigrafiada que incluye los datos de potencia asignada, tensiones asignadas, frecuencia e impedancias equivalentes en tanto por ciento, o caída de tensión relativa de cortocircuito. Si el transformador tiene tomas variados, se incluyen asimismo las tensiones de las diferentes derivaciones. También se indica el esquema de conexiones internas, la especificación del tipo de transformador, clase de refrigeración, nombre del fabricante, serie, código y en algunos casos referencias sobre las instrucciones de funcionamiento.

Las tensiones asignadas o nominales son aquellas para las cuales se ha proyectado el transformador y serán los valores base empleados en los ensayos y en la utilización del transformador. La potencia asignada siempre se refiere a la potencia aparente y se aplica tanto al devanado primario como al secundario. Para transformador monofásico sería igual a:¹⁶

$$S = V1n * I1n = V2n * I2n \quad (1)$$

Donde el subíndice n indica asignada o nominal y los subíndices 1 y 2 se aplican a magnitudes de primario y secundario, respectivamente. Para transformadores trifásico se escribiría en función de los valores de línea:

$$Sn = \sqrt{3}V1n * I1n = \sqrt{3}V2n * I2n \quad (2)$$

La potencia asignada junto con las tensiones asignadas fijan la capacidad de corriente de los devanados del transformador. De la magnitud de la corriente dependen las pérdidas en el cobre, las cuales a su vez inciden en el calentamiento de los arrollamientos; el que ello suceda es crítico, ya que un sobrecalentamiento

¹⁶ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.171.

acorta drásticamente la vida de los aislantes. Los transformadores pueden llegar a tener más una potencia asignada, según se utilice o no la refrigeración forzada o dependiendo de la altitud de la zona en la que vaya a trabajar la máquina.¹⁷

Los términos asignada y plena carga son sinónimos. Conocidas las tensiones de primario y secundario, y la potencia aparente asignada, las ecuaciones 1 y 2 permiten calcular las corrientes asignadas o de plena carga del transformador para cada uno de los devanados.¹⁷

2.1.2.2. Según su número de fases

Según su número de fases los transformadores pueden ser principalmente de dos tipos: monofásicos y trifásicos.

2.1.2.2.1. Monofásicos

Son los transformadores de potencia o distribución que solo están conectados a una fase o línea y a un neutro o tierra. Cuentan con un solo devanado de baja tensión y uno de alta tensión. Son representados por el símbolo 1Φ .

2.1.2.2.2. Trifásicos

Son los transformadores de potencia o de distribución se conectan a tres fases o líneas y tiene la disposición de estar conectados o no a un neutro o tierra común. Cuentan con tres devanados de baja tensión y tres de alta tensión. Son representados por el símbolo 3Φ .

¹⁷ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.172.

2.1.2.3. Según la operación

Según la operación los transformadores pueden ser de dos tipos: de potencia y de distribución.

2.1.2.3.1. Potencia

Los transformadores con capacidad superior a 500KVA y con voltaje hasta los 400 KV.

2.1.2.3.2. Distribución

Los transformadores con capacidad que van desde los 3 KVA hasta los 500 KVA y con voltajes hasta 34,5 KV.

2.1.2.4. Según su construcción

Según su construcción, es decir, la forma de su núcleo, devanados y su disposición entre sí, los transformadores pueden ser de los siguientes tipos:

Autotransformador. Cuentan con un solo circuito de forma física, el cual esta diseñado para funcionar tanto como el devanado primario como el devanado secundario, normalmente de alambre de cobre o aluminio.

Empleados con el fin de enlazar distintos niveles de voltaje, en sistema de potencia, normalmente con relación de dos a uno. En la industria, se utilizan para conectar las maquinas que funcionan a un nivel de tensión que difiere del que se tiene como fuente de energía. En el hogar, son empleados algunas veces para los aparatos electrodomésticos que difieren de la fuente de energía que se tiene.

La principal desventaja de este tipo de transformador es que al ser un solo circuito, no posee un aislamiento galvánico, es decir, no tiene protección entre el circuito primario y secundario.

Transformador con núcleo toroidal. Este diseño de transformador tiene la forma de una dona, sobre la cual se enrollan los devanados tanto primario como secundario, fabricados de compuestos artificiales de ferrita. Tienen la ventaja que al ser su diseño circular los flujos de dispersión son menores y por lo tanto tiene menores pérdidas por corrientes de Foucault, su desventaja es que tienden a ser voluminosos.

Transformador de grano orientado. En este transformador cada chapa se enrolla una sobre la otra, en el mismo sentido, de tal forma que se tienen varias capas de chapas concéntricas sobre el devanado, este núcleo de chapas es de hierro de grano orientado. Presenta menores pérdidas, pero su valor de construcción es mayor. Las chapas de hierro de grano orientado son también empleadas en transformadores orientados (chapa en E), disminuyendo sus pérdidas.

Transformador de núcleo de aire. Este tipo de diseño se realiza a partir de enrollar dos hilos de alambre sobre un núcleo imaginario, y de igual manera juntar estos dos devanados resultantes, formando un transformador. Empleado en aplicaciones de frecuencia alta con una inductancia que se introduce levemente en los devanados con el fin de ajustar la inductancia.

Transformador piezoeléctrico. Son diseñados con constitución plana, para su funcionamiento no se basa en el flujo magnético para transportar la energía, sino que se emplean vibraciones mecánicas en un cristal piezoeléctrico. y debido a que funcionan a frecuencias elevadas, se utilizan en ciertos convertidores de

voltaje como fuentes para las lámparas fluorescentes de los monitores de led y transistores de películas finas empleados en computación y en televisión.

2.1.3. Tipo según la utilización de los transformadores

Los transformadores son destinados para las diferentes aplicaciones, dependiendo de esta son diseñados y seleccionados para desempeñar su función.

2.1.3.1. Según su utilización dentro del sistema eléctrico

En esta parte se describe la utilidad de los transformadores de forma concisa dentro de las partes del sistema eléctrico de potencia.

2.1.3.1.1. En generación

Son los transformadores de potencia que van conectados a la salida del generador elevando el voltaje producido por este para enviar la energía a través de las líneas de transmisión.

2.1.3.1.2. En distribución

Estos transformadores van conectados a las líneas de transmisión y subtransmisión y reducen el voltaje a valores utilizables en zonas de consumo comercial y doméstico. Ubicados principalmente en los postes.

2.1.3.1.3. En subestación

Son transformadores de potencia que van conectados a diferentes puntos de las líneas de transmisión para reducir el voltaje a niveles necesarios para la red eléctrica.

2.1.3.2. Transformadores especiales

Existen transformadores diseñados para aplicaciones especiales, en esta parte se describe la función de algunos casos.

2.1.3.2.1. De aislamiento

Tiene la utilidad de proporciona aislamiento galvánico entre el primario y el secundario, de manera que consigue una alimentación o señal "flotante". Suele tener una relación 1:1 entre las tensiones del primario y secundario. En el que al estar los dos circuitos separados permite proteger contra contactos indirectos. Se utiliza principalmente como medida de protección, en equipos que trabajan directamente con la tensión de la red y también para acoplar señales procedentes de sensores lejanos, en equipos de electromedicina y donde se necesitan tensiones flotantes. También empleados para la protección de personas, y mantener una alta disponibilidad de suministro eléctrico. y como fuente de energía constante para equipos sensibles, como; equipos de quirófanos, computadoras, equipos de laboratorio, entre muchos otros.¹⁸

2.1.3.2.2. De alimentación

Son usados contra choques eléctricos y como filtros para fuentes de energía constante y sensibles. Pueden tener una o varias bobinas secundarias y proporcionan las tensiones necesarias para el funcionamiento del equipo. A veces incorporan fusibles, que cortan su circuito primario cuando el transformador alcanza una temperatura excesiva evitando que éste se queme con la emisión de humos y gases que conlleva el riesgo de incendio. Estos fusibles no suelen ser reemplazables de modo que hay que sustituir todo el transformador.¹⁹

¹⁸ ROCHADAVID. *Símbolos eléctricos*. <http://rochadavid.blogspot.com/2013/04/>. Consulta: noviembre 2019.

¹⁹ INGMECAFENIX. *Tipos de transformadores eléctricos*. <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/tipos-de-transformadores/>. Consulta: noviembre 2019.

2.1.3.2.3. De medida

En las instalaciones eléctricas existe la necesidad de conectar aparatos de medida. También es preciso disponer relés con finalidades diversas (protección, aviso, enclavamiento, entre otros.). Unos y otros suelen ser de constitución delicada, reducidas dimensiones y buena precisión. Frecuentemente las magnitudes que hay que medir son elevadas tensiones, corrientes fuertes, o concurren ambas circunstancias. Se suele requerir que los aparatos de medida o de vigilancia vayan dispuestos en cuadros o pupitres centralizados. Surge la dificultad de conducir tensiones y corrientes elevadas hasta aquellos cuadros.

Se resuelve a base de conducir magnitudes proporcionales a las originales, pero con valores más manejables. Los aparatos más importantes son los transformadores de medida inductivos:²⁰

- Transformadores de corriente;
- Transformadores de tensión.

Con sus primarios conectados en alta o en baja tensión, según corresponda, transforman las magnitudes que se desea medir, en corrientes y tensiones moderadas en el secundario (que por motivos de seguridad puede conectarse a tierra). De esta forma, cabe construir aparatos de medida o de protección (relés) normalizados (por ejemplo: a base de bobinas amperimétricas para corrientes nominales 5 A, Y bobinas voltimétricas para tensiones nominales 110 v). Tales corrientes y tensiones se conducen económicamente a cuadros, entre otros.²¹

Resumiendo, los objetivos principales de los transformadores de medida son:

Aislar o separa los circuitos y aparatos de medida, protección, etc., de la alta tensión.

Evitar perturbaciones electromagnéticas de las corrientes fuertes, y reducir corrientes de cortocircuito a valores admisibles en delicados aparatos de medida.

Obtener intensidades de corriente, o tensiones, proporcionales (por lo menos en determinada zona) a las que se desea medir o vigilar, y transmitir las a los aparatos apropiados.²¹

Transformadores de medida de corriente: En estos transformadores, la intensidad primaria y la secundaria guardan una proporción, siendo ésta igual a la relación de transformación característica del propio transformador. Se utilizan cuando es necesario conocer la intensidad de línea. En este caso se intercala entre una de las fases el bobinado primario de tal manera que esté conectado en serie a la fase y al secundario se conecta el aparato de medida de la misma manera que en los transformadores de tensión.

²⁰ RAS OLVIDA, Enrique. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. p.174.

²¹ *Ibíd.* p.175.

Como se aprecia en la figura 8a, el secundario está conectado a la bobina amperimétrica de un Amperímetro o de cualquier bobina que tenga el instrumento, en el primario está conectado en serie con la línea de fuerza.

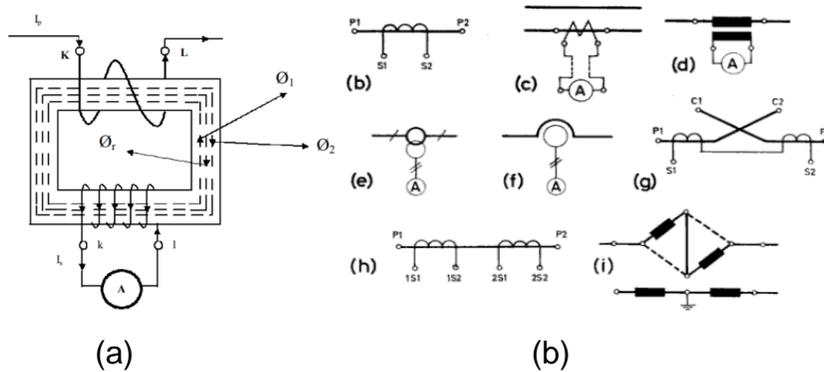
Esta bobina amperimétrica al tener una baja impedancia produce el efecto de un cortocircuito en el arrollamiento secundario del transformador de intensidad. Los flujos magnéticos de ambos arrollamientos (primario y secundario) son casi iguales y tienen sentidos opuestos, de modo que durante el funcionamiento existe solamente un flujo resultante $\Phi_r = \Phi_1 - \Phi_2$ muy pequeño. Este flujo muy pequeño produce una inducción magnética pequeña pero suficiente como para tener una fuerza electromotriz E_2 , que mantiene la intensidad que se mide.

La intensidad nominal secundaria está normalizada en 5 amperios, para todos los transformadores. En algunos casos cuando la distancia entre el transformador y el instrumento de medición es muy grande, se utilizan transformadores de intensidad nominal secundaria de 1 amperio, para evitar tener mucha caída de tensión y tener valores medidos con mucho error.

En los incisos (b), (c), (d), (e) y (f) de la figura 8, se dan representación esquemáticas de los transformadores de corriente. Siendo la (b) la recomendada por la UNE y la CEI. En las (g) y (i) se dan representación transformadores de doble relación. En (h) un transformador con dos secundarios. Notese que, a diferencia de un transformador de potencia, por el primario del transformador de corriente circula una intensidad, independientemente de la carga que tenga conectada el secundario.²²

²² RAS OLVIDA, Enrique. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. p.177.

Figura 8. Esquemas del transformador de medida de corriente



Fuente: RAS OLIVA, Enrique. *Transformadores de potencia, media y protección*. p.176.

Transformadores de medida de Tensión. En la figura 9a, se muestra el esquema del transformador de medida de tensión y su conexión del primario a la red y en el secundario del transformador se conecta todos los instrumentos que tengan bobina voltimétrica quiere decir todos los que se conectan en paralelo, y se caracterizan porque tienen una alta impedancia. Las intensidades de corriente primaria originadas por la alimentación de los instrumentos de alta impedancia en el secundario son muy pequeñas, de modo que en el primario producen un efecto no mayor que el de una corriente de excitación del transformador (I_0). En consecuencia, el transformador de medida de tensión trabaja en las condiciones de un transformador de potencia en vacío.

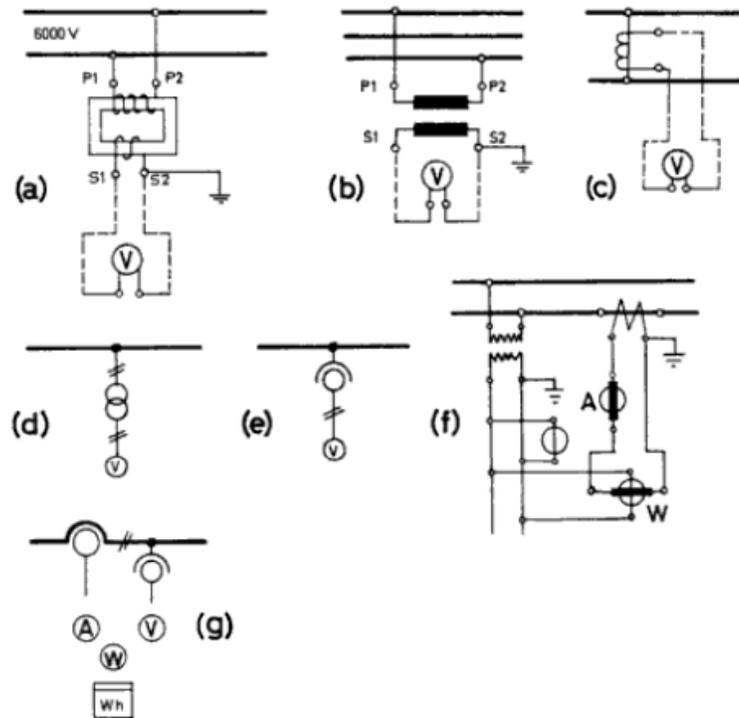
Los transformadores de tensión deben estar protegidos con fusibles, tanto en el lado primario como el lado secundario. Los fusibles del primario protegen la red contra el cortocircuito del transformador y los fusibles en el secundario protegen el transformador contra los cortocircuitos de los instrumentos. El arrollamiento secundario debe estar conectado a tierra como también su caja y su núcleo.

Cada transformador de medida de tensión está construido para una determinada tensión primaria V_1 mientras la tensión secundaria V_2 es normalizada en 100 Voltios.

En la figura 9, se aprecia la constitución y forma de trabajo de un transformador de tensión, análogas a las de un trabajador de potencia. En (d), (e) y (g) se dan representaciones unifilares usuales. En (b) y (c) otras representaciones, también usadas, la primera se refiere a la medición de una tensión compuesta. En (f) se ven un transformador de corriente (alimentando las bobinas amperimétricas de un amperímetro y un vatímetro), y un transformador de tensión (alimentando las

voltimétricas y de un vatímetro). Finalmente, en (g) se da un esquema unifilar simplificado, análogo al (f), pero, alimentando, además, a un contador (Wh).²³

Figura 9. **Esquemas del transformador de medida de tensión**



Fuente: RAS OLIVA, Enrique. *Transformadores de potencia, media y protección*. p.180.

2.1.3.3. Transformadores de instrumento

Los transformadores de instrumento son elementos electromagnéticos con la principal función de reducir a escala, magnitudes de voltaje y corriente que se emplean para la medición y protección de los circuitos de una subestación o sistema eléctrico en general.

²³ RAS OLVIDA, Enrique. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. p.179.

Con el objeto de disminuir el costo y los peligros de las altas tensiones dentro de los tableros de control y protección, se dispone de los aparatos llamados transformadores de corriente y potencial que representan, escalas muy reducidas, las grandes magnitudes de corriente o de tensión respectivamente. Normalmente estos transformadores se construyen con sus secundarios, para corrientes de 5 amperes o tensiones de 120 volts.²⁴

A continuación, se estudian, por separado, las características principales de cada uno de los tipos de transformadores arriba mencionados. Ambos pueden utilizarse para protección, para medición, o bien, para los dos casos simultáneamente siempre y cuando las potencias y clases de precisión sean adecuadas a la función que desarrollen.²⁵

Transformador de Instrumento para corriente. Los transformadores de corriente pueden ser de medición, protección o mixtos.

Transformador de medición. Cuya función es medir, requieren reproducir fielmente la magnitud y el ángulo de fase de la corriente. Su precisión debe garantizarse desde una pequeña fracción de corriente nominal del orden del 10 %, hasta un exceso de corriente del orden del 20%, sobre el valor nominal.

Transformador de protección. Los transformadores cuya función es proteger un circuito, requieren conservar su fidelidad hasta un valor veinte veces la magnitud de la corriente nominal.

Transformadores mixtos. En este caso, los transformadores se diseñan para una combinación de los dos casos anteriores, un circuito con el núcleo de alta precisión para los circuitos de medición y uno o dos circuitos más, con sus núcleos adecuados, para los circuitos de protección.²⁶

2.1.3.3.1. Parámetros de los transformadores de Corrientes

Corriente. Las corrientes primaria y secundaria de un transformador de corriente deben estar normalizadas de acuerdo con cualquiera de las normas nacionales o internacionales en uso.

Corriente primaria. Para esta magnitud se selecciona el valor normalizado inmediato superior de la corriente calculada para la instalación. Para subestaciones de potencia, los valores normalizados son: 300, 400, 600, 800, 1 200, 1 500, 2 000, 4 000 amperes.²⁶

²⁴ MARTIN, José Raúl. *Diseño de subestaciones eléctricas*. p.49.

²⁵ *Ibíd.* p.50.

²⁶ *Ibíd.* p.51.

Corriente secundaria. Es el valor de la impedancia en ohms, reflejada en el secundario de los transformadores de corriente, y que está constituida por la suma de las impedancias del conjunto de todos los medidores, relevadores, cables y conexiones conectados en serie con el secundario y que corresponden a la llamada potencia de precisión a la corriente nominal secundaria. Es decir, una potencia de precisión de 100 VA para una corriente nominal secundaria de 5 amperes, representa una impedancia de carga de:

$$\frac{100}{5^2} = 4 \text{ ohms}$$

La carga se puede expresar también, por los volt-amperes totales y su factor de potencia, obtenidos a un valor específico de corriente y frecuencia.

Límite térmico. Un transformador debe poder soportar en forma permanente, hasta un 20 % sobre el valor nominal de corriente, sin exceder el nivel de temperatura especificado. Para este límite las normas permiten una densidad de corriente de 2 A/mm², en forma continua.²⁷

Límite de cortocircuito. Es la corriente de cortocircuito máxima que soporta un transformador durante un tiempo que varía entre 1 y 5 segundos. Esta corriente puede llegar a significar una fuerza del orden de varias toneladas. Para este límite las normas permiten una densidad de corriente del 143 A/mm² durante un segundo de duración del cortocircuito.

Tensión secundaria nominal. Es la tensión que se levanta en las terminales secundarias del transformador al alimentar este una carga de veinte veces la corriente secundaria nominal. Por ejemplo, si se tiene un transformador con carga nominal de una carga de 1 ohms, tensión secundaria generada será de:

$$1 \text{ ohm} \times 5 \text{ amperes} \times 20 \text{ veces} = 100 \text{ volts}$$

Que se designa como un transformador de corriente de clases C-100.

Corriente de límite térmico. Es el mayor valor eficaz de la corriente primaria que el transformador puede soportar por efecto joule, durante un segundo, sin sufrir deterioro y con el circuito en cortocircuito. Se expresa en kilo amperes eficaces o en n veces la corriente nominal primaria.

Potencial nominal. Es la potencia aparente secundaria que a veces se expresa en volt-ampres (VA) y a veces en ohms. Bajo una corriente nominal determinada y que se indica en la placa de características del aparato. Para escoger la potencia nominal de un transformador, se suman las potencias de las bobinas de todos los aparatos conectados en serie con el devanado secundario, más las pérdidas por efecto joule que se producen en los cables de alimentación, y se selecciona el valor nominal inmediato superior a la cifra obtenida, como se muestra en la Tabla II.²⁸

²⁷ MARTÍN, José Raúl. *Diseño de subestaciones eléctricas*. p.52.

²⁸ *Ibíd.* p.53.

Tabla II. **Cargas aceptadas en transformadores de corriente**

Cargas normales para transformadores de corriente según Normas ANSI C.57.13					
Designación de la carga	Características		Caract. Para 60 Hz. Y corriente, secundaria de 5A		
	Resistencia (ohm)	Inductancia en milihenrys	Impedancia (ohm)	VA	Factor de Potencia
B0,1	0,09	0,116	0,1	2,5	0,9
B0,2	0,18	0,232	0,2	5,0	0,9
B0,5	0,45	0,58	0,5	12,5	0,9
B1,0	0,5	2,3	1,0	25	0,5
B2,0	1,0	4,6	2,0	50	0,5
B4	2,0	9,2	4,0	100	0,5
B5	4,0	18,4	8,0	200	0,5

Fuente: MARTIN, José Raúl. *Diseño de subestación eléctricas*. p.53.

Clase de precisión para medición. La clase de precisión se designa por el error máximo admisible, en por ciento, que el transformador puede introducir en la medición, operando con su corriente nominal primaria y la frecuencia nominal. Las normas ANSI definen la clase de precisión de acuerdo con los siguientes valores: 0,1 – 0,2 – 0,3 – 0,5 – 0,6 – 1,2 – 3 y 5, cada clase de precisión especificada debe asociarse con una o varias cargas nominales de precisión.²⁹

Según el uso que se le dé al transformador, se recomienda las siguientes precisiones, considerando que a precisiones más bajas corresponden precios del transformador más altos, para una misma tensión y relación de transformador (tabla III).²⁹

²⁹ MARTIN, José Raúl. *Diseño de subestaciones eléctricas*. p.53.

Tabla III. **Precisiones personalizadas en transformadores de corriente**

Clase	Utilización
0,1	Aparatos para medición y calibración de laboratorio
0,2 a 0,3	Mediciones de laboratorio y alimentaciones para los wathorímetros de alimentadores de potencias
0,5 a 0,6	Alimentación para wathorímetros de facturación en circuitos de distribución industriales
1,2	Alimentación a las bobinas de corriente de los aparatos de medición en general, indicadores o registradores y a los relevadores de las protecciones diferencial, de impedancia y de distancia.
3 a 5	Alimentación a las bobinas de los relevadores de sobrecorriente.

Fuente: MARTIN, José Raúl. *Diseño de subestación eléctricas*. p. 54

Los transformadores para medición están diseñados para que el núcleo se sature para valores relativamente bajos de sobrecorriente, protegiendo de esta forma los instrumentos conectados al secundario del transformador.

Clase de Precisión para protección. Los transformadores con núcleos para protección se diseñan para que la corriente secundaria sea proporcional a la primaria, para corrientes con valores de hasta 20 veces el valor de la corriente nominal.

Las normas ANSI hace la siguiente clasificación de la precisión para protección:

Clase C. Esta clase cubre a los transformadores que, por tener los devanados uniformemente distribuidos, su flujo de dispersión en el núcleo no tiene efecto apreciable en el error de relación, dentro de los límites de carga y frecuencia especificados.

Clase T. Esta clase cubre a los transformadores que, por no tener los devanados uniformemente distribuidos, el flujo de dispersión en el núcleo afecto el error de relación, dentro de los límites de carga y frecuencia especificados. Su relación debe ser determinada mediante prueba de laboratorio.³⁰

³⁰ MARTIN, José Raúl. *Diseño de subestaciones eléctricas*. p.54.

Transformadores de Potencial. Son aparatos en que la tensión secundaria, dentro de las condiciones normales de operación, es prácticamente proporcional a la tensión primaria, aunque ligeramente desfasada. Desarrollan dos funciones: Transformar la tensión y aislar los instrumentos de protección y medición conectados a los circuitos de alta tensión.³¹

2.1.3.3.2. Parámetros de los transformadores de potencial

Tensiones. Las tensiones primaria y secundaria de un transformador de potencial deben estar normalizadas de acuerdo con cualquiera de las normas nacionales o internacionales en uso.

Tensión primaria. Se deben seleccionar el valor normalizado inmediato superior al valor calculado de la tensión nominal de la instalación.

Tensión secundaria. Los valores normalizados, según ANSI son de 120 volts para aparatos de hasta 25 Kv y de 115 volts para aquellos con valores superiores a 34,5 Kv. A diferencia de los aparatos de corriente, los de potencial se construyen normalmente, con un solo embobinado secundario.

Potencia nominal. Es la potencia secundaria expresada en volt-amperes, que se desarrolla bajo la tensión nominal y que se indica en la placa de características del aparato.

Para escoger la potencia nominal de un transformador, se suman las potencias que consumen las bobinas de todos los aparatos conectados en paralelo con el devanado secundario, más las pérdidas por efecto de las caídas de tensión que se producen en los cables de alimentación: sobre todo cuando las distancias entre los transformadores y los instrumentos que alimentan son importantes: y se selecciona el valor nominal inmediato superior a la cifra obtenida, como se indica en la tabla IV.³¹

³¹ MARTIN, José Raúl. *Diseño de subestaciones eléctricas*. p.56.

Tabla IV. **Precisiones normalizadas en transformadores de potencial**

Cargas normales para transformadores de potencial según Normas ANSI C.57.13					
Características		Características con base en 120V y 60Hz			
Designación	VA	f.p.	Resistencia (ohm)	Inductancia (Henry)	Impedancia (ohm)
W	1215	0,10	115,2	3,042	1,152
X	25	0,70	403,2	1,1	576
Y	75	0,85	163,2	0,268	192
Z	200	0,85	61,2	0,101	72
ZZ	400,0	0,85	30,2	0,0554	36
M	35,0	0,20	82,6	1,07	411

. Fuente: MARTIN, José Raúl. *Diseño de Subestación Eléctricas*. p. 57.

Clase de precisión para medición. La clase de precisión se designa por el error máximo admisible en por ciento, que el transformador de potencial puede introducir en la medición de potencia operando con su tensión nominal primaria y la frecuencia nominal.

La precisión de un transformador se debe poder garantizar para valores entre 90 y 110 % de la tensión nominal. Las normas ANSI definen la clase de precisión de acuerdo con los siguientes valores: 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 0,6, 1,2, 3 y 5. Según el uso que se dé al transformador de potencial, se recomienda las siguientes precisiones:³²

³² MARTIN, José Raúl. *Diseño de subestaciones eléctricas*. p.57.

Tabla V. **Precisión para aparatos de medición**

Clase	Utilización
0,1	Aparatos para medición y calibración de laboratorio
0,2 a 0,3	Mediciones de laboratorio y alimentaciones para los wathorímetros de alimentadores de potencias
0,5 a 0,6	Alimentación para wathorímetros de facturación en circuitos de distribución e industriales
1,2	Alimentación a las bobinas de potencial de los aparatos de medición en general, indicadores o registradores.
3 a 5	Alimentación a las bobinas de los relevadores de tensión, frecuencímetros o sincronoscopios.

Fuente: MARTIN, José Raúl. *Diseño de subestación eléctricas*. p. 57.

En una subestación se acostumbra especificar los transformadores de potencial con la siguiente nomenclatura, de acuerdo con las normas ANSI: 0,3 W, o 0,3 X o 0,3Y, 0,6Y, 1,2Z.

Donde el primer factor 0,3 o 0,6 o 1,2 es el valor de la precisión y debe ir asociado con una o varias cargas nominales de precisión indicadas por las letras W, X, Y o Z que indican las potencias nominales en VA. Además, se acostumbra especificar los transformadores para que resistan durante un segundo los esfuerzos térmicos y mecánicos derivados de un cortocircuito en las terminales del secundario, a voltaje pleno sostenido en las terminales del primario.³³

2.1.4. Normas aplicadas a los transformadores

Los transformadores son controlados por normas que deben seguir para sus diseños según su aplicación, las principales normas que los rigen son las IEC e IEEE.

³³ MARTIN, José Raúl, *Diseño de subestaciones eléctricas*. p.58

2.1.4.1. IEC

La comisión IEC se ubica en Ginebra, suiza y da inicio a raíz del Congreso Eléctrico Internacional el cual tuvo lugar en St. Louis, Missouri, Estados Unidos, en 1906. Compuesta en la actualidad por 42 comités nacionales del mundo. Estas normas son empleadas para coordinar a ingenieros que elaboran normas y evaluaciones de verificación para las pruebas, operación y seguridad en este caso de los transformadores

Las redacciones de esta comisión en lo concerniente a normas de los transformadores de potencia se enuncian a continuación:

- IEC 60076-1 transformadores de potencia general.
- IEC 60076-2 aumento de temperatura de transformadores de potencia.
- IEC 60076-3 niveles de aislamiento de transformadores de potencia, pruebas dieléctricas, y holguras externas en el aire.
- IEC 60076-4 guía para el impulso del rayo y el impulso de conmutación Pruebas: transformadores de potencia y reactores.
- IEC 60076-5 transformadores de potencia Capacidad para soportar cortocircuitos.
- IEC 60076-10 transformadores de potencia - Parte 10: Determinación de los niveles de sonido.

- IEC 60076-11: 2018 transformadores de potencia, parte 11: transformadores de tipo seco.
- IEC 60085 evaluación térmica y clasificación de la electricidad aislamiento.
- IEC 60214 cambiadores de tomas: requisitos de rendimiento y prueba métodos.
- IEC 60551 determinación del nivel sonoro del transformador y del reactor.
- IEC 60044-1 transformador de instrumento, parte 1: transformadores de corriente.
- IEC 60044-2 transformador de instrumento, parte 1: transformadores de tensión inductivos.
- IEC 60044-3 transformador de instrumento, parte 1: combinación de Transformadores.
- IEC 60044-4 transformador de instrumento, parte 1: medición de descargar parciales.

2.1.4.2. IEEE

Creada en el año 1884 por Thomas Alva Edison, Alexander Graham Bell, Franklin Leonard Pope y otros ingenieros. Es una asociación internacional con el objetivo de tener en norma y avances las áreas técnicas. Se ubica en el Municipio de Piscataway, Nueva Jersey, Estados Unidos. Formada por profesionales de las nuevas tecnologías, como ingenieros, matemáticos, cibernéticos, entre otros.

A continuación, se enuncian algunas de las normas concernientes a los transformadores:

- C57.12.00-2015 - estándar IEEE para requisitos generales para transformadores de distribución, potencia y regulación sumergidos en líquidos.
- C57.124-1991 - Práctica recomendada por IEEE para la detección de descargas parciales y la medición de la carga aparente en transformadores de tipo seco.
- C57.127-2018 - guía IEEE para la detección, ubicación e interpretación de fuentes de emisiones acústicas de descargas eléctricas en transformadores de potencia y reactores de potencia.
- IEEE C57.113 - guía IEEE para la medición de descargas parciales en transformadores de potencia llenos de líquido y reactores de derivación.
- C57.152-2013 - guía IEEE para pruebas de diagnóstico de campo de transformadores de potencia, reguladores y reactores llenos de líquido.
- C57.13-2016 - requisitos estándar de IEEE para transformadores de instrumentos.

2.2. Análisis del funcionamiento del transformador

Mediante el análisis del transformador se puede realizar y mantener control de su funcionamiento para las aplicaciones que es destinado, este análisis se puede realizar tanto en las condiciones ideales y reales.

2.2.1. Transformador ideal

El transformador ideal es una maquina en la que se suponen condiciones perfectas y por lo tanto no considera perdidas en su constitución.

Consideremos el transformador monofásico de la figura 10 constituido por un núcleo magnético real de permeabilidad finita, que presenta unas pérdidas en el hierro P_{Fe} y unos arrollamientos primario y secundario con numero de espiras N_1 y N_2 , respectivamente. Supondremos que el transformador se alimenta por el devanado de tensión más elevada, es decir, se considera que la maquina va a trabajar como transformador reductor.

Los convenios de signos adoptado para las corrientes y tensión en la figura 10 corresponden al sentido normal de la transferencia de la energía, es decir: 1) el primario constituye un receptor respecto a la fuente de alimentación, lo que significa que este devanado absorbe una corriente y una potencia y desarrolla una f.c.e.m. (fuerza contraelectromotriz): 2) el secundario se comporta como un generador respecto a la carga conectada en sus bornes, suministrando una corriente y una potencia, siendo a su vez el asiento de una f.e.m. inducida.³⁴

Figura 10. Transformador monofásico con núcleo real



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

³⁴ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.172.

Para comprender mejor el funcionamiento del transformador, sin que las imperfecciones reales que tiene la máquina enmascaren los fenómenos físicos que tienen lugar, vamos a suponer que en un principio se cumplen las condiciones ideales siguientes:

Los devanados primario y secundario tienen resistencia óhmica despreciable, lo que significa que no hay pérdidas por efecto Joule y no existen caídas de tensiones resistivas en el transformador. En el sistema real estas resistencias son de pequeño valor, pero no nulas.

No existen flujos de dispersión, lo que significa que todo el flujo magnético está confinado al núcleo y enlaza ambos devanados primario y secundario. En el transformador real existen pequeñas partes del flujo que solamente atraviesan a cada uno de los arrollamientos y que son los flujos de dispersión que completan su circuito a través del aire.

Al aplicar una tensión V_1 al primario, circulará por él una corriente alterna, que producirá a su vez un flujo alterno en el núcleo cuyo sentido vendrá determinado por la ley de Ampere aplicada a este arrollamiento. En la figura 10 se muestran los sentidos positivos de la corriente y el flujo para el instante definido por la polaridad de la tensión aplicada. Debido a la variación periódica de este flujo se crearán f.e.m.s inducidas en los arrollamientos, que de acuerdo con la ley de Faraday responderán a las ecuaciones:

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} ; e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

Estas f.e.m.s. tienen las polaridades señaladas en la figura 10 para que estén de acuerdo con la ley de Lenz, de oposición al cambio de flujo. Realmente e_1 , y límite de hecho la corriente del primario. La polaridad asignada a e_2 en la figura 10 tiene en cuenta que al cerrar el interruptor S del secundario se tendría a producir una corriente i_2 en el sentido mostrado en la figura, de tal forma que al circular por el devanado secundario daría lugar (aplicar la ley de ampere a este arrollamiento) a una acción antagonista sobre el flujo primario como así lo requiere la ley de Lenz. De ahí la no inclusión del signo menos en la expresión (3). porque ya se ha tenido en cuenta al señalar las polaridades de las f.e.m.s. en la figura 10. En definitiva, de acuerdo con este convenio de signos la f.m.m. del secundario actúa en contra de la f.m.m. del primario produciendo un efecto desmagnetizante sobre ésta.³⁵

Se observa en la figura 10 que los terminales superiores de los devanados primario y secundario tienen en el instante indicado una polaridad positiva respecto de los otros. Para destacar este hecho, en la teoría de circuitos con acoplamiento magnéticos se suelen señalar con un punto aquellos terminales de las bobinas que tiene simultáneamente la misma polaridad instantánea, de ahí la justificación de haber dibujado un punto en los terminales superiores de los devanados del transformador de la figura 10. Existe una recomendación de las Normas CEI (Comité Electrotécnico Internacional), y que también se ha aplicado al esquema de la figura 10, por lo que se deben designar los terminales de la misma polaridad con la misma letra, mayúscula para el lado de A.T. y minúscula para el lado de B.T., los extremos positivos en la forma A-a y los negativos en la forma $\hat{A}-\hat{a}$ (si el

³⁵ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.173.

transformador es trifásico se emplean las letras B y C para las otras dos fases), se observa esta simbología en la figura 10. La ventaja de estos convenios es la de conocer las polaridades de los devanados sin necesidad de tener en cuenta los sentidos de los arrollamientos en el núcleo del transformador. Una vez designados los sentidos de las f.e.m.s y de las corrientes en el transformador, interesa conocer las relaciones existentes entre las tensiones, los flujos y las f.e.m.s. Como quiere que los devanados son ideales, la aplicación del segundo lema de Kirchhoff a los circuitos primario y secundario de la figura 10 nos da:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}; v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

Si se parte de un flujo senoidal de la forma:

$$\Phi = \Phi_m \text{sen } \omega t = \Phi_m \cos (\omega t - 90^\circ) \quad (5)$$

Teniendo en cuenta (4) y (5) se cumplirá:

$$v_1 = e_1 = N_1 \Phi_m \cos \omega t; v_2 = e_2 = N_2 \Phi_m \cos \omega t \quad (6)$$

Lo que indica que las tensiones y f.e.m.s van adelantadas 90° respecto al flujo, siendo sus valores eficaces:

$$V_1 = E_1 = \frac{N_1 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \Phi_m; V_2 = E_2 = \frac{N_2 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (7)$$

Dividiendo entre si las ecuaciones anteriores resultan:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad (8)$$

Donde el factor m se denomina relación de transformación. De este modo, en un transformador ideal la relación de tensiones coincide con la relación de espiras, que es en definitiva la relación de transformación.³⁶

2.2.1.1. Transformador ideal en vacío

Si el interruptor S de la figura 10 está abierto, el transformador funciona sin carga o en régimen de vacío. El primario se comportará como una bobina con núcleo de hierro. En este caso el transformador absorberá corriente de vacío i_0 . La corriente i_0 forma un ángulo φ_0 con la tensión aplicada V_1 , de tal forma que la potencia absorbida en vacío, denominada P_0 será igual a las pérdidas en el hierro P_{Fe} en el núcleo del transformador, cumpliéndose una identidad análoga como se muestra:³⁶

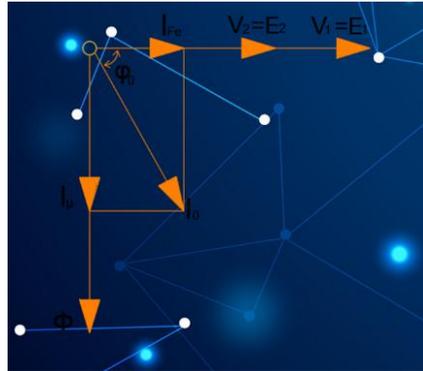
$$P_0 = P_{Fe} = V_1 I_0 \cos \varphi_0 \quad (9)$$

Donde v_1 e I_0 representan los valores eficaces de la tensión y la corriente, respectivamente. La corriente I_0 tiene dos componentes, una activa I_{Fe} y la otra

³⁶ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.174

reactiva I_{μ} . En la figura 11 se muestra el diagrama fasorial de un transformador ideal en vacío, donde se muestran las magnitudes anteriores con sus fases correspondientes, habiéndose tomado como referencia de fases la tensión aplicada v_1 .³⁷

Figura 11. **Diagrama fasorial de tensiones y corrientes en vacío**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

2.2.1.2. Transformador ideal en carga

Cuando se cierra el interruptor S (figura 10), el transformador funciona en Carga y aparece una corriente i_2 que circula por el circuito secundario, que corresponde, a un valor complejo o fasorial:

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_L} = \frac{E_2 \angle 0^\circ}{Z_L \angle \varphi_2} = \frac{E_2}{Z_L} \angle -\varphi_2 \quad (10)$$

Es decir, I_2 se retrasa φ_2 de la f.e.m. E_2 . La corriente i_2 al circular por el devanado secundario produce una f.m.m. desmagnetizante $N_2 i_2$, que se opone a la f.m.m. primaria existente $N_1 I_0$. Es por ello que si esta f.m.m. de secundario no queda neutralizada por una corriente adicional que circule por el primario, el flujo en el núcleo. se verá reducido profundamente, con las consiguientes reducciones en las f.e.m.s e_1 y e_2 que son proporcionales a él y se romperá el equilibrio entre V_1 y e_1 en el primario (ecuación 4). Para que pueda restablecerse el equilibrio es preciso neutralizar la f.m.m. $N_2 i_2$ del secundario, mediante una corriente adicional primaria i_2' equivalente a una f.m.m. $N_1 i_2'$ de valor:³⁷

$$N_1 i_2' = N_2 i_2 \quad (11)$$

³⁷ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.175.

De donde se deduce el valor de la corriente i_2' adicional primaria:

$$i_2' = \frac{N_2}{N_1} i_2 = \frac{i_2}{m}; \quad m = \frac{N_1}{N_2} \quad (12)$$

De este modo, y como se indica en la figura 10, la corriente total necesaria en el primario i_1 será igual a:

$$i_1 = i_0 + i_2' = i_0 + \frac{i_2}{m} \quad (13)$$

Que corresponde en forma fasorial a:

$$I_1 = I_0 + I_2' = I_0 + \frac{I_2}{m} \quad (14)$$

Donde se denominado I_2' a $\frac{I_2}{m}$. La ecuación anterior expresa la relación entre la corriente primaria I_1 , de vacío I_0 y secundaria I_2 . Esta ecuación (13) o su equivalente en forma instantánea (14) nos indica que la corriente primaria tiene dos componentes.

Una corriente de excitación o de vacío I_0 cuya misión es producir el flujo en el núcleo magnético y vencer las pérdidas en el hierro a través de sus componentes I_μ e I_{Fe} , respectivamente.

Una componente de carga I_2' que equilibra o contrarresta la acción desmagnetizante de la f.m.m. secundaria para que el flujo en el núcleo permanezca constante e independiente de la carga, como así lo requiere la ecuación (7).

Un modo más simple de demostrar la ecuación (14) es proceder en sentido inverso. Así la primera ecuación (7) nos indica que si la tensión primaria V_1 es constante deberá permanecer constante el flujo ϕ_m en el núcleo magnético, para cualquier régimen de carga. Si se denomina R a la reluctancia del circuito magnético, la ley de Hopkinson nos indica que, si el flujo es constante, también deberá ser constante la f.m.m. necesaria para producirlo en cualquier régimen de carga. En particular deberán ser iguales las f.m.m.s. en vacío y en carga. En vacío, como las corrientes que circulan por los devanados son $I_1 = I_0$ e $I_2 = 0$, resultará una f.m.m. total:³⁸

$$\mathcal{F} = N_1 I_0 \quad (15)$$

Mientras que, en carga, cuando las corrientes de circulación son I_1 e I_2 , se tiene una f.m.m. resultante:

$$\mathcal{F} = N_1 I_1 - N_2 I_2 \quad (16)$$

El signo menos de la expresión anterior está de acuerdo con la acción desmagnetizante del secundario y que puede comprobar el lector aplicando la teoría de los circuitos magnéticos al esquema de la figura 10. Al igualar (15) y (16) resulta:

³⁸ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.176.

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 - N_2 I_2 \quad (17)$$

De donde se deduce:

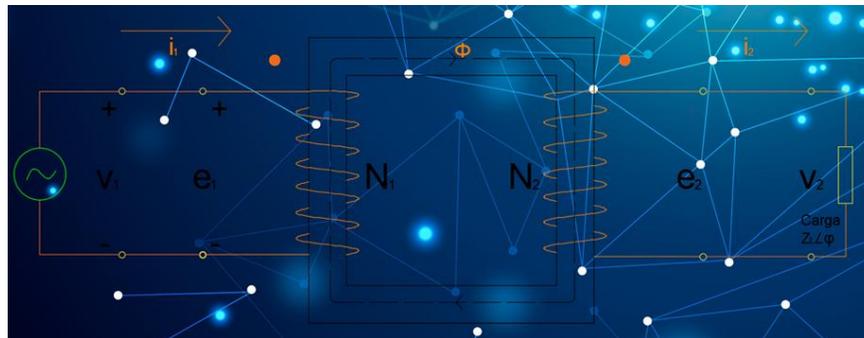
$$I_1 = I_0 + \frac{N_2}{N_1} I_2 = I_0 + \frac{I_2}{m} = I_0 + I_2' \quad (18)$$

Que coincide con la expresión ya demostrada (14). A plena carga la corriente I_2' es de ordinario veinte veces por lo menos mayor que I_0 por lo que puede despreciarse en la expresión (18) se transforma en la expresión aproximada.³⁹

$$I_1 \approx I_2' = \frac{I_2}{m} \quad (19)$$

La impedancia vista por la fuente en el primario Z_1 y la impedancia vista por la salida del transformador en el secundario Z_2 se calculan con respecto a la figura 12 como sigue:

Figura 12. Impedancia reflejada en el transformador Ideal



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

$$Z_P = \frac{V_1}{I_1} ; Z_S = \frac{V_2}{I_2} \quad (20)$$

Reemplazamos las relaciones V contra I por las impedancias tenemos:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (21)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\left(\frac{V_1}{Z_1}\right)}{\left(\frac{V_2}{Z_2}\right)} = \frac{V_1}{V_2} * \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{N_1}{N_2} * \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (22)$$

³⁹ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.176.

$$\frac{N_1}{N_2} * \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (23)$$

De donde despejando se obtiene:

$$Z_1 = Z_2 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 ; \frac{N_1}{N_2} = m = \text{relacion de transformacion} \quad (24)$$

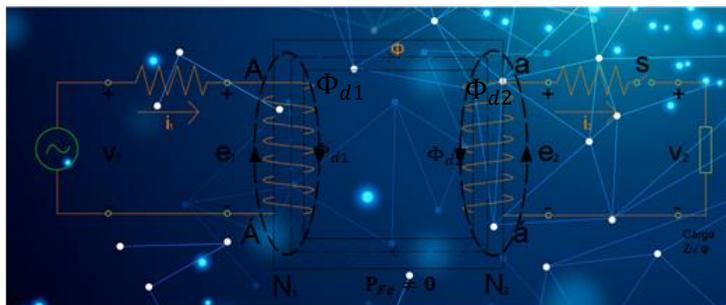
$$Z_1 = Z_2 m^2 \quad (25)$$

Esto nos muestra que la impedancia vista por la fuente en el lado primario corresponde a la impedancia del secundario (la de la carga), multiplicada por el cuadrado de la relación de vueltas de las bobinas. Se dice que esta impedancia vista en el primario es la impedancia del secundario reflejada en el lado primario.⁴⁰

2.2.2. Transformador real

En los transformadores reales hay que considerar la resistencia y los flujos de dispersión que en el transformador ideal no se tenían en cuenta. La aparición de la resistencia es inherente a la constitución de los devanados con hilo conductor. En la figura 13 se muestra el circuito del transformador de la figura 10, donde para mayor claridad se ha considerado resistencias R_1 y R_2 de los arrollamientos, fuera de las propias bobinas.⁴¹

Figura 13. Transformador real con resistencias eléctricas y flujos de dispersión



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Se observa también en el transformador real que todo el flujo producido por los devanados solo existe una parte común a ambos y representada por Φ en la figura 13; lo anterior es consecuencia de los flujos de dispersión que aparecen en los arrollamientos y que se distribuyen por caminos no magnéticos, en particular por

⁴⁰ SALAZAR GOMEZ, Antonio. *Universidad de los Andes*. p.229

⁴¹ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.178.

los conductores y el aire que rodea las bobinas. Si se denominan Φ_1 y Φ_2 a los flujos totales que atraviesan los devanados primario y secundario y Φ_{d1} , Φ_{d2} a los flujos de dispersión respectivos se cumplirá:

$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_{d1} ; \Phi_2 = \Phi + \Phi_{d2} \quad (26)$$

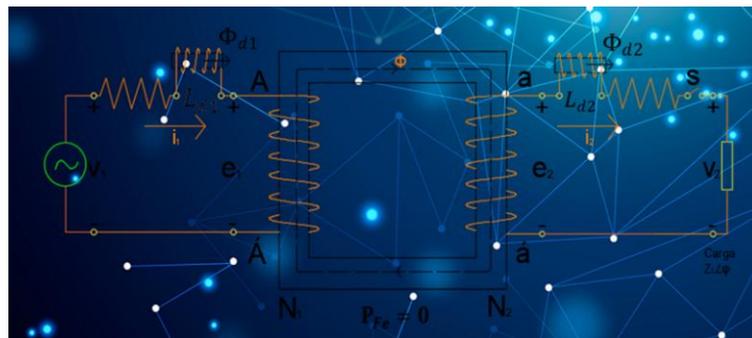
A primera vista, la introducción de los flujos de dispersión complica el estudio, ya que desaparece la idea del flujo común único que existía en el transformador ideal. Sin embargo, se puede conservar tal forma de proceder se añaden en serie a cada arrollamiento unas bobinas con el mismo número de espiras que los devanados correspondientes, de tal modo que al circular por ellas las intensidades respectivas den lugar a los mismos flujos de dispersión Φ_{d1} y Φ_{d2} que en las bobinas reales. En la figura 14 se ha representado esta idea, donde se ha indicado con L_{d1} y L_{d2} los coeficientes de autoinducción respectivos de estas bobinas adicionales (con núcleo de aire), cuyos valores de acuerdo con su definición serán:⁴²

$$L_{d1} = N_1 \frac{d\Phi_{d1}}{di_1} ; L_{d2} = N_2 \frac{d\Phi_{d2}}{di_2} \quad (27)$$

Y que dan lugar a las reactancias de dispersión X_1 y X_2 de ambos devanados:

$$X_1 = L_{d1}\omega ; X_2 = L_{d2}\omega \quad (28)$$

Figura 14. Transformador real con bobinas ideales en el núcleo



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

La aplicación del segundo lema de Kirchoff a los circuitos primario y secundario de la figura 14 nos da:

$$v_1 = e_1 + R_1 i_1 + L_{d1} \frac{di_1}{dt} ; e_2 = v_2 + R_2 i_2 + L_{d2} \frac{di_2}{dt} \quad (29)$$

⁴² FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.179.

Donde los valores e_1 y e_2 vienen expresados por las ecuaciones (3):

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} ; e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (30)$$

Que corresponden a los valores eficaces según (7):

$$E_1 = 4,44fN_1\Phi_m ; E_2 = 4,44fN_2\Phi_m \quad (31)$$

Donde Φ_m es el flujo común máximo que circula por el circuito magnético de la figura 14. Las ecuaciones (29) se expresan en forma compleja:

$$V_1 = E_1 + R_1I_1 + jX_1I_1 ; V_2 = E_2 - R_2I_2 - jX_2I_2 \quad (32)$$

Si se tiene en cuenta (31), la relación entre los valores eficaces de las f.e.m.s inducidas será:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad (33)$$

Ecuación que se cumple siempre tanto en el transformador ideal como en el transformador real. Ahora bien, si se tiene en cuenta (29) o (32), en el transformador real dejan cumplirse las igualdades entre f.e.m.s y tensiones que aparecían en el transformador ideal, por lo que en el caso real el cociente entre las tensiones primaria y secundaria deja de ser igual a la relación de transformación. En los transformadores que usa la industria, las caídas de tensión a plena carga son del orden del 1 al 10 por 100 de las tensiones asignadas, por lo que las relaciones (32) se convierten en las ecuaciones aproximadas:

$$V_1 \approx E_1 ; V_2 \approx E_2 \quad (34)$$

Y de ahí que la relación entre las tensiones primaria y secundaria será aproximadamente igual a:

$$\frac{V_1}{V_2} \approx m \quad (35)$$

Si el transformador trabaja en vacío, las relaciones reales (32) se transforman en:

$$V_1 = E_1 + R_1I_0 + jX_1I_0 ; V_2 = E_2 \quad (36)$$

Ya que I_2 es igual a cero. Como quiera que en la practica la corriente de vacío I_0 es del orden de 0,6 a 8 por 100 de I_{1n} (corriente asignada o de plena carga del primario), las caídas de tensión en vacío definidas por R_1I_0 y X_1I_0 en la primera ecuación (36) son muy pequeñas (del orden de 0,004 a 0,06 por 100 de V_1), y de ahí que en vacío puedan considerarse como suficientemente exactas las igualdades:

$$V_1 = E_1 ; V_{20} = E_2 \quad (37)$$

Donde V_{20} representa la magnitud de la tensión secundaria en vacío. Por consiguiente, y teniendo en cuenta (33) y (37), se podrá escribir:⁴³

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_{20}} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad (38)$$

⁴³ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.180.

Que nos define la relación de transformación como el cociente entre la tensión primaria aplicada al transformador y la tensión secundaria en vacío. Este cociente es el que incluye el fabricante en la placa característica de la máquina.

En el funcionamiento en carga la primera relación aproximada (34) y la primera ecuación (31) nos indica que los flujos magnéticos en vacío y en carga son prácticamente iguales, lo que significa que las f.m.m.s en ambos estados de carga coinciden, por lo que la ecuación (18), que relaciona las corrientes del transformador, se puede considerar válida a todos los efectos y que se vuelve a escribir así:

$$I_1 = I_0 + \frac{I_2}{m} \quad (39)$$

Las ecuaciones (32) y (39) definen el comportamiento eléctrico del transformador en carga. Las ecuaciones (32) relacionan las tensiones con las f.e.m.s. y caídas de tensión dentro de los devanados del transformador, mientras que (39) nos indica la relación entre las corrientes primaria, secundario y de vacío.⁴⁴

2.2.3. Circuito equivalente del transformador

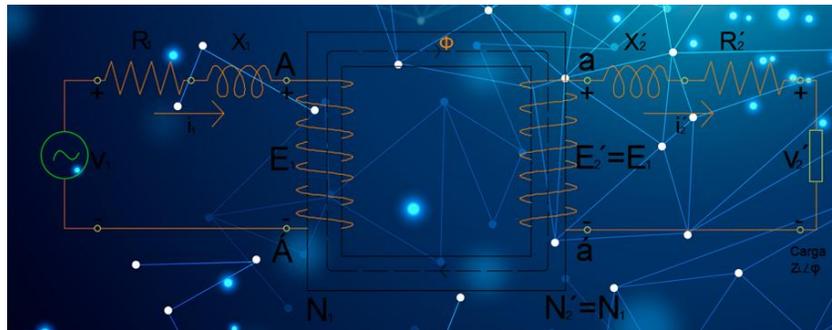
Con el fin de poder determinar con antelación la respuesta en determinadas condiciones el funcionamiento de una máquina eléctrica, se desarrolla un circuito equivalente para poder aplicar todo el potencial de la teoría de redes eléctricas.

En el caso del transformador el desarrollo de un circuito equivalente se inicia reduciendo ambos devanados al mismo número de espiras. Generalmente se reduce el secundario al primario, lo que quiere decir que se sustituye el transformador original por otro que tiene el mismo primario con N_1 espiras y un nuevo secundario con un número de espiras N_2' igual a N_1 . Para que este nuevo transformador sea equivalente al original, deben conservarse las condiciones energéticas de las máquinas, es decir, las potencias, activa y reactiva y su distribución entre los diversos elementos del circuito secundario. Todas las magnitudes relativas a este nuevo devanado se indica con los mismos símbolos del transformador real pero afectados con una tilde, como indica la figura 15 donde los valores de tensiones y corrientes se expresan en forma compleja.⁴⁵

⁴⁴ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.181.

⁴⁵ *Ibíd.* p.182.

Figura 15. **Circuito equivalente de un transformador real reducido al primario**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

De acuerdo con el principio de igualdad de potencias, perdidas, etc., se obtienen las siguientes relaciones entre las magnitudes de los transformadores real y equivalente:

- F.e.m.s. y tensiones.

En el transformador real se cumple:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \rightarrow E_2 = E_1/m \quad (40)$$

Y en el transformador equivalente, al ser $N_2' = N_1$, se tiene:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \rightarrow E_2' = E_1 = mE_2 \quad (41)$$

Es decir, la f.e.m. E_2' del nuevo secundario es m veces mayor que la f.e.m. E_2 que existía en el transformador real.

De forma análoga se tendrá para la tensión V_2' :

$$V_2' = m V_2 \quad (42)$$

- Corrientes.

La conservación de la potencia aparente de ambos secundarios indica que:

$$S_2 = V_2 I_2 = V_2' I_2' \quad (43)$$

Y teniendo en cuenta la relación (42) se obtiene:⁴⁶

$$I_2' = \frac{I_2}{m} \quad (44)$$

Es decir, la corriente I_2' del nuevo secundario es m veces menor que la corriente I_2 que existía en el transformador real.

- Impedancias.

Al igualar las potencias activas que se disipan en las resistencias, se obtiene:

$$R_2 I_2^2 = R_2' I_2'^2 \quad (45)$$

De donde se deduce, teniendo en cuenta (44):

$$R_2' = m^2 R_2 \quad (46)$$

Es decir, la resistencia R_2' del nuevo secundario es m^2 veces la resistencia R_2 que existía en el trabajo real. De forma similar, planteando la conversión de la potencia reactiva, resulta:

$$X_2 I_2^2 = X_2' I_2'^2 \quad (47)$$

Y, por consiguiente:

$$X_2' = m^2 X_2 \quad (48)$$

Es decir, la reactancia del X_2' del nuevo secundario es m^2 veces la reactancia X_2 que existía en el transformador real.

En generalmente cualquier impedancia conectada en el secundario del transformador real, ejemplo la impedancia $ZL \angle \varphi_2$ en la red de la figura 14 se reducirá al primario siguiendo las relaciones (46) o (48), por lo que se convertirá en una impedancia $Z'L$ de valor:

$$Z'L = m^2 ZL \quad (49)$$

Lo que indica que cualquier impedancia ZL conectada en el secundario del transformador se convierte en un valor $m^2 ZL$ en el transformador equivalente.

Téngase en cuenta, para demostrar la igualdad anterior de un modo general, que en la figura 15 del transformador real se cumple:

$$ZL = V_2 / I_2 \quad (50)$$

Siendo la impedancia reducida o transferencia a la primaria en el circuito equivalente de la figura 15:⁴⁷

⁴⁶ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.183.

⁴⁷Ibíd. p.184.

$$ZL = \frac{V_2'}{I_2} \quad (51)$$

Y sustituyen (42), (43) y (50) en (51) resultara:

$$Z'L = \frac{V_2'}{I_2} = \frac{mV_2}{\frac{I_2}{m}} = \frac{m^2V_2}{I_2} = m^2ZL \quad (52)$$

Que coincide con la relación (49), obtenida allí por analogía con las equivalencias de (46) y (48).

Es innegable que observando el circuito equivalente inicial obtenido en la figura 15, el estudiante puede imaginar multitud de redes equivalentes con tal de imponer diferentes condiciones al número de espiras N_2' del nuevo transformador. La importancia fundamental de la reducción de los devanados al haber elegido la igualdad especial $N_2' = N_1$ estriba en que se puede llegar a obtener una representación del transformador en la que no exista la función transformación, o dicho de otra manera, se va a sustituir el transformador real, cuyos devanados están acoplados magnéticamente, por un circuito cuyos elementos están acoplados solo eléctricamente.⁴⁸

En efecto, si se observa el circuito de la figura 15 y se tiene en cuenta la igualdad (41), existe una identidad entre las f.e.m.s primaria y secundaria, lo cual permite reunir los extremos de igual polaridad instantánea, sustituyendo ambos devanados por uno solo como muestra la Figura 16. Por este arrollamiento único circulara una corriente diferencia: $I_1 - I_2'$, que teniendo en cuenta las identidades (18) y (39) es igual a la corriente de vacío I_0 . Esta a su vez, tiene dos componentes, una activa I_{Fe} y otra reactiva I_μ , que representan un circuito paralelo formador por una resistencia R_{Fe} cuyas pérdidas por efecto Joule indican las perdidas en el hierro del transformador y por una reactancia X_μ por la que se deriva la corriente de magnetización de la máquina. De acuerdo con estos razonamientos, el circuito de la figura 16 se transforma en el de la figura 17, lo que representa el denominado circuito equivalente exacto del transformador reducido al primario.

El mismo proceso seguido hasta aquí para obtener el circuito equivalente del transformador reducido al primario se puede emplear en sentido inverso, es decir, tomando un primario con un numero de espiras $N_1' = N_2$ y dejando inalterado el secundario: se obtiene así el llamado circuito equivalente reducido al secundario cuyo esquema se indica en la figura 18.⁴⁹

⁴⁸ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.184.

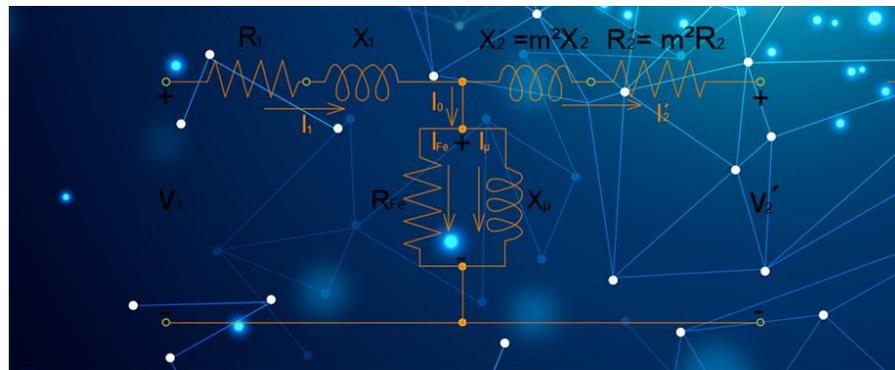
⁴⁹ *Ibíd* p.185.

Figura 16. **Circuito equivalente de un transformador real reducido al primario**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016

Figura 17. **Circuito equivalente exacto reducido al primario**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Figura 18. **Circuito equivalente exacto reducido al secundario**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

2.2.3.1. **Circuito equivalente aproximado**

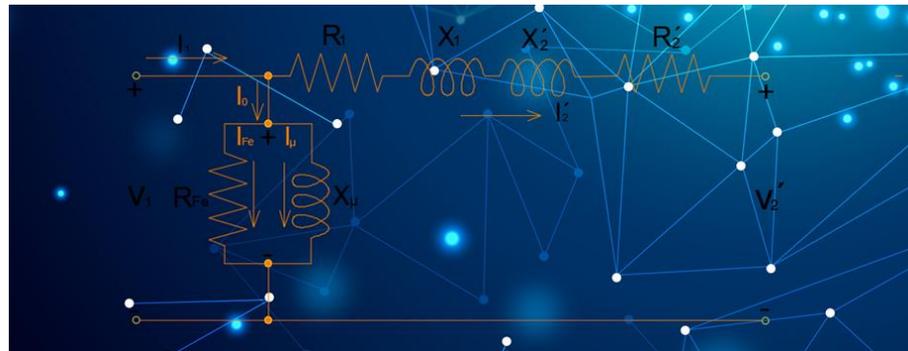
Entonces el circuito obtenido en primer lugar y mostrado en la figura 17 responde fielmente al comportamiento del transformador real y por ello se denomina circuito equivalente exacto. En la práctica, y debido al reducido valor de I_0 frente a las corrientes I_1 e I_2 , suele trabajar con un circuito equivalente aproximado que se obtiene trasladando la rama en paralelo por la que se deriva la corriente de vacío a los bornes de entrada del primario, resultando el esquema de la figura 19a. Con este circuito no se introducen errores en el cálculo y sin embargo se simplifica enormemente el estudio de la máquina. El esquema puede simplificarse aún más observando la conexión en serie constituida por las ramas primaria y secundaria (reducida). Si se denomina:

$$\begin{aligned} R_{cc} &= R^1 + R_2': \text{Resistencia de Cortocircuito} \\ X_{cc} &= X^1 + X_2': \text{Resistencia de Cortocircuito} \end{aligned} \quad (53)$$

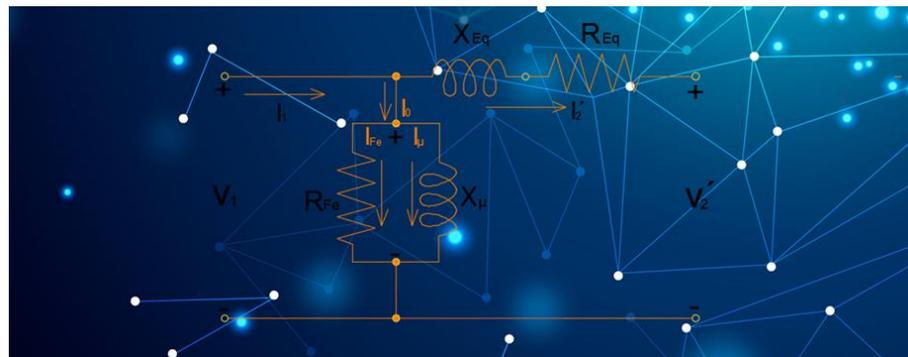
El circuito de la figura 19a se convierte en el de la figura 19b. Con ayuda de este último circuito equivalente simplificado pueden resolverse problemas prácticos que afectan a la utilización del transformador; en particular para el cálculo de caída de tensión y rendimiento. Inclusive, si en un problema real se requiere únicamente la determinación de la caída de tensión del transformador, se puede prescindir de la rama paralelo, ya que no afecta esencialmente al cálculo de aquella; de este modo el circuito resultante será la impedancia serie: $R_{cc} + jX_{cc}$. Como quiera, además, que en los grandes transformadores se cumple que X_{cc} es varias veces R_{cc} , se puede utilizar solamente la reactancia serie X_{cc} para representar el circuito equivalente del transformador. Este esquema final es el que se utiliza cuando se realizan estudios de grandes redes en sistemas eléctricos de potencia: análisis de estabilidad, cortocircuito, etc.⁵⁰

⁵⁰ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.186.

Figura 19. **Circuito equivalente aproximado reducido al primario**



a)



b)

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

2.2.3.2. Ensayos para parámetros del circuito equivalente

Los ensayos de un transformador representan las diversas pruebas que deben prepararse para verificar el comportamiento de la máquina. En la práctica resulta difícil la realización de ensayos reales directos por motivos esenciales: 1) la gran cantidad de energía que ha de disiparse en tales pruebas, 2) es prácticamente imposible disponer de cargas lo suficientemente elevadas (sobre todo cuando la potencia del transformador es grande) para hacer un ensayo en situaciones reales.⁵¹

⁵¹ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.187.

Ahora bien, el comportamiento de un transformador, bajo cualquier condición de trabajo, puede predecirse con suficiente exactitud si se conocen los parámetros del circuito equivalente. Sin embargo, no es sencillo ni fiable obtener estos parámetros de los datos de diseño o proyecto. Los elementos que intervienen en el circuito equivalente aproximado se pueden obtener con unos ensayos muy simples que tiene además la ventaja de requerir muy poco consumo de energía (la suficiente para suministrar únicamente las pérdidas de la máquina), de ahí que sean pruebas sin carga real. Los dos ensayos fundamentales que se utilizan en la práctica para la determinación de los parámetros del circuito equivalente de un transformador son: a) Ensayo en vacío y b) Ensayo de cortocircuito.⁵²

Para proceder a la descripción de estos ensayos vamos a indicar aquí un método para determinar la polaridad de los terminales de un transformador. Consideremos el esquema simplificado del transformador mostrado en la figura 20, en el que se desconoce el sentido del arrollamiento de los devanados. Se trata de determinar la polaridad relativa de los terminales secundarios respecto del primario. El proceso a seguir es el siguiente: se señalan previamente cualesquiera del primario con las letras A y Á. Se unen a continuación dos terminales cualesquiera de primario y secundario, en el caso que nos ocupa se han unido A con x. Se conectan tres voltímetros de c.a. en la forma que se señala. Al alimentar el primario con una tensión alterna se leen los valores señalados por los tres voltímetros V_1 , V_2 y V_3 . Si la tensión V_3 es igual a $V_1 - V_2$ significa entonces que el terminal x es el homólogo a A, por lo que deberá identificarse finalmente este borne con la letra "a" y el otro terminal "y" corresponderá a "á".

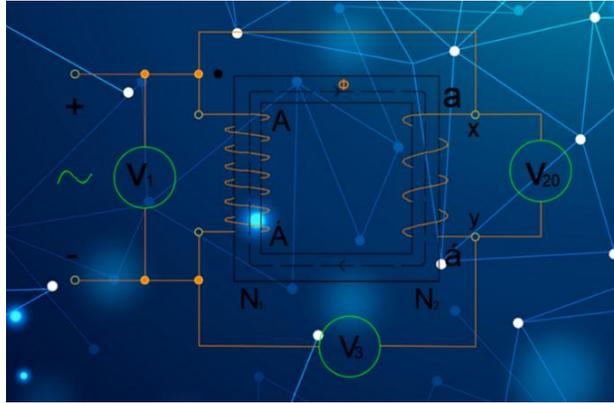
De un modo equivalente con convenio de punto: se deberá señalar con un punto el terminal "a" que es homólogo de "A". Si la tensión V_3 es igual a $V_1 + V_2$ entonces el terminal "y" es ahora homólogo a "A" y, por tanto, "x" es el homólogo de "Á". Con este simple procedimiento se puede realizar el ensayo de polaridad: en la práctica el devanado de alta tensión puede conectarse a una red alterna de 220 V, 50 Hz, aun cuando la tensión asignada de este devanado sea centenares de voltios.

Ensayo en Vacío. Consiste esta prueba en aplicar al primario del transformador la tensión asignada, estando el secundario en circuito abierto. Al mismo tiempo debe medirse la potencia absorbida P_0 , la corriente de vacío I_0 y la tensión secundaria, de acuerdo con el esquema de conexiones de la figura 21.⁵³

⁵² FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.187.

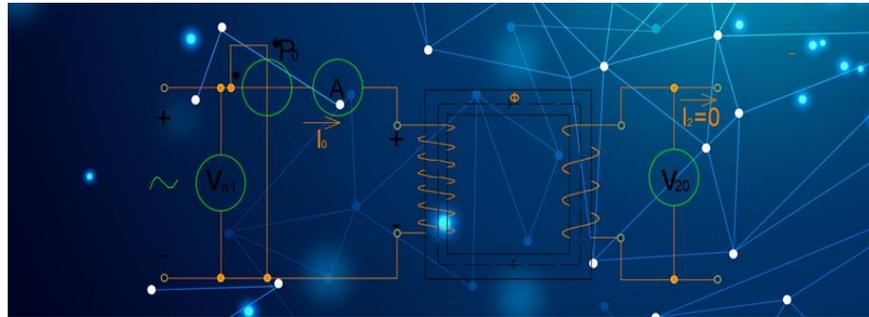
⁵³ *Ibíd.* p.188.

Figura 20. **Disposicion de los apartos de medida para determinar la polaridad**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Figura 21. **Esquema eléctrico de ensayo en vacío**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Como quiera que las pérdidas $R_1 I_o^2$ en vacío son despreciables (debido al pequeño valor de I_o), la potencia absorbida en vacío coincide prácticamente con las pérdidas en el hierro, lo que está de acuerdo con el circuito equivalente aproximado de la figura 22a, que se deduce del esquema general de la figura 19b, al ser $I_2 = 0$. De las medidas efectuadas puede obtenerse el factor de potencia en vacío, de acuerdo a la ecuación: ⁵⁴

$$P_o = V_1 n I_o \cos \varphi_o = P_{Fe} \quad (54)$$

⁵⁴ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.189.

Por otra parte, debido al pequeño valor de la caída de tensión primaria, se puede considerar que la magnitud $V_1 n$ coincide prácticamente con E_1 , resultando el diagrama vectorial de vacío de la figura 22b, en el que se ha tomado la tensión primaria como referencia de fases. En este esquema las dos componentes de I_o valen:

$$I_{F_e} = I_o \cos \varphi_o ; I_{\mu} = I_o \sin \varphi_o \quad (55)$$

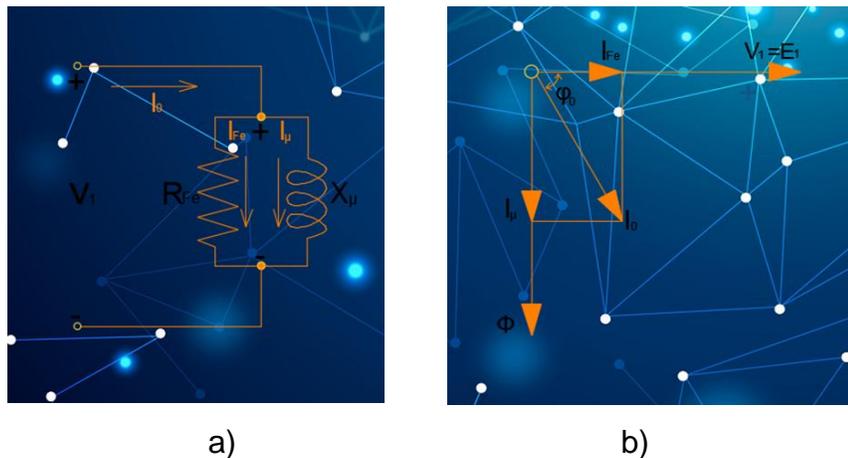
De donde pueden obtenerse ya los valores de los parámetros R_{F_e} y X_{μ} :

$$R_{F_e} = \frac{V_1}{I_{F_e}} ; X_{\mu} = \frac{V_1}{I_{\mu}} \quad (56)$$

Es decir, el ensayo de vacío permite determinar las pérdidas en el hierro del transformador y también los parámetros de la rama paralela del circuito equivalente del mismo. Del ensayo de vacío puede obtenerse también la relación de transformación, merced a que la tensión $V_1 n$ aplicada coincide prácticamente con E_1 , además la f.e.m. E_2 es igual a la tensión medida en el secundario en vacío y que se denomina V_{2o} . En consecuencia, se cumplirá de acuerdo con (37):⁵⁵

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1 n}{V_2 n} \quad (57)$$

Figura 22. **Circuito equivalente en vacío y diagrama fasorial correspondiente**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

⁵⁵ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.189.

Ensayo de Cortocircuito. En este ensayo se cortocircuita el devanado secundario y se aplica al primario una tensión que se va elevando gradualmente desde cero hasta que circula la corriente asignada de plena carga por los devanados. El esquema y tipos de aparatos necesarios para la realización de este ensayo se indican en la figura 23.

La tensión aplicada necesaria en esta prueba representa un pequeño porcentaje respecto a la asignada (3-10 por 100 de V_{1n}), por lo que el flujo en el núcleo es pequeño, siendo en consecuencia despreciables las pérdidas en el hierro. La potencia absorbida en cortocircuito coincide con las pérdidas en el cobre, lo que está de acuerdo con el circuito equivalente aproximado de la figura 24a, que se deduce del esquema general de la figura 19b, al despreciarse la rama en paralelo, como consecuencia del pequeño valor de la corriente I_0 frente a I_{1n} .

De las medidas efectuadas se puede obtener el f.d.p. de cortocircuito, de acuerdo con la ecuación:

$$P_{CC} = V_{1CC} I_{1n} \cos \varphi_{cc} \quad (58)$$

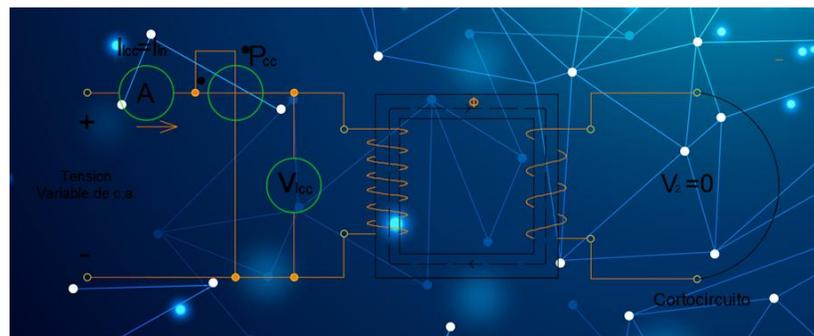
Si en el circuito de la figura 24a se toma la corriente como referencia, se obtiene el diagrama vectorial de la figura 24b, del cual se deduce:

$$V_{R_{CC}} = R_{CC} I_{1n} = V_{1CC} \cos \varphi_{cc} ; \quad V_{X_{CC}} = X_{CC} I_{1n} = V_{1CC} \sin \varphi_{cc} \quad (59)$$

Y, en consecuencia⁵⁶:

$$R_{CC} = \frac{V_{1CC}}{I_{1n}} \cos \varphi_{cc} ; \quad X_{CC} = \frac{V_{1CC}}{I_{1n}} \sin \varphi_{cc} \quad (60)$$

Figura 23. **Circuito equivalente del ensayo de cortocircuito**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

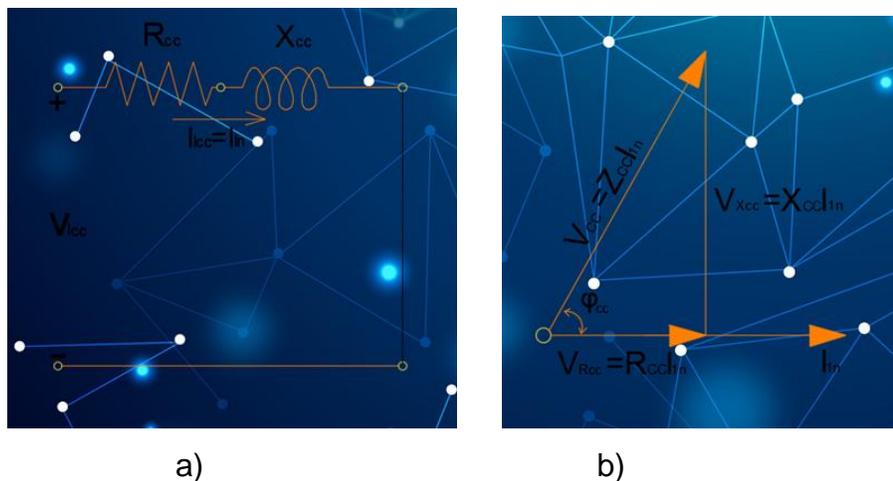
⁵⁶ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.190.

Es decir, el ensayo de cortocircuito permite determinar los parámetros de la rama serie del circuito equivalente del transformador, y de ahí que se designen con los símbolos R_{CC} y X_{CC} . Debe de aclararse que el ensayo de cortocircuito determina la impedancia total del transformador, pero no da información de cómo están distribuidos estos valores totales entre el primario y el secundario. Es decir, se obtiene, según (53):

$$R_{CC} = R_1 + R_2' ; X_{CC} = X_1 + X_2' \quad (61)$$

Para poder determinar los valores individuales de las resistencias R_1 y R_2' es preciso aplicar c.c. a cada uno de los devanados y obtener las resistencias R_1 y R_2 (no R_2') aplicando la ley de ohm y utilizando un factor corrector para obtener en cuenta el efecto pelicular que se produce con c.a. No existen procedimientos para separar en la segunda ecuación (61) X_1 y X_2' .⁵⁷

Figura 24. **Circuito equivalente de cortocircuito y esquema fasorial de tensiones.**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

2.2.3.2.1. Diagrama fasorial de tensiones y corrientes

El diagrama fasorial del transformador puede determinarse a partir de la relación de sus voltajes, corrientes e impedancias, este diagrama es una representación visual del comportamiento de los parámetros de la máquina.

⁵⁷ FRAILE MORA, Jesús, *Maquinas eléctricas*. p.191.

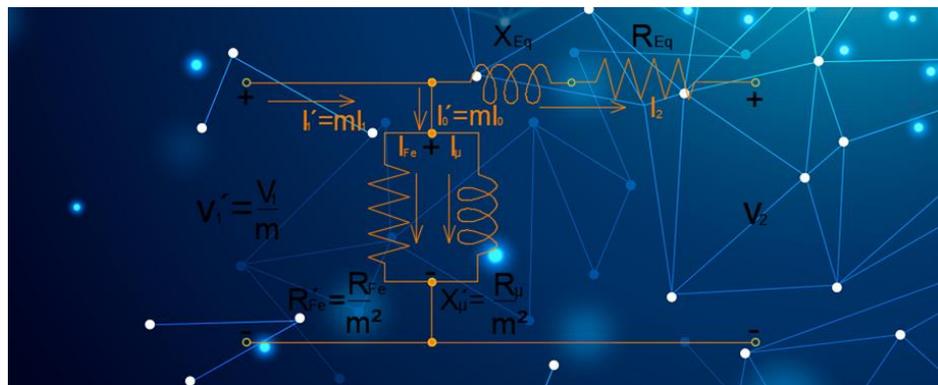
Para determinar la regulación de un transformador, es necesario entender las caídas dentro de él. Considere el circuito aproximado de la figura 25. Los efectos de la rama de excitación en la regulación de voltaje del transformador pueden ser ignorados, por lo cual solo deben considerarse las impedancias serie como del ángulo de fase de la corriente que fluye en el transformador. La forma más fácil de determinar el efecto de las impedancias y los ángulos de fase de la corriente en la regulación de voltaje del transformador es examinando el diagrama fasorial, un dibujo de los fasores de los voltajes y las corrientes en el transformador.

En los diagramas fasoriales siguientes, se supone que el ángulo del fasor de voltaje V_s es 0° , y los demás voltajes y corrientes se comparan con esa referencia. Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff al circuito equivalente de la figura 25, el voltaje en el primario puede ser hallado a partir de:

$$\frac{V_p}{m} = V_s + R_{eq}I_s + jX_{eq}I_s \quad (62)$$

Un diagrama fasorial del Transformador es una representación visual de esta ecuación. La figura 26 muestra un diagrama fasorial de un transformador que opera a un factor de potencia en atraso. Es fácil ver que $V_p/a > V_s$ para cargas en atraso, tal que la regulación de voltaje de un transformador con cargas en atraso debe ser mayor que cero.⁵⁸

Figura 25. **Circuito aproximado de un transformador referido al lado secundario**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

⁵⁸ CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas eléctricas*. p.77.

Figura 26. **Diagrama fasorial de un transformador que opera a un factor de potencia en atraso.**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

En la figura 27 se muestra un diagrama fasorial con factor de potencia igual a 1. Aquí de nuevo, el voltaje en el secundario es menor que el voltaje en el primario, por tanto, $V_R > 0$, Sin embargo, esta vez la regulación de voltaje es un número más pequeño que el obtenido cuando la corriente estaba en atraso. Si la corriente secundaria está en adelanto, el voltaje secundario puede ser mayor que el voltaje primario de referencia. Si esto ocurre, el transformador tendrá regulación de voltaje negativa, figura 28.⁵⁹

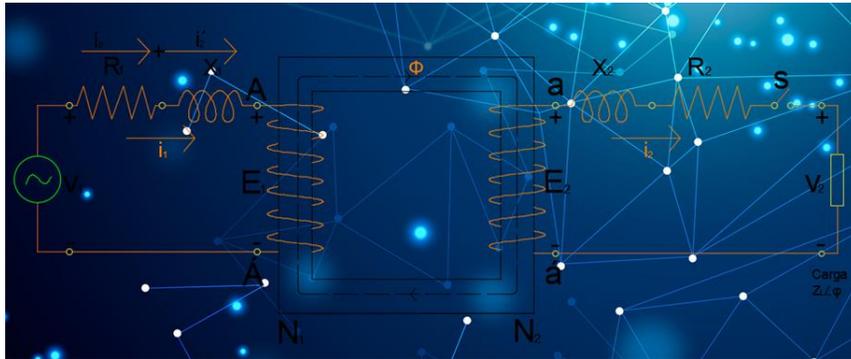
Figura 27. **Diagrama fasorial de un transformador que opera a factor de potencia unitario.**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

⁵⁹ CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas eléctricas*. p.78.

Figura 29. Transformador real en carga



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

- Antes de cerrar el interruptor S, sobre el circuito magnético no existe más que la fuerza magnetomotriz, $N_1 i_0$.
- Al cerrar el interruptor, se da una carga al secundario, entonces aparece la fuerza magnetomotriz $N_2 i_2$, la cual va a cambiar el flujo Φ . Supóngase que lo disminuye.
- Si disminuye el flujo Φ , entonces disminuya e_1 .

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (63)$$

- La ecuación del circuito primario era (antes de cerrar el interruptor, en vacío).

$$I_0 = \frac{V_1 - N_1 \frac{d\Phi}{dt}}{R_1 + jX_{d1}} \quad (64)$$

Con la entrada en efecto de la carga, $e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$ ha sufrido variación, no así V_1 que es la tensión de la red. Luego, la corriente de vacío I_0 queda alterada, por haber variado la diferencia $V_1 - N_1 \frac{d\phi}{dt}$. La nueva corriente de carga se designará por I_1 . Siempre es posible descomponerla en dos sumandos.

$$I_1 = I_0 + I_2' \quad (65)$$

En los transformadores que usa la industria, y dentro de los regímenes de carga que emplea, las caídas de tensión en vacío ($I_0 R_0$ e $I_0 X_{d1}$) son muy pequeñas del orden de 0,002 % a 0,06 %. En régimen de carga, aunque mayores, siguen siendo pequeñas a plena carga del orden de 0,2 % a 6 % V_1 . De ahí se deduce que E_1 , aun cuando disminuida, sigue teniendo un valor análogo a V_1 .

La conclusión es que, en carga, el flujo Φ tiene casi el mismo valor que en vacío, por la razón primaria.⁶⁰

$$N_1 \frac{d\phi}{dt} = -E_1 \approx V_1 \quad (66)$$

Otra consecuencia es que las pérdidas en el hierro son, prácticamente, constantes desde el régimen de vacío hasta el de plena carga. En efecto, tales pérdidas son función de:

$$B = \frac{\phi}{S} \quad (67)$$

Y se ha visto que ϕ varía poco con el régimen de carga.⁶¹

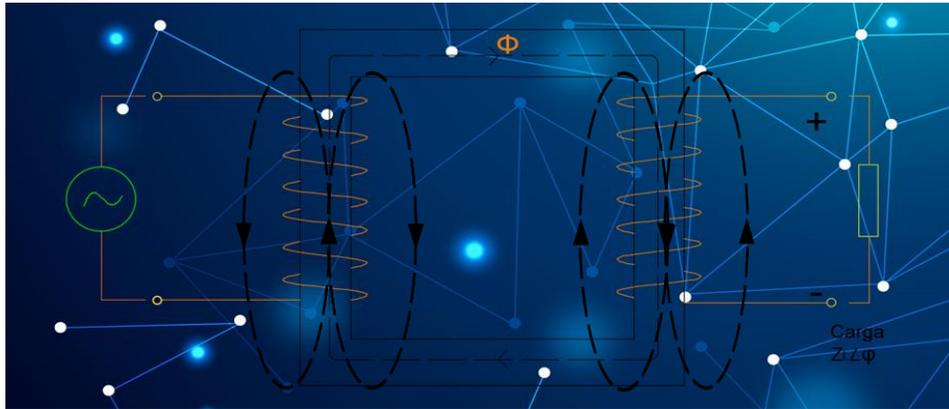
Diagrama Vectorial del transformador en Carga. Al funcionamiento del transformador, en el régimen en carga (figura 30), la corriente i_2 , además de contribuir en el flujo común (contribuyen $N_2 i_2, N_1 i_0, N_1 i_2'$), crea un flujo de dispersión del secundario, ϕ_{d2} . Por un proceso mental análogo al seguido en el caso del flujo de dispersión del primario, el flujo de dispersión del secundario se sustituirá por una bobina ideal X_{d2} (figura 31). Lo que se desea es conseguir es que el circuito magnético no tiene más que flujo común (Φ) a primario y secundario.⁶²

⁶⁰ RAS OLVIDA, Enrique. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. p.40.

⁶¹ *Ibíd.* p.41.

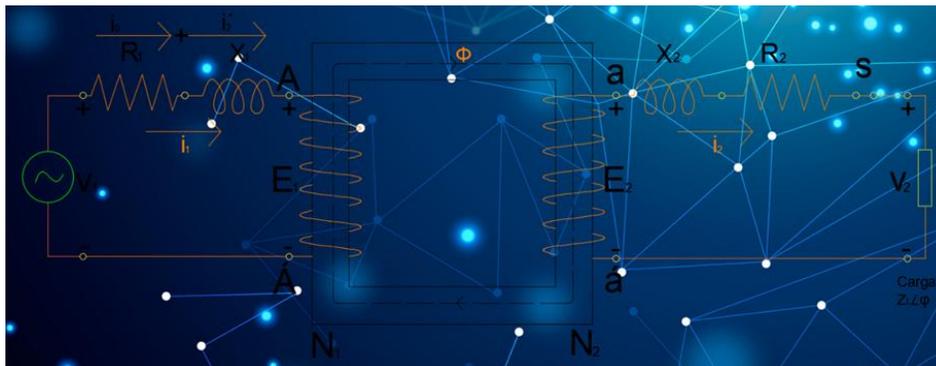
⁶² *Ibíd.* p.42.

Figura 30. Transformador en carga



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Figura 31. Transformador en carga empleado bobina ideal en el secundario



Fuente: elaboración propia, empelando AutoCAD 2016.

Como ejercicio, y por ser de utilidad, razone el estudiante que X_{d2} es, prácticamente, constante (como lo era X_{d1}). Observe en la figura 30, que buena parte del trayecto de Φ_{d2} es el aire.

Es a base del esquema de la figura 31 que suele trabajarse para realizar el diagrama vectorial. Las ecuaciones relativas a esta concepción son:

Corrientes:

$$I_1 = I_0 + I_2' = I_0 - I_2 \frac{1}{m} = I_0 - I_2 \frac{N_2}{N_1} \quad (68)$$

Tensiones Primarias:

$$V_1 - I_1 R_1 - I_1 j X_{d1} + E_1 = 0 \quad (69)$$

$$V_1 = I_1 R_1 + I_1 j X_{d1} - E_1 \quad (70)$$

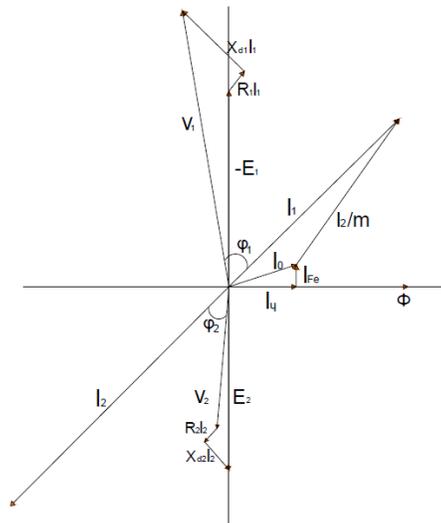
Tensiones Secundarias

$$E_2 - I_2 R_2 - I_2 j X_{d2} = I_2 Z_2 = V_2 \quad (71)$$

$$E_2 = I_2 R_2 + I_2 j X_{d2} + V_2 \quad (72)$$

A estas ecuaciones responde el diagrama vectorial de la figura 32.⁶³

Figura 32. **Diagrama vectorial del transformador de acuerdo al circuito equivalente**



Fuente: RAS OLIVA, Enrique. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. p.42

⁶³ RAS OLVIDA, Enrique. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. p.42.

En relación con los valores prácticos usuales en transformadores industriales, se han dibujado exageradamente grandes, para mayor claridad de la figura, los vectores de I_0 , I_1R_1 , I_1jX_{d1} , I_2R_2 y I_2jX_{d2} .⁶⁴

2.2.4.2. De acuerdo al circuito equivalente reducido

Se trata de una operación de gran utilidad en la ingeniería eléctrica a base varias tensiones nominales. Reduce el estudio al de otro sistema ideal trabajando a una sola tensión.

Teniendo en cuenta las ecuaciones deducidas en la parte del circuito equivalente del transformador como lo son:

Los vectores de tensión del secundario serán, donde m es la relación de transformación:

$$E'_2 = E_2 m \quad (73)$$

$$V'_2 = V_2 m \quad (74)$$

$$V'_{R2} = V_{R2} m = R_2 I_2 m \quad (75)$$

$$V'_{Xd2} = V_{Xd2} m \quad (76)$$

Está claro que, con ello, E'_2 pasa a tener el mismo valor que E_1 . Y, que en general, los otros vectores tensión vienen a tener magnitudes semejantes a las del primario. Por lo tanto, serán de cómoda representación utilizando la misma escala, pero empleando los valores ficticios (reducidos al primario).

La intensidad (o las intensidades) del secundario serán:

$$I'_2 = I_2 \frac{1}{m} \quad (77)$$

Igual que antes, se logra que I'_2 tenga una magnitud semejante a la de I_1 ($I_1 = I_0 + I'_2$, siendo la corriente de vacío, en general, pequeña). Por lo que, se tiene que:

$$I_1 = I_0 - I_2 \frac{1}{m} = I_0 - I'_2 \quad (78)$$

Se desea que las impedancias sigan siendo cocientes entre tensiones y corrientes. Por ello se emplean impedancias reducidas al primario, a base del siguiente convenio.⁶⁵

⁶⁴ RAS OLVIDA, Enrique. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. p.43.

⁶⁵ *Ibíd.* p.46.

$$Z'_L = \frac{V'_2}{I'_2} = \frac{V_2 m}{\frac{I_2}{m}} = Z_L m^2 \quad (79)$$

La Z_L anterior es la de la carga del secundario. Lo mismo se aplicará para todas las impedancias del secundario.

$$R'_2 = R_2 m^2 \quad (80)$$

$$X'_2 = X_{d2} m^2 \quad (81)$$

Obsérvese que las potencias del secundario no sufren alteración con la operación de reducción al primario, ejemplo:

$$R'_2 I_2'^2 = R_2 m^2 \left(I_2 \frac{1}{m} \right)^2 = R_2 I_2^2 \quad (82)$$

- Cabe añadir que los ángulos quedan inalterados y, por lo tanto, también los factores de potencia.
- En general, con las reducciones explicadas, no sufren alteraciones las potencias activas, las reactivas, ni las aparentes.⁶⁶

La reducción del secundario al primario equivale al estudio de un transformador de relación de número de espiras 1/1.

Nótese que, en la reducción al primario, se conservan las f.m.m. ya que únicamente se alteran los factores de secundario, resultando la tabla VI.

En la figura 33 se dibujado el diagrama vectorial de un transformador, con la nueva modalidad.⁶⁷

Tabla VI. **Las f.m.m. del circuito equivalente con y sin reducción**

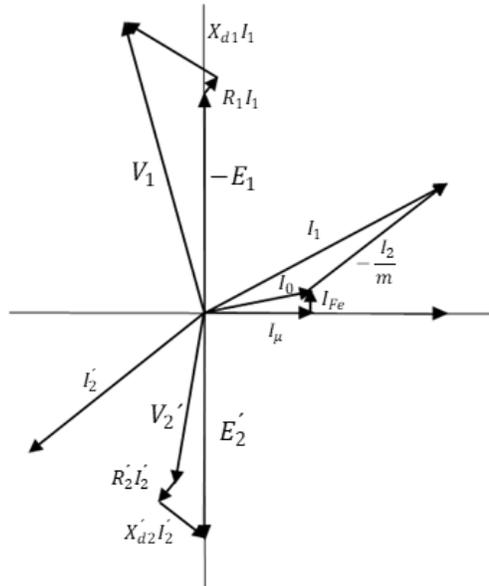
	No. Espiras	Corrientes	f.m.m.
Sin reducción	N_2	i_2	$N_2 i_2$
Con reducción	N_1	$i'_2 = \frac{N_2}{N_1} i_2$	$N_1 i'_2 = N_2 i_2$

Fuente: RAS OLIVA, Enrique. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. p.48.

⁶⁶ RAS OLVIDA, Enrique. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. p.47.

⁶⁷ *Ibíd.* p.48.

Figura 33. Diagrama vectorial del transformador reducido



Fuente: RAS OLIVA, Enrique. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. p.49.

Nótese que, hablando en términos de secundario referido al primario (transformador 1/1), se pueden sentar las siguientes afirmaciones:

La corriente del primario es igual a la de vacío más la del secundario.⁶⁸

$$I_1 = I_0 + I_2' \quad (83)$$

⁶⁸ RAS OLVIDA, Enrique, *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. p.49.

2.2.5. Regulación de voltaje del transformador

Debido a que un transformador real tiene impedancia serie dentro de él, su voltaje de salida varía con la carga, aunque el voltaje de entrada permanezca constante. Para comparar adecuadamente transformadores en este aspecto, se acostumbra definir una cantidad llamada regulación de voltaje (VR). La regulación de voltaje a plena carga es una cantidad que compara el voltaje de salida del transformador sin carga (en vacío) con el voltaje de salida del transformador a plena carga. Está definida por la ecuación:

$$VR = (V_{S,vacio} - V_{S,carga}) / V_{S,carga} \times 100\% \quad (84)$$

En general, una buena práctica es tener una regulación de voltaje tan pequeña como sea posible. Para un transformador ideal $VR = 0\%$. No siempre es una buena idea tener una baja regulación de voltaje ya que, a veces, se utilizan adrede transformadores de alta impedancia y alta regulación de voltaje, para reducir las corrientes de falla en un circuito.⁶⁹

2.2.6. Eficiencia del transformador

Los transformadores son comparados y juzgados por su eficiencia. Como en cualquier máquina eléctrica, la eficiencia es el cociente entre la potencia útil o potencia secundaria y la potencia total o de entrada en el primario. La eficiencia de un aparato está definida por la ecuación.⁷⁰

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \times 100\% \quad (85)$$

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{salida} + P_{perdida}} \times 100\% \quad (86)$$

2.2.6.1. Pérdidas en el transformador

Una máquina eléctrica presenta unas pérdidas fijas y unas pérdidas variables. Las pérdidas fijas se componen de las pérdidas mecánicas, que no existen en el transformador (al no poseer esta máquina órganos móviles), y las pérdidas en el hierro:

⁶⁹ CHAPMAN, STEPHEN J. *Maquinas eléctricas*. p.77.

⁷⁰ Ibid. p.78.

Perdidas por Histéresis: estas pérdidas son causadas por la resistencia del núcleo ferromagnético del circuito equivalente.

Perdidas por corrientes parasitas: estas pérdidas son causadas por la resistencia del núcleo ferromagnético del circuito equivalente.

Las pérdidas variables, que cambian según sea el régimen de carga, son debidas a las pérdidas en el cobre:

Perdidas en el cobre (I^2R): estas pérdidas son causadas por la resistencia en serie del circuito equivalente.

Los circuitos equivalentes del transformador facilitan los cálculos de eficiencia. Ambas pérdidas pueden obtenerse de los ensayos del transformador (Ensayo en vacío y Ensayo de cortocircuito). Se debe recordar que se cumple:

$$P_0 = P_{Fe} \quad \text{y} \quad P_{cc} = R_{cc}I_{2n}^2 \quad (87)$$

La segunda identidad representa las pérdidas en el cobre a plena carga, puesto que el ensayo de cortocircuito se realiza con corriente asignada (I_{2n}^2). En general, para una corriente secundaria I_2 ó reducida (I_2'), se cumplirá.⁷¹

$$P_{cc} = R_{cc}I_2'^2 \quad (88)$$

Como, la eficiencia es el cociente entre la potencia útil o potencia secundaria y la potencia total o de entrada en el primario, es decir la ecuación se reescribe de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{salida} + P_{Fe} + P_{Cu}} \times 100 \% \quad (89)$$

Si el secundario suministra una corriente I_2 a la tensión V_2 con el f.d.p. $\cos\varphi$, se tendrá:

$$P_{salida} = V_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (90)$$

Por consiguiente, la eficiencia del transformador, resulta ser la ecuación.⁷²

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} \times 100 \% \quad (91)$$

⁷¹ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.200.

⁷² *Ibid.* p.201.

2.2.6.1.1. IEEE C57.123-2002

En esta norma se describen más a detalle los requisitos de precisión, los procedimientos del código de prueba, varios métodos de prueba disponibles, métodos para diagnosticar anomalías de prueba y los procedimientos de calibración y seguridad de transformadores sumergidos en líquido, de potencia y regulación. Además, se aplica a transformadores monofásicos y trifásicos. Esta norma tiene como nombre:

IEEE Guide for Transformer Loss Measurement - IEEE Std C57.123-2002

2.2.6.1.2. IEEE C57.120-1991

Esta norma ha sido escrita para proporcionar un método para establecer factores de evaluación de pérdidas para transformadores o reactores. Con los factores de evaluación de pérdidas, el beneficio económico de una unidad, de alto costo y baja pérdida se puede comparar con otra unidad, con un costo más bajo y más alto pérdidas. Esto permite al usuario comparar las ofertas de dos o más fabricantes para ayudarlo, haciendo la mejor opción de compra entre transformadores o reactores competidores. La evaluación de pérdidas también proporciona información para establecer el momento óptimo para retirarse o reemplazar las existentes unidades con transformadores o reactores modernos de baja pérdida. Esta norma tiene como nombre:

IEEE loss evaluation guide for power transformers and reactors - IEEE Std
C57.120-1991

2.2.7. Valores por unidad para un transformador

Un sistema muy empleado para resolver circuitos de sistemas de potencia es el de Valor por unidad, en este caso se estudiará para los transformadores.

La solución de circuitos que contienen los transformadores puede ser una operación tediosa dada la necesidad de referir a un nivel común los distintos niveles de voltaje en los diferentes lados de los transformadores del sistema. Solo cuando haya sido ejecutado este paso, puede resolverse el circuito en cuanto a sus voltajes y corrientes.

Existe otro método para la solución de circuitos que contienen transformadores, el cual elimina la necesidad de hacer explícitas la conversión de nivel de voltaje en todos los transformadores del sistema. En su lugar, las conversiones necesarias se realizan automáticamente por el método en sí, sin que el usuario deba preocuparse por la transformación de las impedancias. Debido a que tales transformaciones de impedancias pueden omitirse, los circuitos que contienen muchos transformadores pueden resolverse fácilmente y riesgo mínimo de error. Este método de cálculo se conoce como sistema por Unidad(pu) de medida.

El sistema por unidad tiene otra ventaja que lo hace importante en el estudio de las máquinas y los transformadores eléctricos. Puesto que el tamaño de las máquinas y los transformadores son diversos, sus impedancias internas varían en gran medida. Por ejemplo, una reactancia primaria de $0,1 \Omega$ podría ser un número excesivamente grande para un transformador, pero, muy pequeño para otro; todo depende del voltaje y de la potencia nominales del aparato. Sin embargo, en un sistema por unidad relacionado con los valores nominales del aparato, las impedancias de las máquinas y los transformadores caen regularmente dentro de rangos estrechos de cada tipo y construcción.

En el sistema por unidad, voltajes, corrientes, potencias, impedancias y otras magnitudes no se miden en sus unidades SI (voltios, amperes, watts, ohmios, entre otros). En su lugar, cada magnitud eléctrica se mide como una fracción decimal de algún nivel base. En el sistema base por unidad, cualquier cantidad puede expresarse mediante la ecuación:

$$\text{Cantidad por unidad}(pu) = \frac{\text{Valor real}}{\text{Valor base}} \quad (92)$$

Donde el “valor real” es el valor en voltios, amperes, ohmios, watts, entre otros. Es costumbre seleccionar dos magnitudes base para definir el sistema por unidad. Las que se seleccionan usualmente son el voltaje y la potencia (o la potencia aparente). Una vez seleccionadas estas cantidades base, los otros valores base se relacionan con ellas por medio de las leyes eléctricas corrientes. En un sistema monofásico estas relaciones son:⁷³

$$P_{base}, Q_{base} \text{ o } S_{base} = V_{base} I_{base} \quad (93)$$

⁷³ CHAPMAN, STEPHEN J. *Maquinas eléctricas*. p.72.

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} \quad (94)$$

$$Y_{base} = \frac{I_{base}}{V_{base}} \quad (95)$$

$$Z_{base} = \frac{(V_{base})^2}{S_{base}} \quad (96)$$

Seleccionados los valores base de S (o P) y V, los demás valores base se pueden calcular con facilidad de las ecuaciones (93) a (96).⁷⁴

Cuando solo se analiza un aparato (transformador o motor), se utilizan normalmente sus propios valores nominales como base para el sistema por Unidad. Si se emplea un sistema por unidad basado en los valores nominales propios de un transformador, las características de un transformador de potencia o de distribución no variaran mucho en un amplio rango de valores nominales de potencia y voltaje.⁷⁵

Si más de una máquina y un transformador están presentes en un sistema de potencia, el voltaje y la potencia base se pueden escoger arbitrariamente, pero el sistema entero debe tener la misma base. Un procedimiento común es escoger las cantidades base del sistema tal que sean las mismas del componente más grande del sistema. Los valores en por unidad dados en otra base pueden expresarse en una nueva base, convirtiéndolos a sus valores reales (volts, amperes, ohms, entre otros). como paso intermedio. En forma alterna, se pueden convertir directamente mediante las ecuaciones.⁷⁶

$$(P, Q, S)_{pu \text{ en base } 2} = (P, Q, S)_{pu \text{ en base } 1} \frac{S_{base 1}}{S_{base 2}} \quad (97)$$

$$V_{pu \text{ en base } 2} = V_{pu \text{ en base } 1} \frac{V_{base 1}}{V_{base 2}} \quad (98)$$

$$(R, X, Z)_{pu \text{ en base } 2} = (R, X, Z)_{pu \text{ en base } 1} \frac{(V_{base 1})^2 (S_{base 2})}{(V_{base 2})^2 (S_{base 1})} \quad (99)$$

2.2.8. Curva de daño del transformador

La curva ANSI (American National Standard Institute), tiene como objetivo representar el máximo límite de protección del transformador y define los aspectos que deben de cumplir los devanados para soportar los esfuerzos magnéticos y térmicos causados por los cortocircuitos en sus terminales sin resultar dañados, considerando periodos definidos.

⁷⁴ CHAPMAN, STEPHEN J. *Maquinas eléctricas*. p.72.

⁷⁵ *Ibíd.* p.75.

⁷⁶ *Ibíd.* p.76.

Las normas ANSI/IEEE Std. C57.12.00-2010 y IEEE Std. C57.109-1993 recomiendan la protección basada en el tamaño del transformador y el número de fallas directas estimadas en el transformador que se esperan encontrar. Las curvas de protección de fallas directas contenidas en la norma IEEE Std. C57.109-1993 son utilizadas como base para el ajuste de relevadores de protección de sobrecorriente para transformadores sumergidos en líquido aislante.

Las curvas representativas del límite térmico para transformadores tipo seco contenidas en la norma IEEE Std. C57.12.59-2001 son utilizadas como base para el ajuste de relevadores de protección de sobrecorriente.

Este documento nos ayuda a establecer las protecciones necesarias de sobrecorriente que ayuden a limitar el tiempo corriente de cortocircuito en el transformador, impidiendo que exista algún daño: para esto, los transformadores se clasifican en cuatro categorías como se muestra en la tabla VII.⁷⁷

Tabla VII. Clasificación de los transformadores

Categoría del Transformador		
KVA nominales de placa (Devanado Principal)		
Categoría	Monofásico	Trifásico
I	5-500	15-500
II	501-1 667	501-5 000
III	1 668-10 000	5 001-30 000
IV	arriba de 10 000	arriba de 30 000

Fuente: MERCADO TORRES, Felipe de Jesús; SALAS AQUINO, Cristian; SOLIS OVERA, Omar. *Tesis: Análisis de la Protecciones para un Transformador de 85/23Kv, 30 MVA, en conexión Delta-Estrella.* p. 18.

Los transformadores con categoría I y IV cuentan con una sola curva de daño de donde se observan los efectos mecánicos y térmicos, mientras los transformadores con categoría II y III cuentan con dos curvas de daño; esto debido a las ocurrencias y niveles de corriente de falla, así como el tiempo de vida; en donde se observan los efectos mecánicos y térmicos.

Cuando los transformadores son afectados por fallas continuamente se representan por dos porciones de curva: una parte solida donde se expresa la duración de la falla alcanzada por el daño térmico y una parte punteada donde se observa los efectos mecánicos.

⁷⁷ MERCADO TORRES, Felipe de Jesús. *Análisis de la Protecciones para un Transformador de 85/23Kv, 30 MVA, en conexión Delta-Estrella.* p. 17.

La curva de los transformadores se puede obtener gracias a las ecuaciones de la tabla VIII, de acuerdo con la categoría se obtienen 2 o 4 puntos respectivamente como se puede observar en la figura 34.⁷⁸

Tabla VIII. **Ecuaciones para el cálculo de los puntos de la curva de daño**

Punto	Categoría	Tiempo	Corriente
1	I	$T = 1250(Zt)^2$	$I = \frac{In}{Zt}$
	II, III, IV	$T = 2$	
2	II	$T = 4.08$	$I = \frac{In}{Zt}(0.7)$
	III, IV	$T = 8.0$	$I = \frac{In}{Zt + Zs}(0.5)$
3	II	$T = 2551(Zt)^2$	$I = \frac{In}{Zt}(0.7)$
	III, IV	$T = 5000(Zt + Zs)^2$	$I = \frac{In}{Zt + Zs}(0.5)$
4	I, II, III, IV	$T = 50$	$I = \ln(5)$
Parte de la curva térmica	I, II, III	$T = 60$	$I = \ln(4.75)$
		$T = 300$	$I = \ln(3)$
		$T = 1800$	$I = \ln(2)$

Fuente: MERCADO TORRES, Felipe de Jesús; SALAS AQUINO, Cristian; SOLIS OVERA, Omar. *Análisis de la Protecciones para un Transformador de 85/23Kv, 30 MVA, en conexión Delta-Estrella*. p. 19.

Donde:

T= Tiempo en segundos.

I= Corriente en amperes.

Zt = Impedancia del transformador en pu en base a los kVA con enfriamiento OA.

Zs = Impedancia de la fuente en pu en base a los kVA con enfriamiento OA.

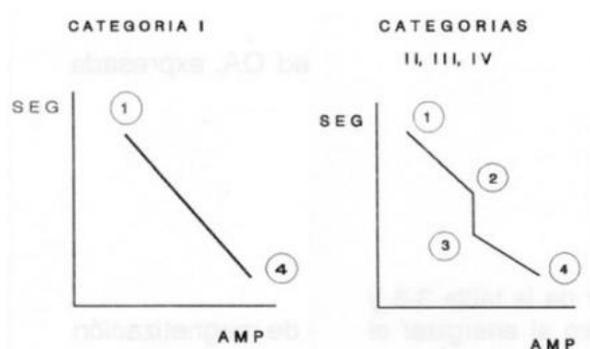
In = Corriente en Amperios a plena carga en base a su capacidad con enfriamiento OA.

⁷⁸ MERCADO TORRES, Felipe de Jesús. *Análisis de la Protecciones para un Transformador de 85/23Kv, 30 MVA, en conexión Delta-Estrella*. p. 18.

La curva de daño del transformador o también conocida como curva Z, es una representación gráfica de las corrientes y tiempos que los transformadores son capaces de soportar sin dañarse.

Al calcular los puntos de la curva ANSI es necesario verificar que la impedancia del transformador no sea menor a las indicadas en la tabla IX.⁷⁹

Figura 34. **Puntos de la curva de daño del transformador obtenida de la norma ANSI-IEEE C57.109-1993**



Fuente: MERCADO TORRES, Felipe de Jesús; SALAS AQUINO, Cristian; SOLIS OVERA, Omar. *Tesis: Análisis de la Protecciones para un Transformador de 85/23Kv, 30 MVA, en conexión Delta-Estrella.* p.19.

⁷⁹ MERCADO TORRES, Felipe de Jesus. *Análisis de la Protecciones para un Transformador de 85/23Kv, 30 MVA, en conexión Delta-Estrella.* p. 18.

Tabla IX. **Impedancias mínimas**

Monofásico (kVA)	Trifásico (kVA)	Impedancia mínima Z_t en por unidad en base a los kVA del transformador
5- 25	15-75	0,0250
37,5-100	112,5-300	0,0286
167	500	0,0400

Fuente: MERCADO TORRES, Felipe de Jesús; SALAS AQUINO, Cristian; SOLIS OVERA, Omar. *Tesis: Análisis de la Protecciones para un Transformador de 85/23Kv, 30 MVA, en conexión Delta-Estrella.* p.19

2.3. Proyecto de instalación de transformador

Se describe en esta parte las protecciones del transformador y también su función dentro del sistema eléctrico de potencia.

2.3.1. Esquema de protección

A continuación, se describe en que se basan la protección diferencial y de sobrecorriente del transformador.

2.3.1.1. Protección diferencial del transformador

La protección diferencial está basada en la medida de las intensidades antes y después del transformador, adaptándolas en magnitud y ángulo de fase y comparándolas en el relé. Cuando se sobrepasa una relación ajustable entre la intensidad de "paso" y la diferencial, el relé actúa. El esquema de protección diferencial se muestra en la figura 35. Son los mismos de toda protección diferencial, en las cuales se monitorea que la corriente que entra sea igual a la corriente que sale, pero presenta algunas dificultades que no se encuentran en la protección diferencial de generadores.⁸⁰

⁸⁰ GRANERO, Andrés. *Protección diferencial de transformadores (ANSI 87 T).* p.1

Figura 35. **Esquema simplificado de un relé diferencial para transformador de potencia**



d = Devanado diferencial, S = Devanado de retención del relé, Id = Corriente diferencial,
I2= Corriente secundaria, I1 = Corriente primaria

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Un relé de protección diferencial moderno va provisto de retención con pendiente porcentual y bloqueo o frenado al 2º y 5º armónico. La retención por pendiente porcentual, (s) distingue con precisión entre faltas internas y externas al transformador, mientras que el bloqueo de armónicos retiene con una determinada temporización las sobreintensidades de origen externo, con objeto de evitar disparos intempestivos de la instalación a consecuencia de corrientes transitorias magnétizantes, producidas, por ejemplo, al conectar el transformador a la red (sobre todo en vacío). En definitiva, el relé no debe funcionar ni en el momento de la conexión del transformador ni en el caso de cortocircuitos externos (corrientes «pasantes»). En cambio, deberá ser rápido y sensible a los defectos que ocurren dentro de su campo de acción delimitado por los transformadores de intensidad primarios y secundarios. La figura 36 muestra el momento de actuar de la protección diferencial.⁸¹

La protección diferencial de transformador protege contra cortocircuitos entre arrollamientos, también detecta cortocircuitos entre espiras de una misma fase, debido a que en este caso también se altera la relación de transformación cambiando la relación entre la corriente de entrada y la de salida, lo que da lugar a una corriente diferencial, cuya magnitud depende del número de espiras cortocircuitadas, el relé actuara dependiendo de la sensibilidad del tarado.

Si el neutro del transformador está aislado de tierra, la protección diferencial puede utilizarse para proteger contra defectos a tierra, en este caso es necesario que la protección sea suficientemente sensible, al igual que para el caso en que la corriente de defecto esté limitada por una impedancia.⁸²

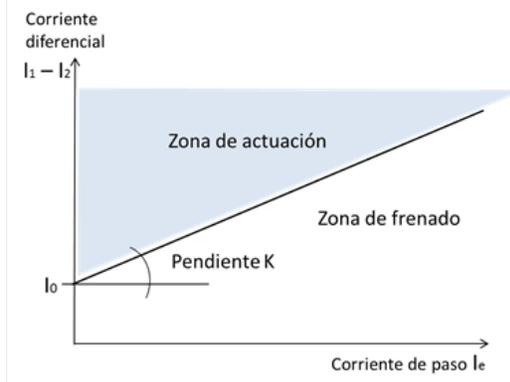
⁸¹ GRANERO, Andrés. *Protección diferencial de transformadores (ANSI 87 T)*. p.2.

⁸² *Ibíd.* p.3

El funcionamiento de la protección diferencial de transformador es muy rápido, aproximadamente 30 ms, lo que permite evitar el deterioro del transformador en caso de cortocircuito entre arrollamientos.⁸³

La protección se activa cuando $I_1 - I_2 > KI_e + I_0$

Figura 36. **Principio de actuación de la protección diferencial de transformador**



Fuente: GRANERO, Andrés, *Protección diferencial de transformadores (ANSI 87 T)*. p.2.

A continuación, se describen las dificultades que se encuentran para la aplicación de la protección diferencial de transformadores:

Corriente de energización del transformador. Al energizar el transformador fluye una corriente de magnetización que puede tener muy alta magnitud, y que solo se mantiene durante unos cuantos ciclos después de cerrar el interruptor. La magnitud y duración de esta corriente depende de varios factores entre los cuales están:⁸⁴

- El tamaño del transformador.
- El tamaño del sistema eléctrico donde está instalado el transformador.
- La resistencia equivalente del sistema de potencia entre la fuente y el punto donde está localizado el transformador.

⁸³ GRANERO, Andrés. *Protección diferencial de transformadores (ANSI 87 T)*. p 3.

⁸⁴ MORALES MAZARIEGOS, Juan Fernando. *Elementos básicos de protección de sistemas de potencia*. p.153.

- Las características del material magnético con el que está fabricado el núcleo.
- El flujo en el núcleo del transformador.

El punto en el que va la onda senoidal de voltaje, cuando se energiza el transformador.

El valor de la corriente de energización del transformador puede llegar en algunos casos a valores que van desde 8 hasta 30 veces la corriente nominal.

El problema que presenta este fenómeno a la aplicación de la protección diferencial es que, por ser una corriente de magnetización, entra al transformador, pero no sale. Lo descrito anteriormente podría ocasionar el disparo sin que existiera falla.

Por ser la corriente de energización una corriente de magnetización no es senoidal y se caracteriza por el alto contenido de armónicas, por lo que este problema se ha solucionado colocando filtros de armónicas en las entradas del relevador diferencial.⁸⁵

Diferentes niveles de voltaje. Cuando se coloca la protección diferencial de transformador, es necesario colocar los transformadores de corriente en diferentes niveles de voltaje ya que hasta para el caso más sencillo de un transformador de dos devanados, un juego se conecta en el lado de alta tensión y otro juego en el lado de baja.

En transformadores con conexión delta en uno de los lados y estrella en el otro, adicional a la compensación por magnitud, debe de compensarse la diferencia angular que existe entre las corrientes de los dos lados. En estos casos los transformadores de corriente del lado de la delta se conectan en estrella y los del lado de la estrella se conectan en delta, debiendo tener cuidado en este último caso de tomar en cuenta que las corrientes que llegan al relevador son el resultado de una suma vectorial.⁸⁶

Desplazamiento angular en transformadores delta-estrella y estrella-delta. En la figura 37 se muestran los factores de corriente en los devanados de un transformador conectado delta en el primario y estrella aterrizada en el secundario. En esta figura se puede observar que el fasor I_a del devanado en el secundario está en fase con el fasor I'_a del devanado primario, lo mismo sucede con I_b que está en fase con I'_b e I_c que está en fase con I'_c . Como se muestra en la tabla X.⁸⁷

⁸⁵ MORALES MAZARIEGOS, Juan Fernando. *Elementos básicos de protección de sistemas de potencia*. p.153.

⁸⁶ *Ibíd.* p.154.

⁸⁷ *Ibíd.* p.156.

Tabla X. **Fasor del devanado secundario en fase con el fasor del devanado primario**

I_a	En fase con	I'_a
I_b	En fase con	I'_b
I_c	En fase con	I'_c

Fuente: MORALES MAZARIEGOS, Juan Fernando. *Elementos básicos de protección de sistema se potencia*. p.156.

Las corrientes que no están en fase son las corrientes de línea porque, mientras en las líneas a, b y c del secundario circulan las corrientes I_a , I_b e I_c respectivamente, en las líneas primarias 1, 2 y 3 circulan las corrientes $I'_a-I'_c$, $I'_b-I'_a$ e $I'_c-I'_b$ respectivamente.

Las únicas corrientes que estarán en fase con las corrientes de línea en lado de la delta serán las de la tabla XI:

Tabla XI. **Corrientes en fase con las corrientes de línea en lado de delta**

I_a-I_c	En fase con	$I'_a-I'_c$
I_b-I_a	En fase con	$I'_b-I'_a$
I_c-I_b	En fase con	$I'_c-I'_b$

Fuente: MORALES MAZARIEGOS, Juan Fernando. *Elementos básicos de protección de sistema se potencia*. p.156.

Y eso es precisamente lo que se hace, conectar los secundarios de los transformadores de corriente, de tal forma que, en el lado de la estrella del transformador, se puedan obtener corrientes que estén en fase con las corrientes de línea del lado de la delta del transformador.⁸⁸

⁸⁸ MORALES MAZARIEGOS, Juan Fernando. *Elementos básicos de protección de sistemas de potencia*. p.156.

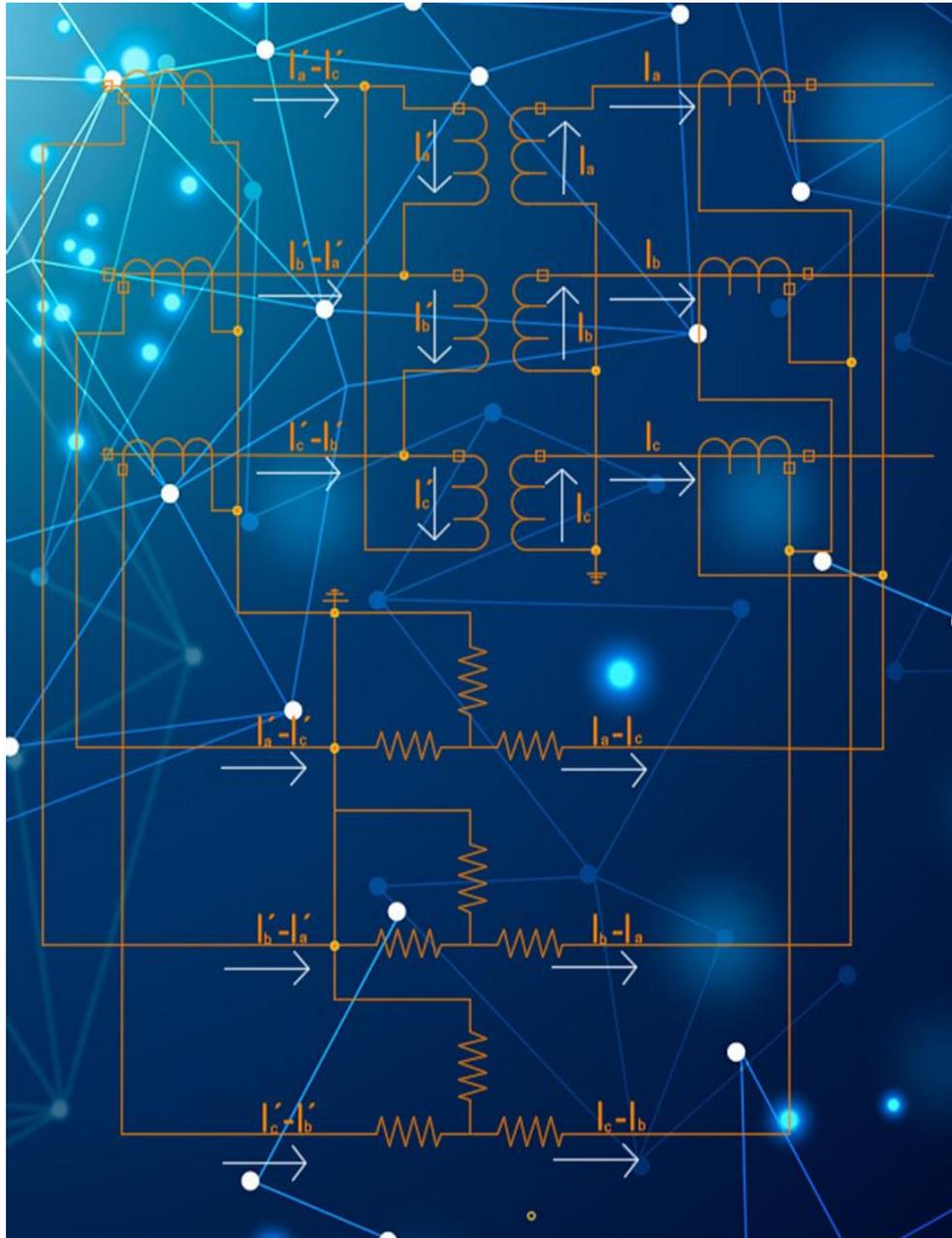
Figura 37. **Desplazamiento angular de los fasores de corriente de línea en transformadores conectados delta/estrella y estrella/delta**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Las conexiones se muestran en la figura 38.

Figura 38. Faseo relevador diferencial del transformador



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

2.3.1.2. Protección contra sobrecorriente

Los fusibles pueden proteger adecuadamente a los pequeños transformadores, pero los más grandes requieren protección contra sobrecorriente mediante un relé, ya que los fusibles no tienen la capacidad requerida para romper fallas.

Fusibles. Los fusibles comúnmente protegen pequeños transformadores de distribución típicamente hasta clasificaciones de 1 MVA en voltajes de distribución. En muchos casos, no se proporciona ningún disyuntor, lo que hace que la protección de fusibles sea el único medio disponible de aislamiento automático.

El fusible debe tener una calificación muy por encima de la corriente máxima de carga del transformador para soportar las sobrecargas de corta duración que pueden ocurrir. Además, los fusibles deben soportar las corrientes de entrada de magnetización dibujadas cuando los transformadores de potencia están energizados.⁸⁹

Relevadores de Sobrecorriente. Es un dispositivo que se utiliza para detectar corrientes con valores por encima de lo que se considera aceptable y cuando esto sucede inicia la operación para aislar el área correspondiente.

Relevadores de sobrecorriente de tiempo definido. Operan cuando la corriente llega a un valor predeterminado y tardan un tiempo definido para efectuar su operación sin tomar en cuenta el valor de la corriente.

Relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso. Estos operan cuando la corriente llega a un valor predeterminado, sin embargo, tienen la característica que conforme crece el valor de la corriente, se reduce el tiempo de operación.

Por el tipo de tecnología utilizado existen 2 tipos:

- Electromecánico
- Estado Sólido

Relevador electromecánico de sobrecorriente de tiempo inverso. Este tipo de relevador utiliza el principio del motor de polo sombreado en donde el estator está formado por un núcleo de material ferromagnético, la bobina de corriente, un magneto para amortiguar el movimiento del disco, un contacto fijo, bobinas en corto circuito (polo sombreado); y el rotor que es un disco de material conductor similar al de los medidores de kWh que gira sobre un eje y sobre el cual está montado el contacto móvil.⁹⁰

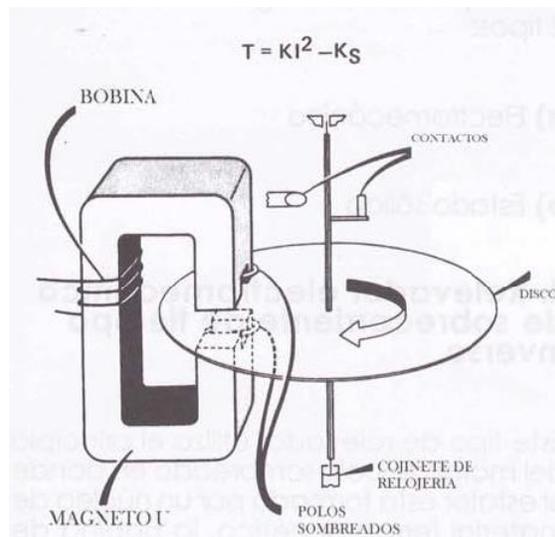
⁸⁹ Energía y poder para todos. *Relé de protección del transformador de potencia (sobrecorriente, falla a tierra restringida y diferencial)*. <https://crushtymks.com/es/electrical-lectures/140-power-transformer-protection-relaying-overcurrent-restricted-earth-fault-038-differential.html#fuses>. Consulta: octubre 2019.

⁹⁰ MORALES MAZARIEGOS, Juan Fernando. *Elementos básicos de protección de sistema se potencia*. p.43.

El rotor tiene también un resorte de espiral que restaura el contacto móvil a su posición original cuando la corriente se reduce por debajo del valor de arranque.

Las componentes del relevador se pueden ajustar de tal manera que por su bobina pueda circular corriente de valor I_0 sin que el disco se mueva, pero cuando llegue a un valor 1, el disco comience su movimiento llevando el contacto móvil en dirección del contacto fijo.⁹¹

Figura 39. **Relevador de corriente electromagnético**



Fuente: MORALES MAZARIEGOS, Juan Fernando. *Elementos básicos de protección de sistema se potencia*. p. 44.

El valor del torque en el rotor es función del número de vueltas en la bobina de corriente N , y de la magnitud de la corriente circulando en esta.

$$Fuerza = f(N, I) \quad (100)$$

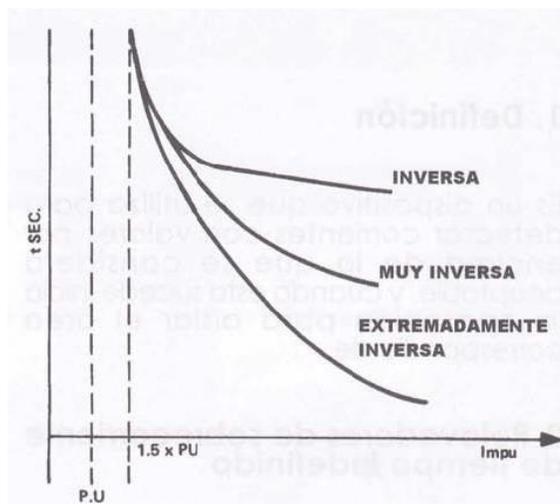
Si se mantiene constante el número de vueltas y se aumenta la corriente I , se incrementará el torque que mueve el contacto móvil obligándolo a que se mueva rápido, y tarde un tiempo menor en tocar el contacto fijo. Conforme aumenta la corriente fluyendo por la bobina, se disminuye el tiempo que tarda el contacto móvil en tocar el fijo. Las formas de curvas típicas de funcionamiento se muestran en la figura 40.⁹²

⁹¹ MORALES MAZARIEGOS, Juan Fernando. *Elementos básicos de protección de sistema se potencia*. p. 43.

⁹² *Ibíd.* p. 44.

El tiempo de operación, a su vez depende de la posición de arranque de disco. Si el disco arranque de una posición más alejada, se demora más en llegar a la posición de cierra de contactos para la misma corriente. Esta circunstancia se aprovecha para cambiar el tiempo de operación del relé (Dial). Fijar el relé significa fijar su tap y su dial.⁹³

Figura 40. Tipos de curvas de relevadores de sobrecorriente



Fuente: MORALES MAZARIEGOS, Juan Fernando. *Elementos básicos de protección de sistema se potencia*. p.44.

2.3.1.2.1. Protección según la Norma IEEE C37.91-2000

Esta guía está destinada a proporcionar a los ingenieros de protección y otros lectores pautas para proteger los transformadores de potencia trifásicos de más de 5 MVA de capacidad nominal y que operan a voltajes superiores a 10 kV. En algunos casos, un usuario puede aplicar las técnicas descritas en esta guía para proteger transformadores de menos de 5 MVA o que operen con voltajes de

⁹³ MORALES MAZARIEGOS, Juan Fernando. *Elementos básicos de protección de sistema se potencia*. p.44.

menos de 10 kV. En esta guía se proporciona información para ayudar a los ingenieros de protección a aplicar relés y otros dispositivos para proteger los transformadores utilizados en los sistemas de transmisión y distribución. Se discute la filosofía general, las aplicaciones prácticas y las consideraciones económicas involucradas en la protección del transformador de potencia. Se hace hincapié en las aplicaciones prácticas. Se describen los tipos de fallas en los transformadores. Se discuten los problemas técnicos con los sistemas de protección, incluido el comportamiento de los transformadores de corriente durante las fallas del sistema. También se discuten los problemas asociados, como la eliminación de fallas y la Re-energización.

2.3.2. El transformador como parte del sistema eléctrico de potencia

Se define y describe la función del transformador dentro del sistema eléctrico de potencia.

2.3.2.1. Descripción del sistema eléctrico de potencia

El sistema eléctrico de potencia es un conjunto de elementos que tiene como fin generar, transformar, transmitir, distribuir y consumir la energía eléctrica de tal forma que se logre la mayor calidad al menor costo posible.

Todo el recorrido de un sistema eléctrico de potencia está definido por 4 partes principales:

- Generación.

- Transmisión.
- Subtransmisión.
- Distribución.

Generación. Es la transferencia de cualquier forma de energía (química, cinética, térmica, lumínica, nuclear, solar entre otras) a energía eléctrica. Los generadores se encargan de esto, se le entrega energía mecánica (mover su eje) para transformarla en energía eléctrica y así producir electricidad.

La energía primaria se refiere a todas las fuentes de energía naturales en su forma original e inalterada. El término energía primaria incluye energías renovables como la energía solar, la energía eólica e hidráulica, la energía geotérmica, la energía mareomotriz y la biomasa (materiales animales y vegetales como la madera), fotovoltaicas, pero también los depósitos de carbón natural, gas natural, petróleo y uranio.⁹⁴

Transmisión. Toda la electricidad producida en los centros de generación se debe transportar hacia los grandes centros poblados, que por lo general se encuentran bastante alejados, uno del otro. Para realizar esta labor de forma eficiente se eleva el voltaje, por medio de transformadores, y se utilizan grandes torres metálicas para sujetar los cables que la transportan.

Subtransmisión. Una vez que nos aproximamos a los centros poblados, es necesario reducir el voltaje a valores menores por medio de transformadores reductores. Para facilitar así el transporte de energía a los grandes centros industriales y residenciales de las ciudades.

Distribución. Finalmente, y para poder llegar a cada uno de los hogares, centros comerciales e industrias, se vuelve a reducir el voltaje. De esta forma es mucho más sencillo, económico y seguro, transportar la energía eléctrica a cada rincón del pueblo, urbanización o ciudad. En esta etapa se reduce el voltaje a valores comerciales (120 Volt, 240 Volt, 440 Volt), por medio de transformadores instalados directamente en los postes por donde se transporta la energía eléctrica.⁹⁵

⁹⁴ VAILLANT, ¿Que es la energía primaria? <https://www.vaillant.es/usuarios/servicios/glosario/energia-primaria/#:~:text=El%20t%C3%A9rmino%20energ%C3%ADa%20primaria%20incluye,gas%20natural%2C%20petr%C3%B3leo%20y%20uranio.> Consulta: octubre 2019

⁹⁵ Materias. *Energía eléctrica.* [http://materias.fi.uba.ar/7106/Resumen0501/Energia%20Electrica.](http://materias.fi.uba.ar/7106/Resumen0501/Energia%20Electrica) Consulta: octubre 2019.

2.3.2.2. Función del transformador en el sistema de potencia

Se describe a continuación, el transformador dentro de la parte de transmisión y dentro de la parte de distribución.

2.3.2.2.1. El transformador en la parte de transmisión

Son aquellos transformadores que manejan grandes magnitudes de voltio amperios VA, los cuales se expresan en KVA [kilo voltio amperios] o en MVA [mega voltio amperios]. Usualmente se considera un transformador de potencia cuando su capacidad es de un valor a partir de: 500 KVA, 750 KVA, 1 000 KVA, 1 250 KVA o 1,25 MVA, hasta potencias del orden de 500 MVA monofásicos y de 650 MVA, 900 MVA trifásicos. Estos últimos operan en niveles de voltaje de 500 KV, 525 KV y superiores.⁹⁶

Son los que se utilizan para subestaciones y transformación de energía en media y alta tensión. Se aplican en subestaciones, centrales de generación y usuarios de grandes potencias. Se construyen en potencias, voltajes y frecuencias estandarizadas según la región o país en donde va trabajar.⁹⁷

Los transformadores de potencia se tienen dos elementos principales que son:

Núcleo. Es uno de los elementos más importantes que permiten el funcionamiento de los transformadores de potencia. El núcleo está constituido por diferentes elementos como las chapas de acero al silicio, columnas y culatas. Cada uno de estos fragmentos realiza una función específica e imprescindible para mantener en perfecto estado el funcionamiento de los transformadores de potencia.

Devanados. Es un hilo de cobre enrollado a través del núcleo del transformador de potencia. Los devanados suelen estar cubiertos de una capa aislante. Los devanados también se denominan bobinas y pueden ser primarios o secundarios, según corresponda a la entrada o salida del sistema en cuestión. También hay transformadores de potencia con más devanados.⁹⁸

⁹⁶ TRACOL. *¿Qué es un transformador?*, <https://tracol.com.co/index.php/pqrs#:~:text=Un%20transformador%20de%20potencia%20es,MVA%20%5Bmega%20voltio%20amperios%5D>. Consulta: octubre 2019.

⁹⁷ APCETECH. *El transformador eléctrico*. <http://www.apcotech.com/BLOG/uncategorized/el-transformador-electrico/>. Consulta: octubre 2019.

⁹⁸ CTCTRAFO. *Transformadores de potencia*. <http://www.ctctrafo.es/transformadores-de-potencia/>. Consulta: octubre 2019.

Los transformadores de potencia pueden ser de dos tipos:

Transformadores de tipología seca. Este tipo de transformador se usa sobre todo en interiores y en espacios concretos, de tamaño reducido y dimensiones especiales. Otro uso muy extendido de los transformadores de potencia de tipo seco es su uso en caso de incendios. La principal característica de los transformadores de potencia de tipo seco es que son refrigerados con aire y con aislamiento.

Transformadores de potencia en aceite. La principal característica de este tipo de transformador de potencia es que el núcleo ferromagnético está en aceite. Los transformadores de potencia en aceite tienen un núcleo, un tanque, intercambiadores de calor, bombas y depósitos para el aceite.⁹⁹

2.3.2.2.2. El transformador en la parte distribución

En la parte de distribución, se denomina transformadores de distribución a los transformadores de potencia iguales o inferiores a 500 KVA, tanto monofásicos como trifásico, son diseñados bajo normas internacionales ANSI/IEEE C57.12.

En todo sistema de potencia, los transformadores de distribución son la última fase para la utilización de la energía eléctrica en alta o baja tensión. Reducen la tensión primaria generada por la planta de energía a la tensión de utilización para los consumidores; por lo general un paso por debajo de 11, 22 o 33 kV a 230 o 433 V.

La gran mayoría de estos transformadores son proyectados para trabajar montados sobre postes, algunos de los tamaños de potencia superior, son construidos para trabajar en subestaciones o en plataformas. Su utilización generalmente es para proveer de energía a residencias, edificios, centros comerciales, fincas, almacenes públicos, talleres, entre otros.¹⁰⁰

Dentro de los transformadores de distribución existen cuatro tipos: tipo pedestal, tipo subestación, tipo sumergible y tipo poste. De entre estos el transformador de distribución tipo poste es el más comúnmente empleado en los sistemas de distribución. Sin embargo, el procedimiento de cálculo del diseño constructivo del conjunto núcleo bobina, prácticamente es el mismo para los cuatro tipos, solo hay cambios en su presentación externa, ósea en la configuración de su tanque o cuba, y de los accesorios adicionales.¹⁰¹

⁹⁹ CTCTRAFO. *Transformadores de potencia*. <http://www.ctctrafo.es/transformadores-de-potencia/>. Consulta: octubre 2019.

¹⁰⁰ PRECIADO MITE. *Gustavo Jonathan. Diseño para la construcción de los transformadores de distribución monofásico tipo tanque*. 7 p.

¹⁰¹ *Ibíd.* 8 p.

Un transformador de distribución generalmente se compone de cuatro partes básicas:

Bobina primaria: La bobina primaria, la primera parte integrante de un transformador de distribución, se compone de cable de cobre recubierto con esmalte y enrollado alrededor de un núcleo magnético. La corriente entrante de baja, de alta tensión alterna a partir de la planta de energía fluye a través del cable y en el proceso genera un flujo magnético.

Bobina secundaria: El flujo magnético producido en la bobina primaria (o devanado primario) desarrolla un campo magnético en una bobina secundaria. Las bobinas secundarias consisten en aluminio o cobre en una cinta de espesa, con un aislamiento de papel impregnado con resina. Similar a la bobina primaria, estas cintas de aluminio o de cobre se enrollan alrededor de un imán. El campo magnético generado en la bobina secundaria induce una corriente de alta corriente y baja tensión alterna en la cinta, que fluye hacia fuera del transformador como energía lista para usar.

Núcleo magnético: Un transformador de distribución no funcionará sin un núcleo magnético, el tercer elemento clave. Este imán en forma de "C" o "E" permite la generación del campo magnético en la bobina secundaria del flujo magnético en la bobina primaria. La base está hecha de pilas de láminas de chapa de acero que la mantiene unida mediante correas de acero o resina. Este núcleo magnético, así como las bobinas primaria y secundaria comprenden partes activas del transformador de distribución y son responsables de la regulación de la tensión.

Tanque: Por último, un tanque de acero con recubrimiento en polvo y una junta sellada sirve como el paquete mecánico o contenedor de protección para las partes activas del transformador. Tiene un aceite mineral no conductor inerte, que sirve de refrigeración y protección contra la humedad, y en el que se sumerge el conjunto de la bobina de núcleo. El depósito también contiene buje, y en algunos casos equipos auxiliares para el transformador. Una vez sellado, el tanque está instalado en un poste de electricidad o en una base de concreto de acero revestido colocado bajo la tierra.

Como se puede observar según la clasificación de los transformadores se puede resumir que en si los transformadores de potencia y de distribución son el en teoría el mismo artefacto, sin embargo, la potencia con la cual estos trabajan es lo que lo diferencia el uno del otro y tenemos que esa diferencia o límite entre ellos va hacer de 500 KVA.¹⁰²

¹⁰² ANDREWS, Natalie. *Partes de un transformador de distribución*. <https://www.geniolandia.com/13147454/partes-de-un-transformador-de-distribucion>. Consulta: octubre 2019.

3. APLICACIÓN DE CONCEPTOS

En este capítulo se presentarán una serie de preguntas y ejemplos que servirán al estudiante para mejor comprensión de los temas expuestos en el anterior capítulo.

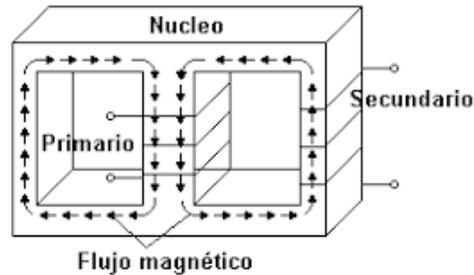
3.1. Aplicación de introducción a los transformadores

A partir de lo expuesto sobre los transformadores, se desarrolla esta parte, donde se deja ilustrada esta máquina y su composición.

3.1.1.1. Ejercicios de comparación de transformadores

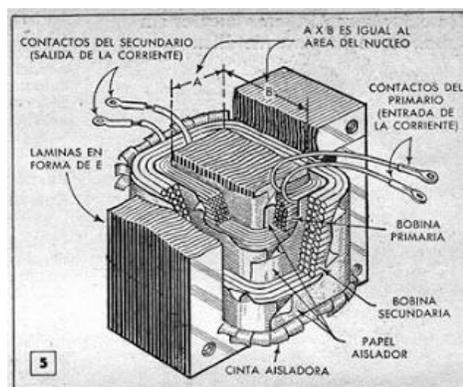
A manera de reconocer cualquier transformador se mostrarán las partes principales que lo componen, como lo son el núcleo, devanado de entrada o primario y el devanado de salida o secundario.

Figura 41. **Ejemplo 1 de composición de un Transformador**



Fuente: Labc.usb. *maquinas eléctricas*. <http://www.labc.usb.ve/paginas/mgimenez/Ec1181ele/Material/Trasformadores/Transformador.PDF>. Consulta: 15 de noviembre de 2019.

Figura 42. **Ejemplo 2 de composición de un Transformador**



Fuente: blogspot, *Transformador*. construcciondeuntransformador.blogspot.com/. Consulta: 15 de noviembre de 2019.

3.1.2. **Ejercicios de tipos y construcción de transformadores**

Conforme al tema del diseño del transformador, se resume para mayor practica las partes que lo conforman.

3.1.2.1. Ejercicio de diseño de un transformador

A continuación, se presentan una serie de preguntas que tienen como objetivo resumir la conformación del transformador:

- ¿Cuáles son las partes principales del transformador?

Núcleo, Devanados, Sistema de refrigeración y aislantes pasantes.

- ¿Qué es el núcleo del Transformador?

Es la parte que forma el circuito magnético y está constituido por chapas de acero al Silicio, laminadas en frío, que han sido sometidas al tratamiento Carlite, que recubre de una capa muy delgada lo que reduce las pérdidas en el hierro.

- ¿Cómo está compuesto el circuito magnético del transformador?

Está compuesto por columnas que son las partes donde se montan los devanados y las culatas, que son las partes que unen las columnas.

- ¿Según la posición relativa entre el núcleo y el devanado como se clasifican los transformadores?

Acorazados y de Columnas.

- ¿Qué son los devanados del Transformador?

Constituyen el circuito eléctrico y se realizan por medio de conductores de cobre, en forma de hilos redondos o de sección rectangular cuando se requieren de mayor capacidad.

- ¿Qué es el sistema de refrigeración del Transformador?

Es el sistema que evita que existan una serie de pérdidas, debido a altas temperaturas y que puedan afectar la vida de los aislamientos de los devanados.

3.1.2.2. Ejercicio para identificar el número de fases

Se propone un ejercicio donde se muestran varias figuras de los transformadores monofásicos y trifásicos a manera de que el estudiante pueda identificar y diferenciar la composición física de cada uno:

Figura 43. Transformador monofásico



Fuente: rte, *Transformadores de corriente*. <https://rte.mx/transformadores-de-corriente-2>.

Consulta: 15 de noviembre de 2019.

Figura 44. **Transformador monofásico de aislamiento**



Fuente: Ticaplus, *Transformador aislamiento tri-tri 20kvas sin envolvente*.
<https://www.ticaplus.com/sistemas-distribucion-electrica/5634-transformador-aislamiento-tritri-20kvas-sin-envolvente.html>. Consulta: 15 de noviembre de 2019.

Figura 45. **Transformador monofásico tipo poste**



Fuente: Alianza eléctrica. *Transformador monofásico tipo poste convencionales 13200v 2 boquillas norma k*. <https://tienda.alianzaelectrica.com/products/copia-de-transformadores-tipo-poste-monofasicos-autoprotegido-13200v-2-boquillas-acero-al-carbon>. Consulta: 15 de noviembre 2019.

Figura 46. **Transformador trifásico 75 kVA /12 KV**



Fuente: Tecnored. *Transformador trifásico 75kVA 12Kv.*

www.tiendatecnored.cl/media/catalog/product/cache/1/image/650x/040ec09b1e35df139433887a97daa66f/3/8/3801046_1.jpg. Consulta: 15 de noviembre 2019.

Figura 47. **Transformador trifásico de aislamiento**



Fuente: Torytrans. *Transformador trifásico.*

www.torytrans.com/fileadmin/user_upload/productos/imagenes/transformador-trifasico-aislamiento-1013af__62_.jpg. Consulta: 15 de noviembre de 2019.

Figura 48. **Transformador trifásico alta tensión**



Fuente: Riegos Patrimoniales. *Transformadores.*

<https://prevencionrimac.com/riesgopatrimoniales/Herramientas/Causa-siniestros/Rotura-maquinaria/Transformadores>. Consulta: 15 de noviembre de 2019.

Figura 49. **Transformador trifásico de potencia de alta tension**



Fuente: Dreamstime. *Transformador de poder de alto voltaje.* <https://es.dreamstime.com/stock-de-ilustraci%C3%B3n-transformador-de-poder-de-alto-voltaje-image55054468>. Consulta: 15 de noviembre 2019.

3.1.2.3. Ejercicios para identificar el tipo de operación

En esta parte a manera de ejercicio se muestran varias figuras de los transformadores de potencia y de Distribución a manera de que el estudiante pueda identificar y diferenciar la composición física de cada uno:

Figura 50. **Transformador de distribución trifásico en poste**



Fuente: Alamy. *Montaje en poste trifásicos de transformadores de distribución.*
<https://www.alamy.es/foto-montaje-en-poste-trifasicos-de-transformadores-de-distribucion-132422436.html>. Consulta: 16 de noviembre 2019.

Figura 51. **Transformador de distribución monofásico en poste**



Fuente: Alamy. *Transformador de distribución monofásico en un poste eléctrico en los EE.UU.*
<https://www.alamy.es/imagenes/transformadores-monof%C3%A1sicos.html>. Consulta: 16 de noviembre 2019.

Figura 52. **Transformador de potencia en subestación 115kV**



Fuente: 123rf. *transformador de potencia en subestación de 115 kv.*
https://es.123rf.com/photo_62841515_transformador-de-potencia-en-subestaci%C3%B3n-de-115-kv-.html. Consulta: 16 de noviembre de 2019.

Figura 53. **Transformador de potencia #1**



Fuente: Tironi. *Transformadores de Potencia.*

<https://www.tironi.com/es/productos/transformadores-de-potencia>. Consulta: 16 de noviembre de 2019.

Figura 54. **Transformador de potencia #2**



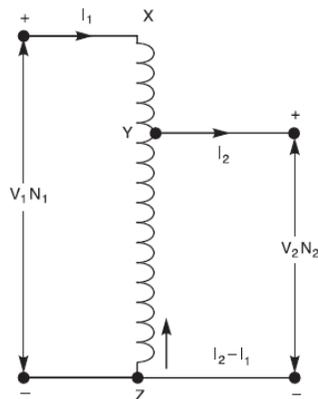
Fuente: 123rf. *Aceite sumergido transformador de potencia en la subestación de alta tensión.*

https://es.123rf.com/photo_32565411_aceite-sumergido-transformador-de-potencia-en-la-subestaci%C3%B3n-de-alta-tensi%C3%B3n.html. Consulta: 16 de noviembre de 2019.

3.1.2.4. Ejercicio para identificar el tipo de construcción

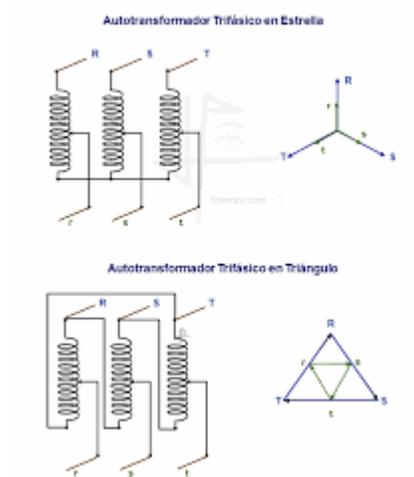
Autotransformador: Para identificar este tipo de transformadores es necesario conocer normalmente su diagrama de eléctrico, donde el primario y el secundario se encuentran en la misma bobina, ya que físicamente son parecidos a un transformador monofásico y algunos a los transformadores Trifásicos. Por lo que a continuación se muestran dos ejemplos de los diagramas eléctricos del autotransformador y de la forma física.

Figura 55. Autotransformador típico



Fuente: Researchgate. *Autotransformador*. https://www.researchgate.net/figure/Figura-45-Autotransformador-tipico-Ref-IEEE-Std-141Recommended-Practice-for-Electric_fig13_282781327. Consulta: 18 de noviembre de 2019.

Figura 56. **Diagrama autotransformador trifásico**



Fuente: Tuveras. *autotransformador trifásico*.

https://www.tuveras.com/eltrafotrifasico/autotransformador_trifasico.htm. Consulta: 18 de noviembre 2019.

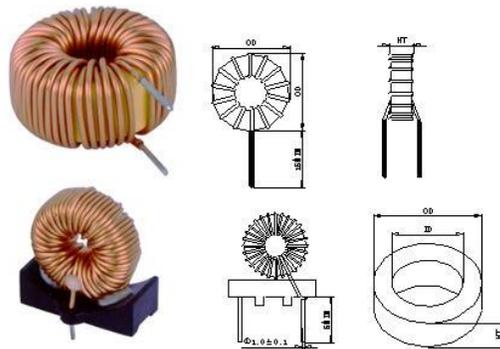
Figura 57. **Ejemplo de autotransformador**



Fuente: Mercado libre. *autotransformador*. https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-549900563-autotransformador-transformadores-marca-laymon-_JM#position=5&search_layout=grid&type=item&tracking_id=99c56fa6-6489-441a-af0e-3d14bba3e8c7. Consulta: 18 de noviembre de 2019.

A continuación, se muestran los otros tipos de transformadores mencionados en el capítulo 2, según su construcción, con el objetivo que el estudiante identifique de forma visual la construcción de cada uno de estos:

Figura 58. **Transformador con núcleo toroidal**



Fuente: Hang tung. *Características y aplicaciones*. www.ht-transformers.com/Content/ue/net/upload1/Other/119648/6361445671558706272389766.png.

Consulta: 18 de noviembre de 2019.

Figura 59. **Transformador de grano orientado**



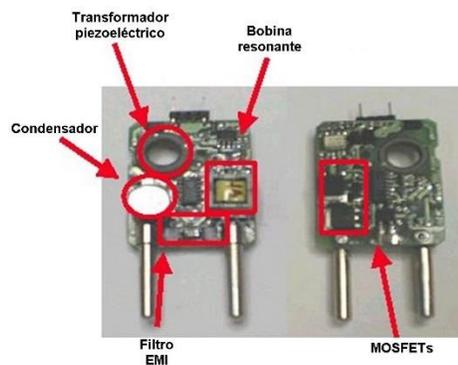
Fuente: Ebay. *Transformadores de núcleo R de salida con blindaje de audio*. https://www.ebay.es/b/Transformadores-12V/181929/bn_7017007767. Consulta: 18 de noviembre de 2019.

Figura 60. **Transformadores de núcleo de aire**



Fuente: Made in china. *Transformador de núcleo de aire con EE30 Bobina|Inductor inductor.*
https://es.made-in-china.com/co_xppower/product_Air-Core-Transformer-with-Ee30-Bobbin-Choke-Coil-Inductor_eegrshgsg.html. Consulta: 18 de noviembre de 2019.

Figura 61. **Transformador piezoeléctrico**



Fuente: Unioviedo. *Uso de transformadores piezoeléctricos.*
https://www.unioviedo.es/ate/ge2/esp/lineas/alta_densidad.htm. Consulta: 18 de noviembre de 2019.

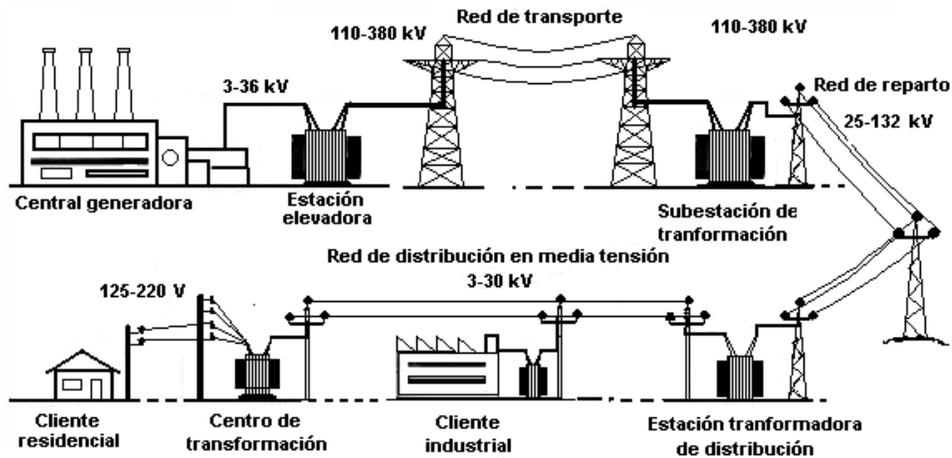
3.1.3. Ejercicio para identificar el tipo de utilización de los transformadores

Debido a que los transformadores son destinados para diferentes tipos de usos, se plantea describir donde es que realizan su función.

3.1.3.1. Ejercicio de transformador dentro del sistema eléctrico

En la figura 62 podemos observar la presencia del transformador dentro del sistema eléctrico de potencia, en la estación elevadora que corresponde a los transformadores para Generador, seguidamente sigue la red de transporte en donde, al final de esta red, se encuentran ubicados los transformadores que conforman las subestaciones de transformación, a continuación, existen las redes de reparto las cuales conectan a las estaciones transformadoras de Distribución, las cuales, finalmente conectan con los consumidores industriales y los consumidores residenciales.

Figura 62. Sistema eléctrico de potencia



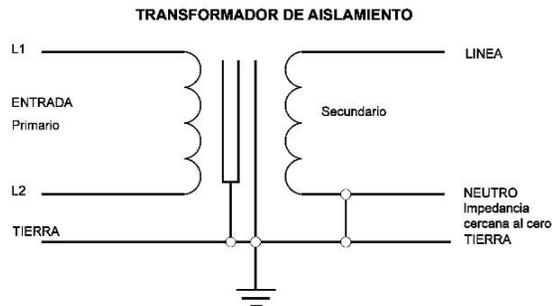
Fuente: Ptolomeo. *Sistema eléctrico de potencia*.

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/326/A4.pdf?sequence=.> Consulta: 25 de noviembre de 2019.

3.1.3.2. Ejercicio de transformador especiales

A manera de conocer la composición y comprender los conceptos de los transformadores especiales, se muestra los diagramas y se resumen en una serie de preguntas las ideas principales.

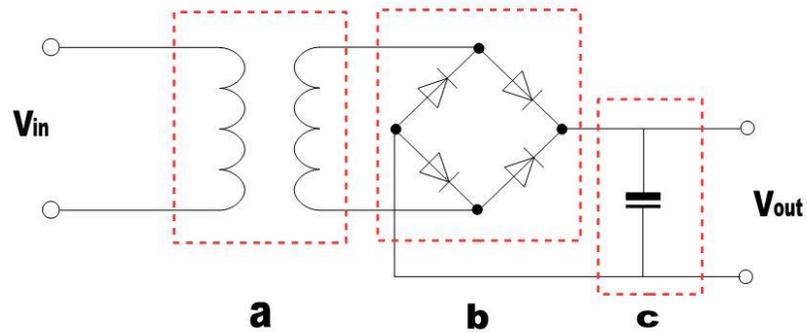
Figura 63. Diagrama de un transformador de aislamiento



Fuente: Imsoltec. *transformador de aislamiento 2kva 120/120*.

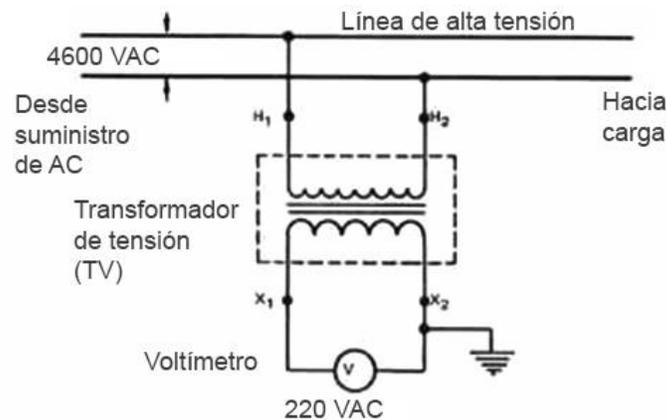
<https://www.imsoltec.com/product/transformador-de-aislamiento-2kva-120-120/>. Consulta: 25 de noviembre de 2019.

Figura 64. Transformador de alimentación



Fuente: Delta. *Fuente de alimentación con transformador*. https://shopdelta.eu/fuente-de-alimentacion-con-transformador_l6_aid798.html. Consulta: 26 de noviembre 2019.

Figura 65. **Transformador de medida de potencial**



Fuente: Sapiensman. *Transformador de potencial*.

<http://www.sapiensman.com/ESDictionary/word/--transformador.php?page=50>. Consulta: 1 de diciembre de 2019.

En manera de ejercicio se presentan las siguientes interrogantes para comprender mejor el tema de los transformadores de instrumentó de corriente:

- ¿Qué son los transformadores de instrumento? ¿Y cómo se conectan?

Son dispositivos electromagnéticos con la función principal de reducir a escala, las magnitudes de tensión y corriente que se utilizan para la protección y medición de los diferentes circuitos de una subestación o sistema eléctrico en general. Los transformadores de corriente van conectados en serie con la línea, mientras los de tensión van conectado en paralelo entre fase y fase o entres fase y neutro.

- ¿Diferencia entre un transformador de medida y un transformador de protección de corriente?

Los transformadores medida como su nombre lo indica es de medir de manera correcta la magnitud y el ángulo de fase de la corriente. Su precisión debe garantizarse desde una pequeña fracción de corriente nominal. Mientras que los transformadores de protección deben proteger un circuito, deben conservar su fidelidad hasta un valor de veinte veces la magnitud de la corriente nominal.

- ¿Cuáles son los parámetros del transformador de corriente?

Las corrientes primaria y secundaria, límite térmico, límite de cortocircuito, tensión secundaria nominal, potencial nominal, clase de precisión para medición, clases de precisión para protección y corriente de límite térmico

- ¿Qué clases precisión de transformadores de medida y de protección de corriente existen? ¿Y qué significan representan?

Las normas ANSI definen la clase de precisión de acuerdo con los siguientes valores:

Para los transformadores de medición: 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 0,6, 1.2, 3 y 5. Estas representan la clase de precisión se designa por el error máximo admisible, en por ciento, que el transformador puede introducir en la medición, operando con su corriente nominal primaria y la frecuencia nominal.

Para los transformadores de protección:

Clase C: son los transformadores que, por tener los devanados uniformemente distribuidos, su flujo de dispersión en el núcleo no tiene efecto apreciable en el error de relación, dentro de los límites de carga y frecuencia especificados.

Clase T: son los transformadores que, por no tener los devanados uniformemente distribuidos, el flujo de dispersión en el núcleo afecta el error de relación, dentro de los límites de carga y frecuencia especificados. Su relación debe ser determinada mediante prueba de laboratorio.

- ¿Porque son utilizados los transformadores de corriente TC's?

Ya que los transformadores de corriente pueden reducir los niveles de corriente de miles de amperes a una salida estándar de una relación conocida o a un valor de 1 o 5 amperes para operación normal, De esta manera, instrumentos pequeños y precisos, así como dispositivos de control pueden emplear TC's por que se encuentran retirados de las líneas de alto voltaje. Existe otras aplicaciones y usos para medición con TC's como conectarlos a: medidores de Watts, medidores de factor de potencia, relevadores de protección o como bobinas de disparo en interruptores magnéticos.

3.1.4. Ejemplo de aplicación de las normas IEC e IEEE

A continuación, se las siguientes preguntas como resumen de estas normas:

- ¿Qué son las normas IEC?

Son normas publicadas por la comisión internacional de electrotécnica para todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y temas relacionados a estos.

- ¿Qué son las normas IEEE?

Son normas creadas y publicadas por una asociación mundial de ingenieros, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, dedicada a la normalización y el desarrollo en áreas técnicas.

- ¿En qué norma IEC se puede obtener la información con respecto a los niveles de aislamiento del transformador de potencia?

Norma IEC 60076-3

- ¿En qué norma IEC se puede obtener la información con respecto a los transformadores de potencia?

Norma IEC 60076-1

- ¿En qué norma IEC se puede obtener la información con respecto a los transformadores de corriente?

Norma IEC 60044-1

- ¿En qué norma IEEE se puede obtener la información con respecto a los requisitos generales para transformadores de distribución, potencia y regulación sumergido en líquido?

Norma IEEE C57.12.00-2015

- ¿En qué norma IEEE se puede obtener la información con respecto a las Pruebas de diagnóstico de campo de transformadores de potencia llenos de líquido y reactores de derivación?

Norma IEEE C57.152-2013

- ¿En qué norma IEEE se puede obtener la información con respecto a los transformadores de instrumento?

Norma IEEE C57.13-2016

3.2. Aplicación de análisis del funcionamiento de un transformador

Se presenta a continuación problemas de análisis del transformador para el funcionamiento en situación ideal y real.

3.2.1. Transformador ideal

Al tener en cuenta que en esta situación el transformador no presenta pérdidas de ningún tipo durante su función, se plantea el siguiente problema.

3.2.1.1. Ejercicio del funcionamiento en vacío y en carga

En el transformador ideal de la figura 10 tiene dos devanados con $N_1 = 300$ espiras y $N_2 = 100$ espiras. La longitud magnética media es de 50cm y la sección transversal del núcleo magnético es de 10 cm^2 . La curva de imanación del material corresponde a la ecuación:

$$B = \frac{1,8 * 10^{-2} H}{1 + 10^{-2} H} \quad B: \text{Teslas}; \quad H: \text{A. v/m}$$

Al aplicar al primario una tensión $v_1 = 150 \cos(314)t$ voltios se comprueba que las pérdidas en el núcleo son de 20 W. Determinar:

La corriente de vacío I_0 absorbida por el transformador.

Tensión secundaria V_2 .

Si el secundario alimenta una impedancia de carga $Z_L = 0,5 \angle 60^\circ \Omega$, determinar la corriente secundaria I_2 y la corriente primaria que absorberá el transformador de la red.

Solución:

La tensión aplicada tiene una tensión eficaz y una frecuencia de valores:

$$V_1 = \frac{150}{\sqrt{2}} = 106,06 \quad ; \quad f = \frac{\omega}{2\pi} = 50 \text{ Hz}$$

De este modo, teniendo en cuenta (7) resulta un flujo máximo en el núcleo:¹⁰³

$$\phi_m = \frac{V_1}{4,44 f N_1} = \frac{106,06}{4,44 * 50 * 300} = 1,59 * 10^{-3} \text{ Wb}$$

Que corresponde a una inducción máxima:

$$B_m = \frac{\phi_m}{S} = \frac{1,59 * 10^{-3}}{10 * 10^{-4}} = 1,59 \text{ Teslas}$$

Lo que requiere una intensidad del campo magnético, teniendo en cuenta la curva de imanación del material:

$$B = 1,59 = \frac{1,8 * 10^{-2} H}{1 + 10^{-2} H} \Rightarrow H_m = 757 \text{ A.v/m}$$

Suponiendo que la corriente de imanación I_m sea de forma senoidal, también lo será la intensidad del campo magnético H_m que ella produce, por lo que se tendrá un valor eficaz de campo:

¹⁰³ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.178.

$$H = \frac{H_m}{\sqrt{2}} = \frac{757}{\sqrt{2}} = 535,28 \text{ A.v/m}$$

y como $H = NI_\mu/l$, daría lugar a una corriente de imanación:

$$I_\mu = \frac{535,28 * 0,5}{300} = 0,9 \text{ A}$$

La componente I_{Fe} de la corriente de vacío puede determinarse de acuerdo con la ecuación:

$$P_{Fe} = V_1 * I_0 * \cos\varphi_0 = V_1 * I_{Fe}$$

Y, por consiguiente;

$$I_{Fe} = \frac{20}{106,06} = 0,19 \text{ A}$$

Si se toma V_1 como referencia de fases, la corriente de vacío, de acuerdo con el diagrama fasorial de la figura 3.11, tendrá la siguiente expresión compleja:

$$I_0 = 0,19 - j0,9 = 0,92 \angle -78,08^\circ \text{ A}$$

De acuerdo con (8) se tiene:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow \frac{106,06}{V_2} = \frac{300}{100}$$

De donde se deduce un módulo de V_2 igual a 35,35 V.

La tensión secundaria calculada en el apartado anterior este en fase con la tensión primaria (figura 11), por lo que la expresión compleja será:¹⁰⁴

$$V_2 = 35,35 \angle 0^\circ \text{ V}$$

De este modo la corriente I_2 valdrá, según (10):

$$I_2 = \frac{35,35 \angle 0^\circ}{0,5 \angle 60^\circ} = 70,7 \angle -60^\circ \text{ A}$$

Que corresponde a un módulo de la corriente secundaria de 70,7 A. La corriente primaria correspondiente se obtendrá aplicando (14), donde $m=300/100=3$, resultando:

$$I_2 = I_0 + \frac{I_2}{m} = 0,92 \angle -78,08^\circ + \frac{70,7 \angle -60^\circ \text{ A}}{3} = 24,44 \angle 60,68^\circ \text{ A}$$

Obsérvese que la expresión (19) nos da un valor aproximado muy cercano al real:¹⁰⁵

$$I_1 \approx \frac{I_2}{m} = 23,57 \angle -60^\circ \text{ A}$$

¹⁰⁴ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.178.

¹⁰⁵ *Ibíd.*

3.2.2. Transformador real

Al tener en cuenta que en esta situación el transformador si presenta pérdidas durante su funcionamiento, se plantea el siguiente problema.

3.2.2.1. Ejercicio de funcionamiento en vacío y en carga

Un transformador monofásico de 10 kVa, relación 500/100 V, tiene las siguientes impedancias de los devanados: $Z = R_1 + jX_1 = 0.2 + j0.4\Omega$; $Z = R_2 + jX_2 = 0.08 + j0.016\Omega$ al alimentar el transformador por una tensión de 500 v que se toma como referencia de fases, la corriente de vacío absorbida responde a la forma compleja: $I_0 = 0.2\angle -70^\circ$ A. Calcular:

Valores de E_1 , E_2 y V_2 cuando el transformador trabaja en vacío.

Si el secundario lleva una corriente de la forma: $I_2 = 100\angle -30^\circ$, calcular los nuevos valores de E_1 , E_2 y V_2 .¹⁰⁶

Solución:

En vacío se cumplen las relaciones (36). Teniendo en cuenta además que:¹⁰⁷

$$V_1 = 500\angle 0^\circ; m = 500/100 = 5$$

Se dará el resultado de:

$$E_1 = 500\angle 0^\circ - (0.2 + j0.4) * 0.2\angle -70^\circ = 499.91\angle 0.0011^\circ$$

Que corresponde a una f.e.m E_2 según (38):

$$E_2 = \frac{E_1}{m} = 99.98\angle 0.0011^\circ$$

Y teniendo en cuenta la segunda ecuación (36) se tiene:

$$V_2 = E_2 = 99.98\angle 0.0011^\circ$$

- o Cuando el transformador funciona con carga, la corriente primaria vendrá expresada por la ecuación (39):

$$I_1 = I_0 + \frac{I_2}{m} = 0.2\angle -70^\circ + \frac{100\angle -30^\circ}{5} = 20.15\angle -30.37^\circ$$

¹⁰⁶ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.181.

¹⁰⁷ *Ibíd.* p.182.

Y teniendo en cuenta la ecuación (30) resulta:

$$E_1 = 500 \angle 0^\circ - (0,2 + j0,4) * 20,15 \angle -30,37^\circ = 492,47 \angle 0,57^\circ$$

Lo que corresponde, según (31), a una f.e.m. E_2 :

$$E_2 = \frac{E_1}{m} = 98,49 \angle 0,57^\circ$$

Y a una tensión secundaria V_2 de:¹⁰⁸

$$V_2 = 98,49 \angle 0,57^\circ - (0,08 + j0,016) * 100 \angle -30^\circ = 97 \angle 0^\circ$$

3.2.2.2. Ejercicio transformador ideal y transformador real

A manera de ejercicio se definen las principales propiedades que definen al transformador Ideal y del transformador Real.

Transformador Ideal: se considera un transformador ideal aquel en el que no hay pérdidas de ningún tipo.

- La relación entre las tensiones del primario y secundario es igual a la relación entre el número de espiras de los arrollamientos primario y secundario.

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

- La relación entre las corrientes del primario y secundario es igual a la inversa de la relación entre el número de espiras de los arrollamientos primario y secundario, con signo menos.

¹⁰⁸ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.182.

$$\frac{N_1}{N_2} = -\frac{I_1}{I_2}$$

- De las dos anteriores propiedades se deduce otra importante propiedad del transformador ideal:
 - Una impedancia cualquiera situada en el circuito primario es equivalente a esa impedancia situada en el circuito secundario dividida por el cuadrado de la relación de transformación (m^2).
 - Una impedancia cualquiera situada en el circuito secundario es equivalente a esa impedancia situada en el circuito primario multiplicada por el cuadrado de la relación de transformación (m^2).

Transformador Real: los transformadores reales se diferencian de los ideales en los siguientes aspectos:

- Los arrollamientos o devanados tienen resistencia eléctrica y capacidades parásitas.
- En el interior del núcleo hay corrientes parásitas o corrientes de Foucault.
- El ciclo de magnetización y desmagnetización del núcleo consume energía debido a la histéresis magnética.
- El acoplamiento magnético de los devanados no es perfecto, que se traduce en una inductancia o flujo de dispersión.
- La permeabilidad magnética del núcleo depende de la frecuencia.

- La saturación magnética del núcleo provoca que la inductividad de los devanados no sea constante.

La resistencia de los devanados, la histéresis del núcleo y las corrientes parásitas producen pérdidas de energía.

3.2.3. Circuito equivalente del transformador

Se presentan a continuación ejercicios definen la construcción del circuito equivalente del transformador.

3.2.3.1. Ejercicio del circuito equivalente aproximado

Un transformador de distribución de 50 kVa 2 400:240 V 60 Hz presenta una impedancia de $0,72+j0,92\Omega$ en el devanado de alto voltaje y $0,0070+j0,0090\Omega$ en el devanado de bajo voltaje. A un voltaje y frecuencia nominales, la impedancia Z_ϕ de la rama derivada (igual a la impedancia de R_{Fe} y jX_μ en paralelo) al medir la corriente de excitación es $6,32 + j43,7\Omega$ vista desde el lado de bajo voltaje. dibuje el circuito equivalente referido a:

El lado de alto voltaje o devanado primario.

El lado de bajo voltaje, además identifique numéricamente las impedancias.¹⁰⁹

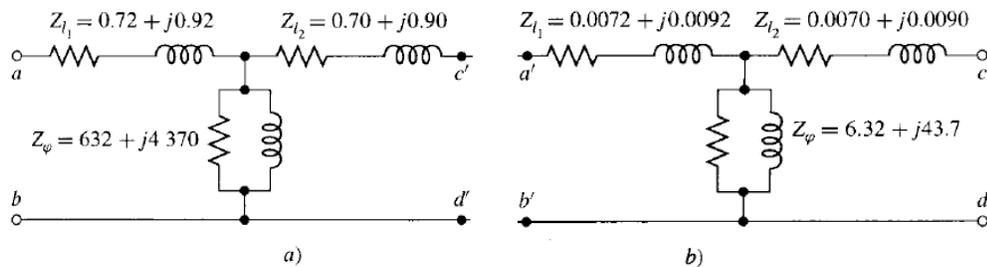
Solución:

Los circuitos se presentan en la figura 66. a y b, respectivamente, con el lado de alto voltaje con el número 1 y el lado de bajo voltaje con el número 2. Los voltajes dados en la placa de un transformador de sistema de potencia se basan en la proporción de numero de vueltas y no toman en consideración la pequeña caída de voltaje por impedancia de dispersión de carga. Dado que es un transformador de 10 a 1(2400:240), las impedancias se refieren a la multiplicación o división entre 100, por ejemplo, el valor de una impedancia relacionada con el lado de alto voltaje es mayor por un factor de 100 en comparación con el valor relacionado con el lado de bajo voltaje.¹¹⁰

¹⁰⁹ FITZGERALD, Arthur. *Maquinas eléctricas*. p.72.

¹¹⁰ *Ibíd.* p.73.

Figura 66. **Circuito equivalente del transformador referido a los lados de alto voltaje y bajo voltaje**



Fuente: FITZGERALD, Arthur Eugene. *Maquinas Eléctricas*. p. 73.

3.2.3.2. Ejercicio del circuito equivalente reducido

A partir de las ecuaciones (31), (32) y (39), que definen el comportamiento de un transformador real, deducir de un modo analítico el circuito equivalente exacto de la figura 17.

Solución:

Las ecuaciones de partida son:

$$V_1 = E_1 + R_1 I_1 + jX_1 I_1 ; V_2 = E_2 - R_2 I_2 - jX_2 I_2 ; \frac{E_1}{E_2} ; I_1 = I_0 + \frac{I_2}{m}$$

Si en la ecuación 2) se multiplica por la relación de transformación m resulta:

$$mV_2 = mE_2 - mR_2 I_2 - jmX_2 I_2$$

O en forma equivalente:

$$2') mV_2 = mE_2 - m^2 R_2 \frac{I_2}{m} - jm^2 X_2 \frac{I_2}{m}$$

y denominando:

$$E'_2 = mE_2 ; V'_2 = mV_2 ; I'_2 = \frac{I_2}{m} ; R'_2 = m^2 R_2 ; X'_2 = m^2 X_2$$

La ecuación 2') se convierte en:

$$V'_2 = E'_2 - R'_2 I'_2 - jX'_2 I'_2$$

Lo que da lugar a las ecuaciones transformadas siguientes:

$$V_1 = E_1 + R_1 I_1 + jX_1 I_1; V_2' = E_1' - R_2 I_2' - jX_2' I_2'; E_1 = E_2'; I_1 = I_0 + I_2'$$

Que el estudiante puede comprobar fácilmente que son las ecuaciones que rigen el comportamiento eléctrico del circuito de la figura 17.¹¹¹

3.2.3.3. Ejercicio de ensayo de parámetros

Un transformador monofásico de 250 KVA, 15 000/250 V, 50 Hz, ha dado los siguientes resultados en unos ensayos: Vacío: 250V, 80^a, 4 000 W (datos medidos en el lado de B.T.). Cortocircuito: 600V, corriente asignada 5 000 W (datos medidos en el lado de A.T.). Calcular:

Parámetros del circuito equivalente del transformador reducido al primario.

Corriente de cortocircuito de falla.

Solución:

○ Se debe de observar que los ensayos no han sido determinados en el primario (ya que la prueba de vacío se ha realizado en el lado de 250 V, es decir, el secundario). Es preciso reducir todas las medidas al lado donde se desea obtener los parámetros del circuito equivalente (primario). Teniendo en cuenta la relación de transformación es:

$$m = \frac{15\,000}{250} = 60$$

El ensayo de vacío reducido al primario corresponderá a los valores:

$$V_1 = 250 * 60 = 15\,000\text{ V}; I_0 = \frac{80}{60} = 1,33\text{ A}; 4\,000\text{ W}$$

Es decir, la tensión se multiplica por la relación de transformación, mientras que la corriente debe dividirse por esa cantidad, permaneciendo inalterada la potencia. El f.d.p. en vacío será entonces: ¹¹²

$$\cos\varphi_0 = \frac{4\,000}{15\,000 * 1,33} = 0,2$$

Que corresponde a un $\varphi_0 = 0,98$ En consecuencia, y de acuerdo con (56), se obtiene:

$$R_{Fe} = \frac{15000}{1,33 * 0,2} = 56,4\text{ k}\Omega; X_\mu = \frac{15000}{1,33 * 0,98} = 11,5\text{ k}\Omega$$

¹¹¹ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.187.

¹¹² *Ibíd.* p.193.

Se observa que esta rama paralela es de gran impedancia, lo que está de acuerdo con la realidad, ya que la corriente de vacío suele estar comprendida en los transformadores industriales entre el 1 y el 8 por 100. En nuestro caso, teniendo en cuenta que la corriente asignada del primario tiene valor de:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{V_{1n}} = \frac{25\,000}{15\,000} = 16,67A$$

La corriente de vacío $I_0 = 1,33A$ representa un valor relativo:

$$\frac{I_0}{I_{1n}} = \frac{1,33}{16,67} = 8\%$$

Del ensayo se deduce también que las pérdidas en el hierro son de 4 000 w. Para calcular la rama serie del circuito equivalente se ha da emplear el ensayo de cortocircuito, cuyos datos están ya medidos en el lado primario (A.T.); por tanto, estas medidas son de utilización directa. El factor de potencia de cortocircuito vale:

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{Icc} I_{In}} = \frac{5\,000}{600 * 16,67} = 0,5$$

Que corresponde a $\text{Sen}\varphi_{cc} = 0,866$. De acuerdo con las expresiones (59) y (67) se obtiene:

$$R_{cc} = \frac{600}{16,67} * 0,5 = 18\Omega; X_{cc} = \frac{600}{16,67} * 0,866 = 31,17$$

Que son de pequeño valor en comparación con la rama paralelo. El valor relativo de la tensión de cortocircuito, de acuerdo con (67), es:¹¹³

$$\varepsilon_{cc} = \frac{V_{Icc}}{V_{1n}} * 100 = \frac{600}{15\,000} * 100 = 4\%$$

Al ocurrir una falta de cortocircuito en el transformador, la corriente correspondiente, que en el primario de acuerdo con (68), será:

$$I_{falla} = \frac{100}{4} * 16,67 = 416,75A$$

Que corresponde en el secundario a una intensidad:

$$I_{falla} = \frac{100}{\varepsilon_{cc}} I_{2n}$$

¹¹³ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.194.

Y como quiera que I_{2n} es igual a:

$$I_{2n} = \frac{S_n}{V_{2n}} = \frac{250\,000}{250} = 100A$$

Se tendrá:

$$I_{falla} = \frac{100}{4} * 1\,000 = 25\,kVA$$

Valores muy superiores a los asignados de la máquina y que habrán de eliminarse por medio de protecciones adecuadas: relés de sobreintensidad, Buchholz, entre otros, en el menor tiempo posible para no dañar al transformador.¹¹⁴

3.2.4. Diagrama vectorial del transformador

A partir de los parámetros del transformador podemos construir el diagrama vectorial del transformador, se presentan los siguientes ejercicios.

3.2.4.1. Ejercicio de acuerdo al circuito equivalente aproximado

Un transformador monofásico de 14 344 VA, Y 50 Hz tiene las siguientes características:

$$\begin{aligned} N_1 &= 1\,500 \text{ espiras}, r_1 = 3\Omega, x_1 = 10\Omega \\ N_2 &= 150 \text{ espiras}, r_2 = 0,03\Omega, x_2 = 0,1\Omega \end{aligned}$$

La corriente de vacío es de 0,2A y las pérdidas son de 100 W.

Para una carga con un "cos φ " de 0,9 y una tensión secundaria en carga de 220 V. Hallar el diagrama vectorial completo del transformador.

Solución:

$$220\,V. \quad I_2 = \frac{S_2}{V_2} = \frac{14,344}{220} = 65,2A$$

Tomando V_2 en el origen:

$$V_2 = 220\angle 0 \quad I_2 = 65,2\angle -25,84 = 58,68 - 28,42j$$

¹¹⁴ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.195.

$$E_2 = V_2 + I_2(r_2 + jx_2) = 220 + 65,2\angle - 25,84 * (0,03 + 0,01j) = 24,05\angle 1,22$$

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1500}{150} = 10$$

$$\frac{E_1}{E_2} = 10 \rightarrow E_1 = 10E_2 = 10 * 24,05\angle 1,22 = 2240,5\angle 1,22$$

Como las perdidas en el hierro se obtiene en vacío: $V_1 \cong E_1$

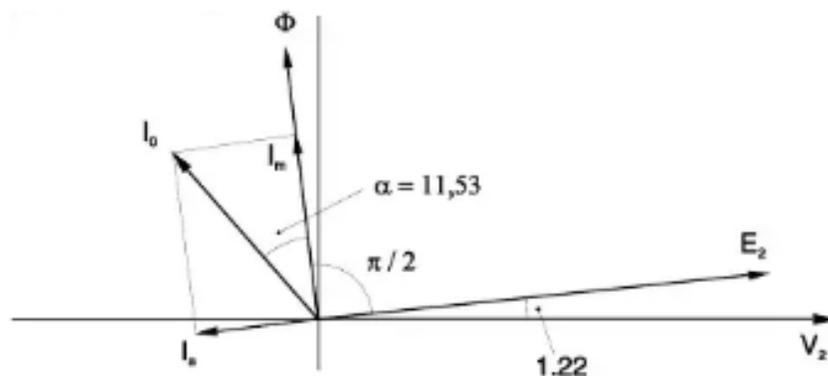
$$P_{Fe} = V_1 I_a = E_1 I_a \Rightarrow I_a = \frac{P_{FE}}{E_1} = \frac{100}{2240,5} = 0,04A$$

$$I_a = I_0 \sin \alpha \rightarrow \sin \alpha = \frac{I_a}{I_0} = \frac{0,04}{0,2} = 0,2 \Rightarrow \alpha = 11,53^\circ$$

La corriente de vacío en forma compleja será:¹¹⁵

$$I_0 = 0,2\angle 1,22 + 90 + 11,53 = 0,2\angle 102,75 = -0,04 + 0,19j$$

Figura 67. **Ejemplo de diagrama vectorial de Transformador**



Fuente: Academia. *Problemas resueltos (transformadores)*. www.academia.edu/9728017/PROBLEMAS_RESUELTOS_TRANSFORMADORES. Consulta: diciembre 2019.

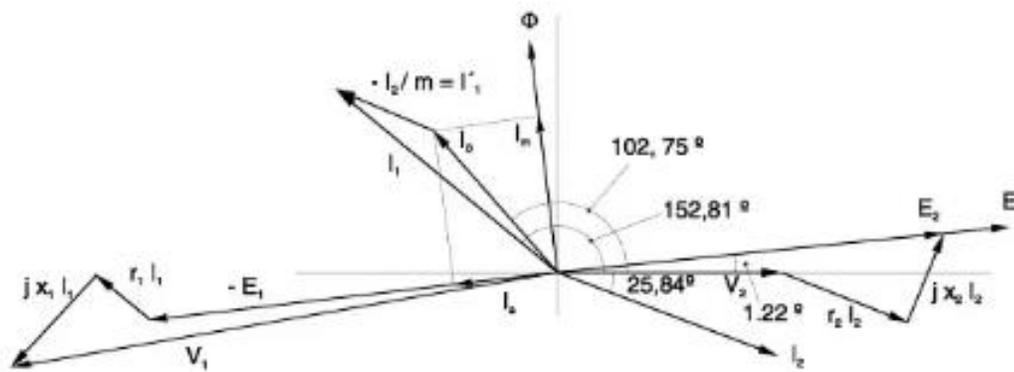
¹¹⁵ Academia. *Problemas resueltos (transformadores)*. www.academia.edu/9728017/PROBLEMAS_RESUELTOS_TRANSFORMADORES. Consulta: diciembre 2019.

$$I_1 = I_0 + I_1 = I_0 - \frac{I_2}{m} = 6,63 \angle 152,81$$

$$V_1 = I_1(r_1 + jx_1) - E_1 = 6,63 \angle 152,81(10,44 \angle 73,3 - 2240,5 \angle 1,22 = 2290 \angle 182,44$$

Entonces el diagrama vectorial será:

Figura 68. **Ejemplo Diagrama vectorial del transformador final**



Fuente: Academia. *Problemas resueltos (transformadores)*. www.academia.edu/9728017/PROBLEMAS_RESUELTOS_TRANSFORMADORES. Consulta: diciembre 2019.

3.2.4.2. Ejercicio de acuerdo al circuito equivalente reducido

Se presenta las siguientes interrogantes e información mejor comprensión del tema del circuito equivalente reducido.

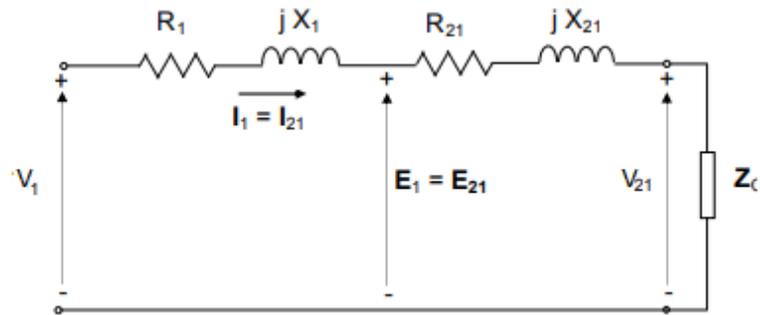
- ¿De qué se trata el diagrama vectorial del Transformador de acuerdo al circuito equivalente reducido?

- Se trata de una operación de gran utilidad a base de varias tensiones nominales. Reduce el estudio al de otro sistema ideal trabajando a una sola tensión.
- ¿Desde un punto de vista matemático que es la reducción del circuito equivalente del transformador?
- Consiste en un cambio de variable en las magnitudes del secundario que facilita el análisis de esta máquina.
- ¿Desde un punto de vista físico que es la reducción del circuito equivalente del transformador?

La reducción del secundario al primario consiste en sustituir el devanado secundario por otro equivalente de forma que el resto de la máquina no se vea afectado por este cambio.

Para algunos cálculos de caídas de tensión, no se tiene en cuenta la rama de excitación, Dibuje el circuito equivalente reducido y su diagrama fasorial en esta situación.

Figura 69. **Circuito equivalente reducido de un transformador**

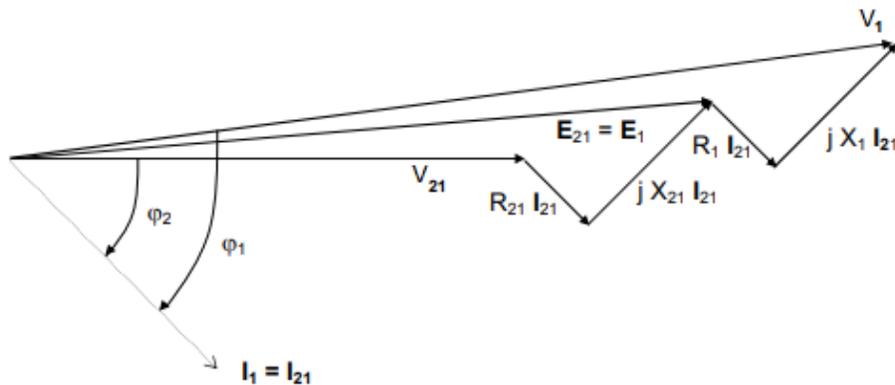


Fuente: ÁLVAREZ, Julio. *Transformadores*.

frq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/6735/mod_resource/content/1/7_transformador.pdf. p. 134.

Consulta: enero 2020.

Figura 70. **Diagrama fasorial de un transformador de acuerdo al Circuito equivalente reducido**



Fuente: ÁLVAREZ, Julio. *Transformadores*.

frq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/6735/mod_resource/content/1/7_transformador.pdf. p. 134.

Consulta: enero 2020.

3.2.5. Ejercicio de regulación de voltaje

Se prueba un transformador de 15 kVA, 23 000/230 V para determinar sus componentes de la rama de excitación, su impedancia serie y su regulación de voltaje. Los siguientes datos fueron obtenidos de las pruebas en el lado primario del transformador.

Tabla XII. Datos de pruebas del transformador lado primario

Prueba de circuito abierto	Prueba de cortocircuito
$V_{oc} = 2300 \text{ V}$	$V_{sc} = 47 \text{ V}$
$I_{oc} = 0.21 \text{ A}$	$I_{sc} = 6.0 \text{ A}$
$P_{oc} = 50 \text{ W}$	$P_{sc} = 160 \text{ W}$

Fuente: CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas Eléctricas*. p.79.

Los datos se tomaron utilizando las conexiones mostradas en las siguientes figuras:

Encuentre el circuito equivalente del Transformador, referido al lado de alto voltaje.

Utilizando la ecuación exacta para V_p , calcule la regulación de voltaje a plena carga si los factores de potencia son 0,8 en atraso, 1 y 0,8 en adelanto.

Solución: los valores de la rama de excitación del circuito equivalente se pueden calcular partiendo de los datos de prueba de circuito abierto y los elementos serie se pueden calcular a partir de los datos de la prueba de cortocircuito. De los datos de circuito abierto, el ángulo de la impedancia de circuito abierto es:¹¹⁶

$$\theta_{ca} = \cos^{-1} \frac{P_{ca}}{V_{ca} I_{ca}}$$

$$\theta_{ca} = \cos^{-1} \frac{50W}{(2300V)(0,21A)}$$

$$\theta_{ca} = 84^\circ$$

¹¹⁶ CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas eléctricas*. p.79.

La admitancia de excitación es

$$Y_E = \frac{I_{ca}}{V_{ca}} \angle -84^\circ$$

$$Y_E = \frac{0.21A}{2300V} \angle -84^\circ$$

$$Y_E = 0,00095 - j0,00908\text{u}$$

Los elementos de la rama de excitación referidos al primario son entonces:¹¹⁷

$$R_{ca} = \frac{1}{0.00095} = 1050\Omega \text{ y } X_{ca} = \frac{1}{0.00908} = 110\Omega$$

De los datos del cortocircuito, el ángulo de la impedancia de cortocircuito es:

$$\theta_{cc} = \text{Cos}^{-1} \frac{P_{cc}}{V_{cc}I_{cc}}$$

$$\theta_{cc} = \text{Cos}^{-1} \frac{160W}{(47V)(6A)}$$

$$\theta_{cc} = 55,4^\circ$$

La impedancia serie equivalente es:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \angle \theta_{cc}$$

$$Z_{cc} = \frac{47V}{6A} \angle 55,4^\circ \Omega$$

$$Z_{cc} = 7,833 \angle 55,4^\circ = 4,45 + j6,45$$

Los parámetros serie referidos al primario son:

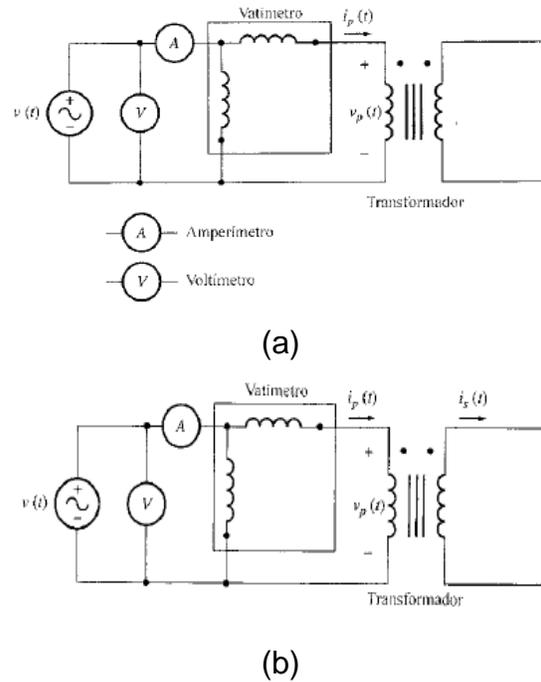
$$R_{cc} = 4145\Omega \text{ y } X_{cc} = 6,45\Omega$$

El circuito Equivalente se muestra a continuación:¹¹⁸

¹¹⁷ CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas eléctricas*. p.79.

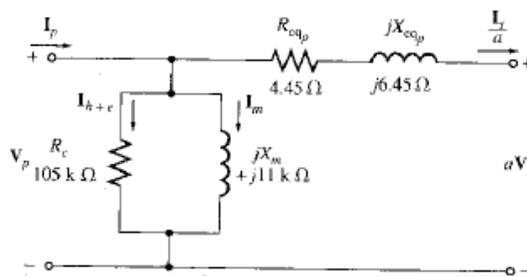
¹¹⁸ *Ibíd.*

Figura 71. **Circuito para la prueba de (a) Circuito abierto y (b) de cortocircuito**



Fuente: CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas Eléctricas*. p.68.

Figura 72. **Circuito equivalente del transformador de ejemplo referido al primario**



Fuente: CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas Eléctricas*. p.80.

Donde: R_c es R_{ca} ; X_{ca} es X_m ; y R_{eq} es R_{cc} ; X_{eq} es X_{cc} .

La corriente a plena carga en el lado secundario del transformador es.

$$I_{S,nominal} = \frac{S_{nominal}}{V_{S,nominal}} = \frac{15\,000\text{ VA}}{230\text{ V}} = 65,2\text{ A}$$

Para calcular $\frac{V_p}{a}$ se utiliza la ecuación siguiente:

$$\frac{V_p}{a} = V_S + R_{cc}I_S + jX_{cc}I_S$$

Para un f.d.p. igual a 0,8 en atraso, la corriente $I_S = 65,2\angle -36,9^\circ\text{ A}$. Entonces:

$$\frac{V_p}{a} = 230\angle 0^\circ\text{ V} + (0,0445\Omega)(65,2\angle -36,9^\circ\text{ A}) + j(0,0645\Omega)(65,2\angle -36,9^\circ\text{ A})$$

$$\frac{V_p}{a} = 234,85\angle 0,40^\circ\text{ V}$$

La regulación de voltaje es:

$$VR = \frac{\frac{V_p}{a} - V_{S,carga}}{V_{S,carga}} \times 100\%$$

$$VR = \frac{234,85\text{ V} - 230\text{ V}}{230\text{ V}} * 100\% = 2,1\%$$

Con f.d.p. de 1 la corriente $I_S = 65,2\angle 0^\circ\text{ A}$. Entonces:

$$\frac{V_p}{a} = 230\angle 0^\circ\text{ V} + (0,0445\Omega)(65,2\angle 0^\circ\text{ A}) + j(0,0645\Omega)(65,2\angle 0^\circ\text{ A})$$

$$\frac{V_p}{a} = 232\angle 1,04^\circ\text{ V}$$

La regulación de voltaje resultante es:

$$VR = \frac{232,94\text{ V} - 230\text{ V}}{230\text{ V}} * 100\% = 1,28\%$$

Con f.d.p. de 0,8 en adelanto, la corriente $I_S = (65,2\angle -36,9^\circ\text{ A})$. Entonces:

$$\frac{V_p}{a} = 230\angle 0^\circ\text{ V} + (0,0445\Omega)(65,2\angle 36,9^\circ\text{ A}) + j(0,0645\Omega)(65,2\angle -36,9^\circ\text{ A})$$

$$\frac{V_p}{a} = 229,85\angle 1,27^\circ\text{ V}$$

La regulación de voltaje resultante es:¹¹⁹

$$VR = \frac{229,85 V - 230 V}{230 V} * 100 \% = -0,062 \%$$

3.2.6. Eficiencia del transformador

Utilizando los mismos datos, que el ejercicio de Regulación de voltaje, se resuelve la siguiente interrogante:

¿Cuál es la eficiencia del transformador a plena carga si el factor de potencia es 0,8 en atraso?

Solución: Para hallar la eficiencia del transformador, primero se calculan las pérdidas. Las pérdidas en el cobre son:¹²⁰

$$P_{cu} = (I_s)^2 R_{eq} = (65,2A)^2 (0,0445\Omega) = 189 W$$

Las pérdidas en el núcleo están dadas por:

$$P_{nucleo} = \frac{\left(\frac{V_p}{a}\right)^2}{R_c} = \frac{(234,85)^2}{1\ 050\Omega} = 52,5 W$$

La potencia de salida con este factor de potencia es:

$$P_{Salida} = V_s I_s \cos\theta$$
$$P_{Salida} = (230V)(65,2A)\cos 36,9^\circ = 12\ 000 W$$

Entonces la eficiencia del transformador con esta condición es:

$$\eta = \frac{V_s I_s \cos\theta}{P_{cu} + 52,5W + V_s I_s \cos\theta} X 100 \%$$
$$\eta = \frac{12\ 000 W}{189 W + 52,5 W + 12\ 000} X 100 \%$$
$$\eta = 98,03 \%$$

3.2.7. Ejercicio de valores por unidad para un transformador

La figura 73 muestra un sistema de potencia sencillo. Este sistema contiene un generador de 480 V conectado a un transformador elevador ideal de relación 1:10, una línea de transmisión, un transformador ideal reductor 20:1 y una carga. La

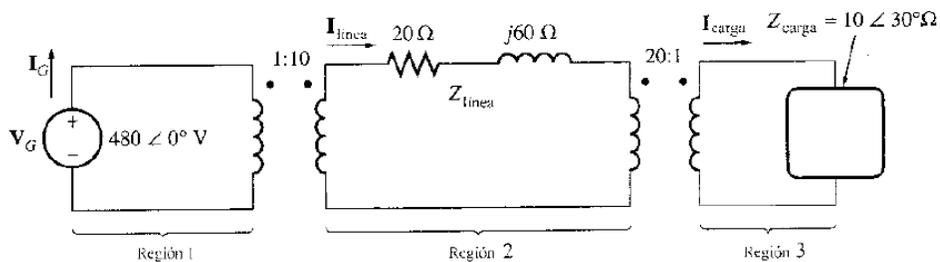
¹¹⁹ CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas eléctricas*. p.81.

¹²⁰ *Ibíd.* p.83.

impedancia de la línea de transmisión es $20+j60\Omega$, y la impedancia de la carga es $10\angle 30^\circ\Omega$. Los valores base para este sistema se escogen como 480 V y 10KVA en el generador.

- Encuentre las bases de voltaje, corriente, impedancia y potencia aparente en cada punto del sistema de potencia.
- Convierta este sistema a circuito equivalente en por unidad.
- Encuentre la potencia suministrada a la carga en el sistema.
- Encuentre la potencia perdida en la línea de transmisión.¹²¹

Figura 73. **Circuito de Sistema de potencia ejercicio**



Fuente: J. CHAPMAN, Stephen. *Maquinas Eléctricas*. p. 73.

Solución: En la región del generador

$V_{base} = 480 \text{ V}$ y $S_{base} = 10 \text{ kVA}$, entonces:

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}} = \frac{10\,000\text{VA}}{480 \text{ V}} = 20,83\text{A}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{480\text{V}}{20,83\text{A}} = 23,04\Omega$$

La relación de vueltas del transformador T_1 es $a = \frac{1}{10} = 0,1$ por lo cual el voltaje base en la región de la línea de transmisión es:

¹²¹ CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas eléctricas*. p.73.

$$V_{base2} = \frac{V_{base1}}{a} = \frac{480V}{0,1} = 4800V$$

Las otras cantidades base son:

$$S_{base2} = 10kVA$$

$$I_{base2} = \frac{S_{base2}}{V_{base2}} = \frac{10\,000\,VA}{4\,800\,V} = 2,083A$$

$$Z_{base2} = \frac{V_{base2}}{I_{base2}} = \frac{4\,800\,V}{2,083\,A} = 2304\Omega$$

La relación de vuelta del transformador T_2 es $a = 20/1 = 20$, entonces el voltaje base en la región de la carga es: ¹²²

$$V_{base3} = \frac{V_{base2}}{a} = \frac{4\,800\,V}{20} = 240\,V$$

Las otras cantidades base son:

$$S_{base3} = 10\,kVA$$

$$I_{base3} = \frac{S_{base3}}{V_{base3}} = \frac{10\,000VA}{240\,V} = 41,67A$$

$$Z_{base3} = \frac{V_{base3}}{I_{base3}} = \frac{240\,V}{41,67A} = 5,76\Omega$$

Para convertir un sistema de potencia a sistema por unidad, cada componente debe dividirse entre su valor base según la región del sistema. El voltaje en por unidad del generador es su valor real entre su valor base:

$$V_{G,pu} = \frac{480\angle 0^\circ V}{480V} = 1,0\angle 0^\circ V_{pu}$$

La impedancia en por unida de la línea de transmisión es su valor actual dividido entre su valor base:

¹²² CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas eléctricas*. p.73.

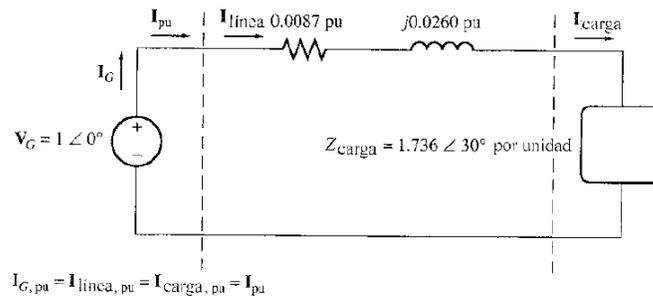
$$Z_{\text{linea},pu} = \frac{20 + j60\Omega}{2304\Omega} = 0,0087 + j0,0260pu$$

La impedancia de la carga en por unidad también se da por el valor real dividido entre el valor base.¹²³

$$Z_{\text{carga},pu} = \frac{10\angle 30^\circ\Omega}{5,76\Omega} = 1,736\angle 30^\circ pu$$

El circuito equivalente del sistema por unidad se muestra en la figura 74.

Figura 74. **Circuito equivalente del sistema por unidad**



Fuente: J. CHAPMAN, Stephen. *Maquinas Eléctricas*. p. 74.

La corriente que fluye en este sistema de potencia por unidad es:

$$I_{pu} = \frac{V_{pu}}{Z_{total,pu}}$$

$$I_{pu} = \frac{1\angle 0^\circ}{(0,0087 + j0,0260) + (1,736\angle 30^\circ)}$$

$$I_{pu} = 0,569\angle -30,6^\circ pu$$

Así mismo, la potencia de la carga por unidad es:

$$P_{\text{carga},pu} = I_{pu}^2 R_{pu} = (0,569)^2 (1,503) = 0,487$$

Y la potencia actual suministrada a la carga es:

$$P_{\text{carga}} = P_{\text{carga},pu} S_{base} = (0,487)(10\,000VA)$$

¹²³ CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas eléctricas*. p.74.

$$P_{carga} = 4970 W$$

a) La pérdida de potencia en por unidad en la línea de transmisión es:

$$P_{linea,pu} = I_{pu}^2 R_{linea,pu} = (0,569)^2 (0,0087) = 0,00282$$

Y la pérdida de potencia real en la línea de transmisión es:¹²⁴

$$P_{linea} = P_{linea,pu} S_{base} = (0,00282)(10000VA)$$

$$P_{linea} = 28,2W$$

3.2.8. Ejercicio para la curva de daño del transformador

Trazar la curva de daño de un transformador de 1500 KVA, a 13,8 KV/2,4 KV, conexión delta en el primario y estrella en el secundario, su impedancia es de 5,75 %. Trazar también su valor de la corriente nominal (I_n).

Paso 1. Definir la categoría del transformador mediante el uso de la tabla VII. De acuerdo con su capacidad en KVA y su número de fases, resulta ser de: Categoría II, por lo cual su curva ANSI se representa por cuatro puntos.

Calcular la corriente nominal (I_n), la cual se considera igual a la corriente a plena carga (I_{pc}), mediante la siguiente formula:

$$I_n = I_{pc} = \frac{S}{V} = \frac{1500 KVA}{\sqrt{3} \times 13,8 KV} = 62,75A$$

Paso 2. Realizar el cambio de impedancia del transformador la cual se obtiene:

$$Z_t = 5,75 \% = 0,0575 pu$$

Paso 3. De acuerdo con la categoría del transformador obtener de la tabla VIII. El tiempo (t) y la corriente (I) para cada uno de los puntos ANSI que indican en la figura 34. Según sea el caso.¹²⁵

Punto ANSI 1 se obtiene con:

$$t_1 = 2seg \qquad I_1 = \frac{62,75A}{0,0575} = 1091,39A$$

Punto ANSI 2 se obtiene con:

¹²⁴ CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas eléctricas*. p.75.
¹²⁵ NANOPDF. *Coordinación de protecciones*. https://nanopdf.com/download/actividad-3-unidad-iii-coordinacion-de-protecciones_pdf. Consulta: enero 2020.

$$t_2 = 40,8\text{seg}$$

$$I_2 = \frac{0,7 \times 62,75A}{0,0575} = 763,98A$$

Punto ANSI 3 se obtiene con:

$$t_3 = 2,551 \times 0,0575^2 = 8,434\text{seg} \quad I_3 = \frac{0,7 \times 62,75A}{0,0575} = 763,98A$$

Punto ANSI 4 se obtiene con:

$$t_4 = 50\text{seg}$$

$$I_4 = 5 \times 62,75A = 313,77A$$

Tabla XIII. **Tabla de resultados para graficar la curva de daño**

Puntos a Graficar	Tiempo (seg)	Corriente (A)
Punto ANSI 1	2	1,091.39
Punto ANSI 2	4.08	763.98
Punto ANSI 3	8.434	763.98
Punto ANSI 4	50	313.77

Fuente: NANOPDF. *Coordinación de protecciones*. C:/Users/user/Downloads/348677710-Curva-de-Dano-de-Transformadores.pdf. Consulta: enero 2020.

3.3. Proyecto de instalación de un transformador

Se describe a continuación el proceso para la instalación de protecciones del transformador y se presenta una serie de preguntas del transformador en el sistema eléctrico de potencia.

3.3.1. Esquema de protección de un transformador

Se describen dos tipos de protección para el transformador: protección diferencial y protección de sobrecorriente.

3.3.1.1. Ejercicio para la protección diferencial

Si se colocara una protección diferencial a un transformador con capacidad de 10/14MVA, OA/FA, con el lado primario conectado en delta y con el voltaje nominal de 66 KV y con el secundario conectado en estrella aterrizada y voltaje nominal de 13,8 KV.

Una regla empírica que generalmente da buenos resultados para seleccionar la relación de transformación de los transformadores de corriente, en transformadores de potencia con conexión delta estrella es seleccionar la de los que se conectaran en estrella con el 200 % del valor nominal de corriente nominal del transformador y en el lado donde los transformadores se conectaran en delta, con el 300 %.

La corriente nominal a 14 MVA es de 120A, para el lado de 66 KV, y 586^a, para el lado de 13,8 KV, por lo que, utilizando la regla mencionada en el párrafo anterior, las relaciones de transformación serian 250:5 en el lado de 66 KV, y 1800:5 en el lado de 13,8 KV.

Una vez seleccionada la relación de transformación en cada nivel de voltaje, se debe seleccionar las derivaciones de compensación, mismas que se utilizan para reducir las diferencias entre los transformadores de corriente conectados en ambos lados del transformador.

Para comprender el funcionamiento de las derivaciones de compensación asumir que el relevador diferencial de transformador tiene derivación de compensación para 2,8 3,2 3,9 4,3 4,7 y 5,0A.¹²⁶

La derivación de compensación correspondiente se selecciona de tal forma que tenga un valor cercano al valor de corriente que entra al relevador tanto por el lado primario como del lado secundario.¹²⁷

Al calcular la corriente que entra al relevador por el lado de 66 KV. Se obtiene un valor de 2,4 A por lo que se selecciona la derivación de compensación de 2,8.

$$120 * \frac{5}{250} = 2,4A$$

Debido a que los transformadores de corriente en el lado de la estrella del transformador se conectan en delta, la corriente que entra al relevador por el lado de 13,8 KV, es de 2,82 A.

$$586 * \sqrt{3} * \frac{5}{1800} = 2,82A$$

Finalmente se evalúa que el desequilibrio de corrientes no sea mayor que el desequilibrio que tolera el relevador para lo cual se hacen los cálculos que se

¹²⁶ MORALES MAZARIEGOS, Juan Fernando. *Elementos básicos de protección de sistemas de potencias*. p.154.

¹²⁷ *Ibíd.*

muestran a continuación. Para calcular el desequilibrio del circuito se utiliza la siguiente fórmula:

$$M = \frac{\left| \frac{I_b}{I_a} * \frac{T_b}{T_a} \right| * 100}{S}$$

Donde I_b e I_a Corresponden a las corrientes que entran al relevador desde el lado de bajo y de lado de alto voltaje respectivamente y, T_b y T_a , corresponden a las derivaciones seleccionadas en el lado de bajo y alto voltaje respectivamente, y “S” es el valor de las relaciones de la ecuación que tenga el valor absoluto más pequeño. Sustituyendo valores se encuentra que:

$$M = \frac{\left| \frac{2,82}{2,4} * \frac{2,8}{2,8} \right| * 100}{1} = 17,5$$

Si se cumple que el valor calculado con la fórmula es menor que el desequilibrio característico del relevador es indicación que los ajustes están adecuados a la instalación.

En caso contrario se tendrá que probar con otras relaciones de transformación de corriente seleccionando otras derivaciones de compensación.

Actualmente los relevadores diferenciales de transformador tienen graduación para el desequilibrio característico, de tal manera que pueden ajustarse entre 5 y 40 %. Si el relevador de este ejemplo tuviera características ajustables, se ajusta a 25 % y debería funcionar correctamente¹²⁸.

3.3.1.2. Ejercicio para protección de sobrecorriente

Seleccionar el relé, fijar el relé para las siguientes condiciones:

$I_n = 300A$. El tiempo mínimo para el cual opera el relé con cortocircuito trifásico debe ser de 0,5 seg.

$$I_{f-1\emptyset} = 2\ 000A \text{ y } I_{f-3\emptyset} = 5\ 000A$$

Solución:

¹²⁸ MORALES MAZARIEGOS, Juan Fernando. *Elementos básicos de protección de sistemas de potencias*. p.155.

Se selecciona la corriente secundaria nominal del transformador como 5 A

Entonces:

$$\text{Relacion de Transformacion (RTC)} = \frac{300}{5} = 60$$

$$I_{f-1\phi sec} = \frac{I_{f-1\phi}}{RTC} = \frac{2000}{60} = 33,33A$$

$$I_{min-cc.sec} = \frac{I_{f-1\phi sec}}{2} = \frac{33,33}{2} = 16,67A$$

$$I_{f-3\phi sec} = \frac{I_{f-3\phi}}{RTC} = \frac{5000}{60} = 83,33A$$

$$I_{min-cc.sec} = \frac{I_{f-3\phi sec}}{2} = \frac{83,33}{2} = 41,66A$$

Por lo que se procede a determinar el tap:

$$\begin{aligned} tap &\leq \frac{I_{min-cc.sec}}{1,5} \\ tap &\leq \frac{16,67}{1,5} \end{aligned}$$

$$tap \leq 11,11A$$

$$tap \geq 1,5 * I_{max-carga} = 1,5 * 5 = 7,5A$$

Por lo cual se puede seleccionar el tap 8 que es inmediatamente superior (y menor que la $\frac{I_{mincc}}{1,5}$).¹²⁹

3.3.2. El transformador como parte de un sistema de potencia

A continuación, se realiza una serie de preguntas planteadas como un resumen de transformador dentro del sistema de potencia.

¹²⁹ HINOJOSA TAPIA. C. Coordinación de protecciones. https://www.academia.edu/29840277/Coordinacion_de_protecciones. Consulta: enero 2020.

3.3.2.1. Ejercicio de las partes del sistema de potencia

- ¿Cómo definen las partes principales de un sistema eléctrico de potencia?
 - Generación, Trasmisión, Sub-Trasmisión, Distribución.
- ¿Cómo se entiende la parte de Generación del Sistema eléctrico de Potencia?
 - Es la transferencia de cualquier forma de energía a energía Eléctrica. Para la generación industrial se recurre a instalaciones denominadas centrales eléctricas, estas constituyen el primer escalón del sistema de suministro eléctrico.
- ¿Diferencia entre las partes de Trasmisión y distribución del Sistema eléctrico de Potencia?
 - La parte de Trasmisión consiste en llevar la energía desde los sitios de producción (centrales de generación) hasta los sitios de consumo, es decir, las ciudades y la mayoría de los municipios del país, pero no hasta las viviendas., por otro lado, La parte de Distribución de distribución transportan energía de menor voltaje que las líneas de trasmisión, con el fin de llevar la energía desde las redes de distribución (postes, transformadores y redes) hasta las viviendas o empresas.

3.3.2.2. Ejercicio en la transmisión del sistema de potencia

- ¿Qué transformador es empleado en la parte de Transmisión en el Sistema eléctrico de potencia?
 - Se consideran los transformadores de Potencia. Ya que manejan grandes magnitudes de voltio-amperios, los cuales se expresan en KVA o en MVA.

- ¿Cuándo se considera un transformador de potencia?
 - Cuando su capacidad es de valor de mayor a 500 KVA, 750 KVA, 1 000 KVA, 1250 KVA o 1,25 MVA, hasta 500 MVA monofásicos y de 650 MVA trifásicos, 900 MVA. Estos cuando operan a voltaje de 500 KV y superiores.

- ¿Qué tipos de transformadores potencia se encuentran encuentra en la parte de Transmisión?
 - Transformadores de potencia de tipología seca, que tienen como principal característica su refrigeración por medio de aire y con aislamiento.

Transformadores de potencia en aceite, que tienen como principal característica que su núcleo ferromagnético está refrigerado en aceite dentro de un depósito.

3.3.2.3. Ejercicio en la distribución del sistema de potencia

- ¿Función principal del Transformador en la parte de Distribución?
 - Reduce la tensión primaria generada por la parte de energía a la tensión de utilización para los consumidores.

- ¿Qué transformadores pueden denominarse como de Distribución?
 - Se consideran los transformadores con potencias iguales o inferiores a un valor de 500 KVA.

- ¿Partes principales de un Transformador de Distribución?
 - Bobina Primaria: La corriente entrante alta tensión alterna, a partir de la planta de energía, fluye a través de esta, y en proceso genera un flujo magnético.

 - Bobina Secundaria: se desarrolla un campo magnético debido al flujo de la bobina primaria en este, que induce una corriente alta y baja tensión que fluye hacia fuera como energía útil.

 - Núcleo magnético: elemento clave para el funcionamiento del transformador de distribución, así como las bobinas primaria y secundaria comprende partes activas del transformador y es responsable de la regulación de la tensión.

- Tanque: Contenedor de acero con recubrimiento en polvo y una junta sellada sirve como el paquete mecánico o contenedor de protección para las partes activas del transformador, las cuales se sumergen en un aceite mineral no conductor inerte, que sirve de refrigeración y protección contra la humedad.

4. EVALUACIÓN DE CONCEPTOS

Con el objetivo de comprobar que se han comprendido los temas expuestos sobre los Transformador se plantea complete o resuelva las siguientes preguntas, ejercicios y problemas que se le presentan.

4.1. Problemas sobre introducción a los transformadores

Conforme a lo definido de la introducción, tipos y diseño de los transformadores se plantean los problemas siguientes.

4.1.1. Problemas de la composición de un transformador

- Definir con sus palabras lo que es un Transformador.
- Explique en que se basa el funcionamiento del Transformador.
- Realice el dibujo en representación de un Transformador e identifique las partes principales que lo conforman.

4.1.2. Tipos y construcción de transformadores

Se plantean a continuación ejercicios de comprobación de los conceptos del diseño y de los tipos de transformadores que existen.

4.1.2.1. Problemas de aplicación de diseño de un transformador

- Explique las partes principales que constituyen a un transformador.
- Dibujos los tipos de transformadores según la relación entre núcleo y devanados.
- Responda las siguientes interrogantes:
 - ¿En el núcleo del Transformador cuales son los tipos de uniones del Chapas que existen?
 - ¿Según la disposición relativa entre el devanado de alta tensión y baja tensión del transformador, de que tipo pueden ser?
 - ¿Cómo puede ser el sistema de refrigeración según el tamaño del transformador?
 - ¿Cómo puede ser el tipo de refrigeración designado en cuatro letras, según las normas CEI?
 - ¿Qué son los aislantes pasantes?
 - ¿En qué consiste la función del Relé Buchholz?

4.1.2.2. Problemas para identificar el número de fases

- Dibuje un transformador Trifásico y un transformador monofásico e identifique cada uno.
- Explique la diferencia entre un transformador trifásico y un transformador monofásico.

4.1.2.3. Problemas para identificar el tipo de operación

Indique los tipos de transformadores que existen según su operación y explique la característica de para cada uno.

4.1.2.4. Problemas para identificar el tipo de construcción

- Mencione los transformadores que pueden encontrarse según su construcción.
- Responda las siguientes interrogantes:
 - ¿Cuál es el Transformador que tiene conectado su devanado primario y secundario en serie, formando un devanado único en su construcción y funcionamiento?
 - ¿Cuál es transformador en el cual su núcleo consiste de un anillo sobre el que se bobinan los devanados primario y secundario?

- ¿Cuál es transformador donde se emplean bobinados sobre un carrete sin núcleo o con un pequeño cilindro de ferrita?

4.1.3. Problema para identificar el transformador dentro del sistema eléctrico de potencia

- Describir la función que realizan los transformadores en cada una de las partes del sistema de potencia.
- Dibuje el transformador dentro de las partes del sistema eléctrico de Potencia.

4.1.3.1. Problemas de los transformadores especiales

- Menciona los transformadores especiales que se pueden encontrar.
- Describe las aplicaciones que tienen los transformadores de Aislamiento.
- Responda las siguientes interrogantes:
 - ¿Cuáles son los transformadores de alimentación?
 - ¿Cómo funcionan los transformadores de medida?
 - ¿Qué tipos de transformadores de medida existen? Y ¿Cómo funcionan?
 - ¿Cómo funcionan los transformadores de instrumento?

- ¿Cuáles son los parámetros del transformador de potencial?
- ¿Clase de precisión del transformador de potencial?

4.1.4. Problemas de aplicación para las normas IEC e IEEE

Realice lo siguiente:

- Explique la diferencia de las normas IEEE e IEC.
- Investigue que otras normas son utilizadas para tema de Transformadores.

4.2. Problemas sobre el análisis del funcionamiento del transformador

Se presentan a continuación problemas de análisis referentes al funcionamiento del transformador en las condiciones ideal y real.

4.2.1. Transformador ideal

Problema de aplicación del funcionamiento en Vacío y en Carga:

Un transformador monofásico de 100 KVA, 3000/220V, 50Hz, tiene 100 espiras en el devanado secundario. Supuesto que el transformador es ideal, calcular: a) corrientes primaria y secundaria a plena carga, b) flujo máximo, c) número de espiras del arrollamiento primario. Respuesta: a) 33,33 A, 454,55 A; b) $9,91 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$; c) 1364 espiras.¹³⁰

¹³⁰ CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas eléctricas*. p.244.

4.2.2. Transformador real

Un transformador monofásico de 125 KVA, 3 000/380 V, 50 Hz, ha dado los siguientes resultados en unos ensayos: Vacío; 3 KV, 0,8 A, 1 000 W (medidos en el primario). Cortocuito; 10 V, 300 A, 750 W (medidos en el secundario). Calcular:

Componentes de la corriente de vacío.

Potencia de pérdidas en el hierro y de pérdidas en el cobre a plena carga.

Respuestas:

$$I_{Fe} = 0,334 \text{ A}, I_{\mu} = 0,727 \text{ A}; P_{Fe} = 1000 \text{ W}, P_{cu} = 901,8 \text{ W}^{131}$$

4.2.3. Circuito equivalente del transformador

A continuación, se presentan problemas de análisis que relacionan al circuito equivalente del transformador y sus parámetros.

4.2.3.1. Problema del circuito equivalente aproximado y reducido

Al probar un transformador de 1 000 VA, 230-115 V para determinar su circuito equivalente, los resultados obtenidos son los siguientes:

Todos los datos fueron tomados en el lado primario del Transformador. Encuentre el circuito equivalente del transformador referido a su lado de bajo voltaje.¹³²

¹³¹ CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas eléctricas*. p.244.

¹³² *Ibíd.* p.113.

Tabla XIV. **Parámetros del ejemplo circuito equivalente del transformador**

Prueba en Vacío	Prueba de Cortocircuito
$V_o = 115 V$	$V_{cc} = 17,1 V$
$I_o = 0,11 A$	$I_{cc} = 8,7 A$
$P_o = 3,9 W$	$P_{cc} = 38,1 W$

Fuente: J. CHAPMAN, Stephen. *Maquinas Eléctricas*. p. 113.

4.2.3.2. Problema de ensayo para los parámetros

Un transformador monofásico de 10 KVA, 220/380 V, 50 Hz, ha dado los siguientes resultados en unos ensayos: Vacío: 220 V, 2 A, 150 W (medidos en el lado de Baja voltaje). Cortocircuito: 10 V, 26,32 A, 75 W (medidos en el lado de Alto voltaje). Calcular: Parámetros del circuito equivalente del Transformador reducido al primario. Respuestas: $R_{fe} = 323,5 \Omega$; $X_{\mu} = 117,02 \Omega$; $R_{cc} = 0,036 \Omega$; $X_{cc} = 0,122 \Omega$ ¹³³

4.2.4. Diagrama vectorial del transformador

A continuación, se presentan problemas para la ejecución y análisis del diagrama vectorial del transformador.

4.2.4.1. Problema según el circuito aproximado

Un transformador monofásico de 14 334 VA, Y 50 Hz tiene las siguientes características:

$$N_1 = 1500 \text{ espiras}, r_1 = 3 \Omega, x_1 = 10 \Omega$$

$$N_2 = 150 \text{ espiras}, r_2 = 0,03 \Omega, x_2 = 0,1 \Omega$$

La corriente de vacío es de 0,2A y las pérdidas son de 100W.

Para una carga con un "cos ϕ " de 0,9 y una tensión secundaria en carga de 220 V. Hallar el diagrama vectorial completo del transformador.¹³⁴

¹³³ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.244.

¹³⁴ ACADEMIA. *Problemas resueltos (transformadores)*. https://www.academia.edu/35372572/PROBLEMAS_RESUELTOS_TRANSFORMADORES. Consulta: febrero 2020.

4.2.4.2. Problema según el circuito equivalente reducido

Explique en qué consiste el Diagrama vectorial del transformador según el circuito equivalente reducido.

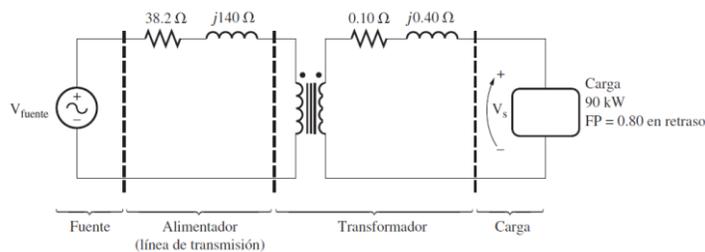
4.2.5. Problema de aplicación regulación de voltaje del transformador

La figura 75 muestra un sistema de potencia monofásico. La fuente de potencia alimenta un transformador de 100 KVA, 14/2,4 KV a través de un alimentador cuya impedancia es $38,3 + j140 \Omega$. La impedancia serie equivalente del transformador referida a su lado de bajo voltaje es $0,12 + j0,4 \Omega$. La carga sobre el transformador es de 90 KW con FP 0,80 en atraso y 2300 V. Encuentre:

¿Cuál es el voltaje en la fuente de potencia del sistema?

¿Cuál es la regulación de voltaje del transformador?¹³⁵

Figura 75. Circuito de ejercicio de regulación de voltaje



Fuente: J. CHAPMAN, Stephen. *Maquinas Eléctricas*. p.113.

¹³⁵ CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas eléctricas*. p.113.

4.2.6. Eficiencia del transformador

Calcular las eficiencias de un transformador de 100 KVA para media carga, plena carga y uno y un cuarto de la plena carga, con f.d.p.: De la unidad y a 0,8.

Las pérdidas en el cobre a plena carga son de 1000 W y las pérdidas en el hierro son de 1 000 W.

Respuesta: 97,56 %, 98,04 %, 97,98 %; 96,96 %, 97,56 %, 97,50 %.¹³⁶

4.2.6.1. Problemas de análisis de pérdidas del transformador

La eficiencia de un transformador monofásico de 100 KVA es de 93,02 % cuando suministra la plena carga con un f.d.p. de 0,8 y de 94,34 % a media carga con f.d.p. unidad. Calcular: pérdida en el hierro y la pérdida en el cobre a plena carga.

Respuesta: 2 KW; 4 KW.¹³⁷

4.2.7. Problemas de aplicación de valores por unidad para un transformador

La corriente de excitación que se mide en el lado de bajo voltaje de un transformador de 50 KVA, 2400:240 V es 5,41 A. Su impedancia equivalente referida al lado de alto voltaje es $1,42 + j1,82 \Omega$. Al utilizar la capacidad del transformador como base, exprese en términos del sistema por unidad en ambos lados del transformador, el lado de alto y de bajo voltaje: la corriente de excitación y la impedancia equivalente.¹³⁸

Respuesta: $I_{excitacion} = 0,026 pu$; $Z_{equivalente} = 0,0123 + j0,0158 pu$.

¹³⁶ CHAPMAN, Stephen J. *Maquinas eléctricas*. p.245.

¹³⁷ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p.245.

¹³⁸ FITZGERALD, Arthur. *Maquinas eléctricas*. p.100

4.2.8. Problema de análisis de la curva de daño del transformador

Calcular y trazar la curva de daño de un transformador de 12 500 KVA, 69 KV/13,8 KV, conexión delta en el primario y estrella en el secundario, impedancia del transformador 8 % y la impedancia de la fuente es de 2,5 %. Encontrar también el valor de la corriente nominal (I_n).

Calcular y trazar la curva de daño de un transformador de 500 KVA, 13,8 KV/0,48KV, conexión delta en el primario y estrella en el secundario, impedancia 6,75 %. Encontrar también el valor de la corriente nominal (I_n).¹³⁹

4.3. Proyecto de instalación del transformador

Se presentan preguntas de las protecciones y de la función del transformador en el sistema de potencia.

4.3.1. Esquema de protección del transformador

A continuación, se tendrán interrogantes sobre la protección diferencial y la protección de sobrecorriente del transformador.

4.3.1.1. Problema de protección diferencial

Responda las siguientes interrogantes:

- ¿En qué se basada la protección diferencial del transformador?
- ¿Cuándo actúa un relé de protección diferencial?
- ¿En qué momento de debe actuar el relé de protección diferencial?

¹³⁹ NANOPDF. Coordinación de protección. https://nanopdf.com/download/actividad-3-unidad-iii-coordinacion-de-protecciones_pdf. Consulta: enero 2020.

- ¿Aproximadamente la protección diferencial que tan rápido funciona?
- Describa la dificultad que se presenta al energizar el transformador cuando se tiene la aplicación de la protección diferencial.
- Describa la dificultad que se presenta al tener Diferentes niveles de voltaje cuando se tiene la aplicación de la protección diferencial.

4.3.1.2. Problema de protección de sobrecorriente

Responda las siguientes interrogantes:

- ¿Cómo funcionan los Fusibles y en que transformadores pueden aplicarse como protección?
- ¿Cómo funcionan los relés de sobrecorriente y en que transformadores pueden aplicarse como protección?
- ¿Cómo operan los relés de sobrecorriente de tiempo definido?
- ¿Cómo operan los relés de sobrecorriente de tiempo inverso?
- ¿Cuál es el principio del relé electromecánico de tiempo inverso?

4.3.2. El transformador como parte del sistema eléctrico de potencia

Se plantean a continuación una serie de preguntas que ayudaran al estudiante a comprobar el entendimiento del transformador dentro del sistema eléctrico de potencia.

4.3.2.1. Problema partes del sistema eléctrico de potencia

Responda las siguientes interrogantes:

- ¿Qué es un Sistema eléctrico de Potencia?
- ¿Explique cada una de las partes del Sistema eléctrico de Potencia?
- ¿Cuál es la función del Transformador en el sistema eléctrico de Potencia?

4.3.2.2. Problemas de la función en la parte de transmisión

Responda las siguientes interrogantes:

- ¿Cuál es el papel del transformador en la Parte de Transmisión?
- ¿Dónde son utilizados los transformadores de potencia?
- ¿Cuáles son las piezas principales de los transformadores de potencia?

- ¿Cuál es la ventaja de los transformadores de potencia de tipología seca y los sumergidos en aceite?

4.3.2.3. Problemas de la función en la parte de distribución

Responde a las siguientes interrogantes:

- ¿Qué es el Transformador de Distribución en el sistema eléctrico de Potencia?
- ¿Cuáles son y explique la función de las partes principales del Transformador de Distribución?
- ¿Cuál es la diferencia entre el transformador de distribución y el transformador de potencia?

CONCLUSIONES

1. Se detalló el concepto del método Constructivista y de las TICS junto a las características que definen, del porqué de la utilización estas formas de aprendizaje y la importancia de poder emplearlas para que el estudiante sea capaz de completar o iniciar el estudio de un tema de su interés.
2. A partir y en base de los principales documentos empleados para impartir el curso de Conversión de Energía Electromecánica 2, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, de la Facultad de Ingeniería, se recabo la información para conformar los conceptos de los temas de introducción y análisis del funcionamiento de los transformadores.
3. Se expusieron las aplicaciones de los temas a través de una serie de ejercicios y de plantear interrogantes que resumen los conceptos que son más teóricos que prácticos, del curso de Conversión de Energía Electromecánica 2, con lo que estudiante podrá ir simultáneamente aprendiendo con las aplicaciones y los conceptos del curso.
4. En la evaluación de los conceptos se plantearon ejercicios e interrogantes, los cuales ponen a prueba el estudio y lo comprendido por el estudiante, recabados en base a los libros con que se imparten los temas del curso de Energía Electromecánica 2, con el fin de comprobar que el estudiante ha obtenido el conocimiento completo del curso.
5. Con los conceptos, aplicaciones y evaluaciones de los temas del curso de Conversión de Energía Electromecánica 2 aquí expuestos, se ha

procedido a realizar una serie de videos que plasman la información que el estudiante debe tener clara para este curso y que puede obtener en forma digital como apoyo a este documento.

RECOMENDACIONES

1. Continuar investigando los temas expuestos del curso de Conversión de Energía Electromecánica 2, con el fin de extender la información de cada uno de los temas, o bien uno que sea de su mayor interés, así mismo sea el caso considere que necesita estudiar más para la total comprensión.
2. Consultar el enlace de los videos, de manera de ir visualizándolos conforme avanza en los temas de estudio, diríjase al enlace siguiente: <https://drive.google.com/drive/folders/1ilPPb71DH6wHWnApzAKmmZqQdFohvDC7>.
3. Practicar cada uno de los problemas planteados en el capítulo 4, con el fin de comprobar la comprensión de cada uno de los temas del curso, apoyándose con las herramientas de estudio, dentro y fuera del documento, referentes a los transformadores.
4. Estudiar los temas base de las máquinas de conversión electromecánica, con el fin de comprender claramente los términos y temas desarrollados a lo largo de este documento, por lo que se considera necesario que se realice un repaso de los temas expuestos en el curso de Conversión de Energía Electromecánica 1.

BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVAREZ PANIAGUA, José Eduardo. *Diseño de prácticas para el laboratorio virtual del curso de conversión de energía electromecánica 2 utilizando LabVIEW*. Guatemala: 2012. 144 p.
2. CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas eléctricas*. 5a ed. España: McGraw-Hill/INTERAMERICANA, 2012. 502 p.
3. COLL, Cesar. *Aprender y enseñar con las TIC: expectativas, realidad y potencialidades*. [en línea]. <http://www.ub.edu/ntae/dcaamtd/Coll_en_Carneiro_Toscano_Diaz_LASTIC2.pdf>. [Consulta: 15 de junio de 2019].
4. ECURED, *Constructivismo (Pedagogía)* [en línea]. <[https://www.ecured.cu/Constructivismo_\(Pedagog%C3%ADa\)](https://www.ecured.cu/Constructivismo_(Pedagog%C3%ADa))>. [Consulta: 14 de junio de 2019].
5. E.E. STAFF. M.I.T. *Circuitos magnéticos y transformadores*. [en línea]. <https://www.academia.edu/38305916/Circuitos_Magn%C3%A9ticos_y_Transformadores_EE_Staff_M_I_T>. [Consulta: 20 de octubre de 2019].
6. FITZGERALD, Arthur Eugene, et al. *Teoría y análisis de las máquinas eléctricas*. 6a. ed. España: McGraw-Hill, 1984. 683 p.

7. FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. 5a ed. España: McGraw-Hill/INTERAMERICANA. 2003. 769 p.
8. I OLIVA, Enrique Ras. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. 7a ed. España: Marcombo. 1991. 304 p.
9. MARTIN, José Raúl, *Diseño de subestaciones eléctricas*. España: McGraw-Hill, 1987. 505 p.
10. MERCADO TORRES, Felipe de Jesús; SALAS AQUINO, Cristian Ulises; SOLIS OIIVERA, Omar Adán. *Análisis de protecciones de sobrecorriente para un transformadojr de 85/23kV, 30MVA, En conexión delta-estrella*. México: 2015. 127 p.
11. MORALES MAZARIEGOS, Juan Fernando. *Elementos básicos de protección de sistema de potencia. departamento de comunicación corporativa de EGGSA*. 1a ed. Guatemala: Sergrafica S.A. 2005. 169 p.
12. Prezi. *Importancia de las TIC en la sociedad*. [en línea]. <<https://prezi.com/5r99pkr3-rcd/importancia-de-las-tic-en-la-sociedad/>>. [Consulta: 17 de junio de 2019].
13. Organización de la Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. *Las Tecnologías de la información y la comunicación en la enseñanza*. [en línea]. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000139028_spa>. [Consulta: 15 de junio de 2019].

APÉNDICE

Apéndice 1. Correo de entrega de material Visual a la EIME



PEREZ LOPEZ, MIGUEL JOSE <2296174840101@ingenie... mié, 12 ene, 14:10 (hace 6 días) ☆ ↶ ⋮
para mecanicaelectrica, mecanicaelectrica ▾

Buenas tardes estimados, como parte de la finalización de mi trabajo de graduación, nombrado como:

"MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO A TRAVÉS DE LA ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS: INTRODUCCIÓN Y ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES, DEL CURSO CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECÁNICA 2, EN LA ESCUELA MECÁNICA ELÉCTRICA, FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA"

Yo, Miguel José Pérez López, de la carrera de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, y por instrucción del coordinador de potencia, el Ing. Fernando Moscoso, Hago entrega formal a la EIME, el enlace, el cual contiene la serie de Videos que completan mi trabajo, habiendo sido revisados y aprobados por mi asesor también el Ing. Fernando Moscoso.

Enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/1iIPb71DH6wHWnApzAKmmZqQdFohvDCZ>

Sin otro particular, muchas gracias

Saludos.

Atte. Miguel José Pérez López
Carne: 201314557
DPI: 2296174840101
Carrera: Ingeniería Eléctrica

Fuente: elaboración propia, empleando Gmail.

