



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

MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO A TRAVÉS DE LA ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS AUTOTRANSFORMADORES, CONEXIONES Y PRUEBAS DE TRANSFORMADORES, DEL CURSO CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA 2, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

José Pablo Alexánder Abad Cortez

Asesorado por el Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira

Guatemala, septiembre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO A TRAVÉS DE LA ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS AUTOTRANSFORMADORES, CONEXIONES Y PRUEBAS DE TRANSFORMADORES, DEL CURSO CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA 2, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA 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

JOSÉ PABLO ALEXÁNDER ABAD CORTEZ

ASESORADO POR EL ING. FERNANDO ALFREDO MOSCOSO LIRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
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 ACADÉMICO A TRAVÉS DE LA ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS AUTOTRANSFORMADORES, CONEXIONES Y PRUEBAS DE TRANSFORMADORES, DEL CURSO CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA 2, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA 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.

José Pablo Alexánder Abad Cortez

Guatemala 21 de enero de 2020


Coordinador Área de potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería

Señor coordinador

Por este medio hago de su conocimiento que he concluido la revisión del trabajo de graduación del estudiante José Pablo Alexander Abad Cortez, titulado:

MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO A TRAVÉS DE LA ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS AUTOTRANSFORMADORES, CONEXIONES Y PRUEBAS DE TRANSFORMADORES, DEL CURSO CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA 2, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.

El cual cumple con los objetivos que se propusieron para su elaboración, por lo que el estudiante y el asesor, nos hacemos responsables del contenido de este trabajo.



Fernando Alfredo Moscoso Lira
Ingeniero Mecánico Electricista
Colegiado 6386
Asesor



REF. EIME 06. 2020.
20 de ENERO 2020.

Señor Director
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO A TRAVÉS DE LA ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS AUTOTRANSFORMADORES, CONEXIONES Y PRUEBAS DE TRANSFORMADORES DEL CURSO CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA 2, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, del estudiante; José Pablo Alexander Abad Cortez que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

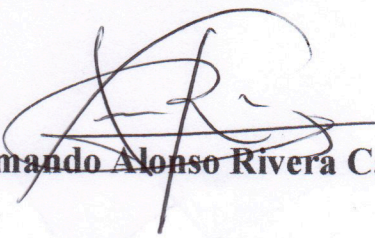
Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
Coordinador de Potencia





REF. EIME 06. 2020.

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: JOSÉ PABLO ALEXÁNDER ABAD CORTEZ titulado: MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO A TRAVÉS DE LA ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS AUTOTRANSFORMADORES, CONEXIONES Y PRUEBAS DE TRANSFORMADORES DEL CURSO CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA 2, DE 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

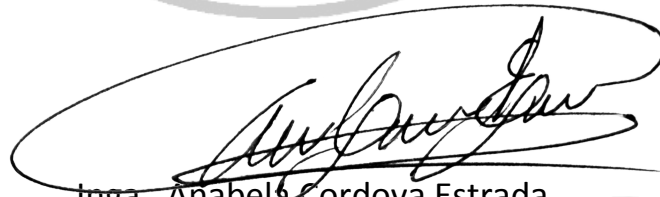


GUATEMALA, 7 DE FEBRERO 2020.

DTG. 254.2020.

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 Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **MEJORAMIENTO DEL RENDIMIENTO ACADÉMICO A TRAVÉS DE LA ESTRUCTURACIÓN VIRTUAL CONSTRUCTIVISTA DE LOS TEMAS AUTOTRANSFORMADORES, CONEXIONES Y PRUEBAS DE TRANSFORMADORES, DEL CURSO CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA 2, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **José Pablo Alexánder Abad Cortez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, septiembre de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por concederme la vida y darme las fuerzas para culminar esta etapa de mi vida.
- Mis padres** Dora Virginia Cortez Aguilar y Carlos Enrique Abad Bolos, por ser las personas más importantes de mi vida, este logro también es de usted, sin su apoyo esto no hubiera sido posible. Gracias por estar siempre apoyándome, por darme esos consejos que han servido para ser la persona que soy. Padre, hoy puedo decirte que todas aquellas desveladas en tu trabajo, las aguantadas de hambre y demás, no fueron en vano. Madre, hoy puedo decirte que todos tus esfuerzos que como madre hiciste para que a mí no me faltara nada, no fueron en vano; por eso y más, papá, mamá, estoy eternamente agradecido.
- Mis hermanos** Julio, Wilson, Junior Abad, por ser parte de este logro, por enseñarme a través de ejemplos, por estar siempre apoyándome y demostrarme que con ayuda de Dios todo es posible.
- Mis abuelos** Felipe Abad, Tomas Cortez.

Mis abuelas

Juan Balbina Bolos, Magdalena Aguilar (q.e.p.d), por su apoyo incondicional; mamá Albina siempre quisiste estar en este logro y puedo decirte lo logre.

Mis amigos

Manuel Rivera, Edson Marcial, Marcos Miranda, Pablo Juárez, Miguel Pérez, Jonathan Medina, Pablo López, Laura Díaz, Manuel Rojas, Héctor Cacho, Miguel Carrillo y demás amigos; ustedes también forman parte de este logro; gracias por sus consejos y su constante apoyo; gracias porque siempre pude contar con ustedes.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por permitirme formarme como profesional y ser mi <i>alma máter</i> .
Facultad de Ingeniería	Por brindarme las herramientas y los conocimientos para alcanzar esta meta y ser mi segundo hogar durante mi carrera.
Mis amigos de la facultad	Por ser una importante influencia durante mi carrera.
Mi familia	Por su amor y buenos consejos, porque ante las diversas dificultades pude salir adelante gracias a su apoyo.
Mi asesor	Ing. Fernando Moscos, por compartirme sus conocimientos a lo largo del proyecto.
Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid	Moisés San Martín, José Serrano y Eduardo Parra, por el apoyo brindado con el software índices horarios, el cual forma parte de este proyecto.
Omicron	Por el material de apoyo que me brindaron para realizar este proyecto.

2.	CONCEPTOS A DIGITALIZAR.....	17
2.1.	Conexiones de transformadores	17
2.1.1.	Formas de conexión de los devanados en un transformador.....	18
2.1.1.1.	Conexión estrella.....	19
2.1.1.2.	Conexión delta	22
2.1.1.3.	Otras conexiones	27
2.1.2.	Designación de terminales	28
2.1.2.1.	Según la norma IEEE C57.12.70	30
2.1.3.	Polaridad de los transformadores.....	32
2.1.3.1.	Polaridad aditiva.....	32
2.1.3.2.	Polaridad sustractiva	33
2.1.3.3.	Chequeo de polaridad	34
2.1.4.	Índice horario.....	35
2.1.4.1.	Método de reloj.....	36
2.1.4.2.	Método según la norma IEEE C57.12.70.....	44
2.1.5.	Tipos de conexión de los transformadores.....	46
2.1.5.1.	Conexión estrella-estrella	49
2.1.5.2.	Conexión estrella-delta.....	53
2.1.5.3.	Conexión delta-estrella.....	56
2.1.5.4.	Conexión delta-delta	58
2.1.5.5.	Conexiones de finalizada especial	60
2.1.6.	Análisis comparativo entre las conexiones.....	65
2.1.6.1.	Ventajas y desventajas entre los tipos de conexión de los transformadores	65
2.2.	Autotransformadores.....	73
2.2.1.	Aspectos constructivos.....	75
2.2.1.1.	Polaridad de un autotransformador	76

	2.2.1.2.	Autotransformador elevador	79
	2.2.1.3.	Autotransformador reductor	83
	2.2.2.	Circuito equivalente	86
	2.2.3.	Ventajas y desventajas frente a un transformador..	93
	2.2.4.	Cálculos asociados a un transformador.....	95
	2.2.5.	Pérdidas y rendimiento del autotransformador	99
2.3.		Protocolos de pruebas en un transformador.....	100
	2.3.1.	Pruebas eléctricas	101
	2.3.1.1.	Prueba de corriente de excitación	102
	2.3.1.2.	Prueba de relación de transformación.....	105
	2.3.1.3.	Prueba de polaridad	107
	2.3.1.4.	Prueba de resistencia de los devanados	108
	2.3.1.5.	Prueba de vacío.....	110
	2.3.1.6.	Prueba de corto circuito.....	112
	2.3.1.7.	Prueba de sonido audible.....	114
	2.3.1.8.	Prueba de factor de potencia a los aislamientos.....	116
	2.3.2.	Pruebas al aceite dieléctrico	118
	2.3.2.1.	Rigidez dieléctrica (ASTM D-877, D-1816).....	120
	2.3.2.2.	Tensión interfacial (ASTM D-971 o D-2285).....	121
	2.3.2.3.	Factor de potencia (ASTM D-924)	122
	2.3.2.4.	Color (ASTM D-1500)	123
	2.3.2.5.	Contenido de humedad (ASTM D-1533).....	125
	2.3.2.6.	Inspección visual (ASTM D-1524)	126

2.3.2.7.	Gravedad específica (ASTM D-1298).	127
2.3.2.8.	Número de neutralización o acidez (ASTM D-974)	128
2.3.2.9.	Contenido inhibidor (ASTM D-2668, D-4768)	130
3.	APLICACIONES DE CONCEPTOS MEDIANTE EJERCICIOS	131
3.1.	Aplicación de conexiones de transformadores	131
3.1.1.	Formas de conexión de los devanados de un transformador	131
3.1.1.1.	Ejercicio conexión estrella	131
3.1.1.2.	Ejercicio conexión triángulo	133
3.1.1.3.	Ejercicio otras conexiones	134
3.1.2.	Ejercicios aplicados a las polaridades de los transformadores	135
3.1.2.1.	Polaridad aditiva	135
3.1.2.2.	Polaridad sustractiva	136
3.1.2.3.	Chequeo de polaridad	137
3.1.3.	Índice horario	139
3.1.3.1.	Ejemplificación del método del reloj ...	139
3.1.4.	Tipos de conexión de los transformadores	140
3.1.4.1.	Ejercicios conexión estrella-estrella ...	140
3.1.4.2.	Ejercicios conexión estrella-delta	143
3.1.4.3.	Ejercicios conexión delta-estrella	147
3.1.4.4.	Ejercicios conexión delta-delta	151
3.1.4.5.	Ejercicios conexiones de finalizada especial	154
3.1.5.	Análisis comparativo entre las conexiones	158

	3.1.5.1.	Ejercicios de aplicación de las ventajas y desventajas entre los tipos de conexión de los transformadores..	158
3.2.		Autotransformadores	160
	3.2.1.	Aspectos constructivos	160
		3.2.1.1. Ejercicio de autotransformador elevador	161
		3.2.1.2. Ejercicio de autotransformador reductor	162
	3.2.2.	Ejercicio de circuito equivalente.....	164
	3.2.3.	Ventajas y desventajas frente a un transformador..	167
		3.2.3.1. Ejercicio/preguntas de aplicación	167
	3.2.4.	Cálculos asociados a un transformador.....	168
	3.2.5.	Aplicación de las pérdidas y rendimientos de autotransformador	173
3.3.		Protocolos de pruebas en un transformador.....	174
	3.3.1.	Procedimiento a llevar a cabo para realizar las diferentes pruebas eléctricas	174
		3.3.1.1. Prueba de corriente de excitación	175
		3.3.1.2. Prueba de relación de transformación	175
		3.3.1.3. Prueba de polaridad	179
		3.3.1.4. Prueba de resistencia de los devanaos	183
		3.3.1.5. Prueba de vacío.....	187
		3.3.1.6. Prueba de cortocircuito.....	189
		3.3.1.7. Prueba de sonido audible	191
		3.3.1.8. Prueba de factor de potencia a los aislamientos.....	194

3.3.2.	Procedimiento a llevar a cabo para las pruebas al aceite dieléctrico.....	196
3.3.2.1.	Rigidez dieléctrica	197
3.3.2.2.	Tensión interfacial	200
3.3.2.3.	Factor de potencia.....	201
3.3.2.4.	Color.....	204
3.3.2.5.	Contenido de humedad	206
3.3.2.6.	Inspección visual	208
3.3.2.7.	Gravedad específica	210
3.3.2.8.	Número de neutralización o acidez	212
3.3.2.9.	Contenido inhibitor	215
4.	PROBLEMAS DE APLICACIÓN DE CONCEPTOS	217
4.1.	Problemas a cerca de las conexiones de transformadores....	217
4.1.1.	Formas de conexión de los devanados de un transformador.....	217
4.1.1.1.	Problemas de aplicación conexión estrella.....	217
4.1.1.2.	Problemas de aplicación conexión delta	218
4.1.1.3.	Problemas para otras conexiones	219
4.1.2.	Polaridad de los transformadores.....	221
4.1.2.1.	Problemas de aplicación polaridad aditiva.....	221
4.1.2.2.	Problemas de aplicación polaridad sustractiva	222
4.1.2.3.	Problema aplicado al chequeo de polaridad.....	223
4.1.3.	Índice horario.....	225

	4.1.3.1.	Problemas de aplicación método del reloj.....	225
4.1.4.		Tipos de conexión de los transformadores.....	226
	4.1.4.1.	Problemas de aplicación conexión estrella-estrella	226
	4.1.4.2.	Problemas de aplicación conexión estrella-delta	227
	4.1.4.3.	Problemas de aplicación conexión delta-estrella	229
	4.1.4.4.	Problemas de aplicación conexión delta-delta.....	230
	4.1.4.5.	Problemas de aplicación conexiones de finalizada especial	232
4.1.5.		Análisis comparativo entre las conexiones.....	234
	4.1.5.1.	Preguntas de aplicación referentes a las ventajas y desventajas entre los tipos de conexión de los transformadores.....	234
4.2.		Autotransformadores.....	236
	4.2.1.	Aspectos constructivos	236
		4.2.1.1. Problemas de aplicación de un autotransformador elevador.....	236
		4.2.1.2. Problemas de aplicación de un autotransformador reductor	237
	4.2.2.	Problemas referentes al circuito equivalente	238
	4.2.3.	Preguntas de aplicación de las ventajas y desventajas de un autotransformador frente a un transformador	239

4.2.4.	Problema de aplicación referente a los cálculos asociados a un autotransformador	240
4.2.5.	Problemas y preguntas de aplicación de las pérdidas y rendimiento del autotransformador	241
4.3.	Preguntas referentes a los protocolos de prueba en un transformador.....	242
4.3.1.	Pruebas eléctricas.....	242
4.3.1.1.	Prueba de corriente de excitación.....	242
4.3.1.2.	Prueba de relación de transformación.....	243
4.3.1.3.	Prueba de polaridad	244
4.3.1.4.	Prueba de resistencia de los devanados.....	245
4.3.1.5.	Prueba de vacío	246
4.3.1.6.	Prueba de corto circuito.....	246
4.3.1.7.	Prueba de sonido audible.....	247
4.3.1.8.	Prueba de factor de potencia a los aislamientos	247
4.3.2.	Pruebas al aceite dieléctrica.....	248
4.3.2.1.	Rigidez dieléctrica	248
4.3.2.2.	Tensión interfacial	249
4.3.2.3.	Factor de potencia.....	251
4.3.2.4.	Color.....	252
4.3.2.5.	Contenido de humedad	254
4.3.2.6.	Inspección visual	255
4.3.2.7.	Gravedad específica	256
4.3.2.8.	Número de neutralización o acidez	258
4.3.2.9.	Contenido inhibitor	259

5.	EVALUACIONES	261
5.1.	Evaluaciones de contenidos en general	261
5.1.1.	Ejercicios para resolver	261
5.1.2.	Preguntas relacionadas a la teoría	268
5.1.3.	Laboratorios.....	277
6.	CALENDARIZACIÓN DE LOS TEMAS	279
6.1.	Distribución de los temas de la clase y material audiovisual .	281
	CONCLUSIONES	285
	RECOMENDACIONES	287
	BIBLIOGRAFÍA.....	289
	APÉNDICES	293
	ANEXO	299

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Banco trifásico de transformadores compuesto por tres transformadores independientes.....	17
2.	Transformador trifásico construido sobre un núcleo que posee tres columnas.....	18
3.	Conexión estrella de los arrollamientos de un transformador	20
4.	Voltajes en una conexión estrella.....	20
5.	Voltajes y diagrama vectorial de una conexión estrella.....	21
6.	Conexión, triángulo de los arrollamientos de un transformador	23
7.	Voltajes en una conexión delta	24
8.	Corrientes en una conexión delta y diagrama vectorial.....	25
9.	Neutro en una conexión delta	26
10.	Conexión delta abierta	27
11.	Conexión zig-zag de los arrollamientos de un transformador	28
12.	Marcas de polaridad.....	29
13.	Marcas de polaridad según región	29
14.	Marcas de polaridad.....	30
15.	Marca de terminales.....	31
16.	Designación de terminales con múltiples taps	32
17.	Polaridad aditiva de un transformador.....	33
18.	Polaridad sustractiva de un transformador.....	34
19.	Polaridades determinadas mediante la prueba de polaridad	35
20.	Identificación de terminales.....	37
21.	Conexión delta del primario y su respectiva alimentación.....	37

22.	Delta con identificación de líneas de alimentación trifásica	38
23.	Designación de marcas en la delta para L1	39
24.	Designación de las marcas de los transformadores en la delta	39
25.	Delta por medio del método de reloj	40
26.	Estrella y delta por medio del método de reloj	41
27.	Designación de marcas en el lado del secundario	42
28.	Designación de las líneas en la configuración estrella.....	43
29.	Conexión final Δ -Y1	44
30.	Conexión Δ -Y1 a realizar según IEEE C57.12.70.....	45
31.	Configuración de los devanados del transformador en Δ -Y1 según norma IEEE C57.12.70	45
32.	Transformador trifásico en configuración estrella-estrella.....	47
33.	Transformador trifásico en configuración estrella-delta.....	48
34.	Diagrama fasorial para el lado de baja tensión de una configuración delta.....	49
35.	Diagrama fasorial de desfase entre tensiones de una configuración estrella-delta	49
36.	Conexión Y-Y.....	51
37.	Núcleo trifásico	52
38.	Conexión Y- Δ	53
39.	Conexión Δ -Y.....	56
40.	Conexión Δ - Δ	59
41.	Conexión Scott-T del transformador	61
42.	Voltajes resultantes aplicados a los primarios	61
43.	Voltajes bifásicos de salida en los secundarios	62
44.	Conexión T trifásica	63
45.	Voltajes de salida.....	63
46.	Conexión Y abierta – Δ abierta	64
47.	Autotransformador	74

48.	Transformador y autotransformador.....	76
49.	Polaridad aditiva y sustractiva de un autotransformador.....	77
50.	Autotransformador elevador.....	80
51.	Autotransformador reductor.....	85
52.	Circuitos equivalentes de un transformador.....	87
53.	Circuito equivalente exacto de un autotransformador reductor.....	88
54.	Circuito equivalente aproximado de un autotransformador reductor....	90
55.	Circuito equivalente de un autotransformador reductor referido al devanado serie.....	91
56.	Representación del circuito equivalente aproximado de un autotransformador que equivale a un transformador convencional.....	92
57.	Componentes de la corriente de excitación.....	103
58.	Curvas ponderadas A, B, C.....	116
59.	Conexión estrella.....	132
60.	Conexión delta o triángulo.....	133
61.	Conexión zig-zag.....	135
62.	Identificación de transformadores en forma aditiva.....	136
63.	Polaridad aditiva del transformador de la figura 62.....	136
64.	Polaridad sustractiva del transformador de la figura 62.....	137
65.	Ejercicio chequeo de polaridad.....	138
66.	Estrella del lado del primario y su representación en el reloj para una configuración Y-Y2.....	139
67.	Resultado de la configuración Y-Y2.....	140
68.	Esquema para una configuración Y-Y10 y su representación en el reloj.....	141
69.	Resultado de la configuración Y-Y10.....	141
70.	Configuración Y-Y10 con diferente posición de las líneas del lado del primario y su representación en el reloj.....	142

71.	Identificación de las estrellas y resultado de la configuración Y-Y10 del ejercicio 2.....	143
72.	Esquema para una configuración Y- Δ 5 y su representación en el reloj	144
73.	Identificación de las delta y resultado de la configuración Y- Δ 5	145
74.	Esquema para una configuración Y- Δ 9 y su representación en el reloj	146
75.	Identificación de las delta y resultado de la configuración Y- Δ 9	147
76.	Esquema para una configuración Δ -Y1 y su representación en el reloj	148
77.	Identificación de la estrella y resultado de la configuración Δ -Y1	148
78.	Esquema para una configuración Δ -Y9 y su representación en el reloj	150
79.	Identificación de la estrella y resultado de la configuración Δ -Y9	150
80.	Esquema para una configuración Δ - Δ 10 y su representación en el reloj	151
81.	Identificación de las deltas y resultado de la configuración Δ - Δ 10.....	152
82.	Esquema para una configuración Δ - Δ 2 y su representación en el reloj	153
83.	Identificación de las delta y resultado de la configuración Δ -Y9	154
84.	Conexión Scott y diagrama vectorial de las tensiones de línea trifásicas.....	156
85.	Transformador conectado como autotransformador elevador	161
86.	Transformador conectado como autotransformador reductor.....	163
87.	Transformador conectado como autotransformador reductor.....	166
88.	Circuito equivalente del autotransformador reductor	166
89.	Autotransformador del ejemplo 27	170

90.	Autotransformador del ejemplo 28	172
91.	Diagrama de circuito para el método de dos voltímetros	176
92.	Voltímetro dispuesto a leer la diferencia entre los dos voltajes secundarios.....	177
93.	Voltímetros dispuestos a leer los dos voltajes secundarios	178
94.	Circuito básico de puente de relación	179
95.	Circuito para la prueba de polaridad	180
96.	Conexión para la prueba de polaridad por tensión alterna.....	181
97.	Diagrama de conexión para la prueba de polaridad por el método de comparación.....	182
98.	Circuito para medición de resistencia de los devanados para el método de voltímetro-amperímetro	184
99.	Conexión por medio del método de puente o micro óhmetro.....	186
100.	Esquema eléctrico del ensayo de vacío	187
101.	Rama en paralelo del circuito equivalente del transformador.....	188
102.	Esquema para la prueba de cortocircuito.....	189
103.	Rama serie del circuito equivalente del transformador.....	190
104.	Electrodos según las normas ASTM D-877 y ASTM D-1816	199
105.	Conexiones para la prueba de factor de potencia utilizando la copa doble	203
106.	Figura del problema 1	218
107.	Esquema del problema 9	220
108.	Conexión del problema 12	220
109.	Conexiones del problema 13.....	221
110.	Esquemas para el problema 14	222
111.	Esquema para el problema 23	224
112.	Conexión para el problema 31	225
113.	Esquema para el problema 36	226
114.	Diagrama para el problema 37	227

115.	Esquema para el problema 40	228
116.	Diagramas para el problema 41	228
117.	Diagrama para el problema 44	229
118.	Diagramas para el problema 45.....	230
119.	Esquema para el problema 49	231
120.	Diagramas para el problema 50.....	231
121.	Diagramas para el problema 51	232
122.	Diagrama para el problema 80	238
123.	Figuras problema 2, evaluación 1	262
124.	Figura problema 3, evaluación1	262
125.	Figura problema 3, evaluación 2.....	263
126.	Figura problema 1, evaluación 3.....	264
127.	Figuras problema 5, evaluación 3	265
128.	Figura problema 3, evaluación 4.....	266
129.	Figura problema 5, evaluación 5.....	267
130.	Programa del curso.....	279

TABLAS

I.	Índice horario para una configuración Y-Y	51
II.	Índice horario para una configuración Y- Δ	55
III.	Índice horario para una configuración Δ -Y	58
IV.	Índice horario para una configuración Δ - Δ	59
V.	Similitud entre ecuaciones de corriente y voltaje de un transformador y un autotransformador	86
VI.	Perdidas del transformador en el hierro y el cobre según la potencia del mismo	113
VII.	Factores de corrección de temperatura para factores de potencia de aislamiento.....	118

VIII.	Estado del aceite según su color	124
IX.	Correcciones para el nivel de ruido	192
X.	Factores de corrección de temperatura para factores de potencia de aislamiento	195
XI.	Valores permisibles de rigidez dieléctrica según normas.....	199
XII.	Correcciones por temperatura a 20 °C para el factor de potencia	203
XIII.	Cuantificación del color del aceite	205
XIV.	Niveles de agua para el aceite según la tensión del transformador ...	208
XV.	Datos del problema 82	238
XVI.	Datos para el problema 83	239
XVII.	alendarización de los contenidos de las clases.....	282
XVIII.	Calendarización del material audiovisual	283

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AT	Alta tensión
BT	Baja tensión
Δ	Configuración delta
Y	Configuración estrella
I	Corriente
Cc	Corriente continua
I_c	Corriente del devanado común
I_H	Corriente del lado de alta tensión (high current)
I_L	Corriente del lado de baja tensión (low current)
I_{SE}	Corriente del devanado serie
I_{AB}	Corriente entre el punto A y B
dB	Decibelios
Fp	Factor de potencia
°	Grados
g	Gramos
T1, T2, T3	Grupo de transformadores de un banco trifásico
Hz	Hertz
Z	Impedancia
kVA	Kilovoltio amperios, potencia eléctrica
L1, L2, L3	Líneas de alimentación de un sistema trifásico
mgKOH	Miligramos de hidróxido de potasio
ml	Mililitros
mm	Milímetros

H2	Negativo del lado de alta tensión del transformador
X2	Negativo del lado de baja tensión del transformador
N	Número de espiras del devanado de un transformador
Ω	Ohm
Ppm	Partes por millón
P	Potencia
H1	Positivo del lado de alta tensión del transformador
S	Potencia aparente
X1	Positivo del lado de baja tensión del transformador
in	Pulgadas
X	Reactancia
m	Relación de transformación
η	Rendimiento
R	Resistencia
T	Temperatura
V_{AB}	Voltaje entre el punto A y B
V_F	Voltaje de fase
V_H	Voltaje del lado de alta tensión (high voltage)
V_L	Voltaje del lado de baja tensión (low voltage)
V_L	Voltaje de línea
V	Voltio

GLOSARIO

Aceite dieléctrico	Tipo de aceite que utilizan los transformadores que por sus características actúa como aislante y refrigerante.
Arrollamiento	Devanados de un conductor eléctrico utilizados en un transformador, motor o generador.
ASTM	American Society of Testing Materials.
Autotransformador	Tipo de transformador en el cual un único devanado actúa como primario y secundario.
Corrientes de Foucault	Corrientes que circulan en el núcleo las cuales ocasionan pérdidas por calentamiento.
Cuba	Recipiente donde se encuentra alojado el transformador.
Gravedad específica	También conocida como densidad relativa, es la relación del peso de un volumen de una sustancia, al peso de un volumen igual, pero de agua.
IEC	International Electrotechnical Commission.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Índice horario	Utilizado para distinguir la forma en que están conectados los transformadores.
Inhibidores	Compuestos químicos que posee el aceite dieléctrico los cuales se encargan de reaccionar de tal manera que disminuyan la velocidad de oxidación del aceite.
Microsoft Office	Software utilizado para creación y edición de documentos de texto.
Núcleo	Parte de un transformador en el que están arrollados los devanados, el cual se encarga de conducir el flujo magnético.
Polaridad	Cualidad que permite distinguir los terminales de un transformador.
Potencia eléctrica	Ritmo con el cual la energía eléctrica es transferida por un circuito eléctrico; cantidad de energía eléctrica entregada o absorbida por un elemento.
Pruebas eléctricas	Procedimientos que se realizan para determinar el estado del transformador.
Rigidez dieléctrica	Capacidad que posee un aceite dieléctrico para soportar tensión eléctrica sin fallar.
Software	Programa de computadora que se utiliza para simular circuitos eléctricos.

Taps	Derivación de un arrollamiento con determinado número de espiras.
Tensión interfacial	Medida de las fuerzas de atracción entre las moléculas de agua y aceite en la interfaz del aceite.
TIC	Tecnologías de la información y la comunicación que conforman la sociedad de la información.
Transformador	Dispositivo eléctrico que se utiliza para la transformación de voltajes o corrientes.
Wondershare	Software utilizado para la creación y edición de videos.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación consiste en la virtualización del curso Conversión de Energía Electromecánica 2, con la implementación de una guía teórica, que se complementa con videos basados en los temas descritos en la guía teórica. Esto tiene por objetivo proporcionar a los estudiantes y personas interesadas el aprender de forma virtual los contenidos del curso descrito.

En el capítulo uno se presenta una breve descripción del constructivismo y las TIC, herramientas que en la actualidad juegan un rol importante en el tema de virtualización.

En el segundo capítulo se describe todo lo relacionado con la teoría y los conceptos de los diferentes temas.

En el tercer capítulo se describen aplicaciones de los diferentes temas; se utiliza ejemplos de aplicación y conceptos de teoría en algunos temas.

En el cuarto capítulo se aborda la comprensión de la teoría de los diferentes temas por medio de ejercicios para resolverlos; además diferentes se presentan preguntas de aplicación.

En el quinto capítulo, se describen las evaluaciones que incluyen ejercicios para resolver y preguntas referentes a la teoría.

En el sexto capítulo se describe el programa del curso que incluye los temas del presente trabajo, una calendarización con el desarrollo de los temas en clase y una calendarización con el orden de los videos.

OBJETIVOS

General

Mejorar el rendimiento académico a través de la estructuración virtual constructivista de los temas autotransformadores, conexiones y pruebas de transformadores del curso Conversión de Energía Electromecánica 2.

Específicos

1. Realizar una guía teórica que incluyan los conceptos y ejercicios de aplicación de los temas.
2. Proponer problemas para resolver, relacionados con los temas a trabajar.
3. Diseñar métodos de evaluación para los temas a desarrollar.
4. Crear videos conceptuales y de aplicación sobre los diferentes temas.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, con el avance de la tecnología, la forma de enseñanza-aprendizaje ha evolucionado; por otro lado, el hacinamiento que se da en los centros de estudio ha sido uno de los muchos problemas que hoy en día afecta la educación. Por lo anterior es necesario tomar vías alternas para mejorar los procesos de enseñanza-aprendizaje, para que a futuro los nuevos conocimientos y la tecnología puedan unificarse, para mejorar de esta forma la educación y junto con esto el rendimiento académico de los alumnos.

Con base en lo anterior surge la elaboración de la presente tesis, cuyo objetivo es estructurar de forma virtual una parte del curso de Conversión de Energía Electromecánica 2, específicamente, los temas: grupo de conexiones de los transformadores, autotransformador y protocolos de pruebas en un transformador. Esta estructuración realiza haciendo uso del constructivismo y las TICS.

En el capítulo I se habla de constructivismo y las tecnologías de información y comunicación (TICS). La incorporación de estas a la educación, los cambios en los procesos educativos, la importancia que tiene hoy en día hacer uso de nuevas tecnologías y las ventajas y desventajas de aplicar este tipo de métodos en el nuevo aprendizaje. Todo ello con el fin de contribuir a mejorar la educación dentro de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

El capítulo 2 está enfocado al desarrollo de cada uno de los conceptos que abarca cada tema; se hace uso de diferentes textos bibliográficos. En la parte de

protocolos de prueba se presenta el concepto general, de equipos utilizados y se describen las diferentes pruebas.

El capítulo 3 está dedicado a la aplicación de los conceptos, se llevan a cabo ejercicios de aplicación en los diferentes temas, en la parte de conexiones de transformadora se hace el uso de un software que simula las diferentes conexiones entre los transformadores. En la parte de autotransformadores se presentan ejemplos de los cálculos correspondientes a un autotransformador y, en la parte de protocolos de pruebas en un transformador se describen las aplicaciones de las diferentes pruebas que se le realizan a un transformador, así como el procedimiento que se lleva a cabo para realizar estas pruebas.

En el capítulo 4 se presenta una serie de problemas, preguntas y laboratorios de los diferentes temas para que los mismos se lleven a cabo. En el capítulo 5 se proponen evaluaciones, tanto prácticas como teóricas, de los temas mencionados.

Por último, en el capítulo 6 se da la estructuración del programa del curso en el que se incluyen los temas desarrollados en el presente trabajo; de forma que se acoplen a los temas del curso de Conversión de Energía Electromecánica 2. Adicional a lo anterior, se da una calendarización de cómo se deben desarrollar en un semestre los temas del curso y una calendarización que indica la forma de ver el material audiovisual basado en los temas del curso.

Además de los capítulos desarrollados en la presente tesis, también se realiza material audiovisual de los conceptos y las aplicaciones de los temas.

1. ASPECTOS GENERALES DE CONSTRUCTIVISMO Y TICS COMO HERRAMIENTA DE VIRTUALIZACIÓN

El constructivismo es la idea de que el individuo –tanto en los aspectos cognitivos y sociales del comportamiento como en los afectivos– no es un mero producto del ambiente ni un simple resultado de sus disposiciones internas, sino una construcción propia que se va produciendo día con día como resultado de la interacción entre esos dos factores. En consecuencia, según la posesión del constructivismo, el conocimiento no es una copia fiel de la realidad, sino una construcción del ser humano. ¿Con qué instrumentos realiza la persona dicha construcción?, fundamentalmente con los esquemas que ya posee, es decir, con lo construido en su relación con el medio.¹

“Por otro lado, las TIC como instrumento de formación vienen impulsadas por los avances de las tecnologías de la información y por las transformaciones que se operan en los distintos contextos formativos. Aunque en el ámbito universitario las TIC están bastante presentes, tanto en la enseñanza como en la investigación, salvo excepciones hay pocas realidades con modelos pedagógicos que se basen en ellas y aún se constata una fuerte preferencia social por la enseñanza tradicional”.²

1.1. ¿Qué son las TIC?

Marina Morales Capilla en su tesis, *Percepción del profesorado y del alumnado de la Facultad de Ciencias de la Educación de la Universidad de Granada acerca de la utilización de las tic por parte del profesorado universitario y de su integración en el proceso de enseñanza-aprendizaje*, las TIC son aquellas tecnologías de la información que ayudan al proceso de enseñanza debido a que permiten la creación de nuevos métodos de estudio o bien se utilizan como una herramienta adicional en la cual se crean nuevos ambientes innovadores en la educación permitiendo de esta forma que el alumno tenga acceso a diversos contenidos de información en diferentes medios.

¹ CARRETERO, Mario. *Constructivismo y educación*. p. 24-25.

² CARNOY, Martin. *Las TIC en la enseñanza: posibilidades y retos*. p. 1.

Tomando como base los planteamientos realizados por los previos autores, las TIC son aquellas herramientas que ayudan el desarrollo de la educación de una forma más amplia, por ejemplo, difundir mucha más información con la ayuda de diferentes herramientas que se encuentran en internet. Para todo ello es obvio que se debe contar con una computadora y acceso a internet; estas herramientas son las que han permitido un gran desarrollo en los procesos de educación; por supuesto para hacer uso de estas tecnologías las personas deben estar capacitadas para su manejo.

En la actualidad, es común el uso de plataformas que contienen la posibilidad de realizar video conferencias en línea para lograr de esta manera contactar con personas distantes y realizar la educación a distancia. Es por todo lo anterior que las TIC están teniendo un gran impacto dentro del desarrollo de la educación y por ello es necesario su integración.

1.1.1. Las TIC y la educación

Las TIC en la actualidad han alcanzado gran ímpetu, principalmente en la educación, debido a que estas están siendo utilizadas desde la educación primaria hasta estudios universitarios. Con el avance que ha tenido la tecnología en los últimos años se debe optar a que tanto estudiantes como docentes se adapten al uso de las TIC ya que con el paso del tiempo estas herramientas serán utilizadas en gran parte para el proceso de enseñanza-aprendizaje. El uso de las TIC dentro de la educación es un apoyo a los sistemas utilizados actualmente por lo que estos no pretenden sustituir por completo a los procesos de enseñanza actuales, pero si a mejorarlos por medio de su utilización.

El uso de las TIC ayuda a mejorar los procesos de enseñanza, así mismo logra cambios pedagógicos que ayudan directamente a aumentar el rendimiento

del estudiante. Dentro de la universidad se está optando por utilizar tecnologías de la información y comunicación y el uso de plataformas que permitan la interacción entre el alumno y el catedrático. En estas el catedrático tiene opciones de cómo realizar pequeños exámenes, compartir material acerca de los temas de interés, postear anuncios y lo que se está planeando es realizar videos de los temas del curso para que estos se puedan complementar con las clases.

La anterior hace referencia a como las TIC pueden ayudar a la educación; crean un entorno diferente que contribuye al desarrollo de habilidades y destrezas de los alumnos; crean en ellos mayor interés por el aprendizaje. Es necesario hacer mención que al momento de implementar las TIC en la educación superior los catedráticos deben crear materiales o herramientas en los cuales puedan ser aplicadas estas tecnologías y, por supuesto, que tengan como fin ayudar a los estudiantes con su proceso de enseñanza.

En muchos países se ha optado por implementar este tipo de tecnologías para el proceso de enseñanza, como la creación de blogs con diferentes tipos de herramientas como documentos de apoyo, videos, enlaces hacia páginas de interés, foros, entre otros; en algunos casos los catedráticos emplean el uso de video llamadas en las cuales el estudiante puede interactuar, también el uso de plataformas que permiten realizar diferentes actividades: exámenes en línea, diferentes pruebas, ejercicios, entre otros.

1.1.2. Las TIC como medio

“Desde el punto de vista del profesor, las TIC constituyen un instrumento que le ayuda en sus tareas administrativas, así como también las TIC pueden ser

instrumentos que le apoyan en sus tareas de enseñanza, al igual que el material audiovisual, las transparencias o la pizarra”³

De lo anterior se puede decir que el catedrático realice materiales de diferente tipo los cuales puedan ayudar a la enseñanza y el aprendizaje de los alumnos; por lo tanto, el docente debe tener conocimiento acerca de las TIC.

1.1.3. El docente y las TIC

El rol de un docente dentro de la educación superior es transmitir los conocimientos hacia los alumnos utilizando para ello, diferentes procesos de enseñanza de tal forma que los alumnos puedan captar de forma clara cada uno de los conceptos referentes a cada uno de los cursos. Es por lo anterior que los docentes deben ir transformando los procesos de enseñanza para adaptarse a los nuevos requerimientos de enseñanza, la cual está iniciando a hacer uso de las tecnologías como una de las principales fuentes de aprendizaje. Es en esta parte entran en juego las TIC y el docente. El docente debe tener la capacidad de manejar las nuevas tecnologías, así como su conocimiento de tal forma que las integre a su proceso de enseñanza.

El docente además debe tener la capacidad de crear nuevas formas de enseñanza conjuntamente con las TIC ya que no basta con saber utilizarlas si al final no se logra el objetivo principal que es transmitir los conocimientos lo más claro posible. El maestro pueda hacer uso eficiente de las TIC tomando en cuenta lo siguiente:

- Alfabetización digital de los profesores y alumnos: todos deben adquirir las competencias básicas en el uso de las TIC.

³ RODRÍGUEZ, Jesús; MARTÍNEZ, Nerwis; LOZADA, Joan Manuel. *Las TIC como recursos para un aprendizaje constructivista*. p. 127.

- Productividad: aprovechar las ventajas que proporcionan al realizar actividades como: preparar apuntes y ejercicios, buscar información, comunicar (email), difundir información (weblogs, web del centro y docentes), gestión de biblioteca.
- Innovar en las prácticas docentes: aprovechar las nuevas posibilidades didácticas que ofrecen las TIC para lograr que los alumnos realicen mejores aprendizajes y reducir el fracaso escolar.⁴

1.1.3.1. Ventajas de las TIC para los docentes

Para los docentes el uso de las TIC puede significar un gran apoyo en cuanto al proceso de enseñanza. Haciendo uso de estos, el docente puede tener un mayor tiempo para el desarrollo de las actividades e interactuar un poco más con los alumnos; es decir, puede sugerirle al alumno tomar cierto contenido digital para luego poder abordar mucho más tiempo a las dudas del alumno.

El profesor se beneficia de una serie de ventajas que le proporciona las TIC en su proceso de enseñanza las cuales se enumeran a continuación:

- Motivar la participación (principio acción).
- Flexibilizar los contenidos.
- Ofrecer un espacio para contenidos transversales.
- Individualizar el proceso de enseñanza (adecuándose a las necesidades particulares de cada alumno).
- Flexibilizar los tipos de interacción y los medios de comunicación.
- Estudiar la evolución del interés de los alumnos.
- Optimizar el uso del tiempo en las clases magistrales (facilitando la resolución completa/parcial de problemas).
- Supervisar las actividades de los alumnos.

⁴ PRADO ÁLVAREZ, Paula Judith. *Actitud de los docentes de la carrera de Magisterio Primaria y Preprimaria del Instituto Belga Guatemalteco ante la utilización de las tecnologías de información y comunicación dentro del proceso de enseñanza y aprendizaje.* p. 24.

- Evaluar el progreso de los alumnos.⁵

Además, a esto se le suma la posibilidad de mantener comunicación directa con el docente ya que existen diversas plataformas que permiten esto incluso la resolución de dudas fuera de las aulas se puede llevar a cabo. También, por medio del uso de las TIC, se da la oportunidad de que el docente pueda compartir información rápidamente y que el alumno tenga la posibilidad de interactuar con esta misma información; en muchas ocasiones se puede realizar en tiempo real, todo dependerá del docente y el alumno.

Por último, es necesario mencionar que una de las grandes ventajas que se está viendo en la actualidad, es la de realizar clases a distancia en la cuales el docente por medio de diversas herramientas realiza una clase y el alumno por medio de estas mismas herramientas puede interactuar (resolver dudas, compartir información, videos, entre otros), las nuevas tecnologías permiten realizar esto como una especie de retroalimentación.

Esto representa una gran ventaja para el docente ya que puede dar su clase por este medio, si por algún motivo no se presente al salón clase o simplemente puede hacer uso de estas para reforzar los temas.

1.1.4. Ventajas del uso de las TIC

Anteriormente se habló de las ventajas que las TIC ofrecen al docente, pero, también, es necesario hablar sobre las ventajas que se presentan hacia el estudiante.

⁵ GALÁN, José Manuel; IZQUIERDO, Luis; MARTÍNEZ, Ricardo; SANTOS, José Ignacio. *Aplicación de las TIC en el nuevo modelo de enseñanza de EEES*. p. 10.

Desde el punto de vista del estudiante la utilización de las TIC puede significar flexibilidad de tiempo, es decir, el alumno en dado momento (si el catedrático lo desea) puede tomar la clase a distancia de tal forma que no sería necesario viajar para tomar la clase. Por el contrario, tendría mayor tiempo disponible para repasar los contenidos. Podría resolver sus dudas un poco más rápido debido a la comunicación (catedrático-alumno) que proporcionan estas nuevas tecnologías (correo, aplicaciones de mensajería y demás).

La virtualización de los cursos es una de las muchas herramientas que proporcionan las TIC, gracias a esto, si el alumno se ausenta a clase, tendría la capacidad de poder tomar la clase a distancia, ya que contará con videos referentes al tema o bien acceder a la información compartida por el catedrático y los demás alumnos si esta fue dada en alguna plataforma. De la misma forma, el alumno tendría la oportunidad de acceder a esta información en cualquier lugar a cualquier hora dependiendo de la necesidad, adicional a esto, podría consultar estas cuantas veces quiera, todo esto representa una gran ventaja y ayuda para el alumno; por supuesto, también, para el catedrático.

Si se toma desde el punto de vista general, entre las ventajas que se presentan están:

- Comunicación permanente entre catedrático-alumno.
- Acceso rápido a la información.
- Interacción con los demás alumnos por medio de foros, chat y demás.
- Mayores metodologías didácticas para llevar a cabo el proceso de formación de los alumnos.
- No sería necesario un lugar específico para recibir las clases.

- Mayor aprovechamiento del tiempo si en dado caso se tiene tareas adicionales.
- Oportunidad de ampliar más los conocimientos.
- Aumento en el interés por parte del alumno.

Lo anterior son muchas de las ventajas que las TIC presentan en la educación, por supuesto tanto alumno como catedrático lo perciben de diferentes puntos de vista, lo que para el alumno puede representar ventaja para el catedrático en ciertos casos podría ser demasiado complejo.

1.2. Modelo constructivista

Mario Carretero en su libro *Constructivismo y educación* indica que el constructivismo es aquel que las personas van construyendo con el paso del tiempo en relación con los aspectos cognitivos y sociales que le rodean. Por lo que el constructivismo se basa en la construcción del medio que rodea a cada persona.

El modelo constructivismo se basa en la construcción del aprendizaje a través de los conocimientos adquiridos a través de experiencias. El constructivismo de otra manera hace referencia a que los conocimientos se forjan a través del tiempo por medio de compartir información entre personas (alumno-docente). Cada persona construye conocimientos por sí mismo dependiendo del entorno en que se encuentra, ya que cada persona construye internamente su propia experiencia.

El modelo constructivismo no se basa en lo tradicional (pizarra y marcador), el constructivismo va más enfocado a la participación de los estudiantes como, por ejemplo, aprender a través del descubrimiento: para resolver un problema no hay solo una forma, antes se deben explorar las posibles formas de resolverlo.

También se encuentra el aprendizaje a través de la comunicación en el cual se desarrollan actividades que permiten la interacción entre las personas de tal modo que se compartan información.

El rol que juegan las nuevas tecnologías de la información junto con el aprendizaje constructivista da como resultado nuevos medios de aprendizaje en que los estudiantes puede demostrar los nuevos conocimientos adquiridos.

La tecnología como bien es sabido proporciona al alumno acceso a información ilimitada, así como comunicación más fácil, de tal modo que esto modifica y mejor el proceso de enseñanza dejando por un lado los métodos tradicionales los cuales en muchos casos no lograba su objetivo, transmitir los conocimientos hacia los estudiantes.

1.2.1. El aprendizaje según el constructivismo

El constructivismo se relaciona con el aprendizaje de modo que las personas (estudiantes), crean nuevos conceptos que se basa en los conocimientos adquiridos a través de los catedráticos. Como se dijo anteriormente estos nuevos conceptos se basan en la experiencia de cada individuo. Pudiendo crear de esta forma sus propias conclusiones que a su vez pueden compartir con demás estudiantes.

El constructivismo es un modelo que permite al estudiante explorar de forma propia y libre cada conocimiento, la forma de cómo lo percibe, la complejidad del mismo, y de esta forma construir un ambiente propio de conocimientos con las experiencias adquiridas tal que el alumno se sienta cómodo en su aprendizaje.

De esta forma surgen nuevos conocimientos ya que cada uno de ellos se va construyendo dependiendo de la percepción de cada individuo. Esta es la idea que el constructivismo da acerca del aprendizaje, el cual se debe forjar de conocimientos y no simplemente memorizar los conceptos.

1.2.1.1. Características de un profesor constructivista

- Acepta e impulsa la autonomía e iniciativa del alumno.
- Usa materia prima y fuentes primarias en conjunto con materiales físicos, interactivos y manipulables.
- Usa terminología cognitiva tal como: clasificar, analizar, predecir, crear, inferir, deducir, estimar, elaborar, pensar.
- Investiga acerca de la comprensión de conceptos que tienen los estudiantes, antes de compartir con ellos su propia comprensión de estos conceptos.
- Desafía la indagación haciendo preguntas que necesitan respuestas muy bien reflexionadas y desafía también a que se hagan preguntas entre ellos.⁶

1.3. Educación a distancia

También denominada educación virtual, es una forma educativa que con el pasar del tiempo está alcanzando un gran ímpetu con ayuda de la tecnología. Muchas instituciones ofrecen este método de aprendizaje, básicamente se trata de recibir cursos a distancia (no se necesita trasladarse a un lugar específico) por medio de plataformas donde se encuentran adjuntos videos de los temas preparados previamente los cuales son consultados por los estudiantes en cualquier momento y lugar. También, ofrece la posibilidad de tomar exámenes, foros y demás herramientas que contribuyan con el aprendizaje de la persona.

⁶ RODRÍGUEZ, Jesús; MARTÍNEZ, Nerwis; LOZADA, Joan Manuel. *Las TIC como recursos para un aprendizaje constructivista*. p. 127.

Este tipo de educación ofrece al estudiante administrar su tiempo con mayor efectividad por el hecho de no trasladarse a un punto específico. Por otro lado, a los establecimientos brinda la oportunidad de maximizar el potencial académico por medio de la utilización de las TIC.

1.3.1. E-learning

Es un método de formación que se da a través del uso de las tecnologías de la información y comunicación (TIC), se caracteriza por ser a distancia. En este se utiliza como principal herramienta el uso de un computador, el aprendizaje se da por medio de internet utilizando metodologías en las que el objetivo principal es la calidad del proceso y los contenidos. En algunos casos existe un tutor que lleva el control de las clases no obstante de perder la clase esta queda grabada para ser consultada en otro momento. Este modelo rompe los paradigmas de los métodos tradicionales de enseñanza.

La finalidad de este método es mejorar la calidad de la educación por medio de la utilización de diferentes herramientas que ayuden a comprender de mejor manera los temas. Dentro este mismo entorno pretende facilitar el acceso a la educación no importando el lugar o entorno que se encuentre y no es necesario tener una disponibilidad de tiempo en un momento específico.

1.3.2. M-learning

Se define como educación móvil la cual es una forma de aprendizaje totalmente virtualizada, haciendo uso de aplicaciones tales como correo, foros, mensajería, entre otros. En esta entran en juego dispositivos como celulares, tablets, iPod, iPad y todo aquel dispositivo de mano que tenga la posibilidad de conectarse a internet. La diferencia frente al e-learning es que se utilizan

dispositivos móviles dando como ventaja el poder acceder en cualquier momento siempre y cuando se cuente con acceso a internet.

Dentro de las características que posee este método se encuentran:

- Acceso desde cualquier lugar.
- Utilización de diversas aplicaciones.
- Mayor interés por el estudiante ya que puede acceder de manera inmediata a los contenidos.
- Se pueden realizar múltiples tareas.
- Diversas herramientas de práctica.

Por supuesto este tipo de aprendizaje requiere que tanto alumno como docente tengan la capacidad de manejar estas tecnologías en especial los dispositivos móviles que son en los cuales se fundamenta. En algunos casos es necesario adaptar los materiales ya existentes para poder utilizarlos en los dispositivos móviles. No obstante, este método es de gran utilidad en el proceso de formación actual ya que la mayoría de personas posee un dispositivo móvil.

1.3.3. B-learning

Es un método de formación académica que combina el e-learning con asistencia presencial, es decir es un método semipresencial. Dentro de este método se siguen utilizando las TIC, sumado a esto los procesos utilizados en la educación presencial.

La finalidad de este método es juntar las ventajas que ambos métodos de aprendizaje e unificarlo para aumentar la calidad de la educación. Permite ampliar los temas, realizar consultas a través de la web para luego discutirlo y compartir ideas. En este método, el profesor pasa a jugar más el rol de guía, pero también puede compartir sus conocimientos.

Dentro de las actividades que este método ofrece están las presenciales:

- Debates
- Evaluaciones presenciales
- Actividades de aprendizaje
- Clases teóricas
- Materiales didácticos

Por otro lado, están las actividades que se pueden realizar en las clases virtuales tales como:

- Foros
- Compartir documentos adicionales de interés
- Utilización de software
- Chats

- Explicación de algún material de la web
- Compartir ideas a través de opción compartir pantalla
- Videos
- Evaluaciones
- Ejercicios de aplicación

1.4. Estructura de videos

Un buen video es aquel que sin tanto preámbulo da la idea concreta del tema, una buena explicación que capte la atención de quien lo ve.

De esta manera, se llevarán a cabo los videos del curso de conversión de energía electromecánica 2, específicamente grupos de conexión de los transformadores, autotransformador y protocolos de pruebas en un transformador que son los temas a tratar en la presente tesis. Los videos se realizan de la siguiente manera:

- Presentación del tema: en el cual se da el contenido y el objetivo de cada video.
- Desarrollo del tema: dependiendo del tema se darán explicaciones centrándose en ideas principales con ayuda de material didáctico, ejemplos, entre otros, de tal forma que se transmita de forma clara el tema.

- Conclusiones: esta se da en la parte final del video y consiste en dar en pocas palabras, ideas claras y concisas acerca del tema.

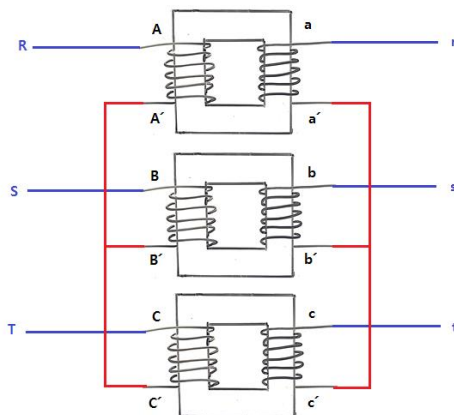
Los videos pretenden no ser de larga duración, pero dependiendo del tema así será su duración siempre tomando en cuenta no extenderse demasiado.

2. CONCEPTOS A DIGITALIZAR

2.1. Conexiones de transformadores

Como bien es sabido los transformadores son una parte esencial de un sistema de potencia, los cuales se utilizan para la transformación de tensiones y corrientes. Para llevar a cabo su conexión en los sistemas trifásicos, se emplean distintas formas para constituir un transformador trifásico. La primera de ellas se realiza por medio de tres transformadores independientes para formar un transformador trifásico, figura 1; pero esto implica mayor costo debido a la fabricación y es necesario tres transformadores idénticos. Este en comparación al que se menciona seguidamente, tiene la ventaja que al momento de averiarse un transformador este puede ser cambiado individualmente por otro.

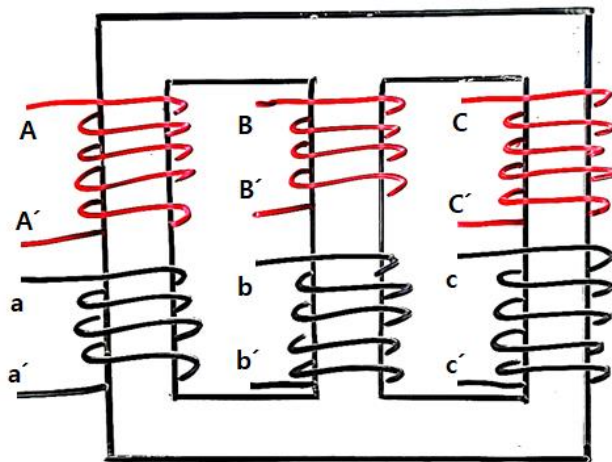
Figura 1. **Banco trifásico de transformadores compuesto por tres transformadores independientes**



Fuente: elaboración propia.

La otra forma de constituir un transformador trifásico es utilizar un transformador de un solo núcleo magnético, en el cual están arrolladas las bobinas (primario y secundario) de cada fase, figura 2. Este en comparación al método anterior, tiene las ventajas de ser más pequeño en su construcción, ligero, barato y ocupa menos espacio que tres unidades monofásicas.

Figura 2. **Transformador trifásico construido sobre un núcleo que posee tres columnas**



Fuente: elaboración propia.

2.1.1. **Formas de conexión de los devanados en un transformador**

“Para llevar a cabo la conexión de los transformadores trifásicos es necesario conocer las formas en que los devanados primarios y secundarios pueden conectarse. Las formas más comunes en que estos pueden ser conectados son en estrella, (con o sin neutro), y en delta o triángulo”.⁷

⁷ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p. 230.

Las formas descritas anteriormente dan como resultado el poder conectar los devanados de alta tensión (AT) y los de baja tensión (BT) de cuatro formas diferentes:

- Estrella (AT) - estrella (BT)
- Estrella (AT) - delta (BT)
- Delta (AT) - delta (BT)
- Delta (AT) - estrella (BT)

“Existen otros tipos de conexiones que no son comúnmente utilizadas entre ellas está la conexión zig-zag. Este tipo de conexión, en la práctica, solo se emplea en el lado de menor tensión”.⁸

2.1.1.1. Conexión estrella

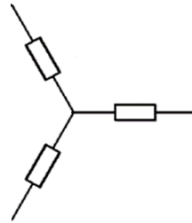
“Es un tipo de conexión que se utiliza en los devanados de los transformadores. En esta se unen en un mismo punto los tres extremos de los arrollamientos que poseen la misma polaridad, existiendo dos formas básicas según se unan los terminales A, B, C o A', B', C', (a, b, c o bien a', b', c' para el secundario tal y como se muestra en la figura 3”.⁹

En algunos casos los terminales también pueden identificarse como H1, H2, H3 para el lado de alta tensión y X1, X2, X3 para el lado de baja tensión. Para una conexión estrella el voltaje de cada una de las bobinas se denomina voltaje de fase y el voltaje que esta entre dos bobinas se denomina voltaje de línea o voltaje línea a línea tal como se muestra en la figura 4.

⁸ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p. 230.

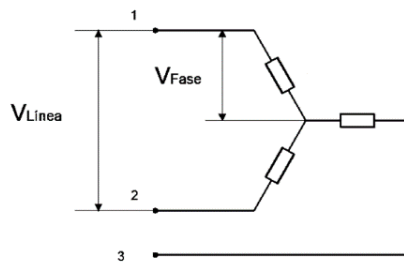
⁹ *Ibíd.* p. 231.

Figura 3. **Conexión estrella de los arrollamientos de un transformador**



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. **Voltajes en una conexión estrella**



Fuente: elaboración propia.

En una conexión estrella el voltaje de línea es $\sqrt{3}$ veces mayor que el voltaje de fase. Lo cual se explica tomando la figura 5(a) en la que representa lo voltajes de línea y fase, de una conexión estrella, de la siguiente forma:

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN}$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN}$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN}$$

Se ha considerado un orden de fase ABC; los valores de los voltajes de línea y fase se obtienen utilizando el diagrama vectorial, figura 5(b), y utilizando la ley de los cosenos de la siguiente forma:

$$V_{AB} = \sqrt{V_{AN}^2 + V_{BN}^2 - 2V_{AN} V_{BN} \cos 120^\circ}$$

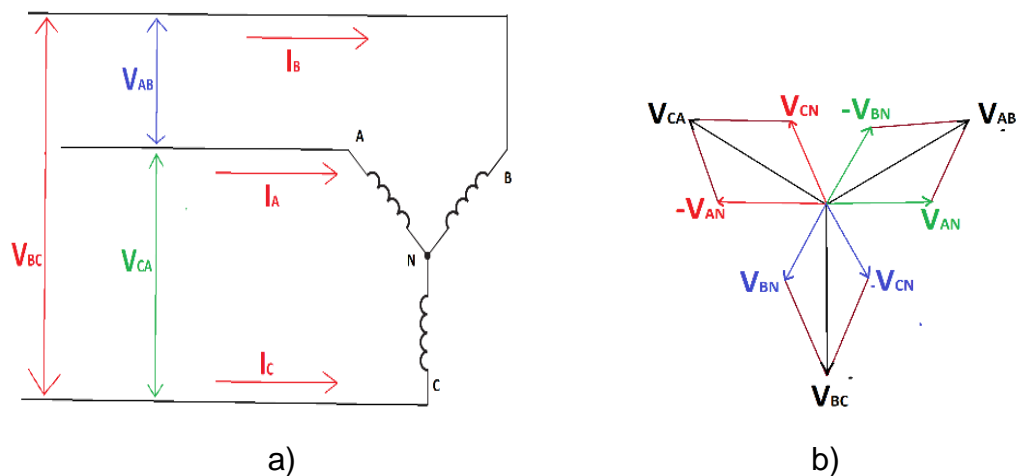
Como $V_{AN} = V_{BN}$

$$V_{AB} = \sqrt{3} V_{AN} \angle 30^\circ$$

Como se dijo al inicio, de la ecuación anterior se observa que voltaje de línea es $\sqrt{3}$ veces mayor que el voltaje de fase.

$$V_{\text{línea}} = \sqrt{3} V_{\text{fase}} \quad \text{Ecuación [2.1]}$$

Figura 5. Voltajes y diagrama vectorial de una conexión estrella



Fuente: elaboración propia.

A diferencia del voltaje, la corriente de línea en una conexión estrella es igual a la corriente de fase.

$$I_{\text{línea}} = I_{\text{fase}} \quad \text{Ecuación [2.2]}$$

La conexión estrella es comúnmente utilizada por los siguientes aspectos:

- Se utiliza generalmente para los transformadores pequeños de alta tensión. El número de vueltas requeridas por fase se reduce. Por lo tanto, también se reduce la cantidad de aislamiento requerido.
- Disminuye su tensión por fase, lo que indica que los bobinados deben poseer aislamiento para esta tensión y no para la tensión línea a línea.
- Esta conexión puede utilizarse únicamente si la carga conectada es equilibrada.
- Provee de un neutro.

Para determinar la potencia en un circuito trifásico en configuración estrella se determina igual como si fuera un circuito monofásico, quedando como resultado la potencia total:

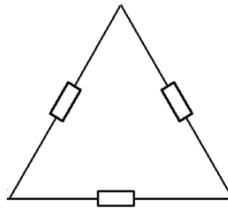
$$P_{\text{total}} = 3 E_{\text{fase}} * I_{\text{fase}} \quad \text{Ecuación [2.3]}$$

2.1.1.2. Conexión delta

La conexión delta también conocida como conexión triángulo es otro tipo de conexión en el cual se pueden conectar los devanados de un transformador

trifásicos. Para llevar a cabo esta conexión se unen sucesivamente los extremos de polaridad opuesta de cada dos devanados, por ejemplo, c' con a, a' con b, b' con c, a forma de cerrar el circuito, figura 6; según sea el orden de sucesión en que se realiza esta operación, pueden existir dos formas diferentes. En este tipo de conexión no existe neutro.

Figura 6. **Conexión, triángulo de los arrollamientos de un transformador**



Fuente: elaboración propia.

Par la conexión triángulo el voltaje de línea coincide con el voltaje de fase, como lo muestra la figura 7.

$$V_{\text{línea}} = V_{\text{fase}} \quad \text{Ecuación [2.4]}$$

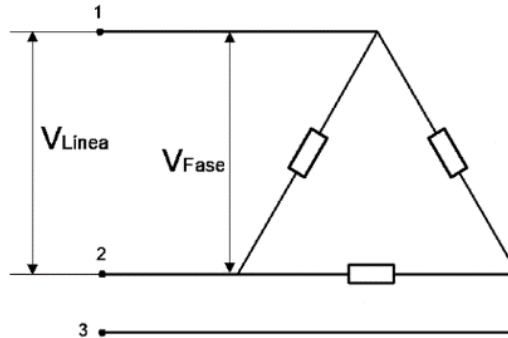
A diferencia de los voltajes en una conexión delta lo que cambian son las corrientes ya que el corriente de línea es $\sqrt{3}$ la corriente de fase. Esto se explica tomando la figura 8(a) en la que se representan las corrientes de línea y fase, de una conexión delta, de la siguiente forma:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB}$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC}$$

Figura 7. Voltajes en una conexión delta



Fuente: elaboración propia.

Se ha considerado un orden de fase ABC; los valores de las corrientes de línea y fase se obtienen utilizando el diagrama vectorial, figura 8(b), y se utiliza la ley de los cosenos de la siguiente forma:

$$I_A = \sqrt{V_{AB}^2 - V_{BC}^2 - 2I_{AB} I_{BC} \cos 120^\circ}$$

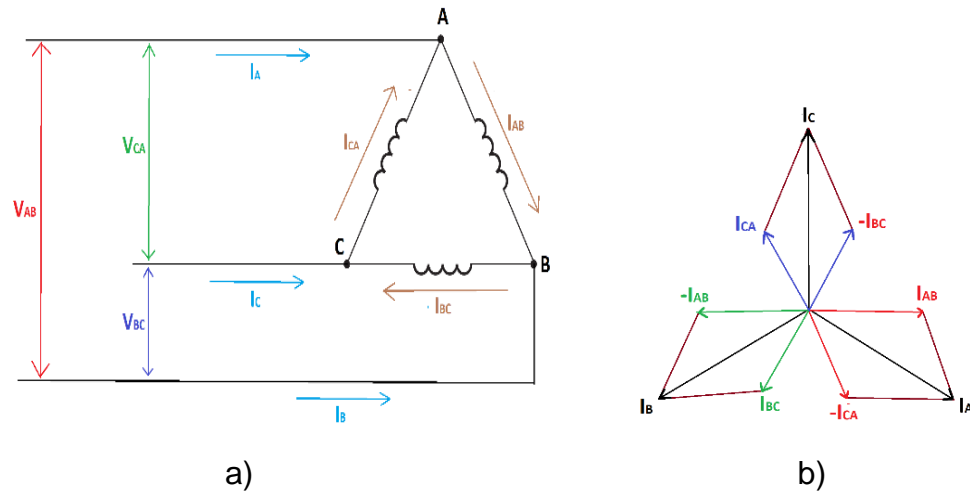
Como $I_{AB} = I_{BC}$

$$I_A = \sqrt{3} I_{AB} \angle -30^\circ$$

Como se mencionó al inicio, de la ecuación anterior se observa que la corriente de línea es $\sqrt{3}$ veces mayor que la corriente de fase.

$$I_{línea} = \sqrt{3} I_{fase} \quad \text{Ecuación [2.5]}$$

Figura 8. **Corrientes en una conexión delta y diagrama vectorial**



Fuente: elaboración propia.

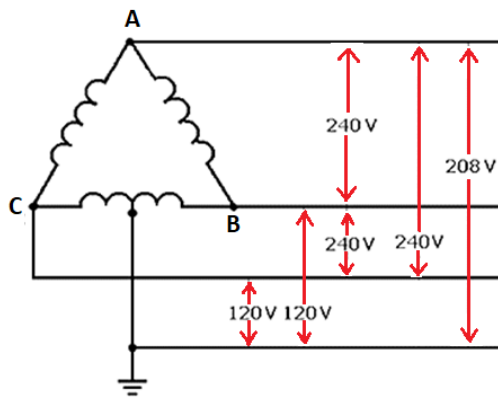
La conexión estrella es comúnmente utilizada por los siguientes aspectos:

- Esta conexión se utiliza generalmente para transformadores grandes, de bajo voltaje. El número de vueltas por fase requerido es relativamente mayor que la conexión estrella.
- Esta conexión se puede utilizar incluso para cargas desequilibradas.
- Si un transformador está desactivado, el sistema puede continuar funcionando como una conexión delta abierta, pero con una reducción de la capacidad disponible.
- Una de sus características por la cual es utilizada es que neutraliza los armónicos que son generados por cargas no lineales en los sistemas eléctricos.

- Este tipo de conexión no provee de un neutro como lo hace la conexión estrella, sin embargo, en muchos casos se obtiene un neutro de la mitad de uno de los devanados, figura 9.

En la conexión delta hay un caso especial el cual se denomina delta abierta, figura 10. Este se da cuando se avería o por otra razón queda fuera de servicio una de los devanados. Esta configuración permite alimentar cargas trifásicas balanceadas empleado solo dos transformadores. Esta se utiliza cuando la potencia que se debe suministrar no es demasiada ya que su capacidad es del 57,7 % de la potencia que suministraría el grupo trifásico completo.

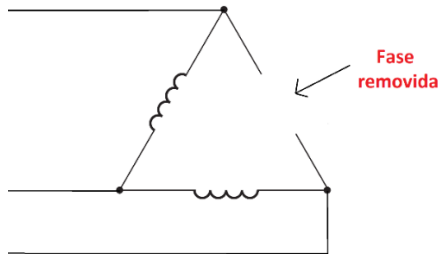
Figura 9. **Neutro en una conexión delta**



Fuente: elaboración propia.

Cuando uno de los arrollamientos no está, la totalidad de la corriente de línea circula a través del arrollamiento de fase, debido a que en una configuración delta abierta las corrientes de línea y fase son las mismas. Es por lo anterior que la potencia debe reducirse ya que un incremento de la corriente causa el sobrecalentamiento en los devanados de fase dañando de esta forma el transformador.

Figura 10. **Conexión delta abierta**



Fuente: elaboración propia.

2.1.1.3. **Otras conexiones**

Dentro de las conexiones que se pueden llevar a cabo en un transformador también está la conexión zig-zag, esta conexión es usada cuando se quiere hacer frente a los armónicos triples.

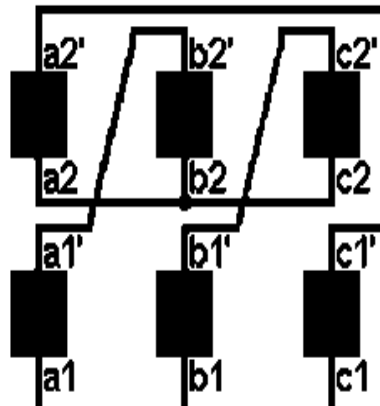
- **Conexión Zig-zag**

La conexión zig-zag en la práctica sólo se emplea en el lado de menor tensión. Consiste en subdividir en dos partes iguales los devanados secundarios, una parte se conecta en estrella y luego cada rama se une en serie con las bobinas invertidas de las fases adyacentes, siguiendo un determinado orden cíclico, figura 11. ¹⁰

La conexión zig-zag se usa en transformadores reductores de tensión, conexión Yz, para distribución, dado que provee de neutro y equilibra las cargas, en un consumo desequilibrado.

¹⁰ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p. 230.

Figura 11. **Conexión zig-zag de los arrollamientos de un transformador**



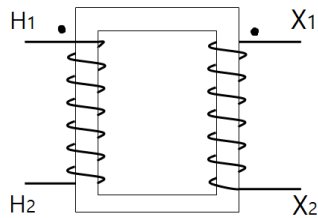
Fuente: elaboración propia.

2.1.2. Designación de terminales

En un transformador los devanados, primario y secundario, vienen identificados por medio de marcas, figura 12, las cuales indican:

- Sentido de arrollamiento de los devanados: el sentido de arrollamiento de los devanados primario y secundario puede ser horario o antihorario.
- Polaridad: se utiliza para identificar los arrollamientos en un transformador según su sentido de arrollamiento, figura 12. La polaridad es importante cuando se conectan transformadores en paralelo, la polaridad puede ser aditiva o sustractiva como se verá más adelante.
- Identificar el positivo de un transformador (relativamente).

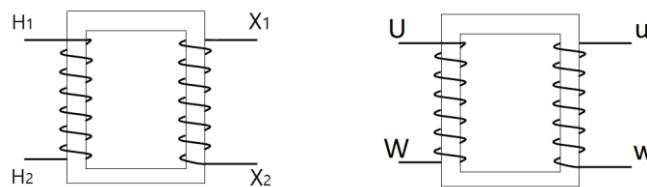
Figura 12. **Marcas de polaridad**



Fuente: elaboración propia.

Estas marcas son de gran utilidad cuando se quieren conectar transformadores en paralelo; ya que dependiendo de cuál de los devanados individuales son conectados entre sí (según la configuración), el desplazamiento angular entre el primario y el secundario puede variar. Las marcas de polaridad dependen del fabricante, el cual no utiliza puntos; en su lugar utiliza números combinados con letras mayúsculas/minúsculas según las normas, figura 13.

Figura 13. **Marcas de polaridad según región**



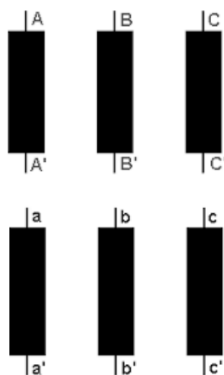
Fuente: elaboración propia.

La norma IEC 60076-1 menciona que la conexión en estrella, delta o en zig-zag de un conjunto de devanados de fase de un transformador trifásico o de devanados del mismo voltaje de los transformadores monofásicos asociados en un banco trifásico se indicará con las letras mayúsculas Y, D o Z para el devanado

de alto voltaje (HV) y las minúsculas y, d o z para los devanados de voltaje intermedio y bajo (LV). Si se muestra el punto neutro de un enlace conectado en estrella o conectado en zigzag, la indicación será YN (yn) o ZN (zn), respectivamente.

Es común encontrar que se utilizan letras mayúsculas de lado de alta tensión (A, B, C) para un terminal y (A', B', C') para el otro terminal y minúsculas del lado de baja tensión (a, b, c) para un terminal y (a', b', c') para el otro terminal, figura 14.

Figura 14. **Marcas de polaridad**



Fuente: elaboración propia.

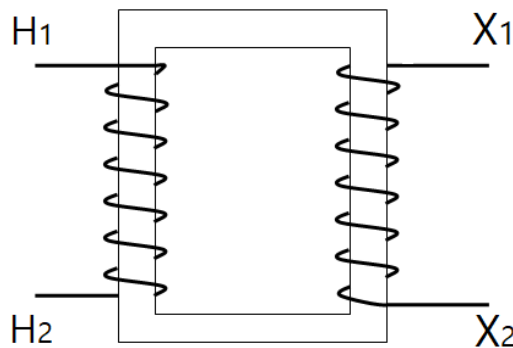
2.1.2.1. **Según la norma IEEE C57.12.70**

La norma IEEE C57.12.70 en el capítulo 2 (marcas de terminales e identificado de devanados) especifica de qué forma se designan las marcas en los devanados del transformador. Para distinguir los devanados, el lado de alto voltaje se designa como HV o H y los de bajo voltaje LV o X. Los transformadores con más de dos devanados, en orden de tensión decreciente, se designan como

X, Y y Z. Si dos (o más) devanados tienen el mismo voltaje y diferentes kVA (kilovoltios-amperios), el bobinado de mayor kVA recibe la designación de la letra anterior de las dos (o más) letras disponibles, de acuerdo a la secuencia por voltaje, como se explicó anteriormente. Si dos o más devanados tienen el mismo kVA y tensión nominal, las designaciones de estos devanados se asignan arbitrariamente.

Los terminales externos deben marcarse con una letra mayúscula seguido de un número de subíndice. Por ejemplo, la bobina H está marcada como H_1 , H_2 y la bobina X como X_1 , X_2 tal como se muestra en la figura 15.

Figura 15. **Marca de terminales**

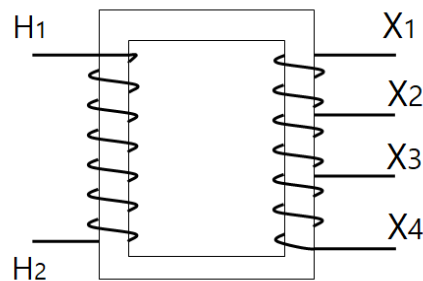


Fuente: elaboración propia.

En algunos transformadores según sea su conexión, posee un terminal neutro, este según la norma IEEE C57.12.70 se designa mediante la letra mayúscula correspondiente acompañado del subíndice 0, por ejemplo, H_0 , X_0 .

Si un transformador posee taps en alguno de sus devanados, la designación de los terminales sería como se muestra en la figura 16.

Figura 16. **Designación de terminales con múltiples taps**



Fuente: elaboración propia.

2.1.3. Polaridad de los transformadores

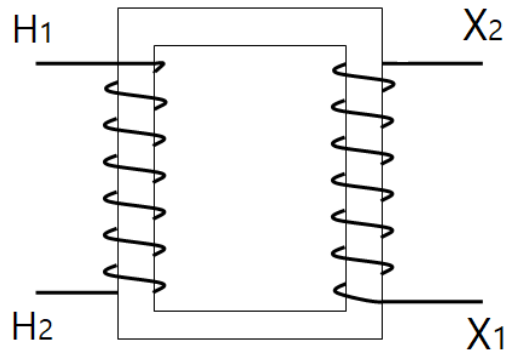
En el apartado anterior se habló de las marcas de polaridad, en este apartado se explica cómo estas marcas son útiles para determinar cuándo un transformador es de polaridad aditiva y cuando es polaridad sustractiva.

2.1.3.1. Polaridad aditiva

La polaridad aditiva en un transformador se da cuando los terminales del mismo lado tienen subíndices diferentes o bien el subíndice del devanado primario se encuentra en diagonal con el mismo subíndice, pero del secundario. La norma IEEE C57.12.70 especifica como polaridad aditiva cuando, H1 está ubicada diagonalmente con respecto a X1, figura 17.

En la polaridad aditiva el bobinado secundario está arrollado en el mismo sentido que el bobinado primario, esto hace que los flujos de los dos bobinados giren en el mismo sentido y se sumen. En la polaridad aditiva el voltaje en el secundario sale desfasado 180 ° respecto a la del primario.

Figura 17. **Polaridad aditiva de un transformador**



Fuente: elaboración propia.

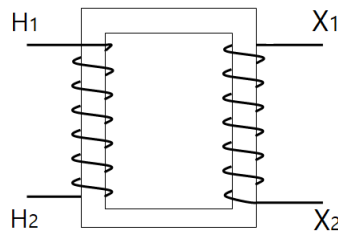
La norma IEEE C57.12.00 especifica que los transformadores inferiores o iguales a 200 kVA con una tensión primaria de 8 660 volts y menores deben tener polaridad aditiva. Todos los demás transformadores monofásicos deben tener polaridad sustractiva.

2.1.3.2. Polaridad sustractiva

La polaridad sustractiva en un transformador se da cuando los terminales de un mismo lado poseen subíndices iguales o bien el subíndice del devanado primario se encuentra en línea recta con el mismo subíndice, pero del lado secundario. La norma IEEE C57.12.70 especifica como sustractiva cuando, H1 y X1 son adyacentes, figura 18.

En la polaridad sustractiva el bobinado secundario está arrollado en sentido opuesto al bobinado primario, esto hace que los flujos de los dos bobinados giren en sentidos opuestos y se resten. En la polaridad sustractiva el voltaje en el secundario sale en fase respecto a la del primario.

Figura 18. **Polaridad sustractiva de un transformador**



Fuente: elaboración propia.

2.1.3.3. **Chequeo de polaridad**

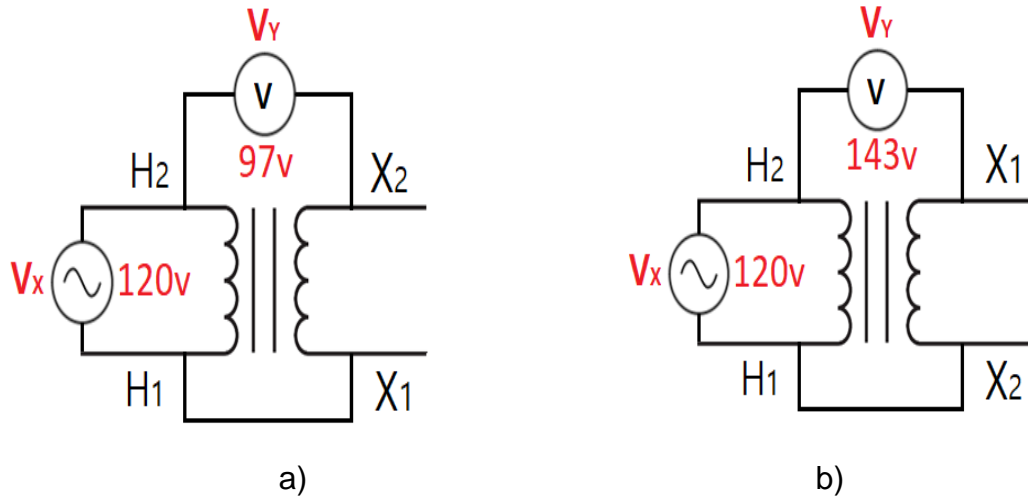
Cuando un transformador no tiene marcas de polaridad se lleva a cabo un procedimiento mediante el uso de una fuente de voltaje y un voltímetro para determinar o hacer un chequeo de la polaridad.

Se coloca la fuente de voltaje en el lado de alta tensión con aproximadamente 115 V, luego se coloca un cable entre los terminales adyacentes del primario y secundario mientras que en los otros terminales adyacentes restantes se coloca el voltímetro tal como se muestra en la figura 19.

El multímetro marcará dos valores de voltaje con respecto al de la fuente, con este dato se determina qué tipo de polaridad se encuentra con forme a lo siguiente:

- **Sustractiva:** se considera polaridad sustractiva cuando el voltaje que marca el voltímetro es menor que el voltaje de la fuente, figura 19(a).
- **Aditiva:** se considera polaridad aditiva cuando el voltaje que marca el voltímetro es mayor al voltaje de la fuente, figura 19(b).

Figura 19. **Polaridades determinadas mediante la prueba de polaridad**



Fuente: elaboración propia.

2.1.4. Índice horario

El índice horario se utiliza para identificar la forma que están conectados los devanados de los transformadores trifásicos. En los transformadores, dependiendo de la conexión, puede existir un desfase de 30° entre la tensión que entra en el primario y la tensión que sale en el secundario. Este desfase se da en las conexiones estrella-delta y delta-estrella, dicho desfase se explica en el apartado 2.1.5. Para las conexiones delta-delta y estrella-estrella este desfase no se da.

En el índice horario, como se verá más adelante, se toma en cuenta este desfase para poder interpretar él porque en conexiones delta-estrella y estrella-delta las configuraciones que se dan solamente pueden ser con subíndice impar y para las conexiones delta-delta y estrella-estrella el subíndice será par.

El índice horario proporciona una nomenclatura que se identifica por medio de la configuración del transformador (Y- Δ , Δ - Δ , Δ -Y, Y-Y) seguido de un subíndice el cual indica el desfase existente en la configuración, por ejemplo: Yd₅, esta se interpreta como una configuración estrella-delta con un desfase de 150° (5 * 30° = 150°). El método del reloj, ayuda a comprender el subíndice y como realizar una conexión con un índice específico.

Conocer el índice horario es muy importante al momento de conectar transformadores en paralelo debido a que todos los transformadores deben tener el mismo índice horario para evitar que puedan producirse corrientes de circulación entre los transformadores cuando se realice la conexión.

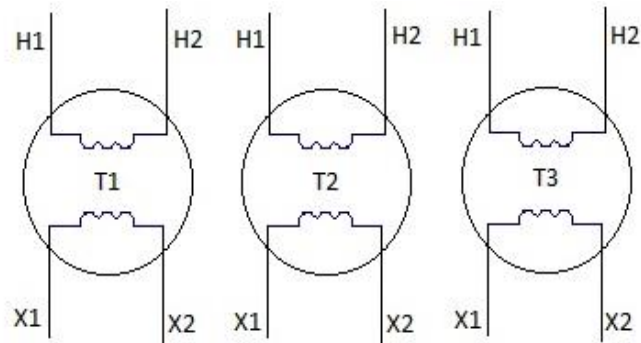
2.1.4.1. Método de reloj

Como su nombre lo indica, este método se basa en un reloj debido a que en un reloj el ángulo que existe entre dos horas es de 30° tal y como sucede con el desfase de 30° descrito en el apartado 2.1.4.

A continuación, se describen los pasos que se deben realizar en el método de reloj para obtener el índice horario:

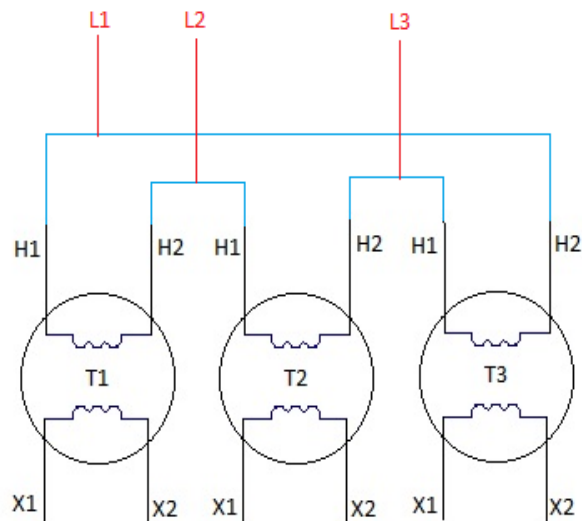
- Para ejemplificar se usará una configuración Δ -Y₁.
- Se determinan las terminales del primario y secundario de los transformadores, figura 20.
- Se realizan las conexiones de las terminales del primario dependiendo de la configuración, en este caso configuración delta. Además, se colocan las líneas (L1, L2, L3) de alimentación, figura 21.

Figura 20. **Identificación de terminales**



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Conexión delta del primario y su respectiva alimentación**

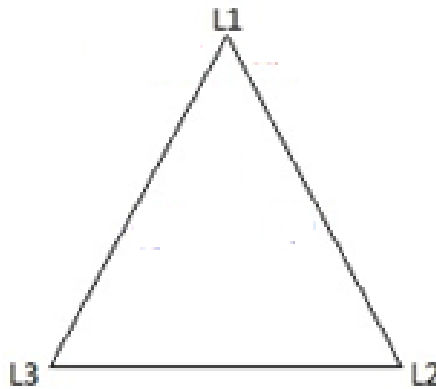


Fuente: elaboración propia.

Para colocar las líneas (L1, L2, L3) no es necesario realizarlo como en la figura 21, estas pueden colocarse de cualquier forma, por ejemplo, basados en la figura 21, la L1 puede ocupar el lugar de L2 y L2 la de L3 y L3 la de L1.

- Se realiza la figura delta y se identifican sobre esta las líneas en sus vértices, figura 22, partiendo de L1 y en sentido de las manecillas del reloj se identifican las otras 2 líneas.

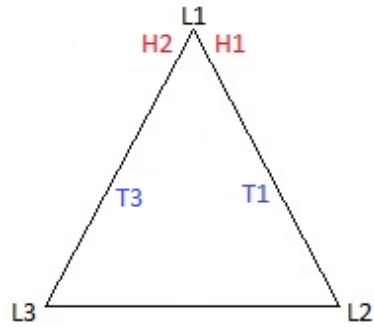
Figura 22. **Delta con identificación de líneas de alimentación trifásica**



Fuente: elaboración propia.

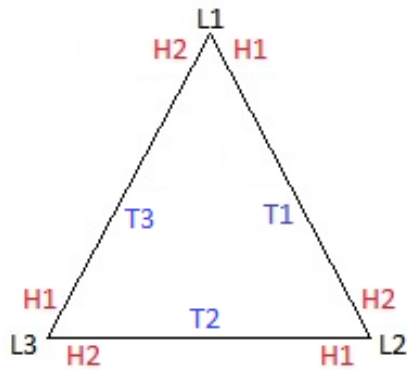
- Ahora se identifican las marcas de los transformadores de la figura 21 en la figura 22, tomando en cuenta qué parte de los devanados es alimentada por cada línea de la siguiente forma:
 - o Se observa en la figura 21 que la línea L1 alimenta H1 del primer transformador (T1) y H2 del tercer transformador (T3) por lo que en la figura 22 se colocan estas marcas en el vértice donde se encuentra L1, figura 23.
 - o El procedimiento anterior se aplica para las líneas L2 y L3, colocando las respectivas marcas en la figura delta, dando como resultado la figura 24.

Figura 23. **Designación de marcas en la delta para L1**



Fuente: elaboración propia.

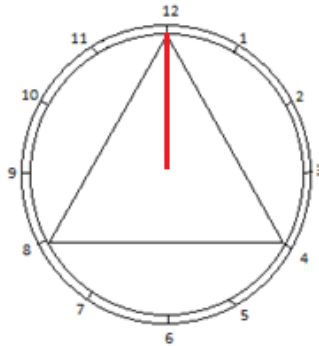
Figura 24. **Designación de las marcas de los transformadores en la delta**



Fuente: elaboración propia.

- Ahora entra en juego el reloj. Se dibuja la configuración que se haya escogido del lado del primario dentro del reloj, en este caso la delta; se obtiene la figura 25. Se debe tomar en cuenta que uno de los vértices quede en el número 12 (0°) ya que de esta línea se parte para medir los grados según configuración deseada.

Figura 25. **Delta por medio del método de reloj**



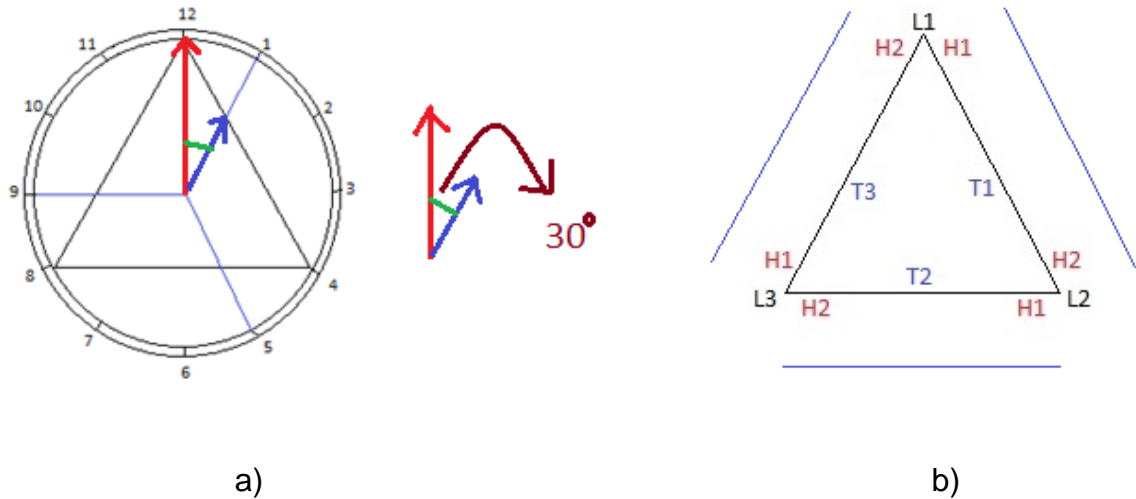
Fuente: elaboración propia.

Para el secundario, dependiendo que configuración se desee (estrella o delta), se dibuja la figura de la configuración dentro del reloj de tal forma que: para una delta, uno de sus vértices quede en el número de la configuración deseada y en estrella una de las líneas quede en el número de la configuración deseada. De modo que se forme el ángulo de la configuración deseada entre la figura del primario y la figura del secundario.

Como se mencionó en apartados anteriores para las configuraciones delta-estrella y estrella-delta solo puede haber configuraciones impares (1, 3, 5, 7, 9, 11) y para configuraciones delta-delta y estrella-estrella solo configuraciones pares (2, 4, 6, 8, 10, 12), estos números se multiplican por 30° para obtener el índice que se requiera.

En este caso se elabora un $\Delta-Y_1$, por lo que quedaría como se ve en la figura 26(a), en la cual está la estrella superpuesta a la delta. Se observa que una de las líneas que conforman la estrella, la línea larga, quedó en el número 1, formado así el ángulo de 30° , respecto a la línea corta, el cual corresponde al número de configuración deseada.

Figura 26. Estrella y delta por medio del método de reloj

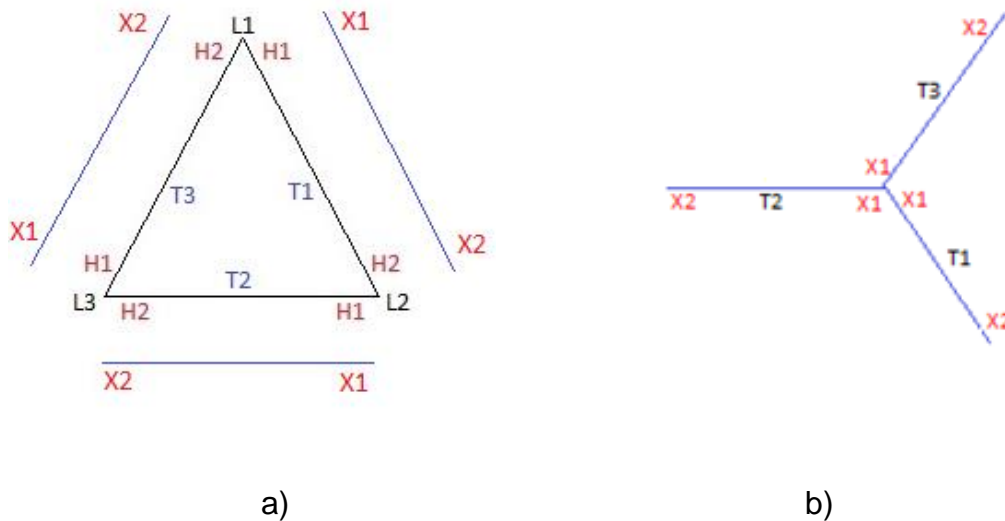


Fuente: elaboración propia.

Las flechas de la figura 26(a), simulan las agujas de un reloj, las cuales marcan el ángulo de la configuración deseada.

- Como se observa en la figura 26(b), si se descomponen las líneas que forman la estrella y se colocan junto a la delta, estas son paralelas con las líneas que conforman la delta. Tomando la figura 26(b) se procede marcar las líneas que conforman la estrella de tal forma que la línea de la estrella que sea paralela a la de la delta, se designará con los índices de igual forma solo que ahora con las marcas para el secundario, por lo que le corresponde (X1, X2) tal como se muestra en la figura 27(a), esto para cada línea de cada que conforma la estrella.
- o Con las líneas ya marcadas de la figura 27(a) se arma de nuevo la estrella obteniendo la figura 27(b) con las marcas ya asignadas.

Figura 27. **Designación de marcas en el lado del secundario**

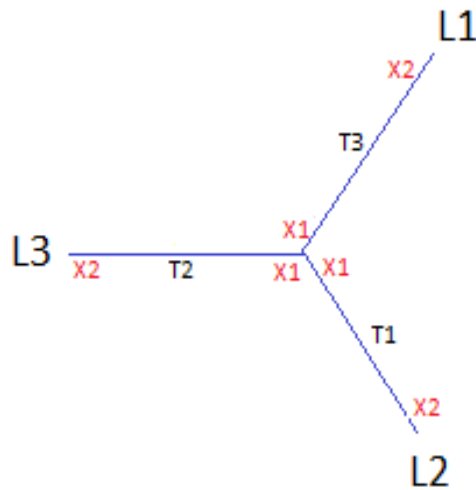


Fuente: elaboración propia.

- Ahora se determina de donde salen las líneas L1, L2, L3, del secundario de la siguiente forma:
 - o La línea L1 va a salir siempre del número de la configuración deseada. Por ejemplo, para la configuración escogida, Δ -Y₁ va a salir del número 1 del reloj, figura 28. Es por esto que en la figura 26(a) se dibujó la estrella de tal manera que una línea quedara en el número 1.
 - o Las demás líneas (L2, L3) salen de las otras dos líneas de la estrella faltantes girando en sentido de las agujas del reloj, figura 28.
- Por último, se procede a realizar las conexiones en los devanados de los transformadores tomando como referencia la figura 28. Los terminales X1

de los transformadores se unen tal y como lo indica la figura 28, y las líneas salen por X2 de cada transformador quedando como resultado la figura 29.

Figura 28. **Designación de las líneas en la configuración estrella**

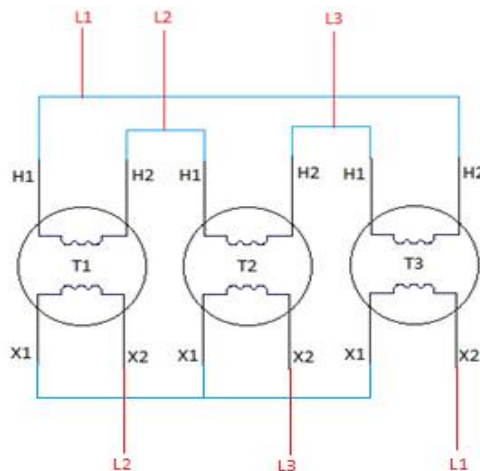


Fuente: elaboración propia.

En la configuración realizada, los transformadores están en polaridad sustractiva, esta misma configuración se puede realizar en polaridad aditiva, siguiendo el procedimiento de asignación de las marcas de polaridad para una polaridad aditiva.

Es necesario mencionar que para llevar a cabo la anterior conexión (Δ - Y_1) hay diferentes maneras de hacerlo, todo depende de cómo se asignen las líneas en el primario y cómo se configuren los devanados del primario. En la sección de ejemplos se verá cómo se obtiene la misma conexión, pero con diferentes posiciones de las líneas en los devanados del primario.

Figura 29. **Conexión final Δ -Y₁**



Fuente: elaboración propia.

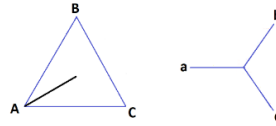
2.1.4.2. **Método según la norma IEEE C57.12.70**

Dentro de la norma IEEE C57.12.70 se describen las figuras que muestran cómo llevar a cabo las conexiones de los transformadores. La norma como tal no describe un procedimiento, simplemente da figuras, por lo que se les dará una interpretación a estas. La norma muestra una figura con la configuración a realizar, figura 30.

También, se describen diferentes conexiones para la misma configuración, utilizando transformadores en aditivo y en sustractivo, figura 31. La figura 31 se pueden interpretar de la siguiente manera:

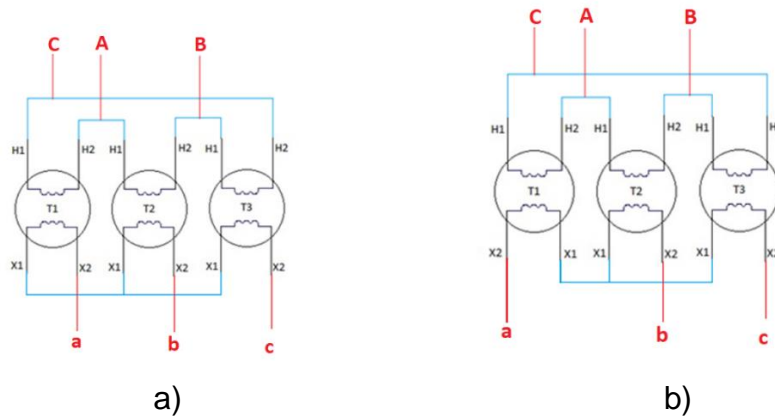
- En la figura 30, la norma dibuja las figuras de la configuración y asigna las líneas como A, B, C, para el lado del primario y dentro de esta dibuja una línea de referencia que va desde el centro hacia el vértice donde se encuentra la línea A.

Figura 30. **Conexión Δ - Y_1 a realizar según IEEE C57.12.70**



Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Configuración de los devanados del transformador en Δ - Y_1 según norma IEEE C57.12.70**



Fuente: elaboración propia.

- Luego dibuja la estrella de tal forma que una línea que conforma la estrella forme 30° con respecto a la dibujada dentro de la delta, figura 30.
- Luego basadas en las dos figuras (figura 30), realiza las conexiones del lado del secundario, quedando como resultado la figura 31.
- En la figura 31(a), la configuración se hace con los tres transformadores en configuración sustractiva; en la figura 31(b), un transformador está en

configuración aditiva y los otros dos en configuración sustractiva. Ambas figuras representan la conexión Δ - Y_1 .

Si el lector presta atención, estas mismas configuraciones se pueden obtener mediante el método del reloj, el cual es el método comúnmente utilizado.

2.1.5. Tipos de conexión de los transformadores

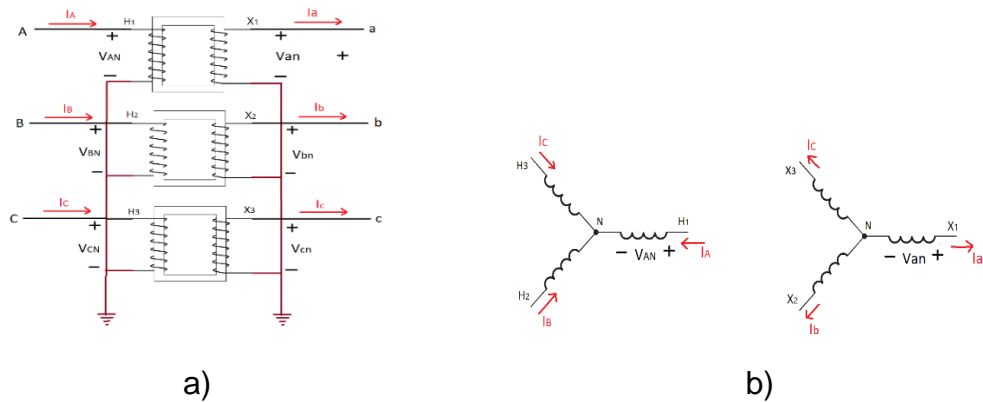
En las secciones anteriores de este capítulo ya se ha hablado un poco de las conexiones entre transformadores, se han dado ejemplos como es el caso de la parte de índice horario en la cual se utilizó conexiones para poder explicarlo. En esta sección se abordan cada una de las conexiones que se dan entre transformadores por aparte, utilizando el método del reloj para su ejemplificación.

Para el caso de las configuraciones delta-delta y estrella-estrella, solamente se dan configuraciones con índices pares (2, 4, 6, 8, 10, 12 = 60° , 120° , 180° , 240° , 300° , 360° o 0°); es decir, no hay desfase entre tensiones del primario y tensiones del secundario.

Para entender porque no hay desfase, véase la figura 32(a), en esta se muestra una configuración estrella-estrella de un transformador trifásico. En la figura 33(b) se muestra el esquema de la figura 33(a). Los devanados que están sobre el mismo núcleo se encuentran dibujados en paralelo y se muestra la relación fasorial en secuencia positiva.

Por ejemplo, H1-N esta sobre el mismo núcleo magnético que el devanado de baja tensión X1-n de la figura 33(b). Del mismo modo V_{AN} está en fase con V_{an} . Como se vio no existe desfase entre tensiones primarias y secundarias.

Figura 32. Transformador trifásico en configuración estrella-estrella



Fuente: elaboración propia.

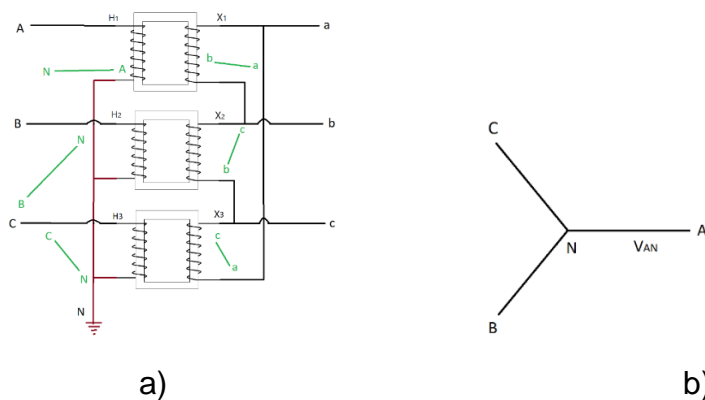
Para las configuraciones delta-estrella y estrella-delta, solamente se dan configuraciones con índices impares (1, 3, 5, 7, 9, 11 = 30°, 90°, 150°, 210°, 270°, 330°) es decir hay presente un desfase entre tensiones del primario y tensiones del secundario; los voltajes del lado de alta tensión adelantan 30° respecto a las cantidades correspondientes de lado de baja tensión, esto para el caso de una secuencia positiva.

Duncan Glover, Mulukutla Sarma en su libro *sistemas de potencia* describen un procedimiento para entender el desfase, de la siguiente forma:

- Véase la figura 33(a) donde se muestra una configuración estrella-delta con sus respectivas marcas, los transformadores están en configuración sustractiva.
- De la figura 33(a), se dibuja el diagrama fasorial en secuencia positiva para el lado primario, que corresponde a una estrella, obteniendo el diagrama de la figura 33(b).
- De la figura 33(b) mueva el fasor A-N junto a las terminales A-N de la figura 33(a). Identifique los extremos de esta línea de la misma manera que el diagrama fasorial. De igual manera, mueva los fasores B-N y C-N junto a las terminales B-N y C-N de la figura 33(a).

- Para cada transformador monofásico, la tensión aplicada al devanado de baja tensión debe estar en fase con la tensión aplicada al devanado de alta tensión, suponiendo un transformador ideal. Por tanto, trace una línea recta junto a cada devanado de baja tensión paralela a la recta correspondiente ya trazada junto al devanado de alta tensión.
- Etiquete los extremos de las rectas trazadas en el anterior inciso mediante la inspección de las marcas de polaridad. Por ejemplo, la fase A está conectada a la terminal con punto H1, y A aparece del lado derecho de la recta A-N. Por tanto, la fase a, que está conectada a la terminal con punto X1, debe estar del lado derecho y b de lado izquierdo de la recta a-b. De manera análoga, la fase B está conectada a la terminal H2, y B esta debajo de la recta B-N. Por tanto, la fase b, conectada a la terminal con punto X2, debe estar debajo de la recta b-c. Análogamente, c está arriba de la recta c-a, figura 33(a).
- Ahora una las rectas obtenidas del lado del secundario, figura 36(a), para completar el diagrama fasorial para el devando de baja tensión (configuración delta) mostrado en la figura 34.
- En la figura 35 note que V_{AN} adelanta a V_{an} por 30° tal y como se había dicho anteriormente.
- En el caso de que los voltajes fueran de secuencia negativa sucedería lo contrario los voltajes de alta tensión V_{AN} irían atrasado 30° de los voltajes de baja tensión V_{an} .¹¹

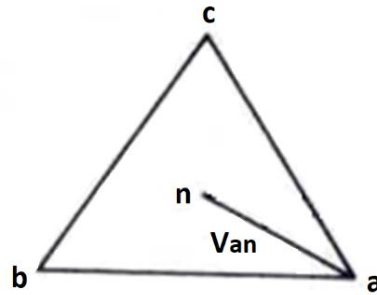
Figura 33. Transformador trifásico en configuración estrella-delta



Fuente: elaboración propia.

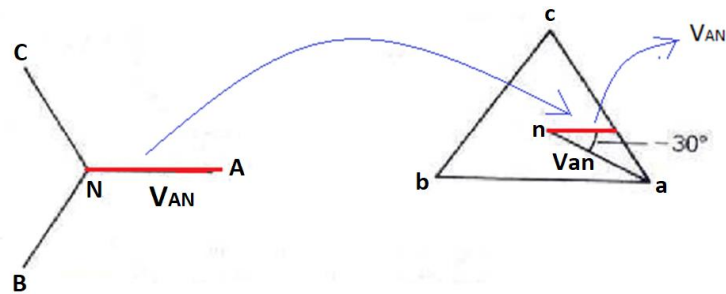
¹¹ GLOVER, Duncan; SARMA, Mulukutla. *Sistemas de potencia análisis y diseño*. p. 97-99.

Figura 34. **Diagrama fasorial para el lado de baja tensión de una configuración delta**



Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Diagrama fasorial de desfase entre tensiones de una configuración estrella-delta**



Fuente: elaboración propia.

2.1.5.1. Conexión estrella-estrella

En el apartado 2.1.1.1 se describió lo que se comprende como conexión estrella. Las conexiones que se pueden realizar en una configuración estrella-estrella, figura 36, se muestran en la tabla I. Estas configuraciones se pueden

realizar en polaridad aditiva o polaridad sustractiva por medio del método del reloj.

En esta conexión la tensión de cada de fase es $1,73 (\sqrt{3})$ veces menor que la tensión de línea, figura 36(a); por lo que el voltaje en el secundario es igual al voltaje de línea del primario multiplicado por el inverso de la relación de transformación, figura 36(b). Por tal razón, esta conexión se emplea en sistema con tensiones muy elevadas, ya que disminuye la capacidad de aislamiento.

- Sabiendo que el voltaje de línea en la estrella es: $V_L = \sqrt{3} V_F$.
- El voltaje de fase en la estrella queda como:

$$V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{V}{\sqrt{3}}$$

- Tomando una fase del transformador, el voltaje en el secundario queda de la siguiente forma:

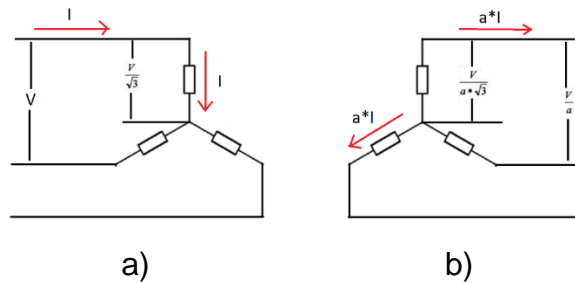
$$\text{Relación de transformación} \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

$$\text{De la relación de transformación} \Rightarrow \frac{\frac{V}{\sqrt{3}}}{V_2} = a$$

$$\text{Voltaje de fase en el secundario} \Rightarrow V_2 = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot a}$$

$$\text{Voltaje de línea en el secundario} \Rightarrow V_{L_2} = \sqrt{3} * V_2 \Rightarrow V_{L_2} = \frac{V}{a}$$

Figura 36. **Conexión Y-Y**



Fuente: elaboración propia.

El anterior procedimiento se aplica también para las corrientes, obteniendo las ecuaciones para las corrientes que aparecen en la figura 36. La conexión estrella-estrella será usada donde el neutro primario pueda ser conectada sólidamente a tierra (de baja impedancia) o al neutro de la fuente de alimentación. Si no se lleva a cabo la conexión del neutro surgen problemas como:

- Inestabilidad en las fases cuando la carga es desequilibrada provocando grandes corrientes de desequilibrio. Presenta tercera armónica de las corrientes y carga de línea a neutro.

Tabla I. **Índice horario para una configuración Y-Y**

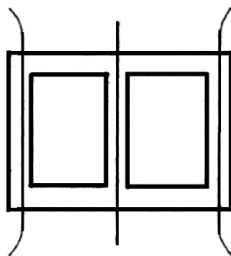
Índice horario	Desfase
Y - Y ₀	0° o 360°
Y - Y ₂	60°
Y - Y ₄	120°
Y - Y ₆	180°
Y - Y ₈	240°
Y - Y ₁₀	300°

Fuente: elaboración propia.

Estos problemas pueden ser eliminados cuando los transformadores poseen un devanado extra llamado terciario. Este devanado se conecta en triángulo el cual proporciona un camino cerrado para la tercera armónica eliminando con ello el voltaje de terceras armónicas en los devanados principales. En algunos casos este devanado se utiliza para alimentar servicios auxiliares por medio de terminales hacia el exterior.

Vembu Gourishanka en su libro *Conversión de energía electromecánica* menciona que la mayor parte de los anteriores problemas se suprime utilizando un núcleo tipo trifásico. A causa de la unión magnética entre las tres fases, el residuo de la tercera armónica es reducido grandemente y también el neutro es apreciablemente estabilizado.¹²

Figura 37. **Núcleo trifásico**



Fuente: elaboración propia.

Esto se debe a que la tercera armónica del flujo producirá una tercera armónica del voltaje que fluye en la misma dirección en las tres fases y regresa de una unión a la otra alrededor de un camino no magnético como se muestra en la figura 37. Como el circuito de regreso para el flujo es un camino de muy alta reluctancia, el flujo resultante es mucho menor que en unidades monofásicas o

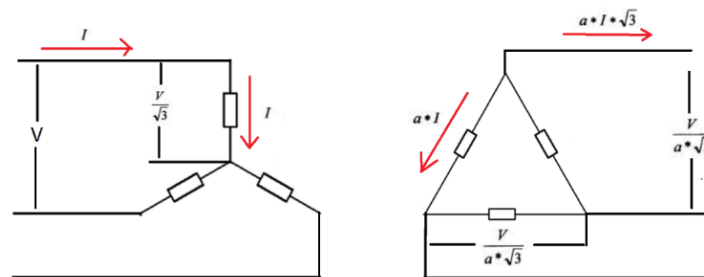
¹² GOURISHANKAR, Vembu. *Conversión de energía electromecánica*. p. 212-213.

en unidades trifásicas tipo acorazado. En ambas de las cuales es conveniente un conducto cerrado de hierro para la tercera armónica del flujo.

2.1.5.2. Conexión estrella-delta

En esta clase de conexión el primario se conecta en estrella y el lado secundario en delta. Las conexiones que se pueden realizar en una configuración estrella-delta, figura 38, se muestran en la tabla II. Las configuraciones tienen subíndices impares por el desfase que existen en este tipo de configuraciones, este se explicó en el apartado 2.1.5. Estas configuraciones se pueden realizar utilizando transformadores con polaridad aditiva o polaridad sustractiva y haciendo uso del método del reloj.

Figura 38. Conexión Y-Δ



Fuente: elaboración propia.

En la figura 38, se muestra la relación que existen entre los voltajes del primario y secundario. Los voltajes de línea y fase de la delta se determinan de la siguiente forma:

- Sabiendo que el voltaje de línea en la estrella es: $V_L = \sqrt{3} V_F$.

- El voltaje de fase en la estrella queda como:

$$V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{V}{\sqrt{3}}$$

- En la delta: $V_L = V_F$.
- Tomando una fase del transformador, el voltaje en el secundario quedaría de la siguiente forma:

$$\text{Relación de transformación} \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

$$\text{De la relación de transformación} \Rightarrow \frac{\frac{V}{\sqrt{3}}}{V_2} = a$$

$$\text{Voltaje de fase en el secundario} \Rightarrow V_2 = \frac{V_1}{\sqrt{3} \cdot a}$$

$$\text{Voltaje de línea en el secundario} \Rightarrow V_2 = \frac{V_1}{\sqrt{3} \cdot a}$$

De esta última ecuación se observa que la relación de transformación general 'a' de una conexión Y-Δ es $\sqrt{3}$ veces mayor que la relación de transformación de voltajes de fase o de espiras.

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{3} \cdot a$$

El anterior procedimiento se aplica también para las corrientes, obteniendo las ecuaciones que aparecen en la figura 38.

Tabla II. Índice horario para una configuración Y- Δ

Índice horario	Desfase
Y - Δ_1	30°
Y - Δ_3	90°
Y - Δ_5	150°
Y - Δ_7	210°
Y - Δ_9	270°
Y - Δ_{11}	330°

Fuente: elaboración propia.

Vembu Gourishankar en su libro *Conversión de energía electromecánica* enumera características que tanto la conexión Y- Δ como la conexión Δ -Y presentan y que las hacen diferentes a las otras:

- El lado de la estrella casi siempre posee cuatro hilos, siendo tres de ellos para la línea y el cuarto denominado neutro, para conectarse a tierra.
- Las tensiones del lado de la delta difieren de las del lado de la estrella por no estar estas en fase.
- El lado de la estrella se puede conectar a tierra en el neutro preferiblemente, con el fin de que los potenciales polares sean simétricos respecto a tierra, siempre y cuando nos convenga y que así lo marque los reglamentos eléctricos.
- En el lado de alta existe la tercera armónica donde puede circular localmente con las mismas condiciones que la conexión delta-delta.
- Su aplicación más frecuente se encuentra en algunas subestaciones intermediarias entre las líneas de transmisión de tensión extra elevadas y las líneas de distribución primaria.¹³

Esta configuración es utilizada para bajar de un voltaje alto a uno medio o bajo, comúnmente usado en transformadores reductores. El lado de la estrella se

¹³ GOURISHANKAR, Vembu. *Conversión de energía electromecánica*. p. 211.

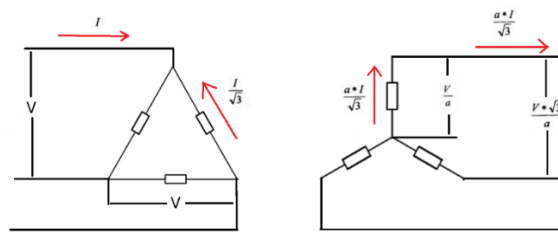
conecta al circuito de alto voltaje por razones de aislamiento y además se cuenta con un neutro. A diferencia en el lado de la delta se carece de neutro.

En esta configuración el voltaje del secundario se desplaza 30° respecto al primario ya sea en adelante o en atraso, depende de la secuencia de fase de los voltajes. Esto causa que no se puedan conectar grupos de transformadores en paralelo.

2.1.5.3. Conexión delta-estrella

En esta conexión el primario se conecta en delta y el lado secundario en estrella. Las conexiones que se pueden realizar en una configuración delta-estrella, figura 39, se muestran en la tabla III.

Figura 39. Conexión Δ -Y



Fuente: elaboración propia.

Al igual que en una conexión Y- Δ , en la conexión Δ -Y también se da el desfase de 30° entre primario y secundario, es por ello el subíndice impar. En la figura 39, se muestra la relación que existe entre los voltajes del primario y secundario. Los voltajes de línea y fase del lado secundario (estrella) se determina de la siguiente forma:

- Sabiendo que el voltaje de línea y fase de una delta son iguales:

$$V_L = V_F \Rightarrow V$$

- El voltaje de en la estrella:

$$V_L = \sqrt{3} V_F$$

- Tomando una fase del transformador, el voltaje en el secundario quedaría de la siguiente forma:

$$\text{Relación de transformación} \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

$$\text{De la relación de transformación} \Rightarrow V_2 = \frac{V_1}{a}$$

$$\text{Voltaje de fase en el secundario} \Rightarrow V_{f_2} = \frac{V_1}{a}$$

$$\text{Voltaje de línea en el secundario} \Rightarrow V_{L_2} = \frac{\sqrt{3} * V_1}{a}$$

Donde $V_1 = V$ figura 42

Esta configuración es utilizada para subir de un voltaje bajo hacia un voltaje alto, empleada en transformadores elevadores. El lado de la estrella, devanado secundario, se conecta al circuito de alto voltaje por razones de aislamiento y además se cuenta con un neutro. El lado del primario corresponde a la delta.

Tabla III. Índice horario para una configuración Δ -Y

Índice horario	Desfase
$\Delta - Y_1$	30°
$\Delta - Y_3$	90°
$\Delta - Y_5$	150°
$\Delta - Y_7$	210°
$\Delta - Y_9$	270°
$\Delta - Y_{11}$	330°

Fuente: elaboración propia.

Esta configuración posee las mismas características que la anterior, se mantiene el desfase de 30° entre primario y secundario. Esta configuración se utiliza mucho en transformadores de distribución, colocando la estrella al lado de baja tensión. Esto permite alimentar cargas trifásicas y monofásicas (entre fase y neutro). No genera terceras armónicas de tensión.

2.1.5.4. Conexión delta-delta

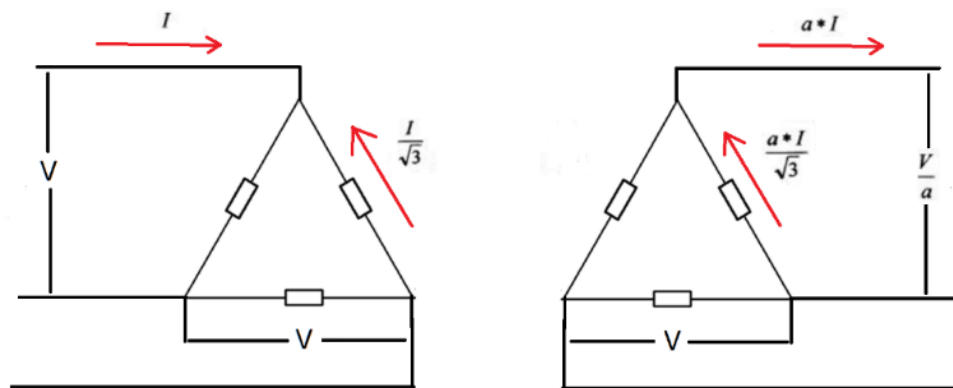
En esta conexión ambos devanados se conectan en configuración delta. Las conexiones que se pueden realizar en una configuración delta-delta, figura 40, se muestran en la tabla IV.

Tal como lo indica la tabla IV y al igual que en la configuración Y-Y, la configuración Δ - Δ solo posee subíndices pares debido a que no hay desfase entre voltajes del primario y voltajes del secundario.

La conexión Δ - Δ carece de terceras armónicas por lo que se utiliza cuando se desean mínimas interferencias en el sistema, además, si se tienen cargas desequilibradas, este desequilibrio se compensa, ya que las corrientes de estas

cargas se distribuyen uniformemente en los devanados. Esta conexión se utiliza comúnmente cuando los voltajes no son muy elevados. Una de sus características por la cual se utiliza se debe al hecho de poder seguir funcionando en caso de que un devanado presente fallas, este puede continuar funcionando en conexión delta-delta abierta, pero con una potencia menor, esto debido a la característica que posee la delta abierta (apartado 2.1.1.2).

Figura 40. **Conexión Δ - Δ**



Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Índice horario para una configuración Δ - Δ**

Índice horario	Desfase
$\Delta - \Delta_2$	60°
$\Delta - \Delta_4$	120°
$\Delta - \Delta_6$	180°
$\Delta - \Delta_8$	240°
$\Delta - \Delta_{10}$	300°
$\Delta - \Delta_{12}$	360° o 0°

Fuente: elaboración propia.

2.1.5.5. Conexiones de finalizada especial

Además de las conexiones trifásicas estándar, existen modos de llevar a cabo la transformación trifásica con solo dos transformadores. Estas técnicas se emplean algunas veces para crear potencia trifásica en ubicaciones en las que no están disponibles las tres líneas de potencia. Si hay un usuario aislado de potencia trifásica a lo largo de una ruta atendida por una línea de distribución con dos de las tres fases, se puede usar esta técnica para crear potencia trifásica para ese usuario en particular.¹⁴

Todas las técnicas que crean potencia trifásica con solo dos transformadores involucran una reducción de la capacidad de manejo de potencia de los transformadores, pero se justifican en ciertas situaciones económicas. Algunas de las conexiones más importantes con dos transformadores son: conexión D abierta (o V-V), conexión Y abierta-D abierta, conexión Scott-T, conexión trifásica en T

- Conexión Scott-T

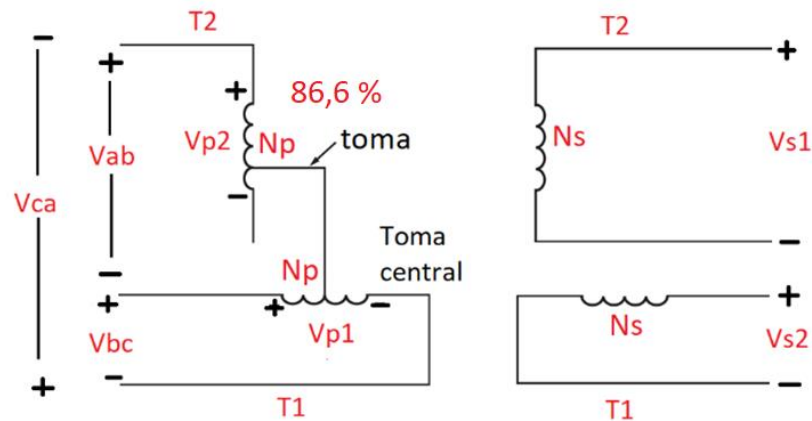
Este tipo de conexión es una manera de obtener dos fases separadas 90° a partir de un sistema trifásico. Este surgió debido a que anteriormente era común conectar sistemas bifásicos y trifásicos. En la actualidad se utiliza cuando se necesita potencia bifásica. Permite acoplar circuitos trifásicos con bifásicos y viceversa.

“La conexión Scott-T consta de dos transformadores monofásicos con idéntica capacidad. Uno tiene una toma en su devanado primario a 86,6 % de su voltaje a plena carga. Están conectados como se muestra en la figura 41. La toma de 86,6 % del transformador T2 está conectada a la toma central del transformador T1. El diagrama de los voltajes resultantes aplicados a los primarios de los dos

¹⁴ CHAPMAN, Stephen. *Maquinas eléctricas*. p. 98.

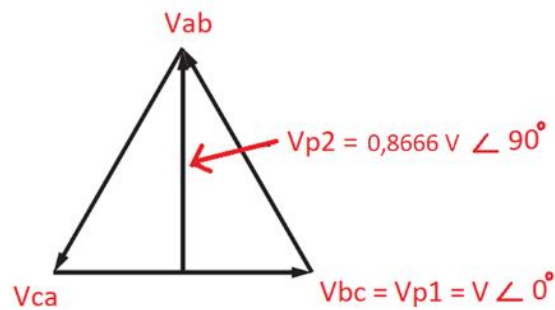
transformadores luego de realizar las conexiones, se muestra en la figura 42. Debido a que los anteriores voltajes se encuentran desfasados 90° , ocasionan una salida bifásica figura 43. Esta conexión también permite convertir la potencia bifásica en potencia trifásica, pero debido a que hay muy pocos generadores bifásicos en uso, por lo común no se hace".¹⁵

Figura 41. **Conexión Scott-T del transformador**



Fuente: elaboración propia.

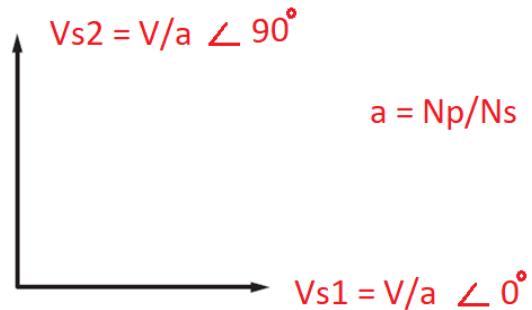
Figura 42. **Voltajes resultantes aplicados a los primarios**



Fuente: elaboración propia.

¹⁵ CHAPMAN, Stephen. *Maquinas eléctricas*. p. 101.

Figura 43. **Voltajes bifásicos de salida en los secundarios**



Fuente: elaboración propia.

- **Conexión T-trifásica**

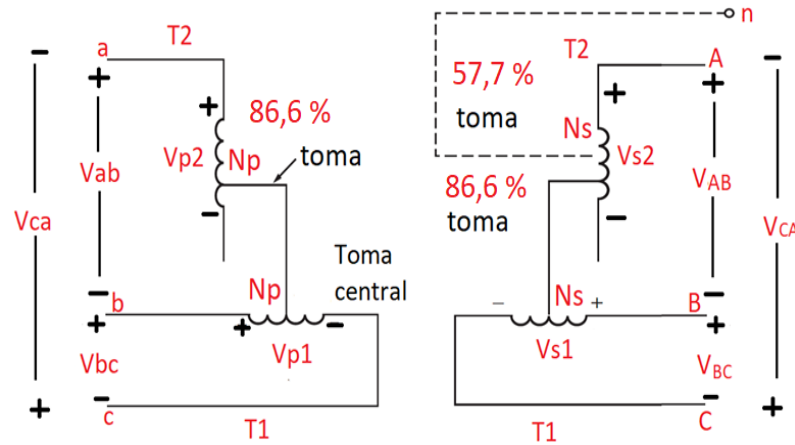
Esta conexión se deriva del caso anterior, a diferencia que en esta se realizan unas modificaciones en las conexiones de los transformadores para poder convertir potencia trifásica en potencia trifásica de otro nivel de voltaje.

“Tal y como se muestra en la figura 44, en este caso, tanto el devanado primario como secundario del transformador T2 tienen una toma al 86,6 % y las tomas están conectadas a las tomas centrales de los devanados correspondientes del transformador T1. En esta conexión, a T1 se le llama transformador principal y a T2 transformador de conexión en T”.¹⁶

Al igual que en la conexión Scott-t los voltajes que se aplican en la entrada producen dos voltajes desfasados 90° en los devanados primarios; estos a su vez producen en los devanados secundarios voltajes que, también, están desfasados 90° , pero estos se combinan en una salida para obtener voltajes trifásicos, figura 45.

¹⁶ CHAPMAN, Stephen. *Maquinas eléctricas*. p. 102.

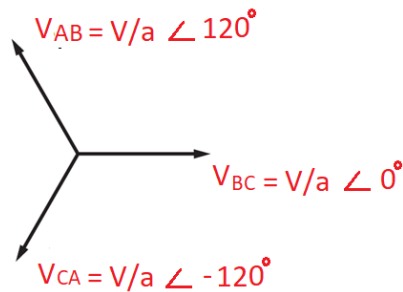
Figura 44. **Conexión T trifásica**



Fuente: elaboración propia.

Este tipo de conexión, como se observó anteriormente, tiene la ventaja de que se puede obtener un voltaje trifásico con el uso de dos transformadores. Esta conexión es utilizada en los transformadores de distribución y tiene la ventaja que se puede conectar neutro en el lado primario y también en el lado del secundario.

Figura 45. **Voltajes de salida**

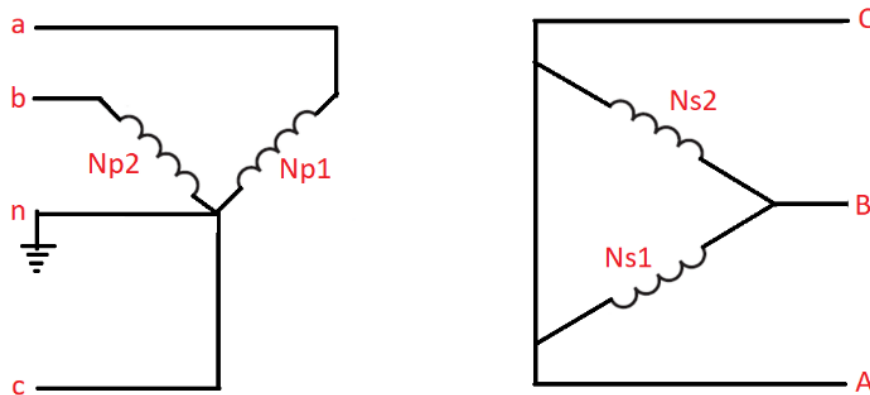


Fuente: elaboración propia.

- Conexión estrella abierta - delta abierta

Esta conexión permite obtener un voltaje trifásico a partir de solo dos fases, comúnmente se utiliza en servicios en los cuales no cuentan con las 3 fases de entrada. Esta conexión basa su principio en la delta abierta del lado del secundario y del lado primario una estrella conformada por 2 fases y un neutro, figura 46.

Figura 46. **Conexión Y abierta – Δ abierta**



Fuente: elaboración propia.

En esta conexión la pérdida de capacidad con respecto al grupo trifásico total es del 42,3 %, es decir, solo puede aprovecharse un 57,7 % de la potencia que suministraría el grupo trifásico completo.

$$\text{Pérdida de capacidad} = P_t (Y-\Delta) - P (Y \text{ abierta}- \Delta \text{ abierta})$$

$$\text{Pérdida de capacidad} = 100 \% - 57,7 \% = 42,3 \%$$

Donde:

- P_t (Y- Δ): es la potencia total del banco completo (Y- Δ).
- P (Y abierta- Δ abierta): es la potencia del banco usando 2 transformadores Y abierta – Δ abierta.

Esta configuración puede utilizar solamente 2 transformadores, pero tiene la desventaja que como se observa en la figura 46, en el neutro del primario circula una corriente demasiado grande.

2.1.6. Análisis comparativo entre las conexiones

Dentro de la sección anterior se dio la teoría de cada una de las conexiones; sin embargo, muchas de estas presentan ventajas y desventajas frente a las demás conexiones por lo que este apartado está enfocado a cada uno de estas, en las conexiones vistas.

Realizar este tipo de análisis, hará que el lector pueda conocer que ventajas presenta una conexión frente a otro ya que estas ayudaran a determinar en qué situación es mejor trabajar con una conexión y no con otra, tal es el caso que presenta la conexión delta en el cual, de darse una falla en uno de sus arrollamientos, este puede seguir trabajando, esto no es posible en una configuración estrella.

2.1.6.1. Ventajas y desventajas entre los tipos de conexión de los transformadores

A continuación, se presentan las ventajas y desventajas que posee las conexiones: estrella-estrella, estrella-delta, delta-delta, delta-estrella,

- Conexión estrella-estrella

- o Ventajas

- Posibilidad de disponer de un neutro tanto en el lado de alta tensión como el de baja tensión.
 - Utilizada en tensiones elevadas por el hecho de disminuir la cantidad de aislamiento.
 - Se puede formar un sistema balanceado de 4 hilos gracias al neutro.
 - Aislamiento mínimo y disminución de las espiras debido a que la tensión de fase es menor a la tensión de línea.

$$(V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}})$$

- Obtener diferentes niveles de tensión debido al neutro.
 - Si una fase del lado del secundario resulta dañando, las dos fases restantes pueden funcionar resultando una transformación monofásica.
 - Si se tiene un devanado terciario, se elimina los armónicos.
 - No hay desplazamiento de fase entre tensiones primarias y secundarias.

- El caso de poseer devanado terciario este puede utilizarse para alimentar pequeñas cargas.
- o Desventajas
 - Se deben aterrizar sólidamente los neutros, de lo contrario serán inestables.
 - Unidades de polaridad opuesta no pueden operar en paralelo.
 - Una fase dañada o transformador hace no se puede operar hasta ser reparada.
 - Propenso a terceras armónicas cuando no se tiene un neutro aterrizado, especialmente la de orden tres.
 - Si se alimentan cargas trifásicas no balanceadas, estas hacen que los voltajes en las fases se desequilibren severamente.
 - Si el transformador posee terciario hace que aumente el costo y tamaño del mismo.
- Conexión estrella-delta
 - o Ventajas
 - Puede abastecer a cargas conectadas en estrella y delta.

- Utilizada cuando se quiere reducir de una tensión alta a una baja o media, debido a que el primario solo debe estar aislado para el voltaje de fase y no el de línea.
- Provee de un neutro del lado del primario, pudiendo conectarse sólidamente a tierra o al neutro de la fuente.
- No presente problema debido a los terceros armónicos ya que las corrientes de terceras armónicas circulan en la delta.
- No presenta problemas de desequilibrio del lado de la delta debido a que en esta misma se redistribuye el desequilibrio.
- Se puede obtener un voltaje monofásico del lado de la delta.

o Desventajas

- No se puede alimentar cargas monofásicas y trifásicas al mismo tiempo debido a que no se dispone de neutro del lado del secundario.
- No es posible formar sistemas de 4 hilos.
- Si una fase del lado del primario resulta dañada no puede continuar funcionando.

$$V_{L_{\text{primario}}} = \sqrt{3} V_{F_{\text{secundario}}}$$

- El voltaje del secundario se desplaza 30° respecto al voltaje primario.
 - No se puede conectar secundarios de transformadores en paralelo debido al desfaseamiento que existe, siendo este un requisito para conectar en paralelo.
 - Es poco usual en los sistemas de distribución.
 - Si se utiliza como transformador elevador, el arrollamiento del secundario (delta) puede resultar débil mecánicamente.
 - No se puede sacar más de un neutro de la delta ya que esto pondrá en corto el transformador.
- Conexión delta-estrella
 - o Ventajas
 - No presente problema debido a los terceros armónicos ya que las corrientes de terceras armónicas circulan en la delta.
 - Esta configuración es utilizada en transformadores elevadores de voltaje.
 - Se tiene neutro del lado del secundario el cual se sirve para suprimir las armónicas y dar neutro para los sistemas estrella-estrella.

- No presenta problemas debido al desequilibrio de cargas.
 - Al aterrizar el neutro del secundario proporciona aislamiento para la corriente de tierra de secuencia cero.
 - El secundario solo debe estar aislado para el voltaje de fase y no el de línea.
- o Desventajas
- La falla de una fase deja fuera de operación al transformador.
 - No se dispone de neutro del lado del primario.
 - EL voltaje del secundario se desplaza 30 respecto al voltaje primario.
 - El devanado en delta puede ser mecánicamente débil.
- Conexión delta-delta
- o Ventajas
- Se puede conectar un neutro en un devanado del secundario para obtener salida monofásica con un valor de $\frac{V_{Linea}}{2}$.
 - Permite conectar cargas trifásicas y monofásicas del lado secundario.

- No presenta problema a los armónicos por la circulación de estas a través de la delta.
 - Se puede operar con una fase dañada, aunque esto disminuye la potencia entregada.
 - No presenta desfase de tensión entre primario y secundario.
 - Se puede conectar transformadores en paralelo por el hecho de no presentar desfase.
 - Al momento de circular corrientes grandes en las líneas, en las fases solo circulara $I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$, por lo que se puede disminuir la sección de los conductores.
- o Desventajas
- No se puede colocar neutro del lado del primario ya que esto ocasionaría corto dentro del transformador.
 - Si se conectan cargas trifásicas desbalanceadas en estrella de lado del secundario, se produce un desbalance en los voltajes de fase.
 - No se pueden conectar cargas desbalanceadas monofásica ya que estas producen desequilibrio en los voltajes monofásicos.

- No se puede sacar más de un neutro de la delta ya que esto pondrá en corto el transformador.
 - Las bobinas deben soportar la tensión de la red por lo que aumenta el número de espiras y los costos de diseño son elevados.
 - No se puede suministrar energía con 4 hilos.
- Análisis comparativo de las conexiones

Anteriormente, se presentaron las ventajas y desventajas de cada una de las conexiones por lo que ahora se puede dar ideas generales de las diferencias entre cada conexión basadas en los puntos anteriores.

- o Una conexión delta-delta permite conectar transformadores en paralelo al igual que una estrella-estrella, pero siempre y cuando se tomen en cuenta las polaridades de los transformadores ya que de no hacerlo se puede producir un corto circuito.
- o Las configuraciones que poseen estrella, (estrella-delta, estrella-estrella y delta estrella), tiene la peculiaridad que en este devanado el aislamiento se reduce por tener menores voltajes de fase, estos son utilizados comúnmente en para voltajes altos.
- o En una conexión en la que se encuentra una delta, se elimina los armónicos por la circulación de estos dentro de la delta, pero una estrella también los puede eliminar solo que debe tener sí o sí un neutro sólidamente aterrizado para que se descarguen en este.

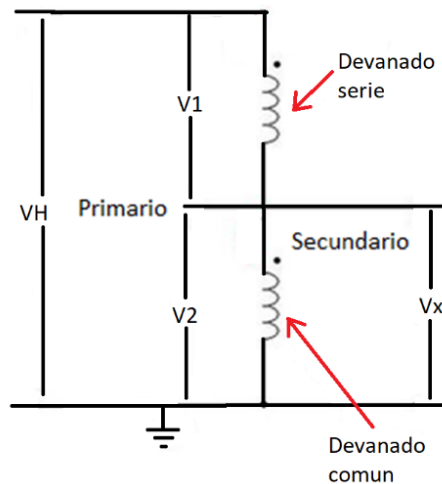
- o De una conexión delta se puede sacar un neutro para alimentar cargas trifásicas, pero no deben estar desequilibradas.
- o La conexión estrella-estrella permite alimentar cargas trifásicas y monofásicas a diferencia de una delta-delta que no lo permite en su totalidad.
- o La configuración-estrella-estrella es la menos utilizada debido a que necesita de neutros para su correcto funcionamiento.
- o La configuración estrella-delta es utilizada en arranques de motores, debido a que en estrella el motor consume tres veces menos corriente que conectado en triángulo.
- o Si se requiere una conexión para alimentar cargas trifásicas y monofásicas en simultáneo es común usar la configuración delta-estrella.
- o En la conexión estrella-triángulo no es posible acceder a un neutro secundario para redes de distribución, por lo cual no podrá tampoco conectarse a una tierra de seguridad.

2.2. Autotransformadores

La transformación de energía también es posible efectuarse mediante el uso de un autotransformador. Este se define como un transformador que está compuesto por un único arrollamiento en el cual se encuentra tanto el devanado primario como el devanado secundario conectados eléctricamente entre sí, estos poseen una conexión en común, figura 47. El autotransformador puede ser

considerado como un caso particular del transformados ya que cumple con las mismas funciones de un trasformador: transferir energía eléctrica a diferentes niveles de voltaje y corriente. Sus principios de funcionamiento son similares a los de un trasformador.

Figura 47. **Autotransformador**



Fuente: elaboración propia.

Al tener un solo devano para el primario y secundario un autotransformador es más barato que un transformador convencional y además tiene menos pérdidas, esto se ve reflejado en un mejor rendimiento. Los bobinados del autotransformador son denominados como devanado serie y devanado común. Dependiendo de cómo sea su conexión puede funcionar como autotransformador elevador o reductor.

A diferencia de los transformadores, un autotransformador transfiere la energía entre los dos circuitos (devanado serie y común) de dos formas:

- Por el acoplamiento magnético.
- Por conexión eléctrica directa: energía transferida conductivamente del primario al secundario.

El principal inconveniente de un autotransformador es que no existe aislamiento entre los circuitos primario y secundario de cada fase. En un transformador normal los dos devanados de una fase están aislados entre sí. Son circuitos que están ligados a través de un campo magnético, pero eléctricamente están separados. Sin embargo, en un autotransformador este aislamiento no existe; pues se trata del mismo devanado que actúa a la vez como primario y como secundario.

La transferencia total de KVA en un autotransformador es la suma fasorial de los KVA conductivos más los KVA transformados. Si un transformador convencional se conecta de tal forma que trabaje como autotransformador, se verá que aumenta la capacidad de KVA que puede transferir, comparado con los KVA que transfiere si trabaja como transformador convencional.

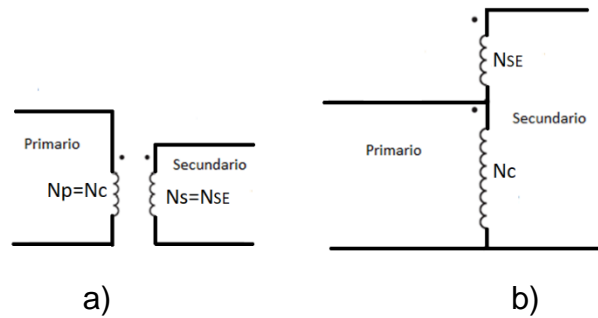
2.2.1. Aspectos constructivos

Un autotransformador está constituido por partes similares a las de un transformador, la diferencia está en que el aislamiento que se le debe dar a un autotransformador es mayor en comparación al que se le da a un transformador convencional debido a que se dispone de un solo bobinado para el primario y secundario.

Un autotransformador también puede ser construido a partir de un transformador convencional de dos arrollamientos, figura 48. En la figura 48(a)

se muestra un transformador común. En la figura 48(b) se muestra el primer devanado conectado de manera aditiva al segundo devanado, formando así un autotransformador elevador.

Figura 48. **Transformador y autotransformador**



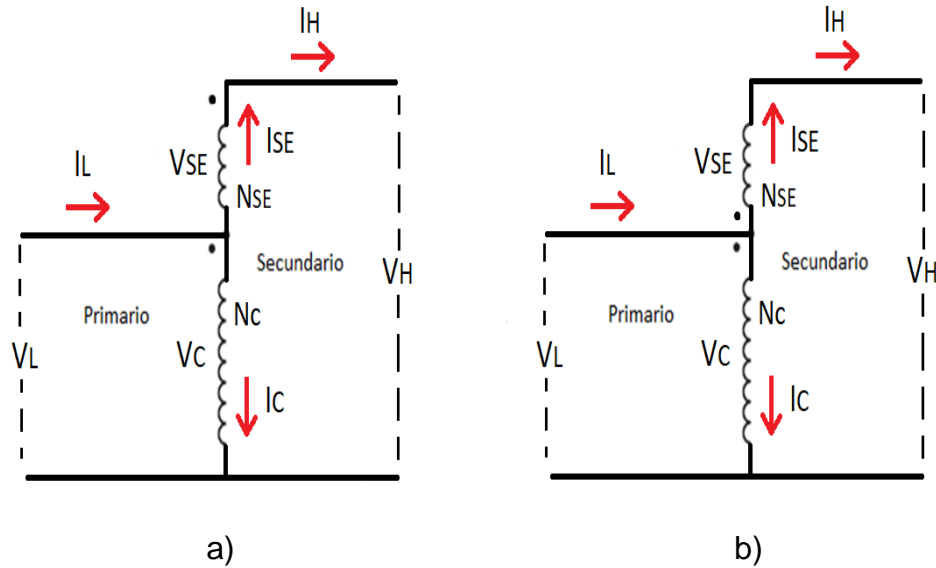
Fuente: elaboración propia.

Se observa que ahora el voltaje de salida del autotransformador es la suma del voltaje de ambos devanados. El primer devanado se denomina como devanado común debido a que su voltaje aparece en ambos lados del autotransformador. El segundo devanado ahora es el devanado serie debido a que está conectado en serie al devanado común. Cuando un autotransformador es formado a partir de un transformador se debe tomar en cuenta la polaridad que tienen los devanados del transformador y como se conecten estos. Más adelante se verá cómo influye esto en un autotransformador.

2.2.1.1. Polaridad de un autotransformador

Al igual que un transformador convencional, los arrollamientos de un autotransformador también poseen polaridad, la cual influye en los voltajes de salida. El concepto de polaridad se trató anteriormente (véase la sección 2.1.3).

Figura 49. **Polaridad aditiva y sustractiva de un autotransformador**



Fuente: elaboración propia.

- Polaridad aditiva

Véase la figura 49(a), en esta se muestra un autotransformador conectado en polaridad aditiva; las marcas de polaridad se encuentran opuestas (en diferente nodo) por lo que las ecuaciones generales de corriente, voltaje y potencia son las siguientes:

$$V_H = V_L + V_{SE} \quad \text{volts (V)}$$

$$I_L = I_C + I_H \quad \text{amperes (A)}$$

$$S = S_H = S_L \quad \text{Volt-amperes (VA)}$$

$$S_L = V_L * I_L$$

$$S_H = V_H * I_H$$

Donde:

- S_H : potencia del lado de alto voltaje
- S_L : potencia del lado de bajo voltaje
- S : potencia en VA transferida por el autotransformador
- V_L : voltaje del lado de bajo voltaje
- V_H : voltaje del lado de alto voltaje
- V_{SE} : voltaje en el devanado serie
- I_L : corriente del lado de bajo voltaje
- I_H : corriente del lado de alto voltaje
- I_C : corriente en el devanado común

En polaridad aditiva el voltaje del lado secundario es la suma fasorial de los voltajes a través de cada devanado y la corriente primaria es la suma fasorial de las corrientes en cada devanado.

- Polaridad sustractiva

Para el modo de polaridad sustractiva véase la figura 49(b), en esta se muestra un autotransformador en polaridad sustractiva, las marcas de polaridad se encuentran en el mismo nodo (ambos extremos con punto se conectan en el mismo nodo; en este caso, el autotransformador se comporta como un autotransformador de bajada, por lo que las ecuaciones generales de corriente, voltaje y potencia son las siguientes:

$$V_H = V_L - V_{SE} \quad \text{volts (V)}$$

$$I_H = I_L + I_C \quad \text{amperes (A)}$$

$$S = S_H = S_L \quad \text{Volt-amperes (VA)}$$

$$S_L = V_L * I_L$$

$$S_H = V_H * I_H$$

En polaridad sustractiva el voltaje del lado secundario es la resta fasorial de los voltajes a través de cada devanado y la corriente primaria es la suma fasorial de las corrientes en cada devanado.

En polaridad aditiva el voltaje del lado secundario es la suma fasorial de los voltajes de cada devanado y en polaridad sustractiva el voltaje del lado del secundario es la resta fasorial de los voltajes de cada devanado. Por lo anterior se mencionó que en polaridad sustractiva el autotransformador se comporta como autotransformador de bajada.

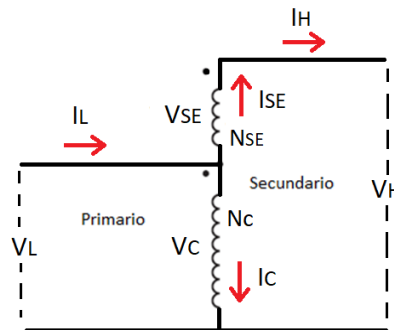
2.2.1.2. Autotransformador elevador

Un autotransformador elevador, como su nombre lo indica se utiliza para elevar el voltaje. Como se muestra en la figura 50, solo una parte del arrollamiento actúa como primario (devanado común) mientras que el arrollamiento total del mismo se utiliza como secundario (devanado común más devanado serie).

- Relación de voltajes y corrientes de un autotransformador elevador

En un autotransformador hay relación entre voltajes y corrientes de las bobinas con voltajes y corrientes en los terminales, para determinar esta relación véase la figura 50, en la que se muestra un autotransformador elevador, identificados de la siguiente manera:

Figura 50. **Autotransformador elevador**



Fuente: elaboración propia.

- V_L : voltaje del lado de bajo voltaje
- V_H : voltaje del lado de alto voltaje
- I_L : corriente del lado de bajo voltaje
- I_H : corriente del lado de alto voltaje
- V_C : voltaje en el devanado común
- V_{SE} : voltaje en el devanado serie
- I_C : corriente en el devanado común
- I_{SE} : corriente en el devanado serie
- N_C : número de espiras del devanado común
- N_{SE} : número de espiras del devanado serie

Tomando el transformador elevador los voltajes y corrientes de la bobina común y serie se relacionan mediante las siguientes ecuaciones respectivamente:

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

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

Los voltajes terminales se relacionan con los voltajes en las bobinas mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_L = V_C$$

$$V_H = V_C + V_{SE} \quad \Rightarrow \quad V_H = V_L + V_{SE}$$

Y las corrientes en terminales mediante las siguientes ecuaciones:

$$I_H = I_{SE}$$

$$I_L = I_C + I_{SE} \quad \Rightarrow \quad I_L = I_C + I_H$$

Las anteriores ecuaciones muestran la relación entre voltajes y corrientes de las bobinas y voltajes y corrientes en terminales. A continuación, se muestra la relación de voltajes y corrientes que hay entre los lados del autotransformador, partiendo de las ecuaciones. Para la relación entre V_H y V_L , V_H está dado por:

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

Pero:

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

Entonces:

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

Pero sabiendo que $V_L = V_C$, entonces la relación entre V_H y V_L , queda de la siguiente manera:

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

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

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

Esto mismo se realiza para la relación entre I_H y I_L , I_L está dado por:

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

Pero:

$$N_C I_C = N_{SE} I_{SE}; \quad I_C = \frac{N_{SE}}{N_C} * I_{SE}$$

Entonces:

$$I_L = \frac{N_{SE}}{N_C} * I_{SE} + I_{SE}$$

Pero sabiendo que $I_H = I_{SE}$, entonces la relación entre I_H y I_L , queda de la siguiente manera:

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

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

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

2.2.1.3. Autotransformador reductor

Un autotransformador reductor es lo contrario a un elevador, este reduce el voltaje. Como se muestra en la figura 51, el total del arrollamiento actúa como primario (devanado común más devanado serie) mientras que una parte del arrollamiento se utiliza como secundario (devanado común).

- Relación de voltajes y corrientes de un autotransformador reductor

Un autotransformador reductor, al igual que un autotransformador elevador, también posee relación entre voltajes y corrientes de las bobinas con voltajes y corrientes en los terminales. Para determinar esta relación se aplica el mismo procedimiento que se realizó con el autotransformador elevador, utilizando la

figura 51. Los voltajes y corrientes de la bobina común y serie se relacionan mediante las siguientes ecuaciones respectivamente:

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

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

Los voltajes y corrientes en terminales se relacionan con los voltajes y corrientes de las bobinas mediante las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$V_L = V_C$$

$$V_H = V_C + V_{SE} \quad \Rightarrow \quad V_H = V_L + V_{SE}$$

$$I_H = I_{SE}$$

$$I_L = I_C + I_{SE} \quad \Rightarrow \quad I_L = I_C + I_H$$

La relación entre V_H y V_L , queda de la siguiente manera:

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

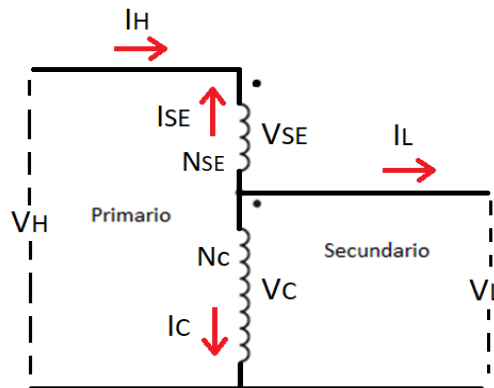
Y la relación entre I_H y I_L , queda de la siguiente manera:

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

En la tabla VI, se muestra la similitud que hay entre las ecuaciones de un autotransformador y las de un transformador convencional; como se mencionó anteriormente la diferencia está en que:

- Para el transformador elevador: el devanado primario está constituido por el devanado común (N_C) y el devanado secundario está constituido por el devanado común (N_C) más el devanado serie (N_{SE}).
- Para el transformador reductor: el devanado primario está constituido por el devanado común (N_C) más el devanado serie (N_{SE}) y el devanado secundario está constituido por el devanado común (N_C).

Figura 51. **Autotransformador reductor**



Fuente: elaboración propia.

Desde el punto de vista de la estructura, la única diferencia entre un autotransformador y un transformador ordinario de dos circuitos estriba en que el devanado serie del autotransformador debe estar aislado para una tensión igual a la tensión a tierra del circuito de alta tensión (tensión mayor que la inducida en el devanado mismo). En todos los demás aspectos, un autotransformador no es más que un transformador ordinario de dos devanados conectados de manera que queden en serie. El comportamiento interno del autotransformador no es diferente

del transformador ordinario de dos circuitos, pero a causa del método de conexión las relaciones entre tensión y las corrientes en los circuitos exteriores y las que circulan por los devanados son las dadas en las ecuaciones siguientes:¹⁷

$$V_L = V_C$$

$$I_H = I_{SE}$$

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

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

Tabla V. **Similitud entre ecuaciones de corriente y voltaje de un transformador y un autotransformador**

	Transformador	Autotransformador elevador	Autotransformador reductor
Voltajes	$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$	$\frac{V_L}{V_H} = \frac{N_C}{N_C + N_{SE}}$	$\frac{V_H}{V_L} = \frac{N_C + N_{SE}}{N_C}$
Corrientes	$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$	$\frac{I_L}{I_H} = \frac{N_{SE} + N_C}{N_C}$	$\frac{I_H}{I_L} = \frac{N_C}{N_C + N_{SE}}$

Fuente: elaboración propia.

2.2.2. Circuito equivalente

El circuito equivalente de un autotransformador puede ser construido realizando el mismo procedimiento que se hace para construir el de un transformador convencional.

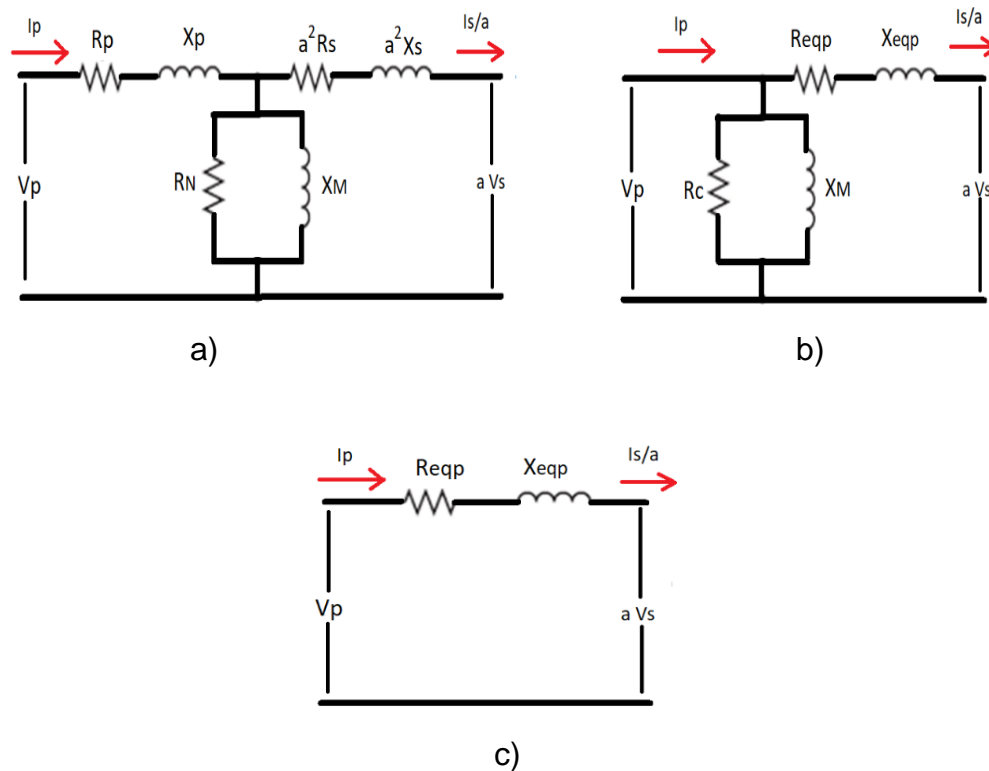
Para poder obtener el circuito equivalente de un autotransformador se debe recordar que el circuito equivalente exacto de un transformador referido al primario es el que se muestra en la figura 52(a).

¹⁷ E.E. STAFF M.I.T. *Circuitos magnéticos y transformadores*. p. 379.

En la figura 52(b) está este mismo circuito, pero con la rama de excitación en un extremo; esto es debido a que esta rama tiene una corriente muy pequeña comparada con la corriente de carga de los transformadores, de hecho, la corriente de excitación es solo aproximadamente de 2 a 3 % de la corriente de carga total de los típicos transformadores de potencia, por lo que es válido realizar este cambio.

Por lo anterior en ciertas aplicaciones se puede omitir por completo la rama de excitación sin causar graves errores obteniendo el circuito de la figura 52(c) que representa el circuito equivalente aproximado de un transformador.

Figura 52. Circuitos equivalentes de un transformador

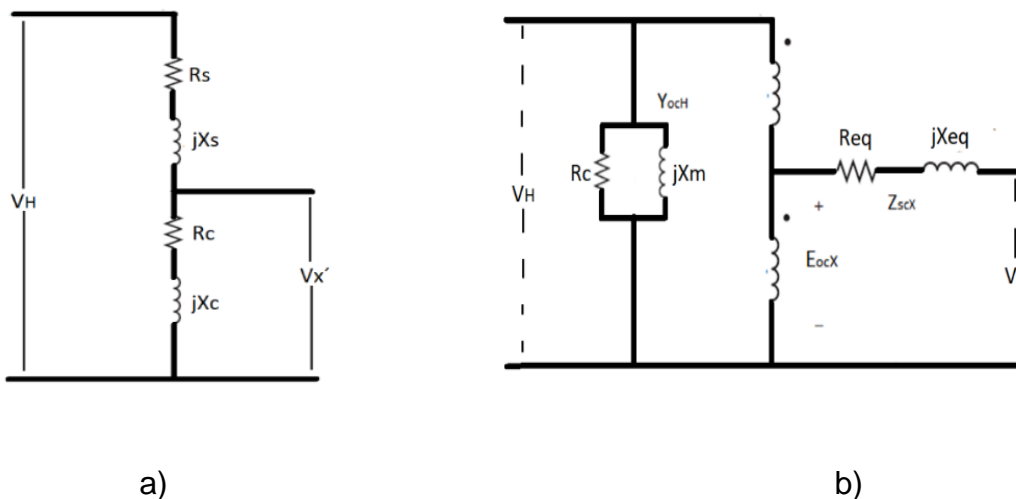


Fuente: elaboración propia.

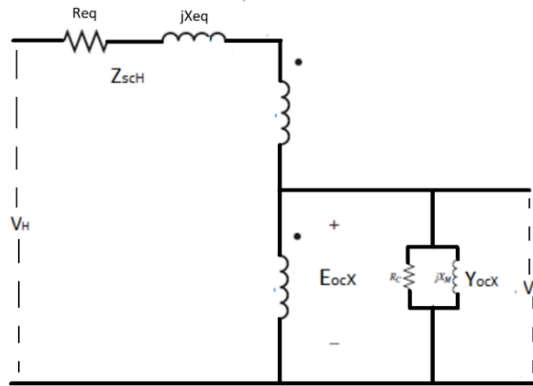
El circuito equivalente de un autotransformador puede obtenerse incluyendo las resistencias de los devanados, reactancias de dispersión, resistencia de pérdidas en el núcleo y la reactancia de magnetización tal y como en un transformador convencional. Suponga el autotransformador ideal de la figura 53(a), si a este se le aplica Thévenin visto desde sus terminales de baja tensión, equivale a una fuerza electromotriz igual a la tensión en circuito abierto E_{ocX} medida entre los terminales de baja tensión, en serie con la impedancia Z_{scX} medida entre los terminales de baja tensión con los terminales de alta cortocircuitados, como se ve en la figura 53(b).

Si se conecta entre los terminales de alta del autotransformador idea, la admitancia en circuito abierto Y_{ocH} medida desde el lado de alta tensión del transformador real, el circuito de la figura 53(b) es un circuito equivalente exacto del autotransformador tanto para el lado de alta tensión como para el lado de baja. Si este mismo procedimiento se realiza desde las terminales de alta tensión también se obtiene un circuito equivalente exacto, figura 53(c).

Figura 53. **Circuito equivalente exacto de un autotransformador reductor**



Continuación de la figura 53.



c)

Fuente: elaboración propia.

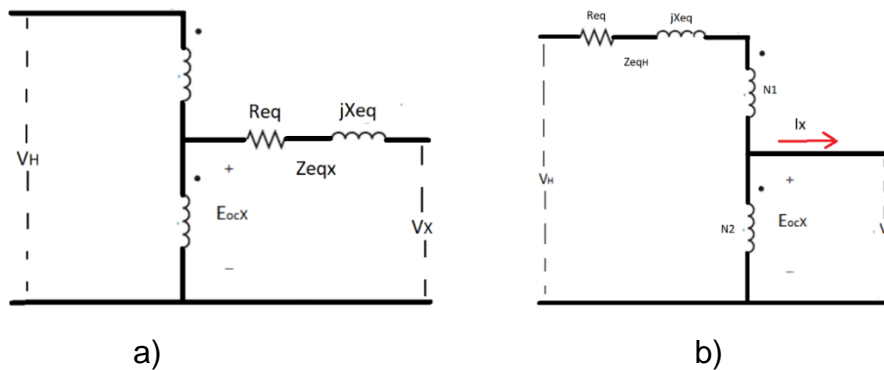
Como se menciona anteriormente, de la teoría de transformadores se sabe que si para un transformador se desprecia la corriente de excitación suele introducirles un error pequeño en el cálculo de problemas; no obstante, si se trabaja con problemas relacionados con los fenómenos de excitación esta no debe despreciarse.

Como, por lo general la corriente de excitación de un autotransformador es muy débil, el despreciarla introduce un error aún menor. Tomando en cuenta lo anterior el circuito equivalente aproximado del autotransformador se puede representar mediante la figura 54.

En un transformador convencional era común referir el secundario al primario para poder encontrar el circuito equivalente. En un autotransformador se aplica lo mismo, a diferencia que el devanado común se refiere al devanado serie, para ello se toma la figura 54(b). El voltaje común referido al primario; que se identifica como V_x' , queda de la siguiente forma:

$$V_x' = \frac{N_1 + N_2}{N_2} * V_x$$

Figura 54. **Circuito equivalente aproximado de un autotransformador reductor**



Fuente: elaboración propia.

La impedancia equivalente es igual a la impedancia medida entre los terminales del devanado serie con el devanado común en cortocircuito, tal y como se hace en el ensayo de cortocircuito de un transformador convencional. También, puede medirse cortocircuitando los terminales de baja tensión del autotransformador y aplicando una tensión reducida a los terminales de alta. En ambos casos se mide la misma impedancia debido a que cuando se cortocircuita, la tensión queda aplicada directamente al devanado serie, figura 54(b).

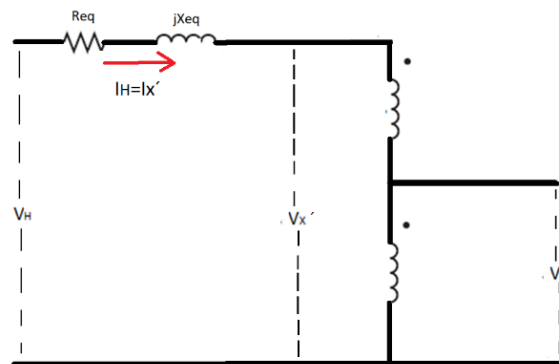
$$Z_{eq} = Z_{eqH}$$

La relación entre las corrientes que circulan por los circuitos de alta y baja tensión del autotransformador queda de la siguiente forma, tomando en cuenta que la corriente del devanado común se refirió al devanado serie:

$$I_H = I_x'$$

$$I_x' = \frac{N_2}{N_1 + N_2} * I_x$$

Figura 55. **Circuito equivalente de un autotransformador reductor referido al devanado serie**



Fuente: elaboración propia.

Con los datos impedancia y voltaje referidos al devanado serie queda el circuito de la figura 55. Del circuito de la figura 55; se puede obtener la siguiente ecuación, la cual corresponde también a la de un transformador, esta es aplicable al circuito equivalente aproximado de un autotransformador.

$$V_H = I_1 * Z_{eq} + V_{X'}$$

$$V_H = I_H * Z_{eq} + \frac{N_1 + N_2}{N_2} * V_X$$

Si se toma la anterior ecuación y se dibuja el circuito correspondiente queda el de la figura 56, el cual es un autotransformador de circuito equivalente aproximado que coincide con el circuito equivalente aproximado de un

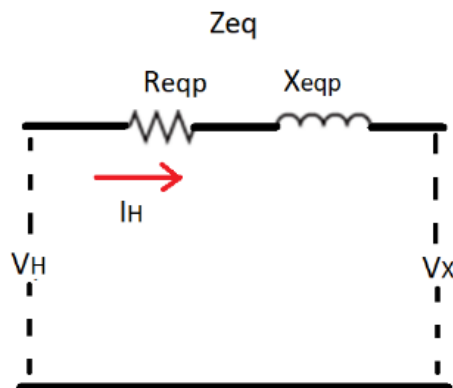
transformado, figura 52(c). La relación de corrientes para un transformador reductor es:

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

Por lo tanto, esta ecuación pone en manifiesto que la impedancia equivalente Z_{eq} del autotransformador, referida a su lado de alta tensión, es la misma que la impedancia equivalente referida al devanado serie cuando el transformador funciona como transformador de dos circuitos.

En otras palabras, es como cuando en un transformador convencional se refería la impedancia del devanado secundario al primario y la suma de estas de la impedancia equivalente.

Figura 56. **Representación del circuito equivalente aproximado de un autotransformador que equivale a un transformador convencional**



Fuente: elaboración propia.

Esta impedancia Z_{eq} puede determinarse midiendo la impedancia entre los terminales del devanado serie con el devanado común cortocircuitado, como en el ensayo de un transformador de dos circuitos.

También, puede determinarse cortocircuitando las terminales de baja tensión del autotransformador y aplicando una tensión reducida a los terminales de alta. Debido al cortocircuito la tensión queda aplicada directamente al devanado serie, por lo que en estos ensayos se mide la misma impedancia.

2.2.3. Ventajas y desventajas frente a un transformador

Un autotransformador por su forma de construcción y funcionamiento presenta ciertas ventajas y desventajas frente a un transformador convencional, sin embargo, cada uno es empleado para tareas específicas en el que el otro no cumpliría con esta.

- Ventajas
 - o Mayor rendimiento debido a que parte de la energía se transfiere directamente.
 - o Por sus características es de menor tamaño por lo que ocuparía menos espacio.
 - o Tiene un solo bobinado por lo que requiere menos cobre.
 - o Es más económico.
 - o Transfiere más potencia que un transformador.

- o Menor corriente de excitación.
- o Si una aplicación particular no requiere de aislamiento eléctrico, el autotransformador es conveniente para unir dos voltajes muy parecidos.
- Desventajas
 - o La principal desventaja de los autotransformadores es que a diferencia de los transformadores ordinarios hay una conexión física directa entre el circuito primario y el secundario, por lo que se pierde el aislamiento eléctrico en ambos lados.
 - o Si hay contacto entre espiras produciría que el secundario quede sometido a la tensión primaria.
 - o No es recomendable usarlo cuando la diferencia de voltaje entre primario y secundario es muy grande, por lo que su relación de transformación es limitada.
 - o No posee aislamiento entre primario y secundario.
 - o Por lo anterior se dan corrientes de cortocircuito muy elevadas.
 - o Debido a que no presenta aislamiento eléctrico hace que un defecto a tierra a un lado del autotransformador pueda dar lugar a tensiones elevadas respecto a tierra en el lado contrario, especialmente si su relación de transformación es muy grande.

2.2.4. Cálculos asociados a un transformador

En apartados anteriores se han visto varios de los procedimientos de cálculos que presenta un autotransformador. En lo que respecta el circuito equivalente se encontró que las ecuaciones de transformador son aplicables también a un autotransformador, con la diferencia que la relación de transformación cambia debido a que en el autotransformador se encuentra el devanado común y serie en un mismo devanado.

Las ecuaciones para el circuito equivalente corresponden a las siguientes:

$$V_x' = \frac{N_1 + N_2}{N_2} \quad \text{Voltaje del devanado común referido al devanado serie}$$

$$Z_{eq} = Z_{eqH} \quad \text{Impedancia equivalente}$$

$$I_x' = \frac{N_2}{N_1 + N_2} * I_x \quad \text{Corriente del devando común referido al devando serie}$$

- Ecuaciones que describen el funcionamiento

En el apartado 2.2.1.2. se desarrollaron las ecuaciones que define el funcionamiento de un autotransformador. Par aun transformador elevador y reductor se vio que los voltajes y corrientes en las bobinas vienen dados por las siguientes ecuaciones, basadas en la figura 50 y 51.

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

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

Y los voltajes y corrientes en terminales están relacionados por las siguientes ecuaciones:

$$V_L = V_C$$

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

$$I_H = I_{SE}$$

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

Estas ecuaciones son aplicadas a ambos autotransformadores debido a que en las figuras 50 y 51 la designación cambia de posición; es decir V_H siempre está en el lado de alta tensión y V_L en el de baja tensión. Finalmente, las ecuaciones que dan la relación de voltajes y corrientes entre los dos lados de un autotransformador viene dadas de la siguiente forma:

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

- Potencia en un autotransformador

Para un autotransformador no toda la potencia que pasa del primario al secundario en el autotransformador pasa a través de los devanados. Como resultado, si un transformador convencional se conecta como autotransformador, puede manejar mucha más potencia que aquella para la que fue fabricado originalmente. Para entender esto supóngase un transformador ideal en que los volt-amperes nominales son los siguientes:

$$S_{entr} = V_1 * I_1$$

$$S_{\text{sali}} = V_2 * I_2$$

Véase la figura 50, note que la potencia aparente de entrada del autotransformador está dada por:

$$S_{\text{entr}} = V_L * I_L$$

$$S_{\text{entr}} = V_L (I_C + I_H)$$

Y la potencia aparente de salida está dada por:

$$S_{\text{sal}} = V_H * I_H$$

$$S_{\text{sal}} = (V_1 + V_2) I_H \quad \text{Donde: } V_1 = V_{SE}$$

$$V_2 = V_C$$

$$I_H = I_2$$

Si se divide la potencia de salida del autotransformador entre la potencia de salida del transformador se obtiene una razón (un número):

$$\frac{S_{\text{sal, auto}}}{S_{\text{sal, trafo}}} = \frac{(V_1 + V_2) I_2}{V_2 * I_2} = \frac{V_1 + V_2}{V_2} = \frac{V_H}{V_H - V_C} = a + 1 \quad \text{Donde: } a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{\text{Valor como autotransformador}}{\text{Valor como transformador}} = a + 1$$

Esta razón indica la cantidad de veces de potencia que puede dar el autotransformador construido a partir de un transformador; es decir cuánta más potencia da el autotransformador referente a la que da el transformador. Al inicio de esta sección se dijo que la potencia de los autotransformadores se transfiere de dos formas distintas, debido a esto los autotransformadores tienen más eficiencia que los transformadores convencionales.

“En un transformador convencional toda la energía que recibe el primario se debe transformar para alcanzar al secundario, pero en un autotransformador solo una parte de la energía que recibe este se transforma; el resto de la energía se transfiere en forma conductiva no produce pérdidas en el transformador”.¹⁸

Para ejemplificar lo dicho anteriormente, véase la figura 51, el autotransformador reductor con polaridad aditiva, la potencia total sería:

$$\text{Transferencia total de KVA} = VA_{\text{Transformados}} + VA_{\text{conductivos}}$$

$$S_T = V_{SE} * I_H + V_C * I_H$$

Véase la figura 50, el autotransformador elevador con polaridad aditiva, la potencia total sería:

$$\text{Transferencia total de KVA} = VA_{\text{Transformados}} + VA_{\text{conductivos}}$$

$$S_T = V_{SE} * I_H + V_S I_H$$

Nuevamente se debe tomar en cuenta que, aunque las ecuaciones se parecen en los términos; estas están aplicadas de diferente manera para cada

¹⁸ KOSOW, Irvin. *Máquinas eléctricas y transformadores*. p. 602.

caso de autotransformador. En el capítulo 3 se dan ejemplos para observar de qué forma se aplican.

2.2.5. Pérdidas y rendimiento del autotransformador

En el apartado anterior se vio como la potencia aumenta la eficiencia del autotransformador. Por otra parte, el rendimiento es más elevado cuando se realiza la conexión de autotransformador.

En una maquina eléctrica presenta pérdidas fijas y perdidas variables. Las perdidas fijas se componen de las pérdidas mecánicas, que no existen en el autotransformador (al no poseer componentes móviles), y las pérdidas en el hierro. Las pérdidas variables son debidas a las pérdidas en el cobre.

Como cualquier maquina eléctricas, el rendimiento es el cociente entre la potencia útil o potencia secundaria y la potencia total o de entrada en el primario, es decir:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} - P_p}$$

Donde P_p representa las pérdidas. Para calcular las pérdidas de un transformador se emplea la siguiente ecuación (despejando las pérdidas de la ecuación de rendimiento):

$$P_p = \frac{P_{out}(1 - \eta)}{\eta}$$

Cuando un transformador se conecta como autotransformador, sus pérdidas a plena carga siguen siendo las misma P_p . Entonces, ahora se determina el rendimiento con los datos del autotransformador pero con las pérdidas obtenidas en el transformador:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} - P_{PT}}$$

2.3. Protocolos de pruebas en un transformador

Un transformador al igual que muchos componentes que constituyen un sistema eléctrico de potencia, sufren desgaste en sus partes que lo compone debido a agentes internos como externos. Dentro de los factores que afectan el funcionamiento del transformador se encuentra el calor, la humedad, el aire, contaminación externa.

El fallo de un transformador puede ser perjudicial para el entorno en que se encuentra trabajando de ocurrir una falla pueda que será necesario el reemplazo de una pieza o del equipo entero; esto requiere planificación y muchas veces el tiempo requerido es demasiado.

Por ello es importante mantener en buenas condiciones el transformador por medio de diferentes pruebas las cuales determina la condición de sus componentes durante la fabricación, antes de ponerlo en funcionamiento, durante su operación incluso después de haber realizado alguna reparación.

Las pruebas en un transformador determinar el estado en que este se encuentra y de esta forma programar los distintos mantenimientos. Algunas de las pruebas que se realizan en los transformadores depende de la condición

individual de los transformadores, del tipo de transformador, entre otros. En el caso de poner en servicio un transformador, estas pruebas se realizan para verificar si el transformador fue diseñado correctamente, obteniendo parámetros iniciales del estado en el que se encuentra y en un futuro pueda servir como referencia.

Las pruebas deben ser realizadas utilizando procesos, equipos e información por medio de los cuales se obtengan resultados confiables acerca de del estado del transformador o de sus partes que lo componen, por ello existen estándares internacionales que indican la metodología con la que se deben realizar cada una de las pruebas.

Existen distintas formas de clasificación de las pruebas a transformadores las cuales, como se dijo, pueden cambiar dependiendo del tipo y de la condición de estos. En la presente sección se abordan las pruebas eléctricas más comunes que se realizan a un transformador, así como las pruebas que se realizan al aceite dieléctrico, que como se sabe es uno de los componentes que revela información acerca del estado del transformador.

2.3.1. Pruebas eléctricas

Las pruebas eléctricas son aquellas que se realizan para verificar que el transformador cumpla con las especificaciones de diseño. Además, también se utilizan para saber si el transformador es apto para el trabajo al cual se va a someter dentro del sistema de potencia. Las pruebas eléctricas se realizan con ayuda de equipos que permiten verificar si existen cortocircuitos entre espiras, detectar la polaridad, desplazamiento angular, etc., como se verán en las distintas pruebas que se presentan en esta sección.

2.3.1.1. Prueba de corriente de excitación

- Objetivo

La prueba de corriente de excitación se realiza para determinar fallas tales como cortocircuito entre espiras, fallas de aislamiento entre laminas del núcleo, apilamiento defectuoso de la lámina del núcleo, sobrecalentamiento, conexiones defectuosas, desplazamiento de devanados, entre otros en general problemas en los devanados y el núcleo del transformador. Para realizar esta prueba se utiliza el equipo de prueba de factor de potencia.

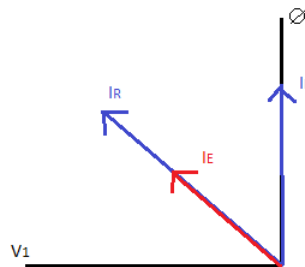
- Concepto/teoría

La corriente de excitación está formada de dos componentes, una en cuadratura y otra en fase. La componente en cuadratura corresponde a la corriente magnetizante del núcleo mientras la componente en fase incluye las pérdidas en el núcleo, cobre y aislamiento, figura 57.

La corriente de excitación es aquella que se obtiene en el devanado primario al aplicar un voltaje, manteniendo el transformador sin carga, es decir, el secundario en circuito abierto. La magnitud de la corriente de excitación en un transformador está dada en función del peso, calidad, estructura y densidad en el núcleo.

La corriente de excitación suele estar entre 4 y 8 % de la corriente nominal. Aquellos valores de corriente mayores al 10 % de la corriente nominal del transformador indican que existen problemas internamente del transformador, tales como cortocircuito entre espiras del devanado, defectos dentro del circuito magnético, fallas en los tornillos de sujeción del núcleo, entre otros.

Figura 57. **Componentes de la corriente de excitación**



Fuente: elaboración propia.

La norma IEEE C57.12.70 menciona que la corriente de excitación es aquella que mantiene la excitación del flujo magnético dentro del núcleo cuando todos los devanados están en circuito abierto, por lo general se expresa en un porcentaje de la corriente nominal.

Además, de ello menciona que la medición de esta corriente se realiza en conjunto con la prueba de pérdidas sin carga o en vacío por lo que la prueba de corriente de excitación se hace conjunto con la prueba antes mencionada.

Omicron dentro de su *manual de pruebas de diagnóstico y monitoreo de transformadores de potencia* menciona que la magnitud de la corriente consumida en el devanado primario es proporcional a la energía requerida para forzar la acción del transformador, es decir inducir una tensión en el devanado secundario.

Se recomienda seleccionar la tensión de prueba más alta dentro de las limitaciones del equipo de prueba y el devanado, para detectar las fallas de cortocircuito entre espiras. Una tensión de prueba estándar es de 10 kV. Uno de los factores que afecta a esta prueba es el magnetismo residual que se da en el

núcleo del transformador. Si se da esto, el transformador debe desmagnetizarse y repetirse la prueba.¹⁹

En los transformadores que han estado en servicio se debe tener cuidado en desmagnetizar el núcleo porque debido a las condiciones de servicio, están sujetos a corrientes de falla que pasan por sus devanados, por lo que el núcleo se magnetiza. El magnetismo residual afecta las lecturas de corriente de excitación lo que implica diagnósticos erróneos.

Antes de realizar la prueba se debe neutralizar el alineamiento magnético del núcleo con la aplicación alternada de un voltaje de corriente directa en polaridad alterna, aplicándolo a la bobina del transformador a intervalos decrecientes.

Este intervalo generalmente se determina cuando la corriente desmagnetizante alcanza un nivel ligeramente menor al anterior, cuando se logra esto, debería de invertirse la polaridad. El proceso se debe realizar hasta que el nivel de corriente es cero. En la norma IEEE Std 62, menciona que esta prueba se realiza comúnmente del lado de alto voltaje con el lado de bajo voltaje en circuito abierto. Las pruebas que se hagan posteriormente se deben realizar al mismo voltaje y las mismas conexiones utilizadas anteriormente. Los resultados de esta prueba se comparan con resultados de pruebas anteriores, o con transformadores similares.

¹⁹ OMICRON. *Pruebas de diagnóstico y monitoreo de transformadores de potencia*. p. 16.

2.3.1.2. Prueba de relación de transformación

- Objetivo

Esta prueba determina la relación entre el número de vueltas del devanado primario y el devanado secundario para determinar si la tensión que se le asigna al primario puede ser convertida a la tensión que se desea en el secundario o bien los resultados se comparan con los datos de la tensión de salida de la placa del transformador.

- Concepto/teoría

En la teoría de transformadores se habla de la relación de transformación, esta se obtiene al dividir el número de vueltas del devanado primario entre el número de vueltas del devanado secundario o bien dividir la tensión de fase del devanado primario entre la tensión de fase del devanado secundario.

$$R_T = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s}$$

La relación de transformación no da resultado del número de vueltas de conductor que hay en cada devanado, simplemente da la relación que existen entre de estos. Una relación de transformación errónea indica que hay una falla en el transformador, pero no indica donde se encuentra como lo hacen otras pruebas.

La norma IEEE C57.12.00 menciona que las relaciones de giro entre los devanados deben ser tales que, con el transformador sin carga y con el voltaje nominal en el devanado con el menor número de vueltas, los voltajes de todos

los demás devanados y todas las conexiones de toma estén dentro del 0,5 % de los voltajes de la placa de identificación. Sin embargo, cuando los voltios por vuelta del devanado exceden el 0,5 % de la placa de identificación, la relación de giros del devanado en todas las conexiones de toma debe ser al giro más cercano. Para los devanados trifásicos conectados en Y, esta tolerancia se aplica a la tensión de fase a neutro. Cuando la tensión de fase a neutro no está marcada explícitamente en la placa de identificación, la tensión de fase a neutro nominal se calculará dividiendo las marcas de tensión de fase a fase por $\sqrt{3}$.

Para esta prueba hay una serie de conjuntos de pruebas disponibles de fabricantes que sirven a la industria de la energía. Estas, cuando se operan de acuerdo con las instrucciones del fabricante, proporcionan lecturas convenientes y precisas de la relación de los transformadores de potencia. Si el transformador tiene tomas de carga, la relación de transformación se debe determinar para todas estas tomas con el cambiador de tomas para el funcionamiento sin energía en una posición específica, como la posición nominal o máxima de las vueltas.

Además, con el cambiador de tomas de carga en la posición neutral, la relación de giros se debe determinar para todas las posiciones del cambiador de tomas para el funcionamiento sin energía. Si un conjunto de prueba comercial no está disponible, entonces la relación de transformación se puede medir e interpretar utilizando los procedimientos aplicados en esta prueba.

2.3.1.3. Prueba de polaridad

- Objetivo

Esta prueba se utiliza para determinar el sentido de arrollamiento de un devanado de un transformador respecto a otro, es decir determinar si los devanados son de polaridad aditiva o polaridad sustractiva.

- Concepto/teoría

Como se vio en la sección 2.1.3 el devanado de un transformador según su arrollamiento puede ser de polaridad aditiva o bien polaridad sustractiva es decir si ambos están arrollados en el mismo sentido o en diferente sentido. La polaridad de un transformador está determinada por las conexiones internas y está indicada por las marcas en la placa del transformador. Conocer la polaridad es importante si el transformador se va a conectar de manera paralela con uno o más transformadores. Los resultados de esta prueba pueden compararse con las especificaciones del fabricante para determinar la veracidad de estas.

La prueba de polaridad junto con la prueba de relación de transformación debe comprobarse antes de energizar un transformador por primera vez o bien antes de volver a energizar un transformado luego de que este ha sido reparado por alguna falla.

Estas pruebas además son de interés debido a su relación con la puesta en paralelo de dos o más transformadores. Además, estas pruebas son de gran utilidad cuando se presentan transformadores cuya placa se ha extraviado y en aquellos casos en los que se tenga una duda respecto al arrollamiento de los devanados. La norma IEEE C57.12.70 menciona que la prueba de polaridad en

transformadores monofásicos se realiza de acuerdo con uno de los siguientes métodos: impulso inductivo, tensión alterna, comparación, ratio bridge.

2.3.1.4. Prueba de resistencia de los devanados

- **Objetivo**

Esta prueba se realiza para determinar conexiones defectuosas que puedan ocasionar falsos contactos, espiras en cortocircuito o defectos de aislamientos. La medición de la resistencia de los devaneos tiene tres propósitos fundamentales los cuales son:

- o Cálculo de las pérdidas de los devanados.
- o Cálculo de temperaturas de los bobinados al final de la prueba de temperatura.
- o Como base para evaluar posibles daños o determinar una posible falla.

- **Concepto/teoría**

La norma IEEE Std. 62, menciona que las resistencias del devanado del transformador se miden en el campo para detectar anomalías debido a conexiones sueltas, hebras rotas y resistencia de alto contacto en los cambiadores.

La interpretación de los resultados generalmente se basa en una comparación de mediciones realizadas por separado en cada fase en el caso de

un devanado conectado en estrella o entre pares de terminales en un devanado conectado en triángulo. La comparación también se puede hacer con los datos originales medidos en la fábrica.

Para esta prueba la tolerancia del 5 % para cualquiera de las comparaciones anteriores generalmente se considera satisfactorio.

La resistencia en frío se determina por medio de la temperatura de los devanados. Esta temperatura es denominada temperatura fría. Para llevar a cabo esta medición se debe tomar en cuenta que las mediciones de resistencia no se realizan en un transformador cuando se encuentra en corrientes de aire o cuando se encuentra en una habitación en la que la temperatura fluctúa rápidamente. Para medir esta temperatura depende si el transformador está sumergido en líquido aislante o no.

Para transformadores sumergidos en líquido aislante se supone que la temperatura de los devanados es la misma que la temperatura media del líquido aislante, siempre que:

- Los bobinados no deben estar sometidos a ninguna corriente en un lapso de 3 h a 8 h (dependiendo del tamaño del transformador) antes de medir la resistencia en frío.
- La temperatura del líquido aislante se ha estabilizado, y la diferencia entre la temperatura superior e inferior no supera los 5 °C.

Para transformadores que no están sumergidos en líquido aislante la temperatura de los bobinados se registrará como el promedio de las mediciones de varios termómetros o termopares insertados entre las bobinas, teniendo

cuidado que sus puntos de medición estén lo más cerca posible en contacto real con los conductores de bobinado.

La norma IEEE Std 62 menciona que en algunos casos es necesario convertir la resistencia a la temperatura a la que se realizaron las mediciones es decir hacer una corrección por temperatura empleando la siguiente fórmula:

$$R_s = R_m \frac{T_s + T_k}{T_m + T_k}$$

Donde:

- R_s : resistencia a la temperatura T_s
- R_m : resistencia a la temperatura T_m
- T_s : temperatura de operación en °C, determinado por: $T_s = \Delta T + 20$ °C
Donde ΔT es la elevación total de temperatura del transformador
- T_m : temperatura a la que se midió la resistencia R_m (°C)
- T_k : es 234.5 °C para cobre o 225 °C par aluminio

La anterior ecuación es también aplicada para determinar la resistencia a la temperatura de operación a plena carga del transformador que se utilizó para llevar a cabo la prueba.

2.3.1.5. Prueba de vacío

- Objetivo

Esta prueba determina las pérdidas que se dan en vacío en un transformador, las cuales están compuestas por las pérdidas de histéresis y las

perdidas por corrientes de Foucault. Estas pérdidas son denominadas como pérdidas en el hierro.

- Concepto/teoría

Como se sabe el núcleo es el encargado de concentrar el flujo magnético el cual enlaza a las bobinas primaria y secundaria.

El núcleo está formado por láminas de acero al silicio de grano orientado, con el fin de reducir la reluctancia sin embargo se presentan algunas pérdidas eléctricas en el núcleo causadas por la energía requerida para orientar los dominios magnéticos del material; esta potencia se denomina pérdida por histéresis.

Por otro lado, las pérdidas por corrientes parásitas o corrientes de Foucault se deben a que el flujo alterno induce en el núcleo una FEM, la que produce que circulen pequeñas corrientes que actúan en la superficie del núcleo ocasionando su calentamiento. Es por lo anterior que la potencia que el transformador absorbe en esta prueba es prácticamente igual a las pérdidas en el hierro. Por ello la prueba de vacío permite determinar las pérdidas en el hierro.

Jesús Fraile Mora en su libro *maquinas eléctricas* menciona que por medio de esta prueba también es posible determinar la relación de transformación, debido a que la tensión aplicada en los terminales coincide con FEM inducida en el primario y la FEM del secundario es igual a la tensión medida en el secundario en vacío.²⁰

²⁰ FRAILE MORA, Jesús. *Maquinas eléctricas*. p. 189.

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

La norma IEEE C57.12.90 menciona que el propósito de la prueba es medir las pérdidas sin carga a un voltaje de excitación y una frecuencia específicos.

2.3.1.6. Prueba de corto circuito

- **Objetivo**

Esta prueba es utilizada para determinar las pérdidas que se dan en el cobre del transformador. También, son denominadas perdidas por el efecto joule. Estas pérdidas coinciden con la potencia consumida por el transformador cuando se realiza la prueba.

- **Concepto/teoría**

Cuando circula corriente en un conductor, debido a las resistencias que presenta este al paso de la corriente se producen perdidas la cuales se manifiestan como calentamiento del conductor. En un transformador su arrollamiento presenta este fenómeno ya que por estos circulan corrientes ocasionándose pérdidas que son iguales al cuadrado de la corriente por la resistencia óhmica del devanado (I^2R).

En esta prueba se desprecian las pérdidas en el hierro debido que la tensión a la que se realiza la prueba es 3-10 % de la tensión asignada. Es por esto que la potencia que el transformador absorbe en la prueba de cortocircuito coincide con las pérdidas en el cobre.

Tabla VI. **Perdidas del transformador en el hierro y el cobre según la potencia del mismo**

Potencia nominal (kVA)	Pérdidas en el hierro (W)	Pérdidas en el cobre (W)	Tensión de cortocircuito % Z
25	195	670	4,5
50	345	810	4,5
75	400	1 080	4,5
100	435	1 850	4,5
125	480	2 350	4,5
160	490	2 600	6,0
200	570	3 400	6,0
250	675	4 230	6,0
315	750	5 250	6,0
400	900	6 200	6,0
500	1 000	8 050	6,0
630	1 250	9 000	6,0
800	1 690	10 800	6,0
1 000	1 800	12 600	6,0
1 250	2 010	16 800	6,0
1 600	2 500	19 000	6,0
2 000	2 750	23 900	7,0
2 500	3 480	29 600	7,15
3 150	3 500	30 500	7,15
4 000	4 300	34 000	7,15
5 000	5 000	39 500	7,15
6 300	6 300	45 000	7,15
8 000	7 000	57 000	8,35
10 000	7 600	68 500	8,35

Fuente: elaboración propia.

En las normas IEEE C57.12.90 y la norma IEEE C57.12.00 se dan todos los requerimientos para esta prueba en la cual se menciona la clasificación de los transformadores para esta prueba, la magnitud de la corriente de cortocircuito, la

duración de la prueba, cálculo de la corriente, algunas condiciones de aplicación que requieren consideración especial y la determinación de la temperatura de los devanados durante la prueba.

En la tabla VI se muestran las pérdidas del transformador según sea su capacidad en KVA.

2.3.1.7. Prueba de sonido audible

- **Objetivo**

Determinar si los niveles de sonidos generados por el transformador cumplen con los niveles establecidos en las especificaciones.

- **Concepto/teoría**

El sonido audible de los transformadores se origina principalmente en el núcleo del transformador y se transmite, ya sea a través del fluido dieléctrico o los soportes estructurales, a la cubierta exterior o a otras superficies sólidas desde las que se irradia como sonido en el aire.

Los espectros de frecuencia del sonido audible consisten principalmente en los armónicos pares de la frecuencia de potencia; por lo tanto, para un sistema de potencia de 60 Hz, el espectro de sonido audible consiste en tonos a 120 Hz, 240 Hz, 360 Hz, 480 Hz, etc. El sonido audible también contiene el ruido emitido por cualquier sistema de enfriamiento mecánico de fluido dieléctrico. El sonido del enfriador mecánico consiste en el ruido del ventilador de banda ancha, más tonos discretos en la frecuencia de paso de las aspas del ventilador y sus armónicos.

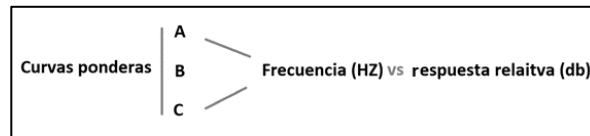
Los procedimientos especificados para medir los niveles de presión acústica del transformador o para calcular los niveles de potencia acústica del transformador deben aplicarse a los transformadores que se están probando en un laboratorio interior o exterior o en una fábrica o a los transformadores que se han instalado en subestaciones, ya sean individuales o combinados, con otros equipos.

El nivel de potencia acústica que emite una fuente sonora determina cuanto ruido produce, mientras que el nivel de presión acústica determina cuanto sonido llega a un determinado punto. Ambos se miden en decibelios.

Las mediciones deben realizarse en un entorno que tenga un nivel de presión acústica (ruido) ambiental al menos 5 dB por debajo del nivel de presión acústica (ruido) combinado del transformador y el nivel de presión acústica ambiental. Cuando las condiciones de sonido ambiental no cumplen, los detalles y los métodos para realizar las mediciones y las correcciones ambientales deben ser acordados por el fabricante y el comprador del transformador.

Las escalas que se utilizan para medir los niveles de presión acústica son denominadas curvas de ponderación clasificadas en curva A, curva B y curva C. Estas indican la sensibilidad del oído en función de la frecuencia, figura 58. Puesto que al realizar el estudio de presión acústica (ruido) existen una amplia gama de frecuencias audibles, no es posible analizar cada frecuencia por lo que estas se dividen en octavas. En los estudios realizados por medio de la prueba de sonido audible en el transformador se necesita mayor precisión por lo que se emplean las denominadas “tercios de octavas”, y la presión acústica se mide en tercios de octava.

Figura 58. **Curvas ponderadas A, B, C.**



Fuente: elaboración propia.

2.3.1.8. **Prueba de factor de potencia a los aislamientos**

- **Objetivo**

La finalidad de esta prueba es comprobar que los niveles de aislamiento del transformador estén en buen estado y que estos no posean humedad o suciedad.

- **Concepto/teoría**

El factor de potencia de aislamiento es la relación entre la potencia disipada en el aislamiento en vatios y el producto de la tensión efectiva y la corriente en voltamperes cuando se prueba bajo una tensión sinusoidal y condiciones prescritas.

$$FP = \frac{W}{VI} = \frac{VI \cos\theta}{VI}$$

Donde:

- **W:** potencia en watts
- **I:** corriente total de fase
- **V:** voltaje de fase

- θ : ángulo entre V y I

El factor de potencia del aislamiento se puede medir mediante un puente de capacitancias, por el método volt-ampere y watt. Esta prueba debe realizarse a la frecuencia de operación nominal y el voltaje aplicado debe ser como mínimo 2,5 KV y no debe exceder los 10 KV. Esta prueba se debe realizar a una temperatura aproximada de 20 °C, en dado caso se realiza a otra temperatura la norma IEEE C57.12.90 menciona la siguiente ecuación para poder corregir la temperatura.

$$FP_{20} = \frac{FP_T}{K}$$

Donde:

- FP_{20} : factor de potencia corregido
- FP_T : factor de potencia medido a una temperatura T
- T: temperatura a la que se realizó la prueba
- K: factor de corrección

Los factores de corrección de temperatura para el factor de potencia de aislamiento dependen de los materiales aislantes y su estructura, contenido de humedad, entre otros, tabla VII.

Nota: los factores de corrección enumerados en la tabla VII se basan en sistemas de aislamiento que utilizan aceite mineral como líquido aislante. Otros líquidos de aislamiento pueden tener diferentes factores de corrección.

Tabla VII. **Factores de corrección de temperatura para factores de potencia de aislamiento**

Temperatura de prueba (°C)	Factor de corrección K
10	0,8
15	0,9
20	1
25	1,12
30	1,25
35	1,4
40	1,55
45	1,75
50	1,95
55	2,18
60	2,42
65	2,7
70	3

Fuente: elaboración propia.

2.3.2. Pruebas al aceite dieléctrico

El aceite dieléctrico juega un papel importante en el transformador. Tiene como finalidad proveer un aislante eléctrico adecuado y a la vez funcionar como refrigerante que disipe el calor generado en el equipo. Como aislante eléctrico debe evitar la fuga de electrones desde los conductores ya que se caracteriza por la escasez de electrones libres en su estructura química.

El aceite aislante también debe proteger a las bobinas y el núcleo de agentes químicos, así como prevenir la formación de lodos dentro del transformador. El aceite utilizado en los transformadores es de tipo mineral el cual está compuesto por hidrocarburos y no-hidrocarburos.

El aceite dieléctrico posee propiedades físicas, química y eléctricas las cuales se enumeran a continuación:

- Propiedades químicas
 - o Hidrocarburos
 - o No-hidrocarburos

- Propiedades físicas
 - o Viscosidad
 - o Gravedad específica
 - o Tensión interfacial
 - o Estabilidad de oxidación

- Propiedades eléctricas
 - o Rigidez dieléctrica
 - o Rigidez de impulso
 - o Permitividad relativa

El aceite de un transformador tiende a degradarse por la presencia de humedad o catalizadores tales como el barniz, pintura, oxígeno. El principal factor

que afecta en el envejecimiento del aceite es la oxidación, esta da lugar a ácidos y formación de otros compuestos. El aceite de transformador, cuando se somete a esfuerzos térmicos y eléctricos en una atmósfera oxidante, va perdiendo su estabilidad y se descompone, se oxida, aumenta su acidez y, finalmente, comienza a producir barro.

La presencia de agentes contaminantes tales como lodos, agua, partículas sólidas, sustancias ácidas, entre otros, y de cualquier otro producto de degradación del aceite de transformadores, se puede determinar estudiando la modificación de una o varias propiedades del aceite, por medio de pruebas que se le realizan a éste, estas pruebas se describen en la presente sección.

2.3.2.1. Rigidez dieléctrica (ASTM D-877, D-1816)

El objetivo de esta prueba es determinar la capacidad del aceite dieléctrico para soportar los esfuerzos eléctricos. El voltaje de ruptura dieléctrica de un líquido es importante como una medida de la capacidad del líquido para soportar la tensión eléctrica sin fallas. Sirve para indicar la presencia de agentes contaminantes, como agua, suciedad, fibras celulósicas húmedas, en concentraciones significativas cuando se encuentran valores de descomposición dieléctricos bajos mediante la prueba.

Sin embargo, un alto voltaje de ruptura dieléctrica no indica la ausencia de todos los contaminantes; puede simplemente indicar que las concentraciones de contaminantes que están presentes en el líquido (entre los electrodos) no son lo suficientemente grandes cuando se analizan con el método descrito en la norma ASTM D-877. Para llevar a cabo la prueba se utiliza un medidor de rigidez dieléctrica que consiste en dos electrodos a los cuales se les aplica un voltaje AC

con una tasa de crecimiento controlada. Los electrodos están inmersos dentro del aceite aislante a estudiar con una separación entre ellos.

Los parámetros para utilizar como lo es la tasa de crecimiento de voltaje y la separación de los electrodos están dados según la norma aplicada para la prueba (ASTM D-877, ASTM D-1816). En la prueba, conforme se varía el voltaje, AC se da la aparición de un arco entre electrodos, este voltaje indica la rigidez dieléctrica del aceite aislante.

2.3.2.2. Tensión interfacial (ASTM D-971 o D-2285)

Esta prueba es un medio para detectar contaminantes solubles y productos de oxidación del aceite.

“La tensión interfacial es la capacidad del aceite de “encapsular” moléculas de agua y sustancias polares. Los materiales que no se mezclan forman una superficie o interfaz cuando se ponen en contacto. Una alta tensión interfacial será capaz de mantener elevada rigidez dieléctrica. A medida que el aceite se envejece y se oxida, los compuestos polares que se forman por la oxidación debilitan la interfaz y reduce la tensión interfacial. El descenso paulatino de la tensión interfacial es señal del envejecimiento del aceite”.²¹

La tensión interfacial se expresa en dinas/cm. Un valor de alrededor de 20 dinas/cm puede indicar que existen contaminantes en el transformador. La determinación de la tensión interfacial se efectúa por dos métodos principalmente el de gota de agua y el del anillo.

²¹ CEVALLOS ALEGA, Juan Pablo. *Diseño de un laboratorio de pruebas para transformadores de distribución para la empresa eléctrica regional del sur S.A.-loja*. p. 24.

El equipo utilizado en algunos casos se denomina tensiómetro easydyne. El método que utiliza el equipo es el método del anillo, el cual está descrito en la norma ASTM D-971 o D-2285.

2.3.2.3. Factor de potencia (ASTM D-924)

Esta prueba se realiza para evaluar la condición del aceite dieléctrico desde el punto de vista dieléctrico o bien si posee contaminación o deterioro. El factor de potencia de aceite es la medición del coseno del ángulo de pérdidas. Mide las pérdidas dieléctricas a través del aceite, lo cual ayuda a evaluarlo de acuerdo a su contaminación o deterioro.

“El factor de potencia del aceite se define como la relación de la potencia disipada en el aceite, en vatios, y el producto del voltaje aplicado y la corriente resultante, el cual está dado en voltamperes, cuando el aceite es probado en condiciones predeterminadas”.²² Cuando un líquido dieléctrico como el aceite del transformador se somete a campos de corriente alterna (CA), se producen pérdidas dieléctricas que causan dos efectos. La corriente resultante se desfasa ligeramente debido al campo de CA aplicado y la energía de las pérdidas se disipa en forma de calor.

De acuerdo con la norma ASTM D-924, el factor de potencia de un aceite nuevo no debe exceder un valor de 0,5 % a 25 °C y 0,3 % a 100 °C. Un factor de potencia alto encontrado en aceites aislantes que están dentro de transformadores sellados, se atribuye a la formación de pequeñas cantidades de compuestos que conducen electrones. Para que el factor de potencia no se eleve

²² NÚÑEZ FORESTIERI, Juan. *Guía para el mantenimiento de transformadores de potencia*. p. 150.

rápidamente cuando un aceite está en operación, este no debe de contener corrosivos.

La prueba de comprobación del factor de potencia del líquido en el aceite del transformador, se realiza, por lo general, a dos temperaturas: 25 °C y 100 °C. La razón es que las dos lecturas debido a que se modifican en el tiempo pueden ser de suma utilidad diagnosticar cuál es la causa de un elevado factor de potencia (humedad, oxidación del aceite o contaminación). Además, el valor a 100°C, en muchas ocasiones, es más sensible a los pequeños cambios que se presenten en las características del aceite.

2.3.2.4. Color (ASTM D-1500)

La prueba de color que se realiza al aceite tiene por objetivo determinar el deterioro y contaminación de este. Esta prueba no se considera muy importante, pero si es de fácil determinación. El color de los aceites se incrementa con el uso, esto debido a la presencia de contaminantes que deterioran su composición. Un oscurecimiento del color es indicativo de contaminación.

La norma que se aplica para el color de un aceite es la ASTM D-1500, esta se aplica a los derivados del petróleo. La norma menciona que el color da una determinación de la calidad del aceite, así como su estado de refinamiento.

Se debe considerar que el color del aceite no determina en su totalidad la calidad del aceite, sin embargo, este puede ser un indicativo para realizar pruebas más detalladas que puedan determinar el estado del aceite y posibles deterioros que causan la contaminación de éste.

Tabla VIII. **Estado del aceite según su color**

Número comparador de color	Color ASTM	Condición del aceite
0,0 - 0,5	Claro	Aceite nuevo
0,5 - 1,0	Amarillo pálido	Buen aceite
1,0 - 2,5	Amarillo	Aceite con tiempo de servicio
2,5 - 4,0	Amarillo brillante	Condiciones marginales
4,0 - 5,5	Ámbar	Mala condición
5,5 - 7,0	Marrón	Condición crítica - necesite regeneración
7,0 - 8,5	Marrón oscuro	Condición extrema - necesita cambio

Fuente: elaboración propia.

Cuando se conoce el rango de color del producto en particular, una variación fuera del rango establecido puede indicar una posible contaminación con otro producto. Sin embargo, el color no siempre es una guía confiable para la calidad del producto y no debe utilizarse de manera indiscriminada en las especificaciones del producto.

El equipo utilizado para llevar a cabo esta prueba se denomina colorímetro, el cual consiste en una fuente de luz, estándares de color de vidrio, caja recipiente de muestra, tapa y pieza de visualización. El color de un aceite aislante es expresado por medio de un número, el cual está basado en la comparación del color de la muestra de aceite con una serie de colores estándar. Los valores con una descripción de colores, se encuentran detallados en la tabla VIII, según la norma ASTM D-1524.

2.3.2.5. Contenido de humedad (ASTM D-1533)

Esta prueba como su nombre lo indica mide la cantidad de humedad que está presente en el aceite dieléctrico, algunos autores lo mencionan también como el contenido de agua que posee el aceite.

La humedad es uno de los factores que más afecta al aislamiento de un transformador, cuando este tiene un crecimiento severo, afecta a la vida útil del aislamiento. Un aumento de la humedad hace que la rigidez dieléctrica del aceite disminuya. Por lo anterior es necesario controlar el contenido de agua presente dentro del aceite del transformador.

La cantidad de agua en un transformador puede estar dada en porcentaje de humedad por peso seco (% M/DW) o en porcentaje de saturación (porcentaje del agua que hay en el aceite en relación con la cantidad de agua que el aceite puede disolver) medido en partes por millón (ppm).

La norma aplicada a esta prueba es la ASTM D-1533, la cual cubre la medición del agua presente en líquidos aislantes. Esta norma se basa en el método de valoración coulométrica de Karl Fischer, este método se usa comúnmente para muestras de ensayo por debajo de 100 % de saturación relativa del agua en aceite. El método de prueba coulométrica es conocida por su alto grado de sensibilidad.

El instrumento que se utiliza para realizar esta prueba adopta el método de control de humedad denominado Karl Fischer. Este método es el más exacto, puede analizar rápidamente el contenido de humedad en el líquido y los resultados son obtenidos inmediatamente. Las pruebas van desde el 0,0001 % (1 ppm) a 100 %.

El método de prueba determina el contenido de humedad del aceite aislante mediante un titulador coulométrico automático Karl Fischer. Se inyecta una muestra de aceite en el dispositivo, el cual añade reactivos de forma automática hasta alcanzar el punto final. Este se determina mediante electrodos que perciben las condiciones eléctricas en el recipiente de reacción. Al alcanzarse el punto final, el dispositivo detiene la dosificación y calcula electrónicamente el contenido de humedad en el aceite a partir del volumen de aceite inyectado y la cantidad de reactivo consumido.

2.3.2.6. Inspección visual (ASTM D-1524)

Esta prueba determina el estado del aceite dieléctrico basado en la presencia de turbulencia o nubosidad, lodo o partículas sólidas.

La apariencia que muestra un aceite está relacionada con el grado de deterioro de este, conforme el paso del tiempo el aceite va envejeciendo, haciendo que en este se presente impurezas, partículas sólidas, lodos, agua, turbulencia, entre otros. Estos surgen debido a la presencia de puntos calientes dentro del transformador o bien por la formación de arcos eléctricos.

Cuando se toma una muestra de aceite, esta se somete a una apreciación visual para comprobar la opacidad, turbidez, partículas en suspensión, sedimentos visibles o lodos, carbón, agua libre o cualquier otra cosa que lo invalide como un aceite claro y homogéneo. Una apariencia clara y brillante describe a un aceite aceptable; además de estar libre de partículas.

La norma utilizada en esta prueba es la ASTM D-1524, esta prueba es aplicable a líquidos eléctricos que se han utilizado en transformadores, interruptores u otros aparatos eléctricos que utilicen líquidos como medio aislante

o enfriamiento o ambos. El estado de la muestra de aceite se estima mediante la observación de nubes, partículas extrañas o materia suspendida en la muestra mediante luz reflejada. Tanto la apariencia como el color de la muestra durante una inspección de campo ayudan a determinar si la muestra se debe enviar o no a un laboratorio para una evaluación completa.

En la norma se describe el método que se debe seguir para realizar la prueba en la cual se utiliza un equipo compuesto por un recipiente de muestra, fuente de luz con un bombillo No. 222 y un paño de enfoque fotográfico.

2.3.2.7. Gravedad específica (ASTM D-1298)

Esta prueba no es esencial, pero es útil para determinar el tipo de aceite o para detectar las modificaciones importantes de su composición.

La gravedad específica también conocida como densidad relativa es la relación del peso de un volumen de una sustancia (aceite dieléctrico), al peso de un volumen igual de agua, ambos a la misma temperatura. La densidad de una sustancia cambia con la temperatura. Durante la operación del transformador el aceite sufre desgaste, así como cambios en su composición química debido a la presencia de agua, sedimentos, entre otros. El medio ambiente también es un factor que afecta la composición de este. Esto hace que la gravedad específica del aceite aislante cambie con el tiempo.

La norma que se aplica para medir la gravedad específica del aceite aislante es la ASTM D-1298, en esta norma se describe el procedimiento que se debe realizar. Los valores son medidos con un hidrómetro ya sea a una temperatura de referencia o a otra temperatura para lo cual es necesario ser corregida a la de

referencia. La norma menciona que la densidad es un indicador de la calidad de la sustancia en medición.

“La gravedad específica provee una manera rápida para detectar la presencia de contaminantes. Para un aceite nuevo la gravedad específica este alrededor de 0,875. Si por alguna razón el dato de la gravedad específica está por arriba de 1, es indicativo que el aceite posee algún contaminante”.²³

El equipo utilizado en esta prueba se denomina hidrómetro. Dentro de la norma ASTM D-128 se describen los hidrómetros recomendados para esta prueba.

El uso de esta prueba es para identificación de la muestra, así como para la corrección de la tensión interfacial. La medición de la gravedad específica puede indicar el estado de contaminación del mismo por alguna sustancia extraña (principalmente agua), y en los casos de climas extremadamente fríos, determinar la posibilidad de encontrar formaciones de hielo flotando sobre la superficie del aceite

2.3.2.8. Número de neutralización o acidez (ASTM D-974)

Esta prueba se realiza al aceite dieléctrico para determinar la cantidad de ácidos presentes generados debido a la degradación del aceite con el tiempo.

La acidez es un fenómeno que se produce a lo largo del tiempo dentro del transformador debido a la degradación, envejecimiento del aislamiento sólido y la oxidación, estos hacen que se produzcan lodos en el interior del transformador,

²³ NÚÑEZ FORESTIERI, Juan. *Guía para el mantenimiento de transformadores de potencia*. p. 155.

estos contienen partículas sólidas polares haciendo que la capacidad dieléctrica del aceite se vea afectada. El contenido de acidez se expresa en miligramos de hidróxido de potasio (KOH).

Esta es la prueba química más importante y conocida. Esta se utiliza para determinar la cantidad de material alcalino necesario para neutralizar los ácidos del aceite. La medida de la acidez indica el nivel de deterioro por oxidación en un aceite. Un aceite nuevo tendrá un valor de 0,009 mgKOH/g de aceite (0,009 mg de hidróxido de potasio por cada gramo de aceite).

“Se ha encontrado que en un transformador la formación del lodo comienza cuando la acidez del aceite esta entre 0,05 y 0,1 mgKOH/gr, mientras que la precipitación del mismo en el interior del transformador ocurre cuando el aceite alcanza valores de acidez por arriba de 0,4 mgKOH/gr”.²⁴

La norma IEEE C57.106 describe las pruebas y mediciones de diagnóstico que se realizan al aceite dieléctrico del transformador. Esta norma proporciona una tabla donde sugiere el valor del número de neutralización para los aceites.

La condición del aceite del transformador con respecto al número de neutralización se divide en tres tipos: bueno, aceptable y malo. Según la norma IEEE C57-152, el límite de aceptación para aceites en servicio es máximo 0,15 mgKOH/g y para aceites nuevos antes de energización es máximo 0,015 mgKOH/g.

²⁴ NÚÑEZ FORESTIERI, Juan. *Guía para el mantenimiento de transformadores de potencia*. p. 146.

2.3.2.9. Contenido inhibidor (ASTM D-2668, D-4768)

Esta prueba se realiza para determinar el contenido de inhibidor en aceite ya sea que este nuevo o usado. Los inhibidores o antioxidantes son compuestos químicos que posee el aceite dieléctrico, estos se encargan de reaccionar de tal manera que disminuyan la velocidad de oxidación del aceite. Sin embargo, si hay corrosivos presentes los inhibidores no pueden evitar que estos disuelvan el cobre que cataliza la per oxidación. Por lo tanto, la sensibilidad de un aceite a la acción de los inhibidores puede considerarse como inversamente proporcional a la cantidad de corrosivos que tiene influencia en el factor de potencia.

Con el paso del tiempo la cantidad de inhibidor que posee el aceite dieléctrico se disminuye haciendo que la oxidación y el deterioro ataquen al aceite, reduciendo su tiempo de vida útil. Cuando un aceite sufre deterioro es posible recuperarlo, pero su contenido de inhibidores se disminuye. En algunos casos se le añaden aditivos que actúan con inhibidores. Un aceite inhibidor se degrada más lentamente que un aceite no inhibido.

Para esta prueba se aplica la norma ASTM D-2668 y la ASTM D-4768, en estas se describen métodos que detectan los componentes DBPC (diter butil paracresol) y CBP (diter butil phenol), utilizados como antioxidantes. El método D-2668 utiliza un espectrómetro infrarrojo para determinar el contenido de inhibidor. La D-4768 utiliza cromatografía de gases.

El equipo utilizado en la norma ASTM D-4768 se denomina FID (detector de Ionización de llama), en este se realiza una cromatografía de gases, aprovechando la parte de hidrocarburo que contiene el inhibidor.

3. APLICACIONES DE CONCEPTOS MEDIANTE EJERCICIOS

La teoría se complementa con ejemplos en los cuales se apliquen los conceptos. Por la anterior en este capítulo se dan esos ejemplos de aplicación de los diferentes conceptos vistos en el capítulo 2.

3.1. Aplicación de conexiones de transformadores

Dentro de las aplicaciones de las conexiones de los transformadores se describen ejercicios para las conexiones las diferentes conexiones vistas, tomando como base los procedimientos descritos en el capítulo anterior.

3.1.1. Formas de conexión de los devanados de un transformador

En los siguientes ejercicios se muestran cómo se realizan las diferentes formas de conexión entre los devanados de un transformador: estrella-estrella, estrella-delta, delta-estrella, delta-delta

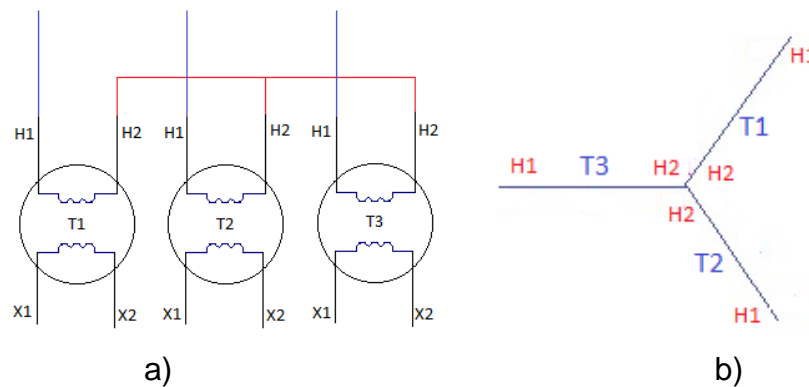
3.1.1.1. Ejercicio conexión estrella

- Ejercicio 1. En una configuración estrella se unen, en un punto en común, una de las terminales del devanado de cada transformador (primarios o secundarios),

En la figura 59(a), se muestra como se realiza una conexión estrella en un arreglo de transformadores trifásicos, en el lado del primario, con los terminales

marcados como H2 (puntos en común). En la figura 59(b) se muestra el esquema equivalente de esta conexión.

Figura 59. **Conexión estrella**



Fuente: elaboración propia.

- Ejercicio 2._Determinar las corrientes de fase y los voltajes de línea para una configuración estrella alimentada por un voltaje de fase de 480 V y corriente de línea igual a 10 A. Aplicando las ecuaciones para una configuración estrella:

Corriente:

$$I_{\text{línea}} = I_{\text{fase}}$$

$$I_{\text{línea}} = 10 \text{ A}$$

$$I_{\text{fase}} = 10 \text{ A}$$

Voltaje:

$$V_{\text{línea}} = \sqrt{3} V_{\text{fase}}$$

$$V_{\text{línea}} = \sqrt{3} (480)$$

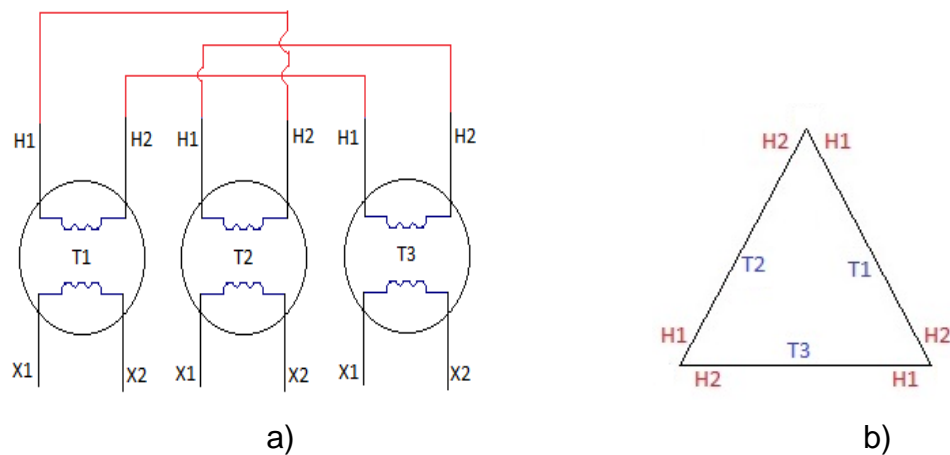
$$V_{\text{línea}} = \sqrt{3} V_{\text{fase}}$$

$$V_{\text{línea}} = 830,4 \text{ V}$$

3.1.1.2. Ejercicio conexión triángulo

- Ejercicio 3. En la figura 60(a), se muestra como se realiza una conexión delta en un arreglo de transformadores trifásicos, en el lado del primario. En la figura 60(b), se muestra el esquema equivalente de esta conexión.

Figura 60. **Conexión delta o triángulo**



Fuente: elaboración propia.

- Ejercicio 4. Determinar las corrientes de línea y los voltajes de fase para una configuración delta alimentada por un voltaje de línea de 13,8 kV y corriente de línea igual a 25 A.

Corriente:

$$I_{\text{línea}} = \sqrt{3} I_{\text{fase}}$$

$$I_{\text{línea}} = \sqrt{3} (25)$$

$$I_{\text{línea}} = 43,25 \text{ A}$$

Voltaje:

$$V_{\text{línea}} = V_{\text{fase}}$$

$$V_{\text{fase}} = 13,8 \text{ kV}$$

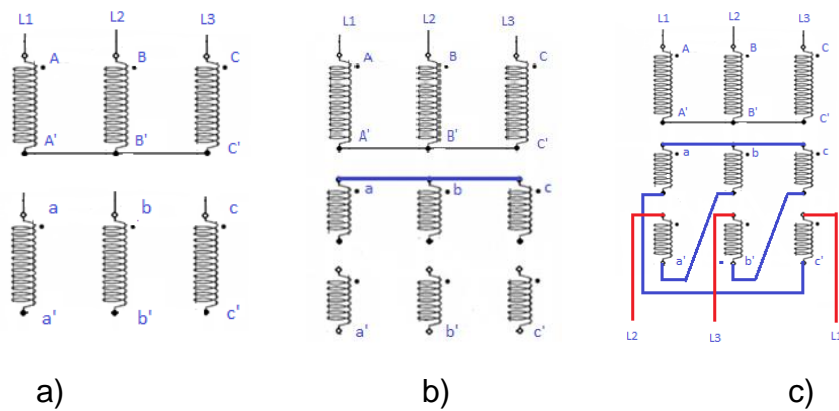
3.1.1.3. Ejercicio otras conexiones

- Ejercicio 5. Realizar una conexión zig-zag en el lado del secundario para un arreglo de transformadores trifásicos, figura 61.

Para realizar una conexión zig-zag se deben dividir las fases en dos partes iguales (semifases), en el lado donde se va a realizar la conexión.

Se toma una semifases de cada fase, formando con estas una estrella de cero grados, representada por las letras a, b, c, de la figura 61(b). Con los secundarios restantes (la otra semifase), se forma una estrella de 180 grados, que no esté cerrada y que las terminales marcadas como a', b', c', sean conectadas en serie con los de la primera estrella, tomando en cuenta que no sean de la misma fase, figura 61(c).

Figura 61. **Conexión zig-zag**



Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Ejercicios aplicados a las polaridades de los transformadores

A continuación, se presentan ejercicios en donde se identifica la polaridad de los transformadores según las características que cada uno de estos debe poseer.

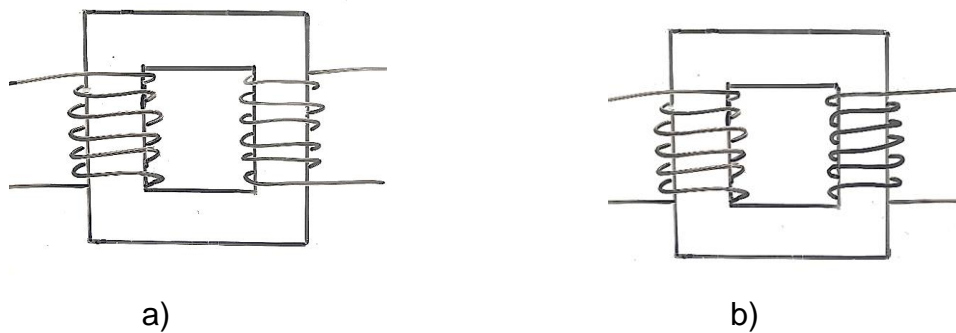
3.1.2.1. Polaridad aditiva

- Ejercicio 6. Para los transformadores de la figura 62 se requiere que posean polaridad aditiva. Identifique estos tomando en cuenta las condiciones que debe cumplir para ser polaridad aditiva, utilice los índices de la norma IEEE C57.12.70.

Para que sea polaridad aditiva deben estar arrollados en el mismo sentido por lo que la figura 62(b) no cumple esta condición. Las figuras 62(a) si cumplen

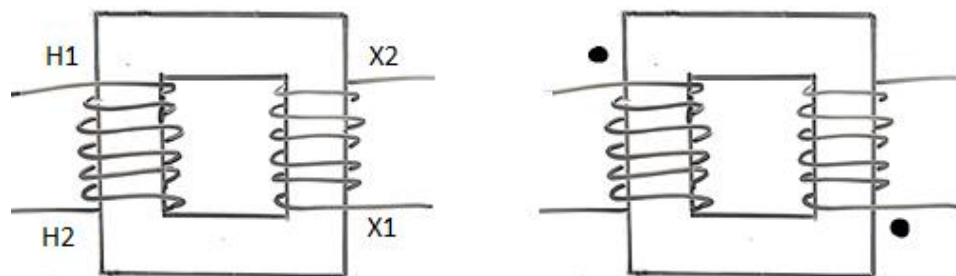
con las condiciones, por lo que queda identificado como se muestra en la figura 63, utilizando marcas según la norma IEEE C57.12.70 y utilizando un punto.

Figura 62. **Identificación de transformadores en forma aditiva**



Fuente: elaboración propia.

Figura 63. **Polaridad aditiva del transformador de la figura 62**



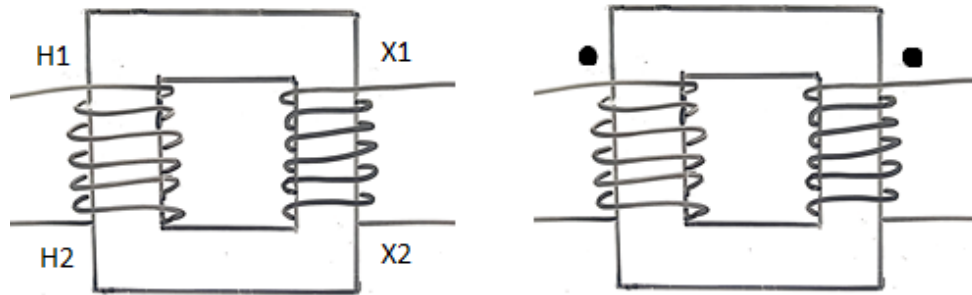
Fuente: elaboración propia.

3.1.2.2. **Polaridad sustractiva**

- Ejercicio 7. Para los transformadores de la figura 62 se requiere que ahora posean polaridad sustractiva. Identifique estos tomando en cuenta las

condiciones que debe cumplir para ser polaridad sustractiva, utilice los índices de la norma IEEE C57.12.70.

Figura 64. **Polaridad sustractiva del transformador de la figura 62**



Fuente: elaboración propia.

Para que sea polaridad sustractiva deben estar arrollados en diferente sentido por lo que la figura 62(a) no cumple esta condición. Las figuras 62(b) si cumplen con las condiciones por lo que quedaría identificado como se muestra en la figura 64.

3.1.2.3. Chequeo de polaridad

- Ejercicio 8. En una fábrica de metales se requiere conectar dos transformadores en paralelo, uno de estos posee polaridad aditiva, en el otro se desconoce la polaridad por lo que se realizó la prueba de polaridad con una fuente de voltaje de 115 V del lado de alta tensión, se obtuvo un voltaje de 92 V en los terminales adyacentes y 23 V en el lado secundario tal como lo muestra la figura 65(a). Identifique la polaridad de este último e indique si es posible conectarlos en paralelo.

Solución:

Como:

$$V = V_1 + V_2$$

$$V = 92 \text{ V} + 23 \text{ V}$$

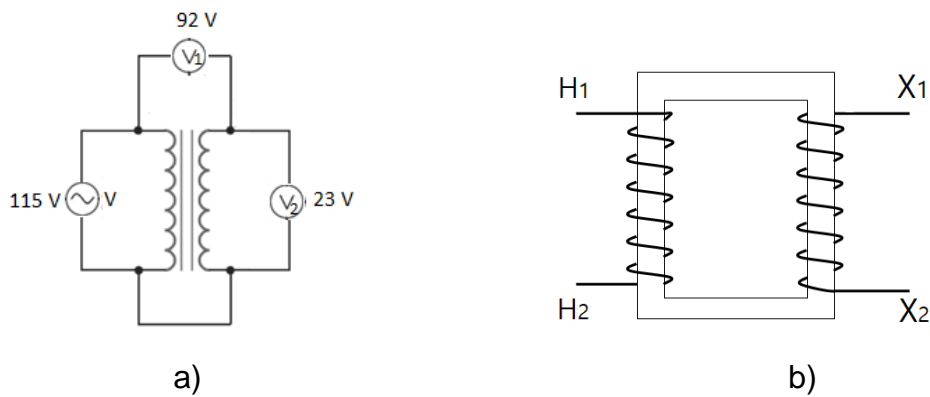
$$V = 115 \text{ V}$$

Y:

$$V_1 < V$$

Con los resultados obtenidos, la polaridad del transformador es sustractiva, figura 65(b), por lo que no es posible conectarlos en paralelo.

Figura 65. **Ejercicio chequeo de polaridad**



Fuente: elaboración propia.

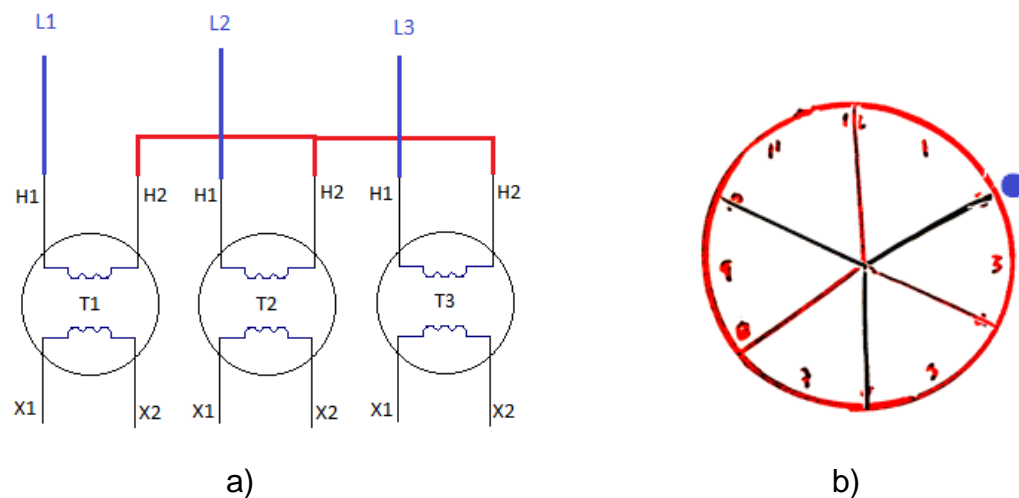
3.1.3. Índice horario

A continuación se describen ejercicios en los que se utiliza el método del reloj para realizar diferentes conexiones.

3.1.3.1. Ejemplificación del método del reloj

- Ejercicio 9. Por medio del método del reloj, realizar la configuración Y-Y₂ con los transformadores en polaridad sustractiva.

Figura 66. **Estrella del lado del primario y su representación en el reloj para una configuración Y-Y₂**



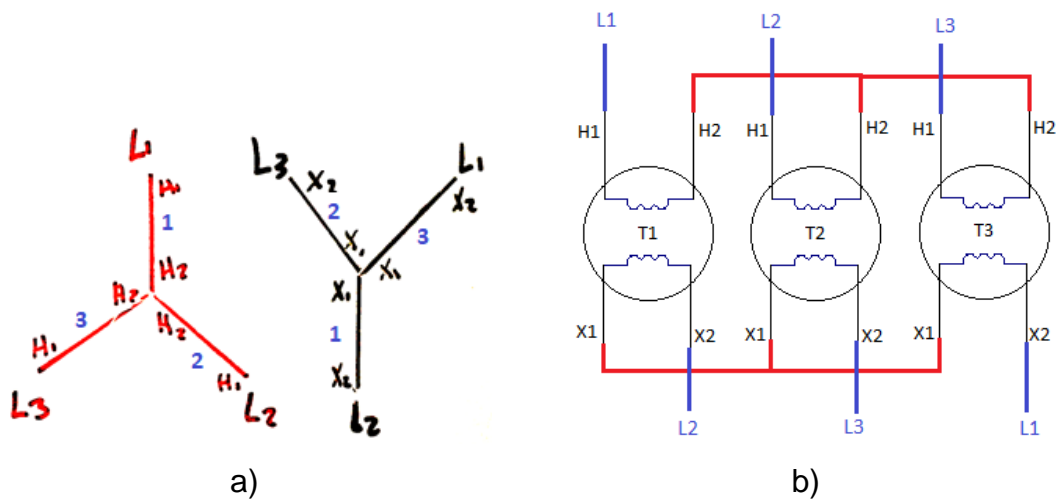
Fuente: elaboración propia.

Solución:

Se forma la estrella del lado del primario identificando las líneas, figura 66(a). Se procede a realizar el reloj con ambas estrellas en su interior, con la estrella del secundario en el número dos del reloj (60°), figura 66(b). Se procede a colocar los subíndices tomando en cuenta las que líneas son paralelas de

ambas estrellas, figura 67(a). Tomando el esquema de la figura 67(a) se realiza la conexión del lado del secundario de la figura 66(a), dando como resultado la configuración requerida Y-Y₂, mostrada en la figura 67(b).

Figura 67. **Resultado de la configuración Y-Y₂**



Fuente: elaboración propia.

3.1.4. Tipos de conexión de los transformadores

A continuación, se presentan ejercicios que demuestran cómo realizar la conexión estrella-estrella utilizando el método del reloj.

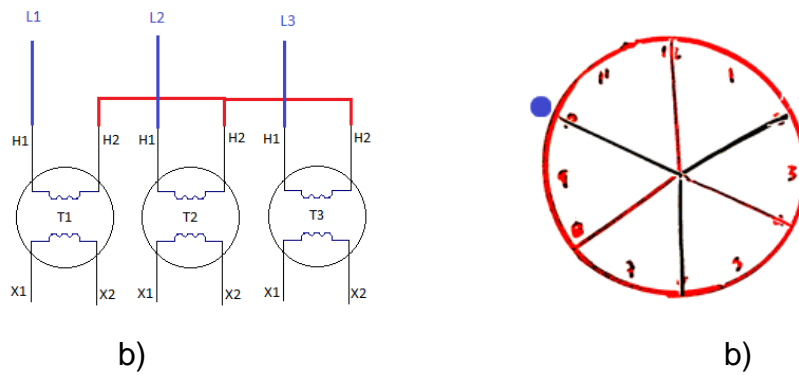
3.1.4.1. Ejercicios conexión estrella-estrella

- Ejercicio 10. Realizar una configuración Y-Y₁₀, con los transformadores en polaridad sustractiva.

Solución:

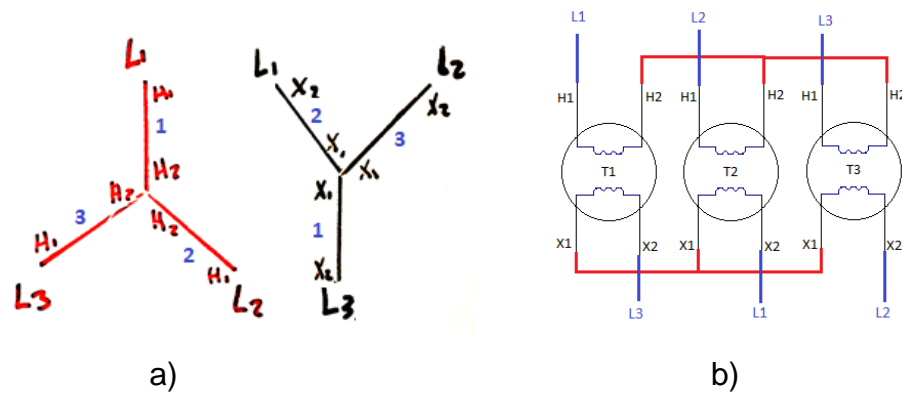
Se forma la estrella del lado del primario identificando las líneas, figura 68(a). Se procede a realizar el reloj con ambas estrellas en su interior, con una de las líneas de la estrella del secundario en el número diez del reloj (300°), figura 68(b).

Figura 68. **Esquema para una configuración Y-Y₁₀ y su representación en el reloj**



Fuente: elaboración propia.

Figura 69. **Resultado de la configuración Y-Y₁₀**



Fuente: elaboración propia.

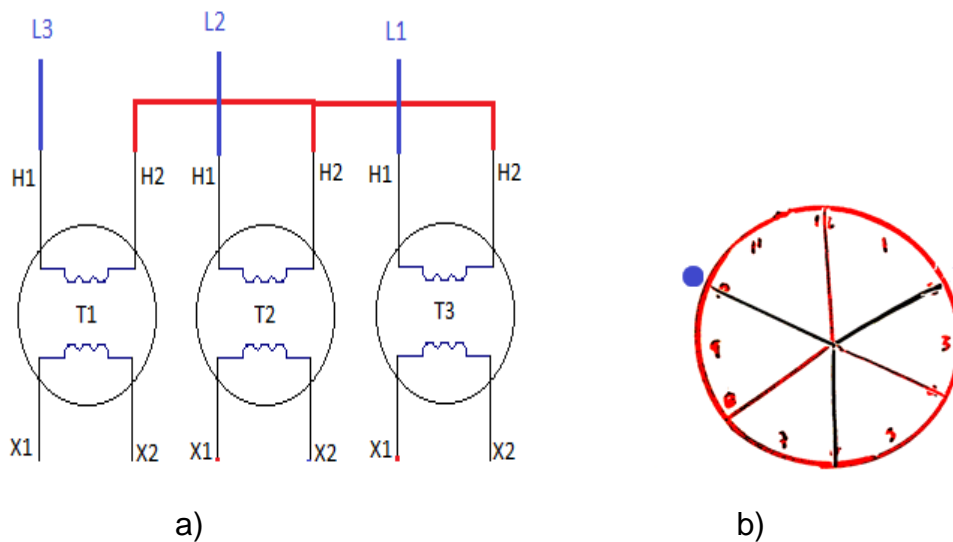
Se colocan los subíndices tomando en cuenta las que líneas son paralelas de ambas estrellas, figura 69(a). Tomando el esquema de la figura 69(a) se realiza la conexión del lado del secundario de la figura 68(a), dando como resultado la configuración requerida Y-Y₁₀, mostrada en la figura 69(b).

- Ejercicio 11. Realizar el ejercicio 1, pero ahora tomar como base la configuración del primario mostrada en la figura 70.

Solución:

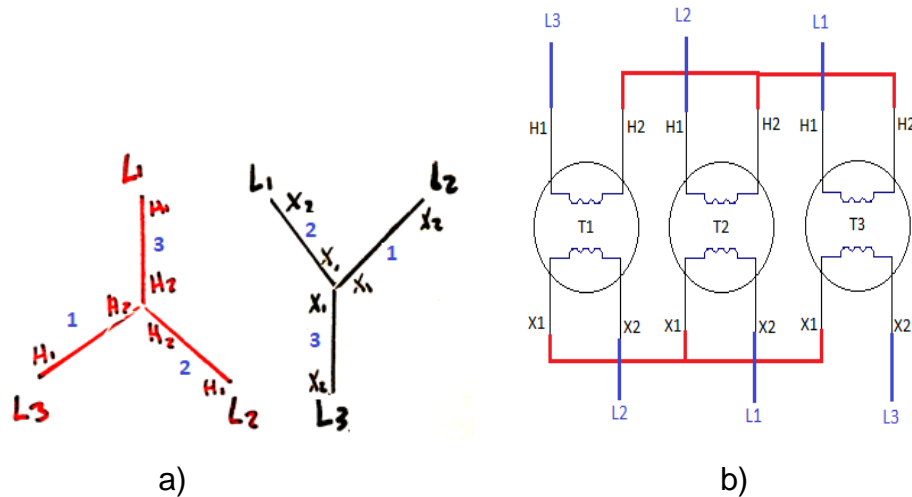
Se dibujan las estrellas dentro del reloj, figura 70(b). Como del lado del primario ya está realizada la conexión, se identifica la figura de la estrella con base en esa configuración, quedando la figura 71(a).

Figura 70. **Configuración Y-Y₁₀ con diferente posición de las líneas del lado del primario y su representación en el reloj**



Fuente: elaboración propia.

Figura 71. **Identificación de las estrellas y resultado de la configuración Y-Y₁₀ del ejercicio 2**



Fuente: elaboración propia.

Con las estrellas identificadas con los subíndices, figura 71(a), se procede a realizar la conexión del lado del secundario de los transformadores; se obtiene como resultado la configuración Y-Y₁₀, figura 71(b).

Nótese la diferencia entre la conexión del ejercicio 1 y el ejercicio 2, ambos representan una configuración Y-Y₁₀. La diferencia está en la posición de las líneas del lado del primario. Se concluye que una configuración se puede obtener de diferentes formas, tomando en cuenta la configuración (que terminales forman la estrella) y la asignación de las líneas en los devanados primarios.

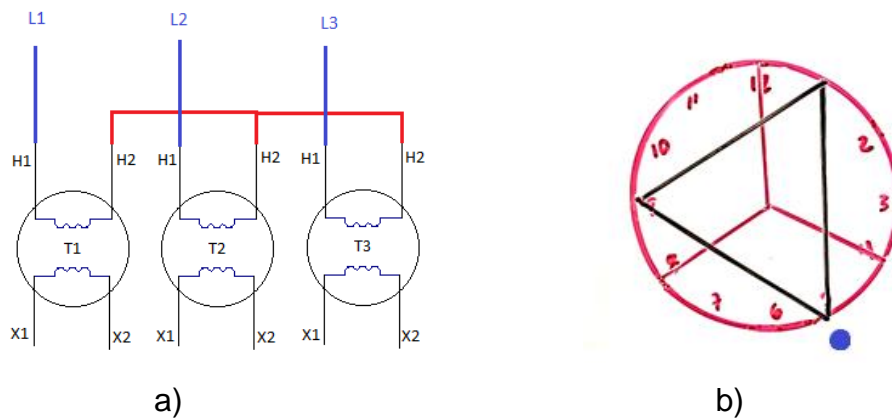
3.1.4.2. Ejercicios conexión estrella-delta

- Ejercicio 12. Realizar una configuración Y- Δ_5 , con los transformadores en polaridad sustractiva.

Solución:

Se realiza la conexión estrella del lado del primario asignando en que terminales van las líneas, figura 72(a). Se realiza el reloj y se dibujan dentro de este las figuras estrella y delta, tomando en cuenta que uno de los vértices de la delta quede en el número 5 (150°), figura 72(b).

Figura 72. **Esquema para una configuración Y- Δ_5 y su representación en el reloj**



Fuente: elaboración propia.

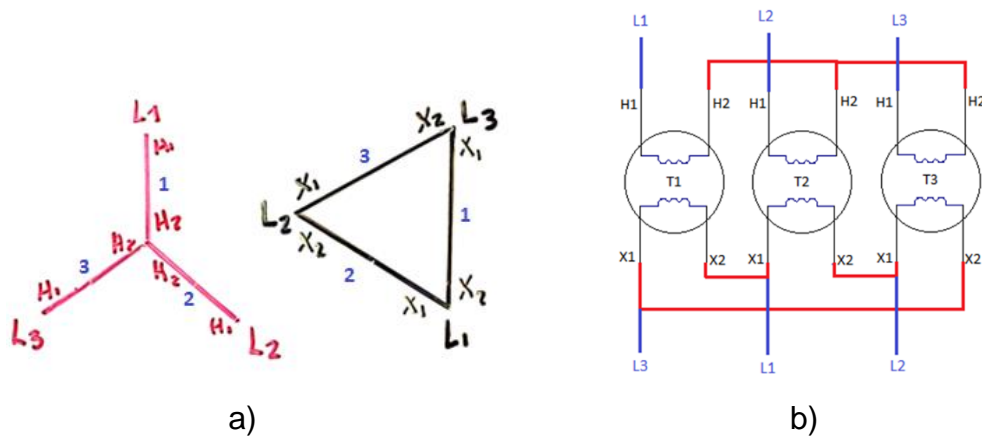
Se identifica la delta con los respectivos subíndices, tomando en cuenta el paralelo de las líneas entre la estrella y la delta. La línea L1, en el secundario, sale en el vértice marcado con un punto el cual pertenece la configuración requerida, figura 73(a).

Con base en la figura 73(a), se realizan las conexiones en los transformadores del lado del secundario, identificando las terminales y las líneas de salida. En la figura 73(b) se representa la conexión finalizada correspondiente

a $Y-\Delta_5$. Esta misma configuración es posible obtenerla de diferentes formas, dependiendo de la configuración de la estrella y posición de las líneas en el primario.

Figura 73. **Identificación de las delta y resultado de la configuración**

$Y-\Delta_5$



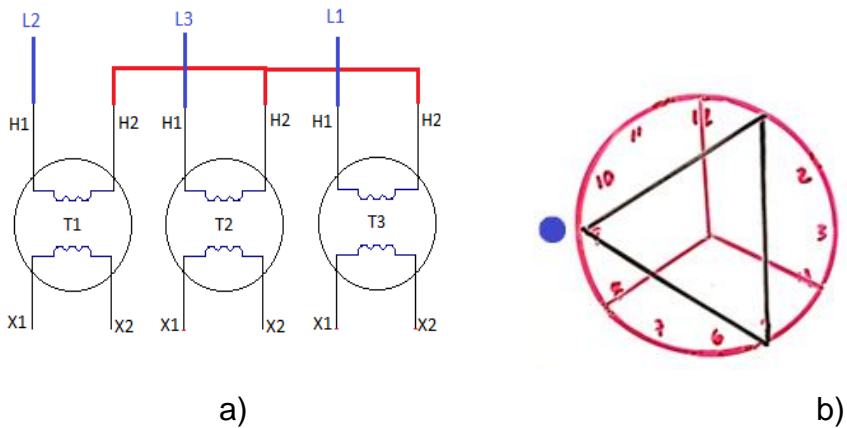
Fuente: elaboración propia.

- Ejercicio 13. Realizar una configuración $Y-\Delta_9$, con los transformadores en polaridad sustractiva y tomando como base la configuración del lado del primario como se muestran en la figura 74(a).

Solución:

Debido a que ya se tiene formada la estrella, se realiza el reloj y se dibujan dentro de este las figuras estrella y delta, tomando en cuenta que uno de los vértices de la delta quede en el número 9 (270°), figura 74(b). Seguidamente, se identifica la delta con los respectivos subíndices, tomando en cuenta el paralelo de las líneas entre la estrella y la delta, figura 75(a).

Figura 74. **Esquema para una configuración Y- Δ_9 y su representación en el reloj**



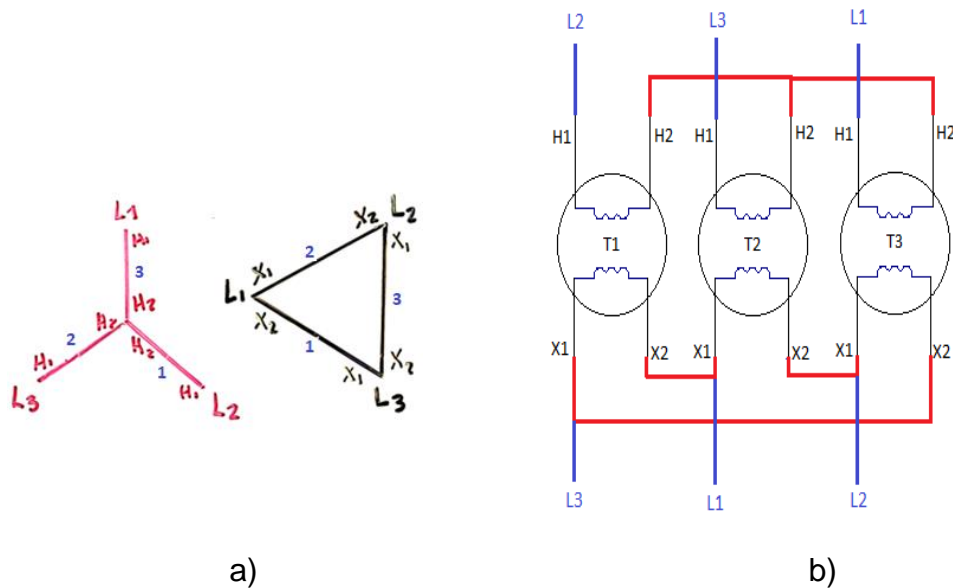
Fuente: elaboración propia.

La línea L1, en el secundario, sale en el vértice marcado con un punto, el cual pertenece la configuración requerida, figura 74(a).

Con base en la figura 75(a), se realizan las conexiones en los transformadores del lado del secundario, identificando las terminales y las líneas de salida. En la figura 75(b) se representa la conexión finalizada correspondiente a Y- Δ_9 . Esta misma configuración es posible obtenerla de diferentes formas, dependiendo de la configuración de la estrella y posición de las líneas en el primario.

Nótese algo interesante entre la configuración obtenida en el ejercicio 1 y la del ejercicio 2, en el secundario de ambas configuraciones, las líneas de salida tienen la misma configuración. Esto indica que, si se mueven de posición las líneas de entrada en la estrella, es posible obtener una configuración diferente, como sucedió en el ejercicio 2.

Figura 75. **Identificación de las delta y resultado de la configuración Y- Δ_9**



Fuente: elaboración propia.

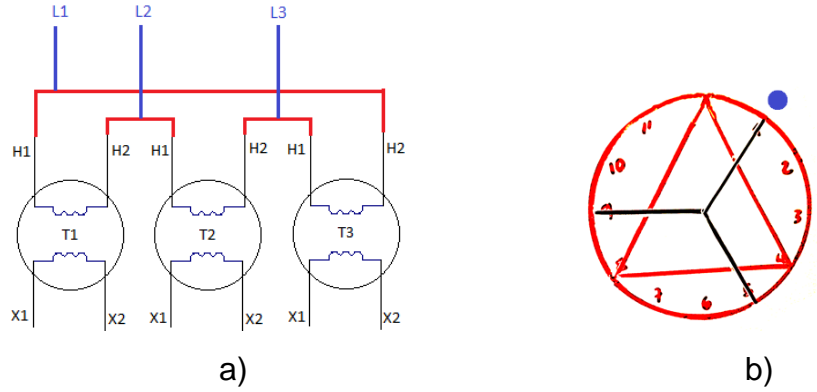
3.1.4.3. Ejercicios conexión delta-estrella

- Ejercicio 14. Realizar una configuración Δ -Y₁, con los transformadores en polaridad sustractiva.

Solución:

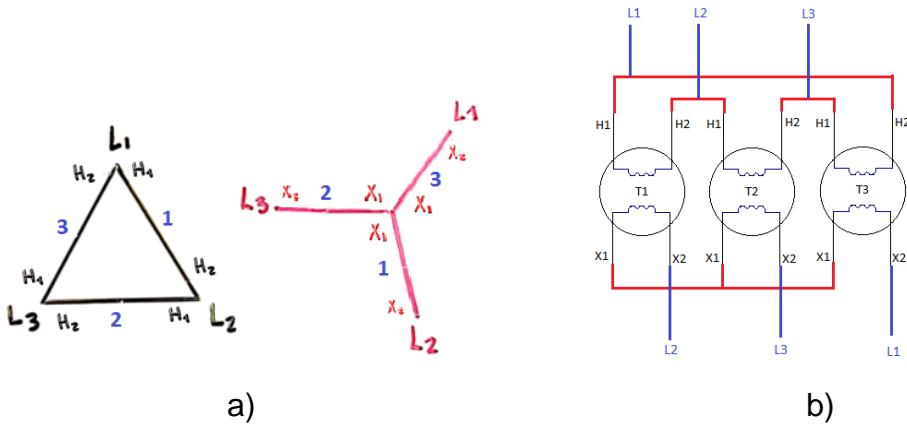
Se realiza la conexión delta del lado del primario, asignando las líneas en las terminales correspondientes, figura 76(a). Se realiza el reloj y se dibujan dentro de este la delta y la estrella. Una de las líneas de la estrella debe quedar indicando el número uno (30°), este corresponde a la configuración deseada, figura 76(b).

Figura 76. **Esquema para una configuración $\Delta-Y_1$ y su representación en el reloj**



Fuente: elaboración propia.

Figura 77. **Identificación de la estrella y resultado de la configuración $\Delta-Y_1$**



Fuente: elaboración propia.

Seguidamente, se identifican las figuras estrella y delta con los respectivos subíndices, tomando en cuenta que para identificar la delta se usa el lado del

primario de la figura 76(a) y para identificar la estrella se toma en cuenta el paralelo de las líneas entre la delta y la estrella. La línea L1 sale por el número del subíndice de la configuración, en este caso el uno, el resultado se muestra en la figura 77(a).

Con base en la figura 77(a), se procede a realizar la conexión estrella del lado del secundario, identificando las terminales de salida de las líneas, figura 77(b).

- Ejercicio 15. Realizar una configuración Δ -Y₉, con los transformadores en polaridad sustractiva y tomando como base la configuración del lado del primario como se muestra en la figura 78(a).

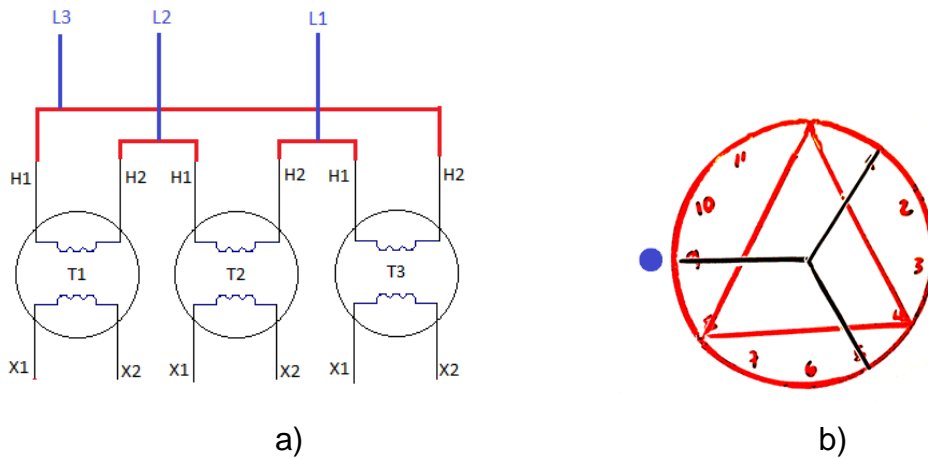
Solución:

Debido a que ya está dada la configuración del primario, se realiza el reloj y se dibujan dentro de este la delta y la estrella. Una de las líneas de la estrella debe quedar indicando el número nueve (270°), este corresponde a la configuración deseada, figura 78(b).

Seguidamente, se identifican las figuras estrella y delta con los respectivos subíndices, tomando en cuenta que para identificar la estrella se toma el paralelo de las líneas entre la delta y la estrella. La línea L1 sale por el número del subíndice de la configuración, en este caso el nueve, el resultado se muestra en la figura 79(a).

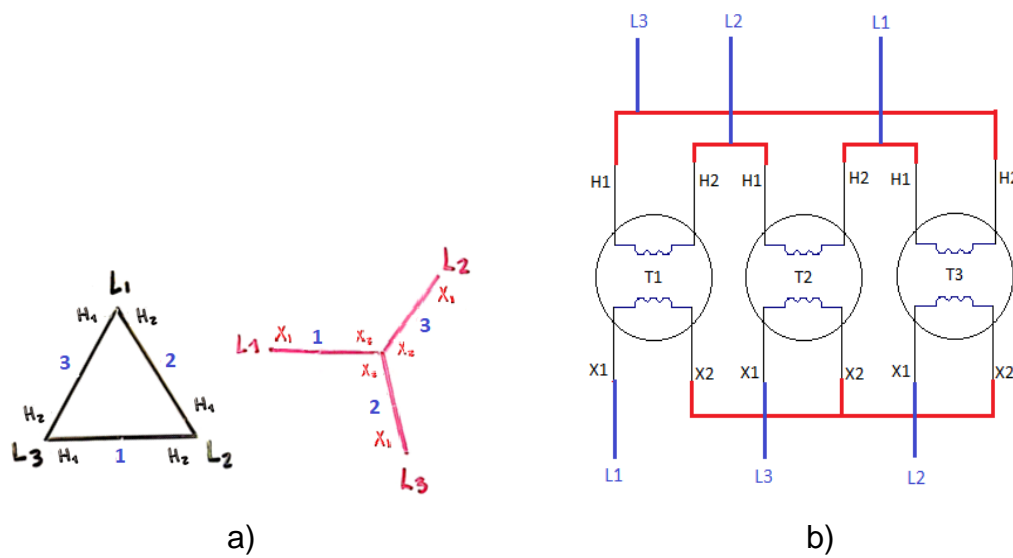
Con base en la figura 79(a), se procede a realizar la conexión estrella del lado del secundario, identificando las terminales de salida de las líneas. El resultado de la conexión Δ -Y₉ se muestra en la figura 79(b).

Figura 78. Esquema para una configuración Δ - Y_9 y su representación en el reloj



Fuente: elaboración propia.

Figura 79. Identificación de la estrella y resultado de la configuración Δ - Y_9



Fuente: elaboración propia.

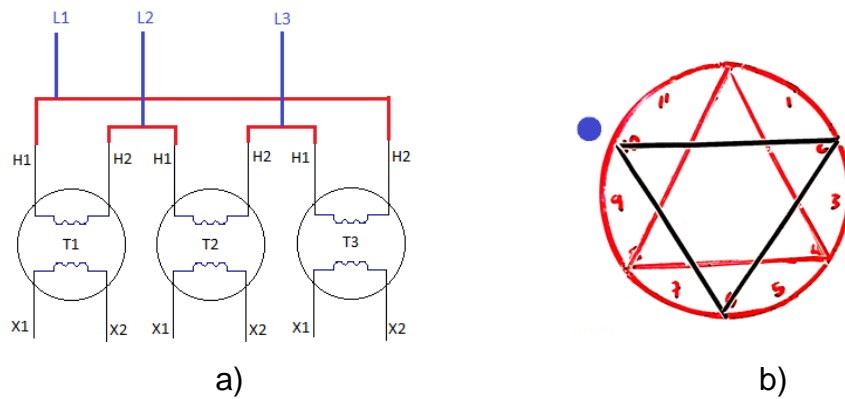
3.1.4.4. Ejercicios conexión delta-delta

- Ejercicio 16. Realizar una configuración $\Delta\text{-}\Delta_{10}$, con los transformadores en polaridad sustractiva.

Solución:

Se realiza la conexión delta del lado del primario, asignando las líneas en las terminales correspondientes, figura 80(a). Se realiza el reloj y se dibujan dentro de este, ambas deltas. Una de las líneas de la delta secundaria debe quedar indicando el número diez (300°), indicado con un punto el cual corresponde a la configuración deseada, figura 80(b).

Figura 80. Esquema para una configuración $\Delta\text{-}\Delta_{10}$ y su representación en el reloj



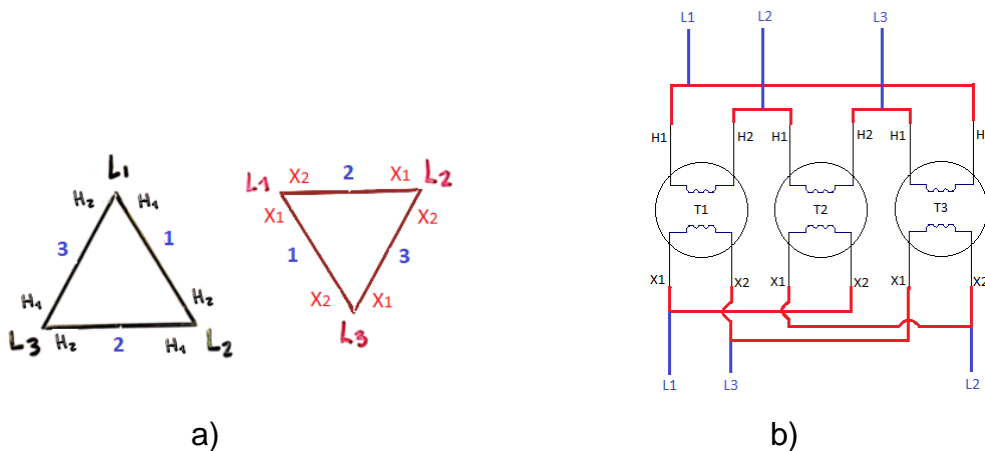
Fuente: elaboración propia.

Seguidamente, se identifican ambas deltas con los respectivos subíndices, tomando en cuenta que para identificar la delta secundaria se toma el paralelo de las líneas entre la delta primaria y la delta secundaria. La línea L1 sale por el

número del subíndice de la configuración, en este caso el diez (en el reloj), el resultado se muestra en la figura 81(a).

Con base en la figura 81(a), se procede a realizar la conexión delta del lado del secundario, identificando las terminales de salida de las líneas. El resultado de la conexión Δ - Δ_{10} se muestra en la figura 81(b).

Figura 81. **Identificación de las deltas y resultado de la configuración Δ - Δ_{10}**



Fuente: elaboración propia.

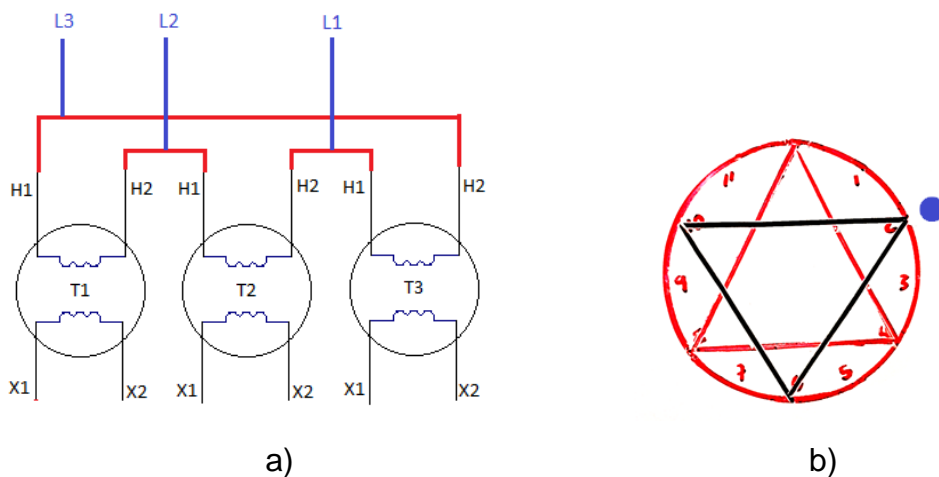
- Ejercicio 17. Realizar una configuración Δ - Δ_2 , con los transformadores en polaridad sustractiva y tomando como base la configuración del lado del primario que se muestra en la figura 82(a).

Solución:

Debido a que ya está dada la configuración del primario, se realiza el reloj y se dibujan dentro de este, ambas deltas (primaria y secundaria). Una de las

líneas de la delta secundaria debe quedar indicando el número dos (60°), este corresponde a la configuración deseada, figura 82(b).

Figura 82. **Esquema para una configuración $\Delta\text{-}\Delta_2$ y su representación en el reloj**



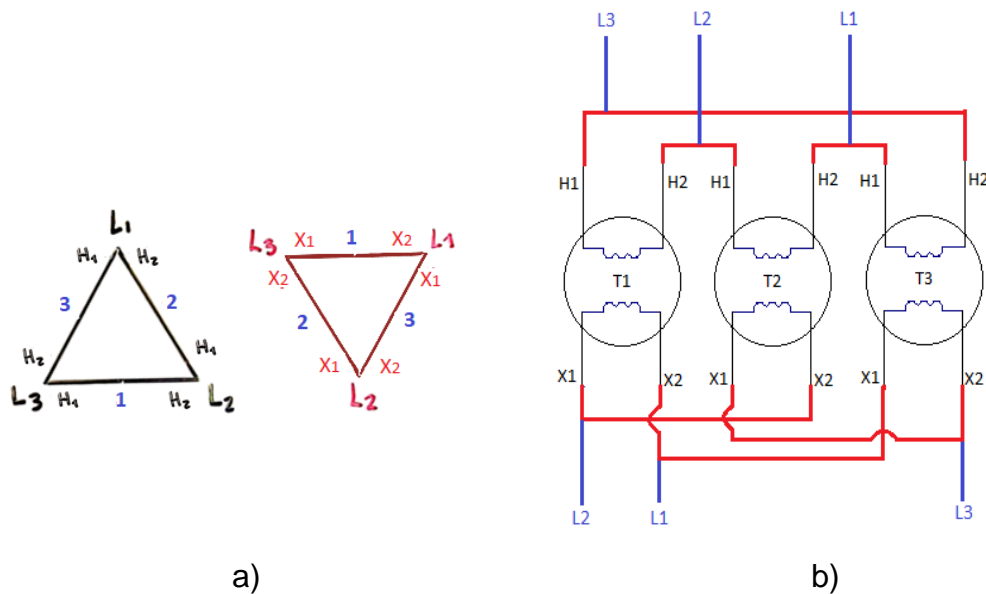
Fuente: elaboración propia.

Seguidamente, se identifican ambas deltas con los respectivos subíndices, tomando en cuenta que para identificar la delta secundaria se toma el paralelo de las líneas entre la delta primaria y la delta secundaria. La línea L1 sale por el número del subíndice de la configuración; en este caso, el dos (en el reloj); el resultado se muestra en la figura 83(a). Con base en la figura 83(a), se procede a realizar la conexión estrella del lado del secundario, identificando las terminales de salida de las líneas. El resultado de la conexión $\Delta\text{-}Y_9$ se muestra en la figura 83(b).

Nótese que la figura 81(b) del ejercicio 1 y la figura 83(b) del ejercicio 2, ambas en el secundario poseen la misma configuración y las líneas salen por el

mismo punto. Esto indica que, cambiando el orden de las líneas en el primario, altera la configuración de los transformadores. En este caso se cambió de posición la línea L1 y L2 de la figura 80(a) y se colocaron como se muestra en la figura 82(a).

Figura 83. **Identificación de las delta y resultado de la configuración Δ - Y_9**



Fuente: elaboración propia.

3.1.4.5. Ejercicios conexiones de finalizada especial

A continuación, se presentan ejercicios de la conexión Scott.

- Ejercicio 18. Determine los voltajes de línea y voltajes de fase para el lado trifásico en una conexión Scott y represente los voltajes de línea por medio de un diagrama vectorial.

Solución:

La figura 84(a) representa una conexión Scott en el que el transformador representado como M posee dos devanados, en uno de sus devanados se encuentra la toma central. El transformador T posee un solo devanado de cada lado.

De la figura 84(a) se observa que las tensiones entre línea y línea quedan de la siguiente manera:

$$V_{AB} = V_{AO} + V_{OB}$$

$$V_{BC} = V_{BO} + V_{OC}$$

$$V_{CA} = V_{CO} + V_{OA}$$

Si estas tensiones se representan por medio de vectores en un diagrama, quedan como se indica en la figura 84(b). El diagrama vectorial puede dibujarse como un triángulo equilátero, figura 84(b); en este se observa que V_{AO} está en fase con la tensión entre la fase A y el neutro de un sistema simétrico de tensiones en estrella; por lo tanto, se obtiene un neutro trifásico simétrico en el devanado trifásico del transformador T se localiza un punto N de toma tal que las tensiones de fase (V_{AN}, V_{BN}, V_{CN}) sean iguales. Las tensiones de fase quedan de la siguiente manera:

Del triángulo de la figura 84(b) se obtiene:

$$\frac{V_{AO}}{V_{AB}} = \text{Sen } 60^\circ$$

La anterior ecuación se puede representar como:

$$V_{AO} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{\text{línea}}$$

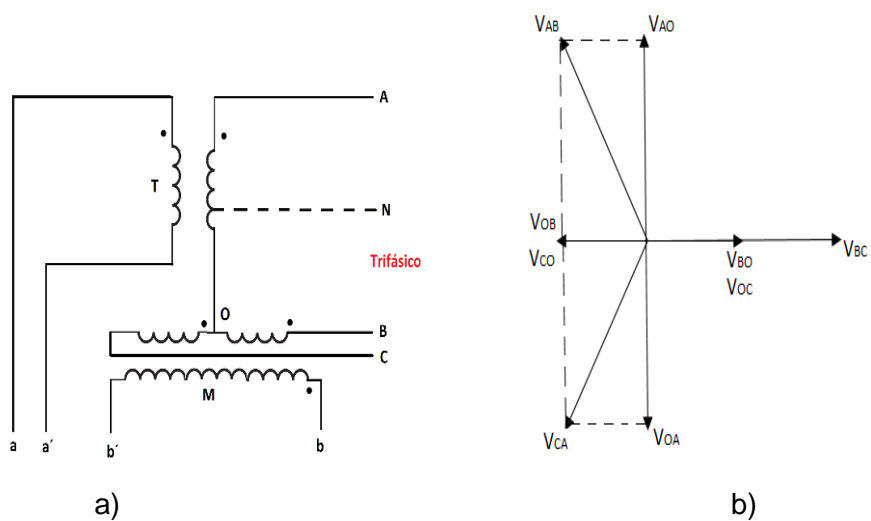
Para un sistema trifásico el voltaje de línea es $\sqrt{3}$ el voltaje de fase, entonces las tensiones de fase quedan como:

$$V_{AN} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{\text{línea}}$$

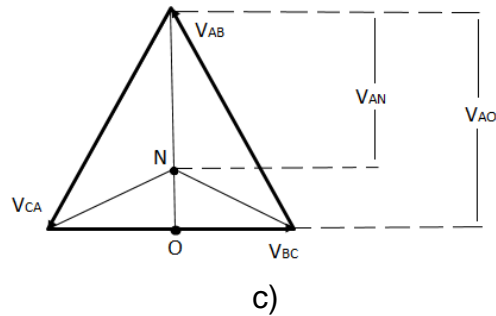
$$V_{BN} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{\text{línea}}$$

$$V_{CN} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{\text{línea}}$$

Figura 84. **Conexión Scott y diagrama vectorial de las tensiones de línea trifásicas**



Continuación de la figura 84.



Fuente: elaboración propia.

- Ejercicio 19. Del anterior ejercicio, demuestre por qué la toma del transformador T del lado trifásico es el 86,6 %.

Solución:

De la siguiente ecuación:

$$\frac{V_{AO}}{V_{AB}} = \text{Sen } 60^\circ$$

esta equivale a:

$$\frac{V_{AO}}{V_{AB}} = \text{Sen } 60^\circ = 0,866$$

Por lo tanto, el transformador T opera al 86,6 % de la tensión trifásica línea a línea. De lo anterior se dice que, si los transformadores T y M tiene igual número de espiras en sus devanados bifásicos, el número de espiras del devanado trifásico AO deberá ser igual al producto del 0,8666 por el número de espiras del devanado completo BC del transformador M.

3.1.5. Análisis comparativo entre las conexiones

A continuación, se presentan ejercicios en los que se exponen diferentes situaciones las cuales deben ser analizadas y determinar qué tipo de conexión es la más idónea en cada caso.

3.1.5.1. Ejercicios de aplicación de las ventajas y desventajas entre los tipos de conexión de los transformadores

- Ejercicio 20. En una fábrica de plásticos se desea habilitar 2 nuevas líneas de producción por lo que ingeniero de mantenimientos solicitó un nuevo servicio de energía eléctrica. Qué tipo de conexión deberían tener los transformadores que se utilizará para alimentar estas 2 nuevas líneas, tomando en cuenta que la mayor parte de carga es trifásica y algunos aparatos son monofásicos, justifique su respuesta.

Respuesta:

La conexión que es más conveniente utilizar es delta-estrella. Esta debido a que puede alimentar las cargas trifásicas y además de ello puede alimentar cargas desequilibradas. Los desequilibrios se pueden dar por las cargas monofásicas de la instalación. Además, mitiga los armónicos generados por las cargas y provee de un neutro del lado del secundario.

- Ejercicio 21. En el departamento de Huehuetenango se habilitará una nueva planta de generación a gas. Qué tipo de conexión deben tener los transformadores de la subestación elevadora para conectarse a la red, justifique su respuesta.

Respuesta:

La conexión que es más conveniente utilizar es delta-estrella. Esta es la más comúnmente utilizada para elevar voltajes debido a que el secundario solamente debe estar aislado para el voltaje de fase y no el de línea por lo que el aislamiento disminuye.

- Ejercicio 22. En una instalación eléctrica se tiene que los transformadores que alimentan la carga se encuentran demasiado lejos, debido a esto hay significativa caída de tensión por lo que es necesario colocar un banco de transformadores cerca de la carga para recuperar de alguna manera esas pérdidas, que conexión sugiere que deberían tener este banco de transformadores.

Respuesta:

La conexión que debería tener sería delta-delta, debido a que esta conexión a realizar es simplemente para mitigar la caída de tensión además de esto no presenta desfase entre las tensiones primarias y secundarias y mitiga los posibles armónicos existentes.

- Aplicación conexión estrella-estrella
 - o Alimentación de cargas trifásicas balanceadas relativamente pequeñas. Para distribución, si es del tipo columnas, ya que el tipo acorazado introduce distorsión debido al contenido de armónicas.
- Aplicación conexión delta-estrella

- o Es comúnmente usada para transformadores reductores para alimentar sistema de 4 hilos, además, es utilizada en transformadores elevadores.
 - o Al aterrizar el neutro del secundario, esta conexión proporciona aislamientos para la corriente de tierra de secuencia cero, la cual permite controlar el circuito de secuencia cero desde el secundario, siendo totalmente independiente del primario.
- Aplicación conexión estrella-delta
 - o Grandes transformadores reductores de un sistema de alto voltaje.
- Aplicación conexión zig-zag
 - o Se utiliza cuando se desea tener un punto de tierra donde no hay ningún transformador que pueda ser aterrizado.

3.2. Autotransformadores

Los autotransformadores son utilizados al igual que en los transformadores dentro de los sistemas de potencia, estos poseen características diferentes como se vio en el capítulo previo. A continuación, se presentan ejercicios donde se ejemplifican diferentes aspectos.

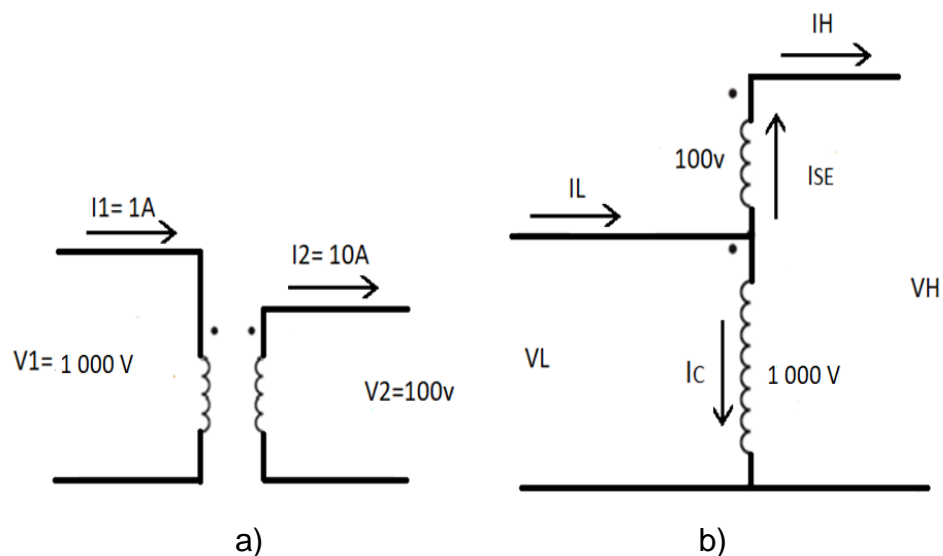
3.2.1. Aspectos constructivos

Los autotransformadores dependiendo si es elevador o reductor poseen diferentes características y determinación de sus parámetros.

3.2.1.1. Ejercicio de autotransformador elevador

- Ejercicio 23. El transformador de la figura 85(a) se conecta como autotransformador elevador con polaridad aditiva, figura 85(b), para este determine a) los voltajes de devanado común, serie y el voltaje del lado del secundario del autotransformador, b) la relación de transformación, c) las corrientes que circulan en el autotransformador.

Figura 85. Transformador conectado como autotransformador elevador



Fuente: elaboración propia.

Solución:

Para determinar el voltaje del devanado común, véase la figura 85(b), en esta observe que el voltaje V_L es igual al voltaje del devanado común, este a su vez es igual al voltaje V_1 del transformador, por lo que el valor del voltaje del devanado común es: $V_L = V_C = V_1 = 1\,000\text{ V}$

El voltaje del devanado serie es igual al voltaje del devanado secundario como transformador por lo que $V_{SE} = V_2 = 100 \text{ V}$. Y finalmente el voltaje del secundario del autotransformador V_H es igual a la suma del voltaje serie más el devanado común: $V_H = V_C + V_{SE} = 1000 \text{ V} + 100 \text{ V} = 1100 \text{ V}$.

La relación de transformación quedaría de la siguiente forma:

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

$$m = \frac{V_L}{V_H} = \frac{1000}{1100} = \frac{10}{11} = 0,9$$

Las conexiones entre los dos devanados del transformador producen una corriente I_L en el autotransformador de un valor igual a $I_L = I_C + I_{SE}$.

$I_L = 1 \text{ A} + 10 \text{ A} = 11 \text{ A}$. Para la corriente I_H es igual a la corriente del devanado serie que esta a su vez es igual a la corriente I_2 del transformador por lo tanto $I_H = 10 \text{ A}$

3.2.1.2. Ejercicio de autotransformador reductor

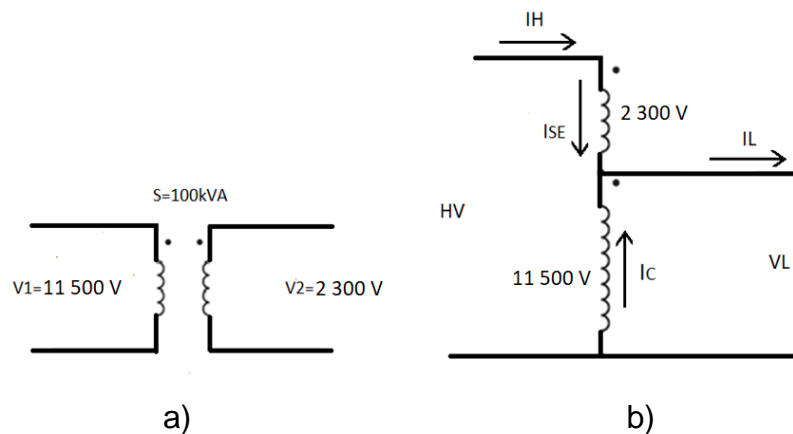
- Ejercicio 24. Considere un transformador que tiene valores nominales de 100 kVA, 1 500 V: 2 300 V, figura 86(a), este se conecta para formar un autotransformador reductor, figura 86(b), para el autotransformador determine a) los voltajes del lado primario y secundario del autotransformador, b) las corrientes que circulan en el autotransformador.

Solución:

Para determinar el voltaje del devanado común, véase la figura 86(b), en esta observe que el voltaje V_L es igual al voltaje del devanado común, este a su vez es igual al voltaje V_1 del transformador, por lo que el valor del voltaje del devanado común es: $V_L = V_C = V_1 = 11\,500\text{ V}$.

El voltaje del devanado serie es igual al voltaje del devanado secundario como transformador por lo que $V_{SE} = V_2 = 2\,300\text{ V}$. Y finalmente el voltaje del secundario del autotransformador V_H es igual a la suma del voltaje serie más el devanado común: $V_H = V_C + V_{SE} = 11\,500\text{ V} + 2\,300\text{ V} = 13\,800\text{ V}$.

Figura 86. **Transformador conectado como autotransformador reductor**



Fuente: elaboración propia.

La corriente que circula por el devanado serie es:

$$I_{SE} = \frac{100\,000}{2\,300} = 43,5\text{ A}$$

Para la corriente que circula por el devanado común se tiene que:

$$I_C = \frac{100\,000}{11\,500} = 8,70 \text{ A}$$

De las corrientes anteriores se tiene que la corriente que circula por el devanado de alta tensión I_H es igual la corriente del devanado serie por lo que:

$$I_H = I_{SE} = 43,5 \text{ A}$$

Y la corriente que circula por el secundario del transformador I_L se tiene que es la suma de las corrientes del devanado serie y el devanado común:

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

$$I_L = 8,70 \text{ A} + 43,5 \text{ A}$$

$$I_L = 52,2 \text{ A}$$

3.2.2. Ejercicio de circuito equivalente

- Ejercicio 25. Del ensayo de cortocircuito de un transformador convencional se tienen los siguientes datos: 600 V, corriente asignada, (datos medidos del lado de alta tensión). Si este transformador se conecta como autotransformador reductor, figura 87(b), determine el circuito equivalente aproximado del autotransformador si se desprecian las pérdidas en el hierro. Considere que el transformador tiene valores nominales de 250 kVA, 15 000 V: 250 V, figura 87(a).

Solución:

Para el circuito equivalente aproximado de un autotransformador reductor la ecuación que se aplica es la siguiente:

$$V_H = I_H * Z_{eq} + \frac{N_1 + N_2}{N_2} * V_X$$

Para ello se determinan los valores del autotransformador los cuales quedan como:

$$V_H = 15\ 250\ V$$

$$I_H = 10\ A$$

$$V_x = V_L = 250\ V$$

Del ensayo de cortocircuito del transformador se tiene que:

$$I = \frac{S}{V} = \frac{250\ 000}{15\ 000} = 16,67\ A$$

Por lo tanto, si el $\cos \phi = 0,5$; $\sin \phi = 0,866$:

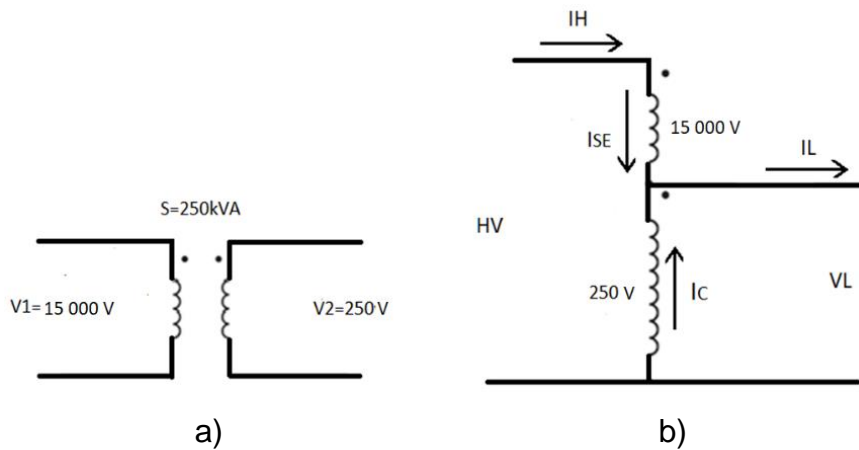
$$R_{CC} = \frac{600}{16,67} * 0,5 = 18 ; \quad X_{CC} = \frac{600}{16,67} * 0,866 = 31,17$$

Por lo tanto, con los parámetros obtenidos el circuito equivalente queda como lo muestra la figura 88:

Nota: los parámetros de la impedancia se obtuvieron de esta forma debido a que es posible aplicar los conceptos de un transformador a un

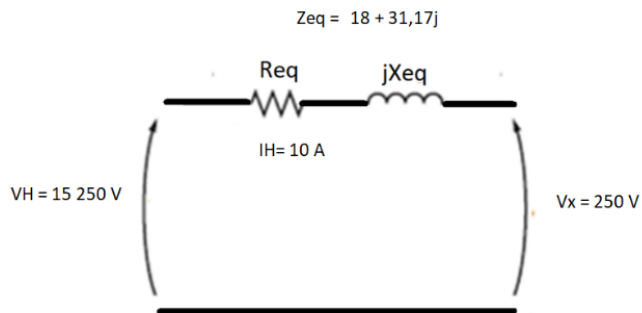
autotransformador. En este caso el primario del transformador corresponde al circuito serie de autotransformador por lo tanto al momento de llevar a cabo el ensayo de CC en un autotransformador; la tensión queda aplicada directamente al devanado serie de autotransformador es por ello que para este ejemplo es posible aplicar esto.

Figura 87. **Transformador conectado como autotransformador reductor**



Fuente: elaboración propia.

Figura 88. **Circuito equivalente del autotransformador reductor**



Fuente: elaboración propia.

3.2.3. Ventajas y desventajas frente a un transformador

El autotransformador a diferencia del transformador presenta ventajas y desventajas por lo que se presentan ejercicios en los que se debe determinar si es idóneo utilizar un autotransformador.

3.2.3.1. Ejercicio/preguntas de aplicación

- Ejercicio 26. Un molino de grano se desea poner en funcionamiento utilizando motor de inducción tipo jaula de aridilla, es conveniente utilizar un autotransformador para su funcionamiento.

Respuesta:

Sí, es conveniente usar un autotransformador para el molino. De hecho, el autotransformador se utiliza como arranque en los motores de inducción debido a que con este se logra un arranque suave debido a que un motor de inducción demanda una alta corriente en su arranque. Si se alimenta el motor conectándolo a la toma menor de un autotransformador, el voltaje reducido de alimentación resultara en una menor corriente de arranque y por lo tanto en condiciones más seguras de operación. Una vez que el motor ha alcanzado suficiente velocidad, se puede ir aumentando el voltaje de alimentación (dependiendo de la cantidad de tomas que posea el autotransformador) hasta llegar al voltaje de la red (cuando la relación de tomas sea 1:1).

- Preguntas de aplicación

Según las ventajas y desventajas que presentan los autotransformadores, mencione algunas aplicaciones en las que se utilice un autotransformador.

- o Dentro de las aplicaciones de los autotransformadores está el uso en sistemas eléctricos de potencia, para interconectar circuitos que funcionan a tensiones diferentes, pero en una relación cercana a 2:1 (por ejemplo, 400 kV / 230 kV o 138 kV / 66 kV).
- o En la industria, los autotransformadores tienen aplicaciones como poner en marcha maquinaria que utilice tensiones nominales diferentes a la de la fuente de alimentación (por ejemplo, motores de 480 V conectados a una alimentación de 600 V).
- o Los autotransformadores se utilizan también en sistemas de distribución rural, donde las distancias son largas, se pueden utilizar autotransformadores especiales con relaciones alrededor de 1:1, aprovechando la multiplicidad de tomas para variar la tensión de alimentación y así compensar las apreciables caídas de tensión en los extremos de la línea.
- o También son utilizados para conectar aparatos, electrodomésticos y cargas menores en cualquiera de las dos alimentaciones más comunes a nivel mundial (100-130 V a 200-250 V).

3.2.4. Cálculos asociados a un transformador

- Ejemplo 27. Un transformador ideal de dos embobinados tiene una capacidad de 3 kVA y su relación de voltajes es 200 / 100 V. Este transformador se conecta como autotransformador y se usa para transformar 200 a 300 V. una impedancia de carga de $6+8j \Omega$ se conecta a los terminales de 300 V. Determine a) las corrientes en la carga y en los bobinados, b) la potencia de salida, la entrega a la carga por inducción y

la entrega por conducción, c) la relación de la capacidad en voltamperes como autotransformador a su capacidad como transformador de dos embobinados d) relación de voltaje como autotransformador.

Solución:

En la figura 89 se muestra el transformador y la forma en que se conectó como autotransformador. Para el autotransformador se tiene que:

$$V_H = 300 \text{ V}$$

$$V_L = 200 \text{ V}$$

Por lo que la corriente I_H será:

$$I_H = \frac{6 + 8j}{300} = 30\angle -53^\circ \text{ A}$$

La corriente I_{SE} será:

$$I_{SE} = I_H = 30\angle -53^\circ \text{ A}$$

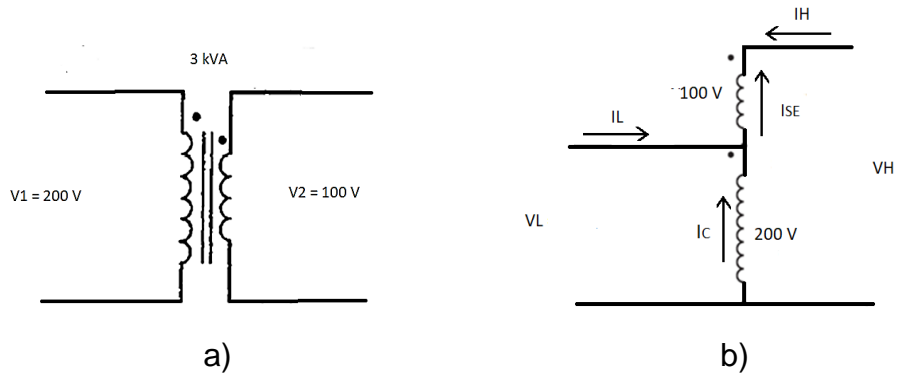
La corriente I_C será:

$$I_C = \frac{3\,000 \text{ VA}}{200 \text{ V}} = 15 \text{ A}$$

La corriente I_L será:

$$I_L = I_C + I_{SE} = 30\angle -53^\circ + 15 = 45\angle -53^\circ \text{ A}$$

Figura 89. **Autotransformador del ejemplo 27**



Fuente: elaboración propia,

La potencia de salida como autotransformador es:

$$S_{out} = V_H * I_H \cos\theta$$

$$S_{out} = 300 * 30 * 0,6 = 5\,400 \text{ watts}$$

La potencia entregada por inducción es igual a la potencia nominal de salida como transformador:

$$S_{induc} = 100 * 30 * 0,6 = 1\,800 \text{ W}$$

Por lo que la potencia entregada por conducción es:

$$S_{conduc} = 5\,400 - 1\,800 = 3\,600 \text{ W}$$

La relación de la capacidad en voltamperes como autotransformador a su capacidad como transformador de dos embobinados será:

$$\frac{S_{\text{sal, auto}}}{S_{\text{sal, trafo}}} = \frac{V_H}{V_H - V_C} = \frac{300}{300 - 200} = 3$$

Es decir que como autotransformador da 3 veces la potencia que da como transformador:

Como transformador = 1 800

Como autotransformador = 1 800 * 3 = 5 400

La relación de voltaje como autotransformador será:

$$\frac{300}{200} = 1,5$$

- Ejemplo 28. Se conecta un transformador de 100 VA y 120 / 12 V para que funcione como autotransformador elevador, véase la figura 90. Se aplica un voltaje primario de 120 V al autotransformador. Determine a) cual es el voltaje secundario de autotransformador, b) cuál es su capacidad máxima en VA, c) la ventaja nominal de la conexión como autotransformador sobre la ventaja nomina en operación como transformador.

Solución:

Debido a que se trata de un transformador elevador el voltaje del lado del secundario está determinado por la siguiente ecuación:

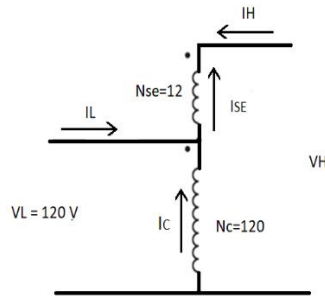
$$V_H = \frac{N_{SE} + N_C}{N_C} V_L$$

$$V_H = \frac{12 + 120}{120} * 120 = 132 \text{ V}$$

El valor máximo en voltamperes en cualquiera de los dos devanados de este transformador es de 100 VA. Para determinar la respuesta a este es necesario examinarse el devanado en serie. El voltaje V_{SE} en el devanado es de 12 V y el valor en voltamperes del devanado es de 100 VA. Por lo tanto, la corriente del devanado en serie máxima es

$$I_{SE} = \frac{S_{\max}}{V_{SE}} = \frac{100 \text{ VA}}{12 \text{ V}} = 8,33 \text{ A}$$

Figura 90. **Autotransformador del ejemplo 28**



Fuente: elaboración propia.

Debido a que I_{SE} es igual a la corriente secundaria I_S y en función de que el voltaje secundario es $V_S = V_A = 123 \text{ V}$, la potencia aparente secundaria es

$$S_{\text{salida}} = V_S I_S = V_H I_H$$

$$132 \text{ V} * 8,33 \text{ A} = 1100 \text{ VA} = S_{\text{entrada}}$$

La ventaja nominal se puede calcular a partir de la siguiente formula:

$$\frac{S_{\text{sal, auto}}}{S_{\text{sal, trafo}}} = \frac{V_H}{V_H - V_C} = \frac{132}{132 - 120} = 11$$

El numero 11 significa que cuando trabaja como autotransformador la potencia se incrementa 11 veces de la que tiene cuando trabaja como transformador.

3.2.5. Aplicación de las perdidas y rendimientos de autotransformador

- Ejercicio 29. Del ejercicio 24, a) determine las pérdidas que se da como transformador; si el rendimiento a plena carga con factor de potencia unidad es 0,9825. Si cuando se conecta como autotransformador sus pérdidas en plena carga siguen siendo las mismas que como transformador, determine, b) qué porcentaje de la potencia de entrada equivalen ahora estas pérdidas, pero como autotransformador, c) el rendimiento como autotransformador.

Las pérdidas como transformador son:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} - P_P} \quad P_P = \frac{100(1 - 0,9825)}{0,9825} = 1,78 \text{ kW}$$

La potencia del autotransformador es:

$$\frac{11 \ 500 * 52,2}{1 \ 000} = 600 \text{ kVA}$$

Es decir, este transformador cuya potencia nominal como transformador es de 100 kVA, es por tanto capaz de transformador 600 kVA conectado como autotransformador. Debido a que cuando se conecta como autotransformador sus pérdidas en plena carga siguen siendo las mismas, que como transformador 1,78 kW, pero ahora estas pérdidas son:

$$\frac{P_p}{P_{\text{Autotrafo}} + P_p} = \frac{1,78}{601,78} = 0,00296$$

Por lo que las pérdidas equivalen a 0,00296 de la potencia de entrada.

El rendimiento como autotransformador será:

$$\eta = \frac{600}{600 - 1,78} = 0,99704$$

Por lo que el rendimiento como autotransformador es casi perfecto y es mayor al que se tiene como transformador.

3.3. Protocolos de pruebas en un transformador

Cuando un transformador se energiza por primera vez es necesario realizarle pruebas, las cuales pueden ser utilizadas como referencia para pruebas posteriores o bien para saber el estado del mismo antes de su instalación.

3.3.1. Procedimiento a llevar a cabo para realizar las diferentes pruebas eléctricas

En la sección 2.2.1, se dio el concepto de cada prueba en específico, así como los equipos utilizados. En esta sección se dan el procedimiento que se

realiza en cada prueba; tanto para las pruebas eléctricas como para las pruebas al aceite dieléctrico.

3.3.1.1. Prueba de corriente de excitación

“El método consiste simplemente en la medición de una corriente monofásica en el lado energizado de un transformador, usualmente el lado de alta tensión, con el otro lado en vacío (con excepción del neutro aterrizado). Los transformadores trifásicos son probados aplicando un voltaje monofásico a una fase a la vez. La prueba debe ser realizada con el mayor voltaje posible sin exceder el voltaje nominal del devanado del transformador baja prueba.”²⁵

3.3.1.2. Prueba de relación de transformación

La norma IEEE C57.12.90 menciona dos métodos para realizar esta prueba:

- Método de dos voltímetros
- Método de comparación
- Método de dos voltímetros

Se utilizarán dos voltímetros (con transformadores de voltaje cuando sea necesario); uno para leer el voltaje del devanado de alto voltaje V_H y el otro, el devanado de bajo voltaje V_L . En la figura 91 se muestra el diagrama del circuito de prueba. Los dos voltímetros se leerán simultáneamente por lo que la relación de transformación será:

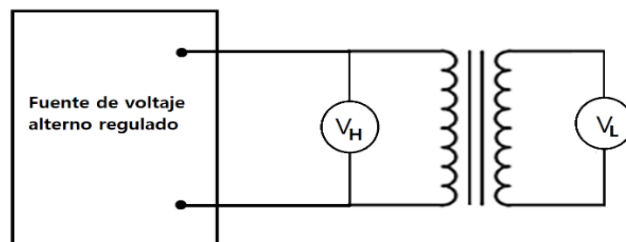
²⁵ NÚÑEZ FORESTIERI, Juan. *Guía para el mantenimiento de transformadores de potencia*. p. 322.

$$m = \frac{V_H}{V_L}$$

Se tomará un segundo conjunto de lecturas con los instrumentos intercambiados, y el promedio de los dos conjuntos de lecturas tomadas para compensar los errores del instrumento. Las relaciones de transformador de voltaje deberían producir aproximadamente las mismas lecturas en los dos voltímetros. La compensación por errores en el instrumento mediante el intercambio de instrumentos no sería satisfactoria, y será necesario aplicar las correcciones apropiadas a las lecturas del voltímetro.

Cuando la relación por comprobar es de valor elevado, debe incluirse un transformador de potencial, ya que es necesario que los aparatos sean iguales para poderse intercambiar. Las pruebas se realizarán a no menos de cuatro voltajes en pasos de aproximadamente 10 %, y el resultado promedio se tomará como el valor verdadero. Si la relación obtenida en cada par de grupos de lecturas no difiere de un 1 %, la prueba será aceptable y la relación de transformación será el promedio de todos los resultados. De lo contrario, las pruebas se repetirán con otros voltímetros.

Figura 91. **Diagrama de circuito para el método de dos voltímetros**



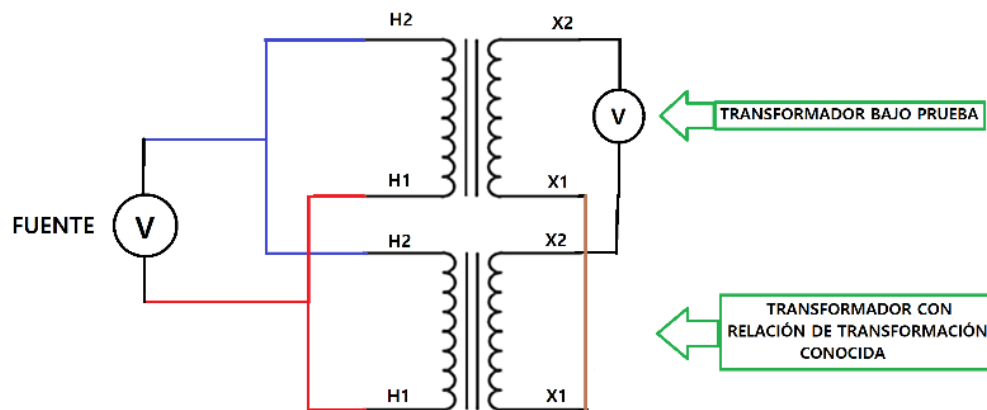
Fuente: elaboración propia.

Cuando se van a probar varios transformadores de clasificación duplicada, el trabajo se puede acelerar aplicando las pruebas anteriores a una sola unidad y luego comparando las otras unidades con esta como estándar, de acuerdo con el método de comparación de transformadores.

- Método de comparación

Un método conveniente para medir la relación de un transformador es en comparación con un transformador de relación conocida.

Figura 92. **Voltímetro dispuesto a leer la diferencia entre los dos voltajes secundarios**

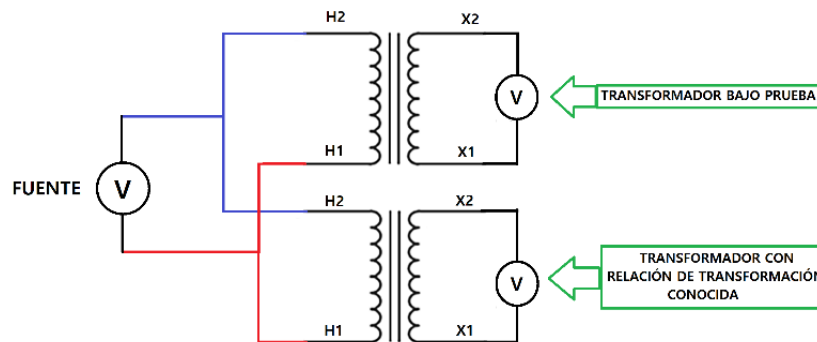


Fuente: elaboración propia.

El transformador a probar se excita en paralelo con un transformador de la misma relación nominal, y los dos secundarios se conectan en paralelo, pero con un voltímetro o detector en la conexión entre dos terminales de polaridad similar, figura 92.

Este método es más preciso porque el voltímetro o detector indica la diferencia de voltaje. Para un método alternativo, el transformador que se va a probar se excita en paralelo con un transformador de relación conocida, y los voltímetros están dispuestos para medir los dos voltajes secundarios, figura 92. Los voltímetros se intercambiarán y se repetirá la prueba. Los promedios de los resultados son los voltajes correctos.

Figura 93. **Voltímetros dispuestos a leer los dos voltajes secundarios**



Fuente: elaboración propia.

- Puente de relación de transformación

Un puente que usa el circuito básico de la figura 94, puede usarse para medir la relación.

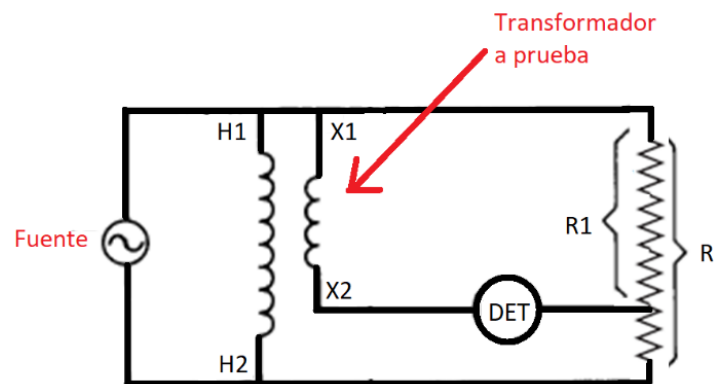
Cuando el detector DET está en equilibrio, la relación del transformador es igual a R / R_1 .

- o Se pueden obtener resultados más precisos utilizando un puente de relación que proporciona corrección de ángulo de fase.

- o El puente de relación también se puede utilizar para probar la polaridad, la relación de fase y la secuencia de fase.

En la actualidad se utiliza un equipo denominado medidor de relación de transformación TTR, para realizar esta prueba.

Figura 94. **Circuito básico de puente de relación**



Fuente: elaboración propia.

3.3.1.3. Prueba de polaridad

La norma IEEE C57.12.90 menciona que la prueba de polaridad en transformadores monofásicos se realiza de acuerdo con uno de los siguientes métodos:

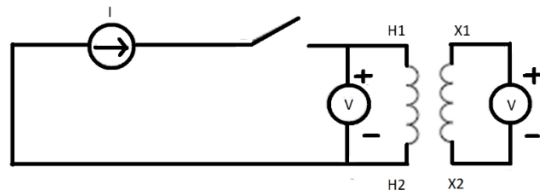
- Impulso inductivo

La polaridad por pulso inductivo puede medirse utilizando dos voltímetros de CC y una fuente de corriente de CC. Por razones de seguridad, es preferible

aplicar la fuente de CC a través del devanado de alto voltaje. En la figura 95, se muestra el diagrama empleado para la prueba.

Se debe colocar un voltímetro de DC a través de los cables H1-H2, con el cable positivo conectado al terminal H1. Se debe colocar un voltímetro DC a través de los cables X1-X2, con el cable positivo colocado al terminal X1.

Figura 95. **Circuito para la prueba de polaridad**



Fuente: elaboración propia.

Se debe conectar una fuente de bajo voltaje, como una batería, a los terminales H1-H2, causando así una pequeña pero notable separación del voltímetro de CC conectado a través de los terminales H1-H2.

La conexión de la fuente de DC debe ser tal que la indicación del voltímetro de DC sea positiva. Interrumpir la excitación de corriente continua, lo que induce un voltaje en el devanado de bajo voltaje (impulso inductivo), lo que provocara una desviación en el voltímetro. La desviación se interpreta de la siguiente manera:

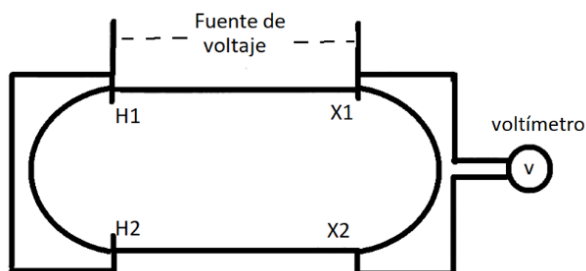
- o Cuando el puntero oscila en la dirección opuesta, la polaridad es sustractiva.

- o Cuando el puntero oscila en la misma dirección que antes, la polaridad es aditiva.
- Tensión alterna

Cualquier valor conveniente de voltaje alterno se aplicará al devanado completo de alto voltaje. Se toman las lecturas del voltaje aplicado y el voltaje entre los cables adyacentes de alto voltaje y bajo voltaje adyacentes, figura 96.

- o Cuando la última lectura (bajo voltaje) es mayor que la primera (voltaje aplicado), la polaridad, es aditiva
- o Cuando la última lectura de voltaje (bajo voltaje) es menor que la anterior (voltaje aplicado), la polaridad es sustractiva.

Figura 96. **Conexión para la prueba de polaridad por tensión alterna**



Fuente: elaboración propia.

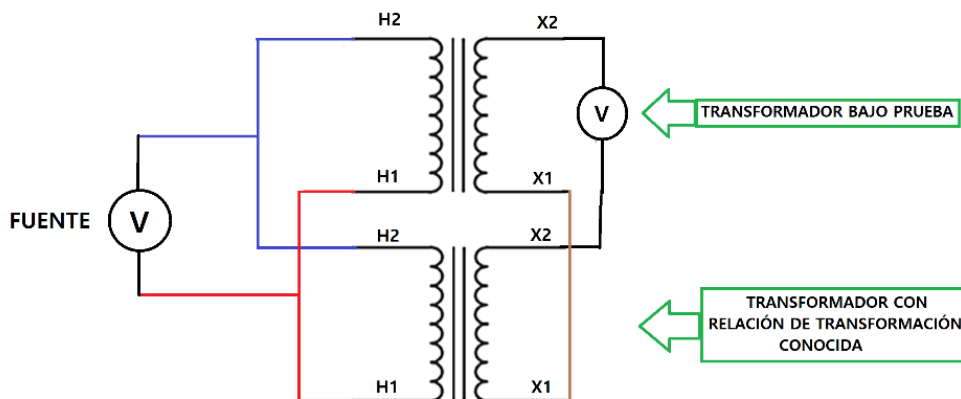
- Método de comparación

Cuando se posee un transformador de polaridad conocida y de la misma relación que la unidad bajo prueba, la polaridad se puede verificar por

comparación de manera similar al método de comparación utilizado en la prueba de relación de transformación.

- o Se deben conectar los devanados de alto voltaje de ambos transformadores en paralelo conectando cables marcados de manera similar.
- o Se deben conectar los cables de baja tensión, X2, de ambos transformadores, dejando libres los cables X1.
- o Con estas conexiones, se aplica un voltaje reducido a los devanados de alto voltaje y mida el voltaje entre los dos cables.

Figura 97. **Diagrama de conexión para la prueba de polaridad por el método de comparación**



Fuente: elaboración propia.

- o Una lectura cero o insignificante del voltímetro indicara que las polaridades relativas de ambos transformadores son idénticas.

- o Un método alternativo para verificar la polaridad es sustituir un fusible de baja potencia o lámparas adecuadas para el voltímetro. Este procedimiento se recomienda como medida de precaución antes de conectar el voltímetro.

3.3.1.4. Prueba de resistencia de los devanaos

La norma IEEE Std 62 menciona que la resistencia del devanado del transformador generalmente se mide utilizando técnicas de puente, el método de voltímetro-amperímetro o un micro ohmímetro. Cuando se usan puentes, se prefiere un puente Wheatstone para valores de resistencia de $\geq 1 \Omega$. Un puente Kelvin o un micro ohmímetro es preferible para valores de resistencia de $<1 \Omega$.

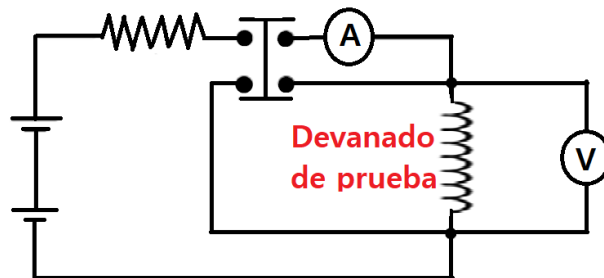
La corrección de la temperatura de la resistencia del devanado normalmente no se requiere en el sitio porque la comparación de medición se realiza entre fases.

- Método voltímetro-amperímetro

El método del voltímetro-amperímetro es a veces más conveniente que el método del puente. Debe emplearse solo si la corriente nominal del devanado del transformador es >1 A. Los voltímetros digitales y los amperímetros digitales de precisión adecuada se usan comúnmente.

La medición se realiza con corriente continua, y las lecturas simultáneas de corriente y voltaje se toman utilizando las conexiones de la figura 98. La resistencia requerida se calcula a partir de las lecturas de acuerdo con la ley de Ohm.

Figura 98. **Circuito para medición de resistencia de los devanados para el método de voltímetro-amperímetro**



Fuente: elaboración propia.

Normalmente, se utiliza una batería de 12 V como fuente de alimentación. Sin embargo, también se puede usar una fuente de alimentación electrónica regulada siempre que su contenido de ondulación sea $<1\%$ del voltaje medio.

Para minimizar los errores de medición, se deben tomar las siguientes precauciones:

- o Los instrumentos de medición deben tener tales rangos que las lecturas se puedan hacer lo más cerca posible de la escala completa y, en cualquier caso, por encima del 70 % de la escala completa.
- o La polaridad de la magnetización del núcleo debe mantenerse constante durante todas las mediciones de resistencia.
- o Nota: una inversión en la magnetización del núcleo puede cambiar la constante de tiempo y generar lecturas erróneas.

- o Los cables del voltímetro deben ser independientes de los cables de corriente y deben conectarse lo más cerca posible de los terminales del devanado que se va a medir. Esto evita incluir las resistencias de los cables que llevan corriente y sus contactos y las resistencias de longitudes adicionales de cables en la lectura.

Las lecturas no se deben tomar hasta después de que la corriente y el voltaje hayan alcanzado valores de estado estacionario. Para reducir el tiempo requerido para que la corriente alcance su valor de estado estable, se debe agregar una resistencia externa no inductiva en serie con la fuente de CC. La resistencia debe ser grande en comparación con la resistencia del devanado. Las corrientes utilizadas para estas mediciones normalmente no superan el 15 % de la corriente nominal. Esto evita calentar el devanado y, por lo tanto, cambiar su resistencia. La variación de resistencia no debe exceder el 5 % de fase a fase.

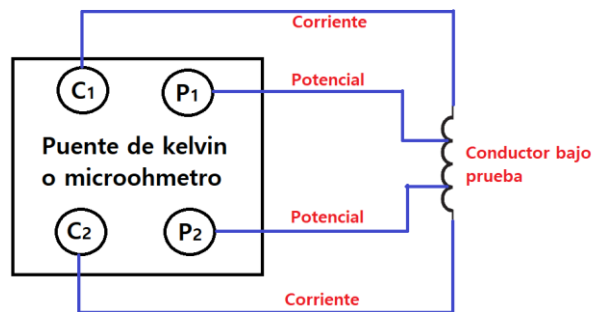
Precauciones: si la corriente se apaga repentinamente, se generará un alto voltaje a través del devanado. La corriente debe desconectarse mediante un interruptor adecuadamente aislado antes de que el personal contacte el circuito de prueba. Alternativamente, el devanado del transformador debe estar en cortocircuito antes de desconectar la corriente, siempre que esto no provoque daños a la fuente de alimentación ni a ninguna resistencia conectada en serie. Para evitar que el voltímetro se dañe, debe desconectarse del circuito antes de encender o apagar la corriente.

- Método de puente o micro óhmetro

La conexión tanto del puente como del micro óhmetro al circuito bajo prueba es básicamente la misma. Usando el manual de instrucciones como guía, los cuatro cables deben conectarse al circuito que se está midiendo. Se deben

conectar dos cables, uno potencial y uno actual, a cada extremo del circuito a medir. Se debe tener cuidado para garantizar un buen contacto de todas las conexiones de los cables y para garantizar que todos los cables de prueba sean iguales (es decir, longitud, calibre y material). Se debe tener cuidado al conectar los cables de corriente fuera de los cables de voltaje en los puntos de conexión al circuito de prueba, figura 99.

Figura 99. **Conexión por medio del método de puente o micro óhmetro**



Fuente: elaboración propia.

Cuando se utiliza un puente, debe estar equilibrado, comenzando con el ajuste de dígitos más significativo seguido por el siguiente más significativo, entre otros, hasta que el medidor nulo del puente esté equilibrado. La resistencia medida del conductor se lee directamente de la configuración del puente.

Cuando se utiliza el micro óhmetro, solo se necesita hacer una selección de rango y la lectura medida se muestra directamente en el instrumento. Después de obtener la resistencia medida, rms, desde la configuración del puente o el micro óhmetro, ese valor debe corregirse para la temperatura utilizando el procedimiento descrito en la sección 2.3.1.4.

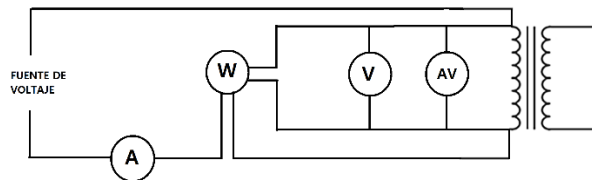
Este valor de resistencia corregido ahora se puede comparar con los valores anteriores que se corrigieron a las mismas condiciones estándar.

Interpretación: la interpretación de los resultados depende mucho del tipo de conductor que se mide. Algunos conductores consisten en varios caminos paralelos de cables trenzados y la detección de un problema con un solo cable puede estar más allá de la resolución del puente o micro óhmetro. Si se rompe más de una hebra o hay una conexión interna de alta resistencia, el puente Kelvin o el micro óhmetro deberían detectar el circuito de mayor resistencia resultante.

3.3.1.5. Prueba de vacío

Durante la prueba de vacío del transformador o de circuito abierto, se aplica el voltaje nominal del transformador por el devanado de bajo voltaje y se miden los voltajes V_p , la corriente de vacío I_o y la potencia P_o que representa las pérdidas en vacío o en el núcleo del transformador. El esquema de la conexión se presenta en la figura 100.

Figura 100. Esquema eléctrico del ensayo de vacío



Fuente: elaboración propia.

La potencia absorbida en vacío coincide con las pérdidas en el hierro. De las medidas efectuadas se obtiene el factor de potencia en vacío de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P_o = V_{1n} I_o \cos \theta = P_{Fe}$$

Las componentes de la corriente I_o valen:

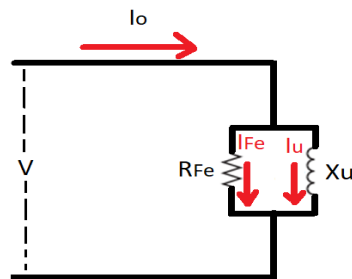
$$I_o \cos \theta \quad ; \quad I_o \sin \theta$$

De donde pueden obtenerse los valores de los parámetros R_{Fe} , X_μ , figura 101:

$$R_{Fe} = \frac{V_1}{I_{Fe}} \quad ; \quad X_\mu = \frac{V_1}{I_\mu}$$

El ensayo de vacío permite determinar las pérdidas en el hierro del transformador y además permite obtener la rama en paralelo del circuito equivalente del mismo. La norma IEEE C57.12.90 menciona que en algunas ocasiones es necesario hacer uso de un transformador de instrumento. La prueba de vacío del transformador se realiza con el voltaje nominal impreso en los terminales del transformador, utilizando una fuente de voltaje a una frecuencia igual a la frecuencia nominal del transformador bajo prueba.

Figura 101. **Rama en paralelo del circuito equivalente del transformador**



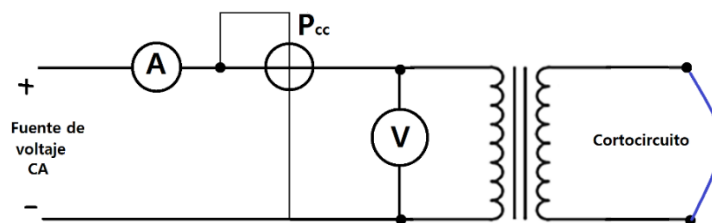
Fuente: elaboración propia.

La norma también menciona que el devanado de alta o baja tensión del transformador bajo prueba puede estar energizado, pero generalmente es más conveniente realizar esta prueba utilizando el devanado de baja tensión. Para transformadores trifásicos se emplea el método de los tres vatímetros de acuerdo con el siguiente esquema.

3.3.1.6. Prueba de cortocircuito

En esta prueba 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 que se utiliza para la prueba se muestra en la figura 102.

Figura 102. Esquema para la prueba de cortocircuito



Fuente: elaboración propia.

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. La potencia que absorbe el transformador en esta prueba coincide con las pérdidas en el cobre.

De las medidas efectuadas se deduce que:

$$P_{cc} = V_{1cc} I_{1n} \cos \theta_{cc}$$

$$V_{R_{cc}} = R_{cc} I_{1n} = V_{1cc} \cos \theta_{cc} \quad ; \quad V_{X_{cc}} = X_{cc} I_{1n} = V_{1cc} \sin \theta_{cc}$$

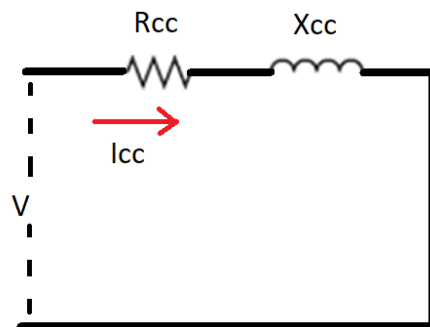
Por lo que:

$$R_{cc} = \frac{V_{1cc} \cos \theta_{cc}}{I_{1n}} \quad ; \quad X_{cc} = \frac{V_{1cc} \sin \theta_{cc}}{I_{1n}}$$

Por lo que el ensayo de cortocircuito permite determinar los parámetros de la rama serie del circuito equivalente del transformador, figura 103. Pero se sabe que:

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 \quad ; \quad X_{cc} = X_1 + X'_2$$

Figura 103. **Rama serie del circuito equivalente del transformador**



Fuente: elaboración propia.

Para poder determinar los valores individuales de las resistencias R_1 , 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 tener en cuenta el efecto pelicular que se produce con AC (la resistencia óhmica es

función de la frecuencia, debido a la distribución no uniforme de la corriente por la sección transversal del conductor). No existen procedimientos para separar X_1 de X'_2 . En la práctica de la ingeniería eléctrica, cuando se desea conocer la distribución de R_{cc} y X_{cc} entre ambos devanados es frecuente recurrir a la solución aproximada que consiste en dividir en dos R_{cc} y X_{cc} :

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_{cc}}{2} \quad ; \quad X_1 = X'_2 = \frac{X_{cc}}{2}$$

3.3.1.7. Prueba de sonido audible

La norma IEEE C57.12.90 menciona que las mediciones deben realizarse en un entorno que tenga un nivel de presión de sonido ambiental de al menos 5 dB por debajo del nivel de presión de sonido combinado del transformador y el nivel de presión de sonido ambiental.

Cuando el nivel de presión acústica ambiental es 5 dB o más por debajo del nivel combinado del transformador y el nivel de presión acústica ambiental, las correcciones que se muestran en la tabla IX se aplicarán al transformador combinado y al nivel de presión acústica ambiental para obtener el nivel de presión acústica del transformador.

Cuando la diferencia entre el nivel de presión acústica combinada ambiental y del transformador y el nivel de presión acústica ambiental es inferior a 5 dB, y solo se desea conocer el nivel de presión acústica que el transformador no excede, una corrección de -1,6 dB puede ser usado. Para mediciones de un tercio de octava o de banda estrecha, la diferencia de 5 dB se aplicará a cada banda de frecuencia en la que se realizan las mediciones.

Cuando las condiciones de sonido ambiental no cumplen, las correcciones adecuadas pueden ser factibles cuando las condiciones de sonido ambiental son constantes y se miden niveles de frecuencia de sonido discretos. Para esta condición, el fabricante y el comprador del transformador acordarán los detalles y métodos para realizar las mediciones y las correcciones ambientales.

Tabla IX. **Correcciones para el nivel de ruido**

Diferencia en decibeles entre el nivel de ruido del transformador y ambiente combinados y el nivel de ruido del ambiente	Corrección en decibels aplicable al nivel de ruido del transformador y ambiente combinados para obtener el nivel de ruido del transformador
5,0	1,6
6,0	1,3
7,0	1,0
8,0	0,8
9,0	0,6
10,0	0,4
Más de 10	0,0

Fuente: elaboración propia.

El transformador debe ubicarse de manera que no haya una superficie que refleje acústicamente dentro de los 3 m del micrófono de medición, que no sea el piso o el suelo. Cuando un transformador se va a probar dentro de una instalación semi-reverberante, debe ubicarse de manera asimétrica con respecto a la geometría de la sala. Si no se pueden cumplir las condiciones especificadas, el transformador no deberá estar a menos de 3 m de una superficie que refleje el sonido.

Cuando las emisiones de sonido del transformador se miden en un espacio cerrado, los reflejos del sonido de las paredes u otros objetos grandes pueden

influir en los resultados porque el sonido contiene tonos discretos que se ven afectados por la acústica de la habitación, la geometría de la habitación o los objetos reflectantes. Por lo tanto, pueden existir diferencias en el sonido medido en una instalación de transformador interior y el sonido medido en un laboratorio acústico o una instalación exterior.

- Mediciones

La norma IEEE C57.12.90 da el esquema del transformador para realizar las mediciones de sonido. Estas mediciones comenzarán después de que el transformador que se está probando se energice y se establezcan las condiciones de nivel de sonido en estado estable. Las mediciones se pueden hacer inmediatamente en transformadores que han estado en operación continua.

- o Para realizar las mediciones la superficie productora de sonido de referencia de un transformador es una superficie vertical que sigue el contorno de una cuerda tensa estirada alrededor de la periferia del transformador o recinto integral.
- o El contorno debe incluir radiadores, enfriadores, tubos, compartimientos de interruptores y cámaras de terminales, pero excluye bujes y extensiones menores, como válvulas, medidores de aceite, termómetros, cajas de terminales de conductos y proyecciones a la altura de la cubierta o por encima de ella.
- o Para transformadores cuyo tanque sea de altura menor a 2,40 m las mediciones deben hacerse a la mitad de la altura aproximada. Para transformadores cuyo tanque sea de una altura de 2,40 m o

mayor, las mediciones deben hacerse a un tercio y dos tercios de altura aproximadamente.

- o Las primeras ubicaciones del micrófono deben coincidir con la válvula de drenaje principal. Las ubicaciones adicionales de los micrófonos deben estar a intervalos de 1 m en una dirección horizontal, en el sentido de las agujas del reloj, visto desde arriba a lo largo de la superficie de medición, se utilizarán no menos de cuatro ubicaciones de micrófono.

- o El micrófono debe estar espaciado a 0,3 m de la superficie productora de sonido de referencia. Cuando los ventiladores están en funcionamiento, el micrófono debe ubicarse a 2 m de cualquier parte de los radiadores, enfriadores o tubos de enfriamiento enfriados por aire forzado.

3.3.1.8. Prueba de factor de potencia a los aislamientos

La IEEE C57.12.90 menciona que el método que se describe es aplicable a los transformadores de distribución y potencia que están sumergidos en un líquido aislante.

La muestra para el ensayo deberá tener lo siguiente:

- Todos los devanados sumergidos en líquido aislante.

- Todos los devanados en cortocircuito.

- Los bushings en su lugar.
- Temperatura de los devanados y líquido aislante cerca de la temperatura de referencia de 20 °C.

Tabla X. **Factores de corrección de temperatura para factores de potencia de aislamiento**

Temperatura de prueba $T^{\circ}C$	Factor de corrección K
10	0,8
15	0,9
20	1
25	1,12
30	1,25
35	1,4
40	1,55
45	1,75
50	1,95
55	2,18
60	2,42
65	2,7
70	3,00
Nota: Los factores de corrección enumerados anteriormente se basan en sistemas aislantes que utilizan aceite mineral como líquido aislante. Otros líquidos aislantes pueden tener diferentes factores de corrección.	

Fuente: elaboración propia.

Las pruebas de factor de potencia de aislamiento se realizarán de devanados a tierra y entre devanados. En algunos casos donde la prueba se

hace a una temperatura diferente es necesario emplear la corrección de temperatura para el factor de potencia de aislamiento, estos dependen de los materiales aislantes y su estructura, contenido de humedad, entre otros. Los valores del factor de corrección K se encuentran enumerados en la tabla X, son típicos y satisfactorios a efectos prácticos para su uso en la siguiente ecuación:

$$F_{p20} = \frac{F_{pt}}{K}$$

Donde:

- F_{p20} : factor de potencia corregido a 20 °C
- F_{pt} : factor de potencia medido a la temperatura T
- T: temperatura de la prueba
- K: factor de corrección

La temperatura de aislamiento puede considerarse la temperatura promedio del líquido. Cuando el factor de potencia de aislamiento se mide a una temperatura relativamente alta y los valores corregidos son inusualmente altos, se debe permitir que el transformador se enfríe; y las mediciones deben repetirse a 20 °C o cerca de esta.

3.3.2. Procedimiento a llevar a cabo para las pruebas al aceite dieléctrico

Los procedimientos para las pruebas al aceite dieléctrico están dados por las diferentes normas ASTM, como lo indica la norma IEEE C57.106, por lo que se hará uso de estas.

3.3.2.1. Rigidez dieléctrica

Para realizar la prueba se deben tomar en cuenta diferentes aspectos.

- Verificar que la temperatura de la muestra cuando se analice debe ser la misma que la de la habitación, pero la temperatura de la habitación no debe ser en ningún caso inferior a 20 °C (68 °F). Si se realiza la prueba a temperaturas más bajas que las de la habitación dará resultados variables e insatisfactorios.
 - Limpiar la cuba y los electrodos con un elemento que no deje residuos. En lugares con alta humedad relativa, la cuba debe calentarse ligeramente para evitar condensación.
 - Si los electrodos poseen erosión por los efectos del arco eléctrico, estos deben ser pulirse. No tocar el interior de la celda ni los electrodos luego de realizada la limpieza.
 - Al inicio de cada prueba y después de realizar la limpieza a la cuba, se debe revisar que la separación de los electrodos sea la especificada en la norma, de no cumplirse debe calibrar.²⁶
-
- Procedimiento según norma ASTM D-877

En este método se emplea una cuba con dos electrodos de disco plano de 25 mm o 1 plg de diámetro y al menos 3 mm o 1/8 plg de espesor, espaciados entre si una distancia de 0,1 plg, figura 104(a). El crecimiento del voltaje aplicado debe ser a razón de 3 kV/seg.

- o Se llena la cuba a una altura no menor de 20 mm o 0.8 plg sobre la parte superior de los electrodos. Al momento de llenar la cuba se debe realizar lenta y cuidadosamente para evitar el atrapamiento de aire.

²⁶ NÚÑEZ FORESTIERI, Juan. *Guía para el mantenimiento de transformadores de potencia*. p. 266-268.

- o Se coloca la cuba en el medidos de rigidez y dejar reposar por 2 minutos, pero no más de 3 minutos, esto con el fin de que el líquido repose.
- o Se aplica voltaje a la tasa indicada por la norma 3 kV/ser, hasta que la suceda la ruptura del aceite; anote el valor.

Cuando se quiera determinar la rigidez dieléctrica de un aceite en base a una rutina, es necesario hacer cinco mediciones de rigidez dieléctrica con intervalos de un minuto entre cada medición. El promedio de las medidas tomadas será el valor de la rigidez dieléctrica.

- Procedimiento según norma ASTM D-1816

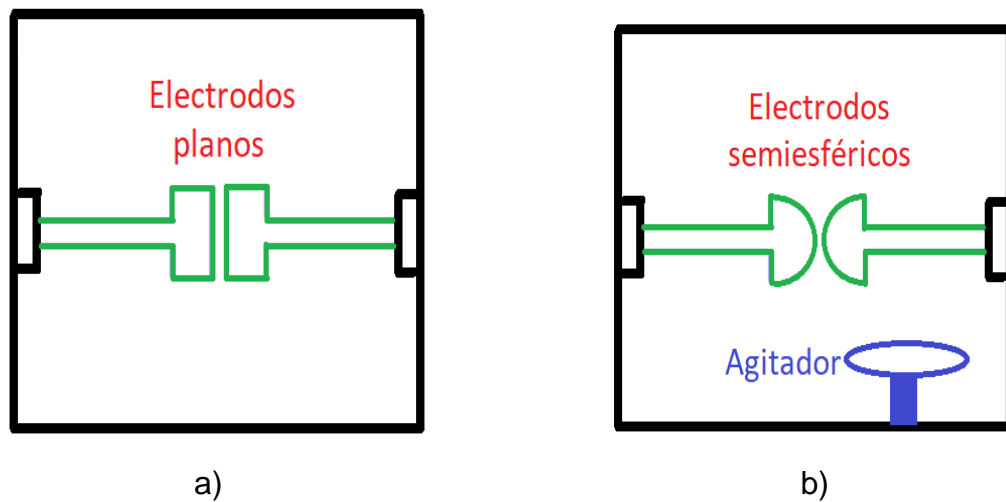
En este método se emplea una cuba con dos electrodos semiesféricos separados por una distancia de 1 mm. En este caso la cuba cuenta con agitador que proporciona una circulación lenta del aceite, lo cual a hace más representativa las condiciones a la que opera el aceite, figura 104(b). El crecimiento del voltaje aplicado debe ser a razón de 0,5 kV/seg.

- o Llenar la cuba a una altura no menor de 20 mm o 0.8 plg sobre la parte superior de los electrodos. Al momento de llenar la cuba se debe realizar lenta y cuidadosamente para evitar el atrapamiento de aire.
- o Colocar la cuba en el medidos de rigidez y dejar reposar por 2 minutos, pero no más de 3 minutos, esto con el fin de que el líquido repose.

- o Aplicar voltaje a la tasa indicada por la norma 0,5 kV/ser, hasta que la suceda la ruptura del aceite; anote el valor.

En la tabla XI, se indican los valores permisibles de rigidez dieléctrica para aceites nuevos y usados según las normas ASTM D-877 y ASTM D-1816.

Figura 104. **Electrodos según las normas ASTM D-877 y ASTM D-1816**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Valores permisibles de rigidez dieléctrica según normas**

Norma	Valor de rigidez dieléctrica permisible
ASTM D877	Aceites usados: 25 kV mínimo
	Aceites nuevos: 35 kV mínimo
ASTM D1816	Aceites usados: 20 kV mínimo
	Aceites nuevos: 30 kV mínimo

Fuente: elaboración propia.

3.3.2.2. Tensión interfacial

Antes de realizar la prueba se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Limpiar el orificio del tensiómetro con un pequeño trapo, evitando que fibras de este queden en el orificio. No se recomienda utilizar solventes para la limpieza del orificio.
- Limpie el vaso de precipitación utilizado para la prueba utilizando benceno, esto permitirá eliminar los residuos de aceite, luego lave el recipiente con jabón y finalmente con agua destilada.²⁷
- Procedimiento norma ASTM D-2285
 - o La temperatura de la muestra y tensiómetro debe ser la misma, preferiblemente 25 °C. Llenar el recipiente del tensiómetro con agua destilada y elimine el aire existente dentro del recipiente del tensiómetro y acóplelo al tensiómetro.
 - o Colocar el aceite de la muestra en el vaso de precipitación, por lo menos 1 plg (25,4 mm). Coloque el recipiente sobre la base del tensiómetro de manera que el orificio de la aguja este inmerso aproximadamente ½ plg (12,7 mm).
 - o Anotar la lectura inicial de la escala y en seguida expulse una gota de aceite. Anote la diferencia entre la lectura actual y anterior. No mueve el pistón del tensiómetro en sentido contrario ya que este hará que se introduzca aceite en el recipiente de agua destilada, contaminándolo.

²⁷ NÚÑEZ FORESTIERI, Juan. *Guía para el mantenimiento de transformadores de potencia*. p. 277-278.

- o Se debe expulsar cerca de $\frac{3}{4}$ del volumen de agua del recipiente, y permita que esta gota permanezca suspendida por cerca de 30 segundos (envejeciéndose).
 - o Se debe expulsar lentamente agua para provocar que caiga la gota en forma tal que el tiempo total quede comprendido entre 45 y 60 seg.
 - o Tomar nota del volumen de agua en la gota en términos de las unidades de escala. Esta lectura nos dará la tensión interfacial de la muestra de aceite.
- Procedimiento norma ASTM D-2285

La norma ASTM reconoce al método D-971 para la medición de la tensión interfacial del aceite en referencia al agua. Para este método se emplea un Tensiómetro que funciona bajo el principio de Dunoüy, La muestra de aceite es cuidadosamente colocada sobre una cama de agua, y un anillo de platino es jalado desde la cama de agua hacia la muestra de aceite, la fuerza necesaria para que el anillo atraviese la interface entre el agua y el aceite, es medida mediante un resorte calibrado. Estos instrumentos son de alta precisión y requieren de un fino manejo de la muestra y todos los elementos que integran el equipo de prueba. Los valores de medición son expresados en MN / m o dinas / cm.²⁸

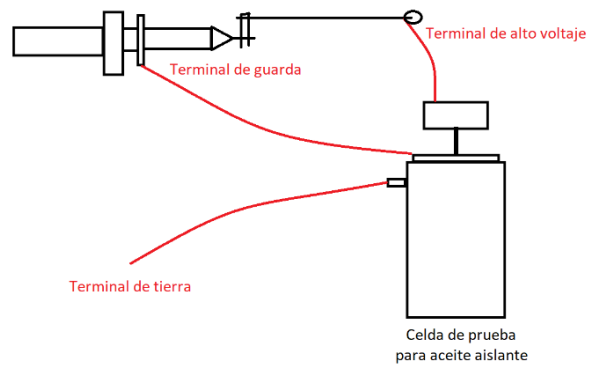
3.3.2.3. Factor de potencia

El apartado que se utiliza en esta prueba es esencialmente un capacitor, en el cual el dieléctrico es el aceite. Al conjunto de este se le conoce como celda de prueba. La toma de muestra para la prueba se hace en la misma forma que la prueba de rigidez dieléctrica. El procedimiento es el siguiente:

²⁸ PÉREZ RIVERA, Michael Isaí. *Implementación del mantenimiento predictivo de los transformadores de potencia de la ccc Iberdrola Energía Tamazunchale SA de CV, a través de las técnicas de diagnóstico de análisis del aceite dieléctrico.* p. 34.

- Disponer del equipo de prueba conectándose a él todas las puntas de prueba o terminales.
- Se llena la celda de prueba con el aceite a probar, procurar que se encuentre perfectamente nivelada sobre una base firme.
- Se efectúan las conexiones del equipo a la celda, figura 105, conectando el gancho del cable de alta tensión a la manija de la celda, la terminal de baja tensión se conecta al cilindro metálico de la celda y el anillo de guarda del cable de alta tensión al tornillo de guarda del cable,
- Energizar la celda de prueba que contiene el aceite y se procede a leer los resultados obtenidos de los Volt-amperes de carga las pérdidas en vatios del aceite bajo prueba.
- Con los valores obtenidos se determina el factor de potencia de acuerdo a la siguiente fórmula:
- Después de efectuar la prueba, se debe tomar la temperatura del aceite alojado en la celda de prueba, para relacionar el valor obtenido para el factor de potencia a la temperatura de referencia que es 20 °C, haciendo las correcciones de acuerdo a los factores multiplicadores de la tabla XII.

Figura 105. **Conexiones para la prueba de factor de potencia utilizando la copa doble**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Correcciones por temperatura a 20 °C para el factor de potencia**

Temperatura en °C	Factor de corrección
10	1,38
14	1,24
16	1,16
18	1,08
20	1
21	0,96
22	0,91
23	0,87
24	0,83
25	0,79
26	0,76
27	0,73
28	0,7
29	0,67
30	0,63

Continuación de la tabla XII.

31	0,6
32	0,58
33	0,56
34	0,53
35	0,51
37	0,47
38	0,45
39	0,44
40	0,42
42	0,38
44	0,36
46	0,33
48	0,3
50	0,28
52	0,26
54	0,23
56	0,21
58	0,19
60	0,17
64	0,15
68	0,13
70	0,12

Fuente: elaboración propia.

3.3.2.4. Color

Para realizar la prueba de color se utiliza un tubo de ensayo de fondo plano de 30 a 32,4 mm de diámetro y 115 a 125 mm de altura con un espesor de no mayor a 1,6 mm. Antes de realizar el ensayo se debe realizar la limpieza del tubo.

El procedimiento para realizar la prueba es el siguiente:

- Se coloca una muestra de aceite en el tubo el cual contenga por lo menos 50 mm de altura. Se coloca el tubo de ensayo en el colorímetro y encienda la fuente de luz.
- Se compara el color de la muestra de aceite con los colores del colorímetro. Para dar el resultado obtenido se observa que color de la muestra coincide con alguno del colorímetro y se escribe como; color 7,5 ASTM.
 - o Si el color obtenido este intermedio entre 2 colores del colorímetro, se toma el más oscuro y se escribe como: color L7,5 ASTM.
 - o Si el color obtenido de la muestra es mayor a 8, se escribe el numero precedido de una letra D: color D8 ASTM.

En la tabla XIII, se muestran valores estandarizados de la condición del aceite basado en el color.

Tabla XIII. Cuantificación del color del aceite

Número comparador de color	Color ASTM	Condición del aceite
0,0 - 0,5	Claro	Aceite nuevo
0,5 - 1,0	Amarillo pálido	Buen aceite
1,0 - 2,5	Amarillo	Aceite con tiempo de servicio
2,5 - 4,0	Amarillo brillante	Condiciones marginales
4,0 - 5,5	Ámbar	Mala condición
5,5 - 7,0	Marrón	Condición crítica - necesite regeneración
7,0 - 8,5	Marrón oscuro	Condición extrema - necesita cambio

Fuente: elaboración propia.

3.3.2.5. Contenido de humedad

Antes de realizar la prueba debe verificarse la titulación del instrumento y los reactivos, mediante el uso de una solución de verificación adecuada que contenga una cantidad conocida de humedad. Es deseable verificar el funcionamiento del sistema utilizando una solución que se aproxime al mismo rango de agua que se espera que esté en las muestras. Si los resultados de la solución de verificación se encuentran fuera de los parámetros establecidos por el fabricante para el contenido de humedad aceptable de la solución, los reactivos se cambiarán y volverán a verificar.

El procedimiento para realizar esta prueba se describe a continuación según la norma ASTM D-1533:

- Después de verificar que el sistema funciona correctamente, permita que el instrumento se vuelva a estabilizar antes de usarlo.
- Siga las instrucciones del fabricante para el tamaño de muestra sugerido para un rango esperado de contenido de humedad.
- Usando una jeringa y una aguja apropiadas muestree el fluido aislante a analizar. Antes del muestreo, enjuague la jeringa y la aguja con el líquido a analizar una vez.
 - o Las jeringas se deben usar de un tamaño adecuado recomendadas por los fabricantes de instrumentos del tamaño de la muestra. Las jeringas pueden ser de vidrio o plástico. Las jeringas de vidrio se deben limpiar y secar durante 1 hora a 100 ° C antes de su uso. Las

jeringas de plástico deben desecharse después de cada uso de muestra.

- o Las agujas que se deben colocar en las jeringas de transferencia deben ser lo suficientemente largas como para inyectar muestras directamente debajo de la superficie del reactivo Karl Fischer. Deben ser de un calibre lo suficientemente grande como para permitir una fácil transferencia de la muestra.
- Determine la masa de la muestra por diferencia a tres cifras significativas pesando la muestra de prueba antes y después de la inyección. Alternativamente, inyecte un volumen conocido de una muestra cuya densidad se conozca a la temperatura de prueba para determinar el tamaño de la muestra.
- Las soluciones reactivas se pueden usar hasta que las soluciones de verificación ya no se prueben con precisión.
- La mayoría de los instrumentos coulométricos Karl Fischer disponibles comercialmente calculan automáticamente el contenido de agua en ppm o porcentaje. Si no, calcule la cantidad de agua en la muestra utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Contenido de agua, } \frac{\text{mg}}{\text{kg}} \text{ (ppm)} = \frac{A}{B}$$

Donde:

- o A: masa del agua (lectura del instrumento)

- o B: masa de la muestra de prueba
- Por último, identifique la muestra, así como el contenido de agua de la muestra de prueba en mg/kg (ppm) y la temperatura de la muestra cuando se recolecta.

En la tabla XXI, se muestran los valores máximos de agua en ppm dependiendo de la tensión del transformador:

Tabla XIV. Niveles de agua para el aceite según la tensión del transformador

Nivel de tensión en kV	Cantidad máxima de agua en el aceite (ppm)
< 69	35
69 - 228	25
> 228	20

Fuente: elaboración propia.

3.3.2.6. Inspección visual

En esta prueba la condición de la muestra de prueba se estima mediante la observación de la turbidez, partículas extrañas o materia suspendida en la muestra por la luz reflejada.

La norma ASTM D-1524 indica que para realizar esta prueba se emplea un recipiente de muestra en el que se pueda proyectar luz desde el fondo hacia la muestra, una fuente de luz como una luz de lápiz con una bombilla No. 222 y un

pañó de enfoque del fotógráfo. La norma describe el procedimiento para realizar la prueba de la siguiente forma:

- Se toma una muestra de aceite en el recipiente.
- Se proyecta un haz de luz enfocado estrecho desde la luz de la pluma hacia arriba a través del recipiente de muestra, utilizando el paño de enfoque fotográfico para excluir la luz extraña. Examine cuidadosamente la muestra de prueba por medio de esta luz.
- La turbidez o turbidez generalmente denota humedad en suspensión o lodo. Si la rigidez dieléctrica es satisfactoria, la turbidez puede ser causada por productos de oxidación, en cuyo caso el número de neutralización probablemente será alto y la tensión interfacial baja. Las partículas de metales, aislamiento, carbono y otras materias se mostrarán de manera muy marcada por la luz reflejada.
- Se informa que el líquido aislante eléctrico está fallando en la prueba si se observa la aparición de cualquier otra condición que no sea clara y brillante.
- Al finalizar la prueba se reporta lo siguiente:
 - o Tipo de líquido aislante.
 - o Descripción de cualquier desviación de perfectamente clara y brillante.
 - o Temperatura aproximada a la que se tomó la muestra.

- o Temperatura aproximada del momento en que se tomó la muestra.

Por último, se toma en cuenta que un aceite en buen estado debe ser brillante y transparente, sin sólidos en suspensión

3.3.2.7. Gravedad específica

Para realizar la prueba se utiliza un hidrómetro de vidrio, graduado en unidades de densidad, densidad relativa o gravedad API, termómetros que tengan intervalos de graduación y errores máximos de escala permitidos. La norma ASTM D-1298 menciona el procedimiento para realizar la prueba de la siguiente forma:

- La temperatura de la muestra debe ser tal que permita que la muestra sea lo suficientemente fluida pero no tan alta ya que causaría la pérdida de componentes livianos, ni tan baja como para resultar en aparición de cera en la muestra.
- Se lleva el cilindro de hidrómetro y el termómetro hasta aproximadamente 5 °C de la temperatura de prueba.
- Se transfiere la muestra al cilindro de hidrómetro limpio, con temperatura estabilizada y sin salpicar, para evitar la formación de burbujas de aire, y minimizar la evaporación de los componentes, se debe tener cuidado ya que los vapores pueden causar fuego en destello.
- Se transfieren las muestras muy volátiles vaciando con sifón o desplazamiento de agua debe tener cuidado ya que el vaciado con sifón por la boca podría resultar en ingestión de la muestra.

- Se remueve cualquier burbuja de aire después que éstas se hayan recopilado en la superficie de la porción de prueba, tocándolas con un pedazo de papel filtro limpio antes de introducir el hidrómetro.
- Se coloca el cilindro que contiene la porción de muestra en una posición vertical en un sitio libre de corrientes de aire y donde la temperatura del medio circundante no cambie más de 2 °C durante el tiempo tomado para completar la prueba. Cuando la temperatura de la porción de prueba difiere por más de 2 °C del ambiente, utilice un baño de temperatura constante para mantener una temperatura uniforme durante la realización de la prueba.
- Se introduce el termómetro o equipo de medición de temperatura apropiado y agite la porción de prueba con una varilla de agitación, usando una combinación de movimientos verticales y giratorios para asegurar temperatura y densidad uniforme a lo largo del cilindro de hidrómetro.
- Se baja el hidrómetro apropiado en el líquido y suéltelo en una posición de equilibrio, teniendo cuidado de evitar mojar el tronco por encima del nivel en el cual flota libremente.
- Se permite tiempo suficiente para que el hidrómetro llegue al reposo, y para que todas las burbujas de aire lleguen a la superficie. Retire cualquier burbuja de aire antes de hacer una lectura.
- Cuando el hidrómetro ha llegado al reposo flotando libremente lejos de las paredes del cilindro, se lee la lectura en la escala del hidrómetro lo más cercano a un quinto de una escala entera de división, esta medición depende si el líquido es transparente u opaco.

- Inmediatamente después de registrar la lectura de la escala del hidrómetro, se levanta con cuidado el hidrómetro fuera del líquido, se inserta el termómetro o equipo de medición de temperatura y se agita la porción de muestra verticalmente con la barra de agitación. Se registra la temperatura de la muestra. Si ésta temperatura difiere de las lecturas anteriores por más de 0,5 °C, se repiten las observaciones del hidrómetro y termómetro hasta que la temperatura se estabilice dentro de 0,5 °C. Si no se obtiene una temperatura estable, se coloca el cilindro de hidrómetro en un baño de temperatura constante y repita el procedimiento.
- Se aplica cualquier corrección la medida del termómetro y el hidrómetro de ser necesario y se reporta el valor final como densidad, en kilogramos por metro cúbico, a la temperatura de referencia, lo más cercano a 0,1 kg/m³.

Nota: el procedimiento antes descrito es un resumen del descrito en la norma ASTM D-1298, por lo que si se desea saber más detalles consultar la norma antes.

3.3.2.8. Número de neutralización o acidez

La norma ASTM D-974 menciona detalladamente todos lo que se debe realizar antes, durante y después de la prueba. Antes de realizar la prueba se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Calentar la muestra de aceite usado a 60 °C ± 5 °C en el recipiente original y agitar hasta que todo el sedimento se suspenda homogéneamente en el aceite. Si el recipiente original es de material opaco, o si está más de tres cuartos lleno, transfiera la muestra completa a una botella de vidrio

transparente que tenga una capacidad de al menos un tercio mayor que el volumen de la muestra, y transfiera todos los rastros de sedimento del recipiente original a la botella.

- o Cuando las muestras están visiblemente libres de sedimentos, se puede omitir el procedimiento de calentamiento descrito.
- o Dado que el aceite usado puede cambiar considerablemente en el almacenamiento, las muestras deben analizarse lo antes posible después de retirarlas del sistema de lubricación y deben anotarse las fechas de muestreo y análisis.

A continuación, se describe el procedimiento para realizar la prueba:

- Se introduce aproximadamente 25 g de una muestra del aceite a ensayar en un embudo separador de 250 ml y agregue 100 ml de agua hirviendo.
- Se agita y drena la fase acuosa en un matraz de valoración de 500 ml.
- Se extrae la muestra dos veces más con porciones de 50 ml de agua hirviendo, agregando ambos extractos al matraz. A los extractos combinados, agregue 0,1 ml de solución indicadora de naranja de metilo y, si la solución se vuelve rosa o roja, se titula con solución de 0,1 M KOH hasta que la solución se vuelva de color marrón dorado. Si el color inicial no es rosa o rojo, informe el número de ácido fuerte como cero.
- Efectuar un ensayo en blanco en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, introduzca 200 ml de la misma agua hirviendo que se usó anteriormente. Agregue 0,1 mL de solución indicadora de metil naranja. Si el color del

indicador es amarillo-naranja, se titula con 0,1 M HCl a la misma profundidad y forma de color obtenida en anterior muestra. Si el color del indicador es rosa o rojo, se titula como solución de 0,1 M KOH hasta el mismo punto final que el utilizado en la muestra anterior.

- Determine el número de acidez utilizando la siguiente formula:

$$\text{Número de acidez, mg de } \frac{\text{KOH}}{\text{G}} = [(A - B)M * 56,1]/W$$

Donde:

- o A: solución de KOH requerida para la muestra
 - o B: solución de KOH requerida para la prueba en blanco
 - o M: factor de solución KOH
 - o W: muestra utilizada en g
- Informe el resultado de la prueba como número de ácido fuerte o número de base de la siguiente manera:
 - o Número ácido (D974) = resultado
 - o Número de ácido fuerte (D974) = resultado
 - o Número base (D974) = resultado

La norma ASTM D-974 describe los valores de número de neutralización para diferentes categorías del aceite.

3.3.2.9. Contenido inhibidor

Para realizar esta prueba existen dos normas cada una utiliza un método diferente.

La norma ASTM D-2668 para realizar la prueba utiliza un espectrómetro infrarrojo para determinar el contenido de inhibidor en el aceite.

La norma ASTM D-4768 basa su método en una cromatografía de gases en el cual se determina el contenido inhibidor de oxidación. Según la norma el valor de inhibidor que debe cumplir un aceite de prueba es de 0,08 % para aceites tipo I y 0,3 % para aceites tipo II.

4. PROBLEMAS DE APLICACIÓN DE CONCEPTOS

En el presente capítulo se presentan problemas de los diferentes temas vistos en los capítulos previos, estos fueron elaborados con ayuda de los libros: *Conversión de Energía Electromecánica* de Vembu Gourishankar, *Máquinas Eléctricas y Transformadores* de Irving Kosow, *Circuitos magnéticos y transformadores* de E.E. STAFF. M.I.T y demás textos descritos en la bibliografía.

4.1. Problemas a cerca de las conexiones de transformadores

Se presentan una serie de problemas de los temas que abarcan las conexiones de un transformador, cada uno; en su respectiva sección.

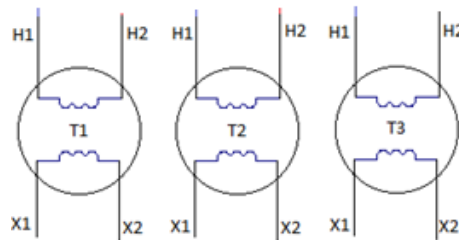
4.1.1. Formas de conexión de los devanados de un transformador

A continuación, se presentan diversos problemas referentes a las conexiones que se dan en los devanados de un transformador.

4.1.1.1. Problemas de aplicación conexión estrella

- Problema 1. Para la figura 106, realice a) una conexión estrella del lado del primario, b) realice el esquema de la conexión.
- Problema 2. De la figura 106, realice nuevamente una conexión estrella, pero con diferentes terminales de los que utilizo en el ejercicio anterior, realice el esquema de esta nueva conexión.

Figura 106. **Figura del problema 1**



Fuente: elaboración propia.

- Problema 3. Un transformador trifásico de 600 kVA, se conecta a una línea de 20 kV, determine la tensión simple del primario y la corriente que absorbe, cuando se conecta en configuración estrella. Indique los valores de línea y fase de la tensión y corriente.
- Problema 4. Una transformado trifásico compuesta por tres transformadores monofásicos con relación 1 000 / 200 V cada uno se conecta en delta del lado primario y estrella del lado del secundario. El conjunto alimenta una carga equilibrada conectada en estrella $2 \angle 45^\circ \Omega/\text{fase}$. Determine las corrientes del lado del secundario.

4.1.1.2. **Problemas de aplicación conexión delta**

- Problema 5. Para la figura 106, realice a) una conexión delta del lado del primario, b) realice el esquema de la conexión.
- Problema 6. De la figura 106, realice nuevamente una conexión delta, pero uniendo diferentes terminales de los que utilizo en el ejercicio anterior, realice el esquema de esta nueva conexión.

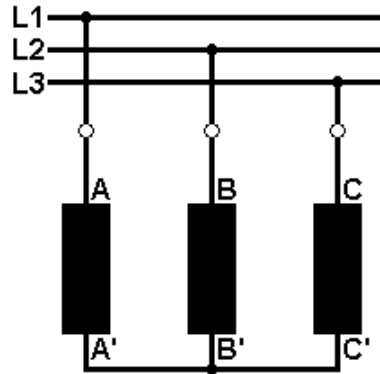
- Problema 7. Un transformador trifásico de 500 kVA, se conecta a una línea de 10 kV, determine la tensión simple del primario y la corriente que absorbe, cuando se conecta en configuración delta Indique los valores de línea y fase de la tensión y corriente.
- Problema 8. Una transformado trifásico compuesta por tres transformadores monofásicos con relación 1 000 / 200 V cada uno se conecta en estrella del lado primario y delta del lado del secundario. El conjunto alimenta una carga equilibrada conectada en estrella $2 \angle 45^\circ \Omega/\text{fase}$. Si la tensión simple secundaria es igual a 200 V, determine los voltajes y corrientes del lado del secundario.

4.1.1.3. Problemas para otras conexiones

- Problema 9. Realizar una conexión Yz_1 , tomando como base la estrella del lado del primario como se muestra en la figura 107.
- Problema 10. Realice nuevamente una conexión Yz_1 , pero con diferentes conexiones del lado del secundario de las usadas en el problema 9; tome como base en la estrella del primario la figura 107.
- Problema 11. Realice una conexión Yd_0 , y determine si esta se puede realizar utilizando solamente un tipo de conexión del lado del secundario o si es posible obtenerla de distintas formas de conexión.
- Problema 12. Determine si las figuras pertenecientes a la figura 109 poseen el mismo índice horario. De no ser así identifique el índice horario de cada una.

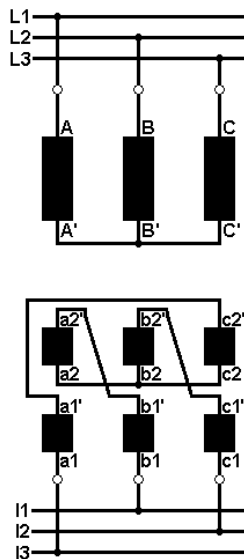
- Problema 13. Determine el índice horario de la figura 108.

Figura 107. **Esquema del problema 9**



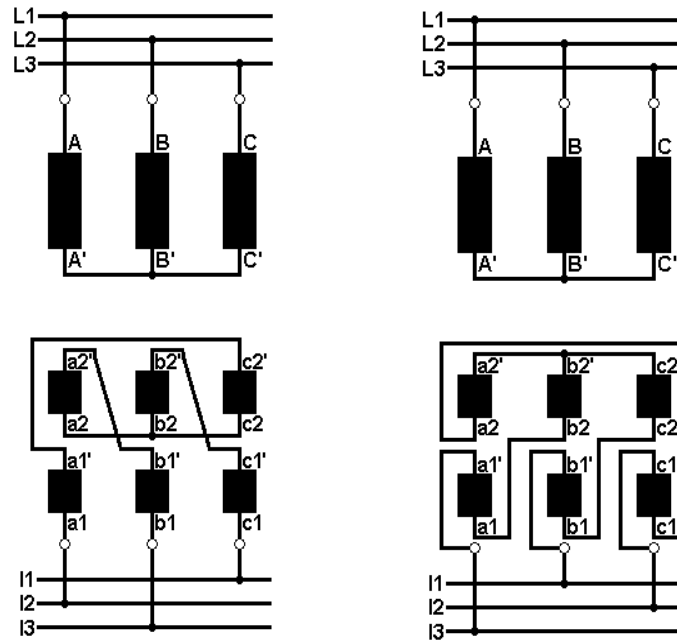
Fuente: elaboración propia.

Figura 108. **Conexión del problema 12**



Fuente: elaboración propia.

Figura 109. **Conexiones del problema 13**



Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Polaridad de los transformadores

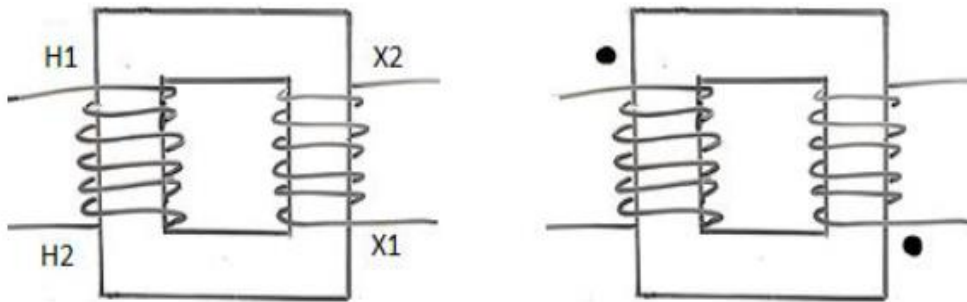
A continuación, se presentan diversos problemas referentes a la polaridad de un transformador.

4.1.2.1. Problemas de aplicación polaridad aditiva

- Problema 14. Los transformadores de la figura 110 se necesita conectar en paralelo, tomando en cuenta su polaridad es posible conectarlos.
- Problema 15. Para un transformador de polaridad aditiva ¿cómo deben estar arrollados sus devanados?

- Problema 16. ¿Cómo se comportan los flujos en un transformador con polaridad aditiva?

Figura 110. **Esquemas para el problema 14**



Fuente: elaboración propia.

- Problema 17. Si los terminales de diversos arrollamientos de un transformador no están identificados, ¿se les puede conectar juntos para elevar el voltaje?

4.1.2.2. Problemas de aplicación polaridad sustractiva

- Problema 18. Para un transformador de polaridad sustractiva ¿cómo deben estar arrollados sus devanados?
- Problema 19. Para los transformadores de la figura 110 identifíquelos con polaridad sustractiva, e identifica el sentido de las corrientes en ambos devanados tal que cumplan con la polaridad sustractiva.

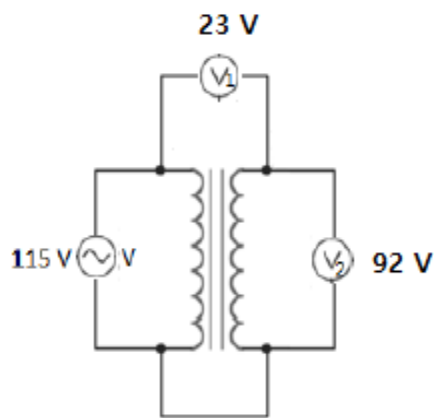
- Problema 20. ¿Cómo se comportan los flujos en un transformador con polaridad sustractiva?
- Problema 21. ¿Qué sucede con el voltaje del secundario con respecto al primario en un transformador con polaridad sustractiva?
- Problema 22. Dos de cuatro terminales del secundario de un transformador están marcados con un punto. Si a esos dos terminales se les conecta juntos, los arrollamientos esta:
 - o Conectados en serie sustractiva
 - o Conectados en serie aditiva
 - o Conectados para incrementar el voltaje
 - o B y c

4.1.2.3. Problema aplicado al chequeo de polaridad

- Problema 23. Por medio del cheque de polaridad, determine la polaridad del transformador con los valores de la figura 111.
- Problema 24. Que otro método hay para determinar la polaridad de un transformador, aparte del descrito en la sección 2, de una breve descripción.
- Problema 25. Para conectar correctamente los arrollamientos de un transformador para elevar el voltaje es necesario conocer:

- o Sus características
- o La corriente máxima del arrollamiento
- o El tipo de material del núcleo
- o Conocer la polaridad de los arrollamientos

Figura 111. **Esquema para el problema 23**



Fuente: elaboración propia.

- Problema 26. ¿Porque considera que es necesario marcar los terminales de un transformador? ¿Qué sucedería si no se marcarán?
- Problema 27. ¿Cuándo se dice que dos flujos son aditivos?
- Problema 28. ¿Cuándo se dice que dos flujos son sustractivos?

- Problema 29. ¿Qué se debe hacer si en un transformador tenemos polaridad aditiva, pero requerimos polaridad sustractiva?

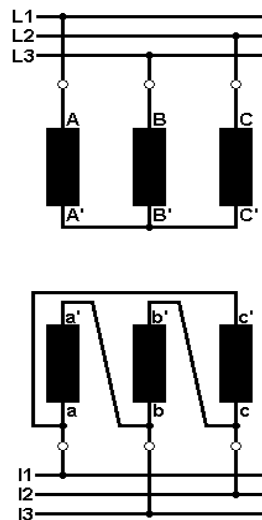
4.1.3. Índice horario

A continuación, se presentan diversos problemas referentes a índice horario en los cuales puede ser aplicado el método del reloj u otro método para su verificación.

4.1.3.1. Problemas de aplicación método del reloj

- Problema 30. Utilizando el método del reloj, realice una conexión Yd_5 .

Figura 112. Conexión para el problema 31



Fuente: elaboración propia.

- Problema 31. Con ayuda del método del reloj, determine el índice horario de la conexión representada en figura 112.

- Problema 32. Realice una conexión Dy_5 utilizando el método del reloj y con los transformadores en polaridad aditiva.
- Problema 33. Realice una conexión Dy_4 utilizando el método del reloj y con los transformadores en polaridad sustractiva.

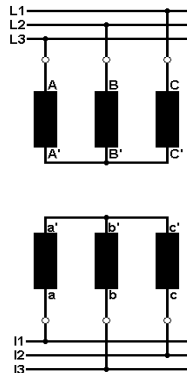
4.1.4. Tipos de conexión de los transformadores

A continuación, se presentan diversos problemas referentes a las conexiones que se realizan en los devanados de los transformadores trifásicos para su funcionamiento en un sistema de potencia.

4.1.4.1. Problemas de aplicación conexión estrella-estrella

- Problema 34. Realice una conexión Yy_2 , con los transformadores en polaridad sustractiva.

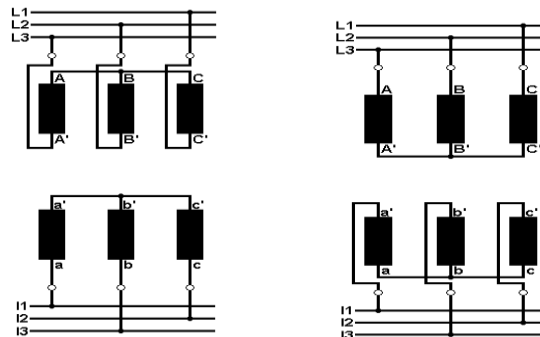
Figura 113. Esquema para el problema 36



Fuente: elaboración propia.

- Problema 35. Obtenga dos tipos de conexión en el cual el resultado sea una conexión Yy_4 .
- Problema 36. Para la figura 113, se desconoce el índice horario de la conexión, determínela.
- Problema 37. En la figura 114 se representan dos conexiones, determine si estas poseen el mismo índice horario; de no ser así identifique el índice horario que poseen.

Figura 114. Diagrama para el problema 37



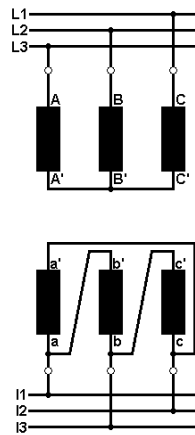
Fuente: elaboración propia.

4.1.4.2. Problemas de aplicación conexión estrella-delta

- Problema 38. Realice una conexión Yd_3 , con los transformadores en polaridad sustractiva.
- Problema 39. Obtenga dos tipos de conexión en el cual el resultado sea una conexión Yd_{11} .

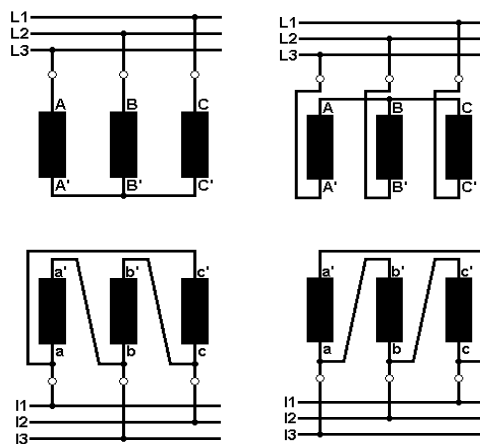
- Problema 40. Para la figura 115, se desconoce el índice horario de la conexión, determínala.

Figura 115. **Esquema para el problema 40**



Fuente: elaboración propia.

Figura 116. **Diagramas para el problema 41**



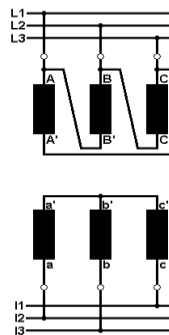
Fuente: elaboración propia.

- Problema 41. En la figura 116 se representan dos conexiones, determine si estas poseen el mismo índice horario; de no ser así identifique el índice horario que poseen.

4.1.4.3. Problemas de aplicación conexión delta-estrella

- Problema 42. Realice una conexión Dy_5 , con los transformadores en polaridad sustractiva.
- Problema 43. Obtenga dos tipos de conexión en el cual el resultado sea una conexión Dy_3 .
- Problema 44. La figura 117 posee un índice horario Dy_9 , mueva de lugar las líneas del lado del primario para obtener un Dy_5 , sin mover nada del lado del secundario.

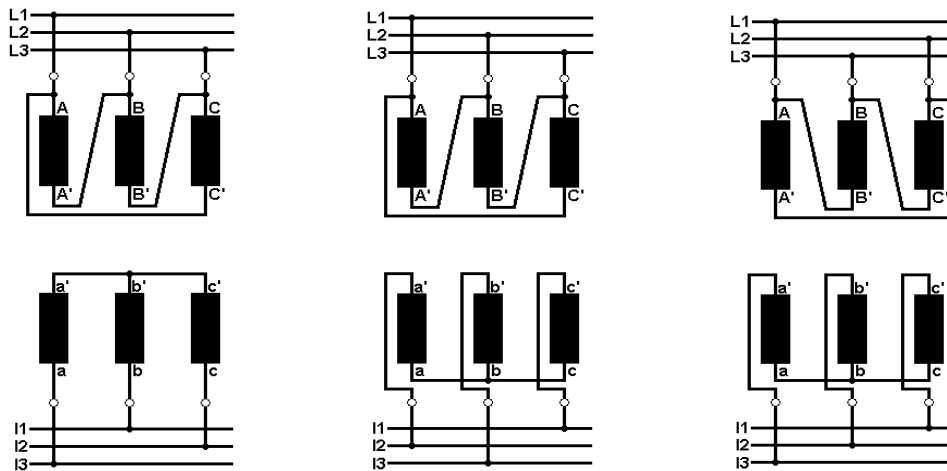
Figura 117. Diagrama para el problema 44



Fuente: elaboración propia.

- Problema 45. Determine el índice horario de los diagramas de la figura 118.
- Problema 46. ¿Por qué en una configuración delta-estrella el voltaje de secundario sale desplazado 30° respecto al voltaje primario?

Figura 118. Diagramas para el problema 45



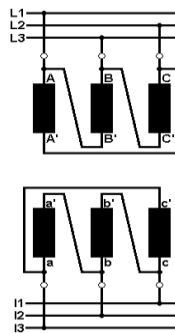
Fuente: elaboración propia.

4.1.4.4. Problemas de aplicación conexión delta-delta

- Problema 47. Realice una conexión Dd_0 , con los transformadores en polaridad sustractiva.
- Problema 48. Obtenga dos tipos de conexión en el cual el resultado sea una conexión Dd_8 .

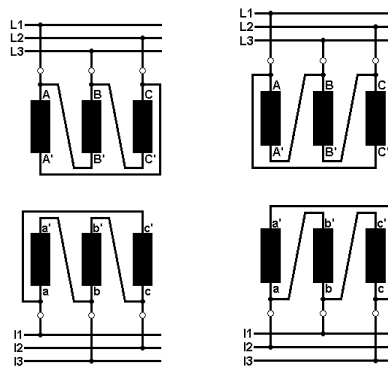
- Problema 49. Para la figura 119, se desconoce el índice horario de la conexión, determínela.
- Problema 50. En la figura 120 se representan dos conexiones, determine si estas poseen el mismo índice horario; de no ser así identifique el índice horario que poseen.

Figura 119. **Esquema para el problema 49**



Fuente: elaboración propia.

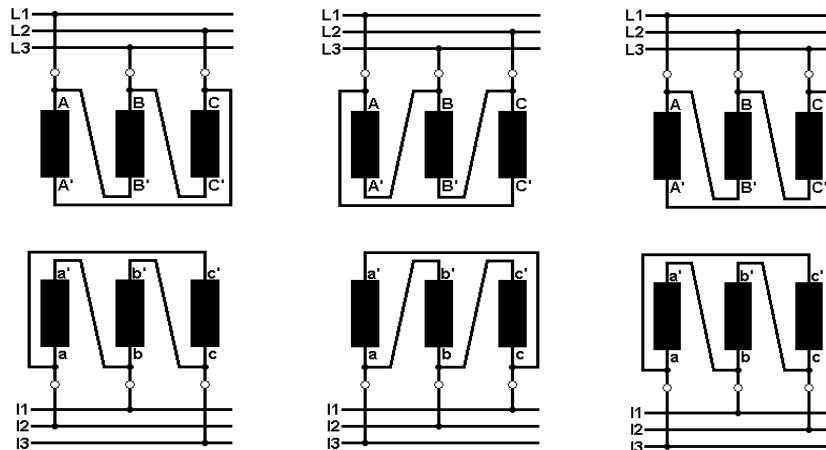
Figura 120. **Diagramas para el problema 50**



Fuente: elaboración propia.

- Problema 51. Determine el índice horario de los diagramas de la figura 121.

Figura 121. Diagramas para el problema 51



Fuente: elaboración propia.

4.1.4.5. Problemas de aplicación conexiones de finalizada especial

- Problema 52. ¿Cómo se puede lograr la transformación trifásica utilizando solo dos transformadores?
- Problema 53. ¿Qué tipo de conexiones hay para realizar una transformación trifásica usando solo dos transformadores?
- Problema 54. Describa algunas ventajas y desventajas de la transformación trifásica utilizando solo dos transformadores.

- Problema 55. Explique por qué una conexión delta abierta está limitada a suministrar solo 57 % de la carga de un banco de transformadores delta-delta normal.
- Problema 56. ¿En que difiere un sistema bifásico de uno trifásico?
- Problema 57. ¿Cuál es la relación entre los voltajes de línea y de fase en un sistema bifásico?
- Problema 58. ¿Si solo se usa un transformador ¿Es posible transformador un sistema bifásico en un sistema de seis fases? Explicar la respuesta.
- Problema 59. Trazar una transformación Scott que muestre una transformación de 3 a 2 fases con 5 conductores en el que las relaciones de voltaje de fase a fase sean 120 / 120 V.
- Problema 60. Una planta industrial se alimenta con un banco de transformadores delta-delta con una capacidad de 20 kVA cada uno, 2300 / 230. El banco abastece una carga de 40 kVA con F_p 0,7 en retraso. Si se saca un transformador averiado para su reparación determinar para una conexión V-V:
 - o La carga en kVA que tiene cada transformador.
 - o El por ciento de la carga nominal que tiene cada transformador.
 - o La carga total nominal de kVA del banco de transformadores V-V.
 - o La relación de capacidad del banco V-V a la del banco delta-delta.

- o El aumento porcentual de carga en cada transformador restante al sacar un transformador.
- Problema 61. Un motor trifásico de inducción de jaula de 100 hp, 440 V, que tiene un FP de 0,8 se va a trabajar con un suministro de 155 / 110 V bifásico. Suponiendo que los transformadores que se seleccionen tienen una eficiencia de 98 por ciento a plena carga y la corriente de línea para el motor es 155 A, determinar:
 - o La relación de transformación.
 - o La corriente en el primario de los transformadores de Scott.
 - o Los kVA de los transformadores principal (T1) y desenredo(T2), figura 41.

4.1.5. Análisis comparativo entre las conexiones

A continuación, se presentan diversos problemas o preguntas en donde se aplican los conocimientos adquiridos en las diferentes conexiones, cuando es conveniente usar una u otra.

4.1.5.1. Preguntas de aplicación referentes a las ventajas y desventajas entre los tipos de conexión de los transformadores

- Problema 62. ¿Cuáles son los problemas asociados a una conexión Y-Y de un transformador trifásico?

- Problema 63. Dé tres motivos para hacer una conexión de neutro siempre que se tenga un banco en estrella.
- Problema 64. ¿Es posible tener un neutro en un sistema delta-delta?
- Problema 65. Mencione tres objetivos del empleo de devanados terciarios en transformadores de transmisión y distribución de potencia.
- Problema 66. ¿Por qué nunca se conecta a tierra el primario de un banco en delta, con una fuente trifásica de cuatro conductores?
- Problema 67. ¿Por qué siempre se conectan los devanados terciarios en malla?
- Problema 68. ¿Cómo reduce el devanado terciario los desequilibrios de cargas conectadas en estrella?
- Problema 69. ¿Qué tipo de transformador nunca se fabrica con devanado terciario?
- Problema 70. ¿Por qué siempre suman cero las corrientes de línea de un sistema delta-delta?
- Problema 71. ¿Qué método permite sacar conductor central y aterrizarlo en las tres fases secundarias?
- Problema 72. ¿Por qué no es posible poner el transformador en corto cuando se usa el método que se describe en el problema 71?

- Problema 73. ¿Para qué se emplea la conexión delta-estrella en un sistema de potencia?
- Problema 74. ¿Es la más empleadas, se utiliza en los sistemas de potencia para elevar voltajes de generación o de transmisión, en los sistemas de distribución (a 4 hilos) para alimentación de fuerza y alumbrado?
- Problema 75. ¿Qué tipo de conexión es utilizada cuando se necesitan mínimas interferencias en el sistema?

4.2. Autotransformadores

Para un autotransformador se aplican diferentes procedimientos para determinar sus parámetros como un transformador convencional, para esto se presentan diversos problemas en los que se debe aplicar lo aprendido en la sección de autotransformadores en el capítulo 2.

4.2.1. Aspectos constructivos

A continuación, se presentan diversos problemas en los que se debe emplear los cálculos que se asocian a un autotransformador.

4.2.1.1. Problemas de aplicación de un autotransformador elevador

- Problema 76. Se emplea un transformador de 10 000 / 1 000 V con corrientes en primario y secundario 5 A y 10 A respectivamente; este se conecta para que funcione como un autotransformador elevador, para este determine: a) los voltajes del primario y secundario del autotransformador,

b) la relación de transformación, c) las corrientes que circulan en el autotransformador.

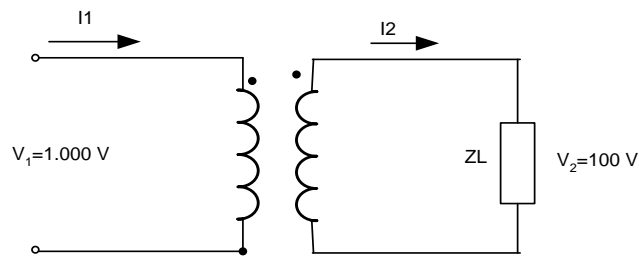
- Problema 77. Un transformador de 10 kVA y 480 / 120 V se desea conectar como autotransformador elevador en el que el voltaje del secundario debe ser 600 V. determine los parámetros de voltajes y corrientes del autotransformador.
- Problema 78. Se emplea un autotransformador de subida para abastecer 3 kV a partir de una línea de suministro de 2,4 kV. Si la carga en el secundario es de 50 A, desprecie las pérdidas y la corriente de magnetización, determine: a) las corrientes de cada parte del autotransformador, b) la corriente que se toma del suministro de 2,4 kV.

4.2.1.2. Problemas de aplicación de un autotransformador reductor

- Problema 79. Repita el problema 77 pero ahora el autotransformador se conecta como para que funcione como reductor a 360 V del lado del secundario.
- Problema 80. Considere el transformador de la figura 122; con valores de corriente en primario y secundario de 1 A y 10 A, respectivamente; determina las corrientes que circulan en el autotransformador, el voltaje en el devanado serie y común.
- Problema 81. Suponga que el autotransformador del problema 78 ahora se quiere conectar como autotransformador reductor para alimentar una carga de 2 kV, utilizando los mismos datos determine: a) las corrientes de

cada parte del autotransformador, b) la corriente que se toma del suministro de 2,4 kV.

Figura 122. Diagrama para el problema 80



Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Problemas referentes al circuito equivalente

- Problema 82. Los ensayos clásicos en cortocircuito y en circuito abierto realizados sobre un transformador de dos devanados de 100 kVA, 60 Hz, 4 400 / 2 200 V se muestran en la tabla XV, si se conecta este transformador como autotransformador determine: a) el circuito equivalente referido al primario, b) su potencia nominal

Tabla XV. Datos del problema 82

Ensayo de corto circuito, devanado de alta tensión			
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Potencia
60 Hz	228 V	22,8 A	1 300 W
Ensayo de circuito abierto, devanado de baja tensión excitado			
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Potencia
60 Hz	2 200 V	1,08 A	525 W

Fuente: elaboración propia.

- Problema 83. Se realiza una prueba a un transformador de distribución de 50 kVA, 2000 / 480 V y 60 Hz y se obtiene los datos de la tabla XVI. Este transformador se conecta como autotransformador reductor, para este determine el circuito equivalente aproximado (desprecie la rama en paralelo).

Tabla XVI. **Datos para el problema 83**

Ensayo de corto circuito, devanado de alta tensión			
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Potencia
60 Hz	1 130 V	1,30 A	550 W
Ensayo de circuito abierto, devanado de baja tensión excitado			
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Potencia
60 Hz	480 V	4,1 A	620 W

Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Preguntas de aplicación de las ventajas y desventajas de un autotransformador frente a un transformador

- Problema 84. ¿Cuál es la finalidad de usar un autotransformador?
- Problema 85. Para un autotransformador ¿Considera que las pérdidas eléctricas son menores a las pérdidas magnéticas? ¿Por qué si o por qué no?
- Problema 86. ¿Por qué en un autotransformador, en caso de corto circuito la corriente es elevada? Porque tiene una tensión de cortocircuito pequeña.

- Problema 87. ¿Cuál es la ventaja de valor nominal de la potencia aparente de los autotransformadores?
- Problema 88. Explique algunas ventajas y desventajas del autotransformador.
- Problema 89. ¿En dónde se utilizan los autotransformadores?
- Problema 90. ¿Qué tipos de pérdida se presentan en un autotransformador?
- Problema 91. ¿Por qué los autotransformadores pueden manejar más potencia que los transformadores convencionales del mismo tamaño?
- Problema 92. ¿La impedancia de entrada del autotransformador es menor que la de un transformador convencional? ¿Por qué sí o por qué no?

4.2.4. Problema de aplicación referente a los cálculos asociados a un autotransformador

- Problema 93. Un transformador de dos embobinados de 2 kVA, 400 / 100 V, 50 Hz. se va a conectar como autotransformador para transformar 500 V a 400 V. ¿Cuáles son los voltamperes máximos de salida que el transformador puede entregar trabajando como autotransformador sin exceder las corrientes y voltajes nominal de los dos bobinados?
- Problema 94. Para el problema 93 suponga que el transformador es ideal, determine los voltamperes entregados por acción del autotransformador y los voltamperes entregados a una carga por conducción directa.

- Problema 95. Para el autotransformador que se da en el problema 78 determine: a) los kVA nominales del autotransformador, b) los kVA nominales de un transformador convencional equivalente de dos devanados, necesario para llevar a cabo la misma transformación que el autotransformador.
- Problema 96. Para el autotransformador que se da en el problema 78 determine: a) la potencia que se transfiere del primario al secundario, b) la potencia que se transfiere por conducción del primario al secundario, con la carga nominal y FP unidad

4.2.5. Problemas y preguntas de aplicación de las pérdidas y rendimiento del autotransformador

- Problema 97. Un transformador de 5 kVA, 100 / 200 V se conecta como autotransformador para transformar 200 a 300 V. Si la eficiencia nominal del transformador de dos bobinados es de 95 % cuando el factor de potencia de la carga es la unidad, determinar su eficiencia como autotransformador cuando está entregando su salida máxima segura a factor de potencia unitario.
- Problema 98. Un autotransformador de 25 kVA, 60 Hz, 660 / 220 V, al excitar su lado de alta tensión con 27,6 V estando cortocircuitados sus terminales de baja tensión, consume la corriente nominal del primario con una potencia de entrada de 320 W. Su pérdida en el núcleo a la tensión nominal es de 360 W. determine: a) si se utiliza el transformador para alimentar una carga inductiva de 220 V, 25 kVA y factor de potencia 0,90 determinar su tanto por ciento de regulación y su rendimiento, b) si se volviera a conectar el transformador de manera que sus tensiones

nominales fueran 660 / 440 V, ¿cuál sería su potencia nominal y su regulación y rendimiento cuando se alimenta la carga nominal con el factor de potencia del inciso a)?

4.3. Preguntas referentes a los protocolos de prueba en un transformador

Se dan una serie de preguntas de los temas que abarcan las pruebas eléctricas que se realizan a un transformador previo a ponerlo en funcionamiento y pasado cierto tiempo se le deben realizar estas mismas pruebas. También se incluyen las pruebas más conocidas que se le realizan al aceite dieléctrico.

4.3.1. Pruebas eléctricas

A continuación, se presentan diversas preguntas de las pruebas eléctricas que se le realizan a un transformador, divididas cada una; en su respectiva prueba.

4.3.1.1. Prueba de corriente de excitación

- ¿Cuál el objetivo de realizar la prueba de corriente de excitación?
- ¿Por qué es importante tomar en cuenta el magnetismo residual que se da en el transformador para realizar esta prueba?
- ¿Cuál es el equipo utilizado en esta prueba (según este texto)?
- Si no se sabe el valor de la tensión a la que se debe realizar la prueba, ¿Cuál es la tensión que se debe utilizar?

- ¿En qué devanado se realiza la prueba de corriente de excitación?
- ¿Qué significado tiene obtener una corriente excesiva en la prueba?
- Si al término de la prueba se carece de datos anteriores que determine el estado del transformador. ¿Qué se debe hacer para saber el estado del mismo?
- ¿En una conexión estrella el devanado bajo prueba debe ser sometido a una tensión que no exceda el voltaje line a neutro? ¿Por qué sí o por qué no?
- ¿En una conexión delta el devanado bajo prueba debe ser sometido a una tensión que no exceda el voltaje line a línea? ¿Por qué sí o por qué no?
- Investigue que otros métodos hay para realizar la prueba de corriente de excitación.

4.3.1.2. Prueba de relación de transformación

- ¿Cuál es el objetivo de realizar la prueba de relación de transformación?
- ¿La prueba de relación de transformación debe realizarse con o sin carga?
- ¿En esta prueba se obtiene el número de vueltas que poseen los devanados?
- ¿Cuánto es el porcentaje de desviación que deben poseer los voltajes medidos respecto a los de la placa del transformador?

- Si un transformador posee taps, ¿de qué forma se realiza la prueba de relación de transformación?
- ¿Cuáles son los métodos utilizados para la prueba de relación de transformación?
- Dé una breve descripción de los métodos descritos en la pregunta anterior.
- Mencione algunos factores que puedan afectar la prueba de relación de transformación.

4.3.1.3. Prueba de polaridad

- ¿Cuál es el objetivo de realizar la prueba de polaridad?
- Según la norma IEEE C57.12.90, ¿cuáles son los métodos para realizar la prueba de polaridad?
- ¿Qué instrumentos se utilizan para realizar la prueba de polaridad por el método de impulso inductivo?
- Mencione algunos aspectos importantes del porque es necesario conocer la polaridad de un transformador.
- Dibuje el esquema que se utiliza para realizar la prueba por medio del método de tensión alterna.
- ¿En qué consiste el método de comparación?

- En el método de prueba inductiva cuando el puntero oscila en la dirección opuesta a la de la prueba, ¿qué polaridad se tiene?

4.3.1.4. Prueba de resistencia de los devanados

- ¿En esta prueba se verifica el componente de caída de voltaje por resistencia y la elevación de temperatura bajo carga?
- ¿Por medio de esta prueba se puede verificar que las conexiones internas de los devanados estén bien hechas?
- ¿Para qué se realiza la prueba de resistencia de los devanados?
- ¿Es necesario tomar la temperatura durante la prueba? ¿Por qué si o por qué no?
- Para evitar riesgos por voltajes inducidos durante la prueba, ¿qué se debe hacer?
- ¿Qué instrumentos se utilizan en esta prueba? Fuente de corriente directa, voltímetros y amperímetros.
- ¿Qué métodos hay para realizar esta prueba?
- ¿Cuál es el porcentaje que no debe diferir la medición de todas las fases?
- ¿Por qué motivo en algunos casos se debe realizar una corrección de temperatura para esta prueba?

4.3.1.5. Prueba de vacío

- ¿Cuál es el objetivo de realizar la prueba de vacío?
- ¿Cuáles son las pérdidas que se dan en vacío dentro del transformador?
- Dé una breve explicación de las pérdidas de la pregunta anterior.
- ¿En esta prueba se determina la rama en serie correspondiente al circuito equivalente del transformador?
- ¿A qué valor de tensión se realiza esta prueba?
- ¿A qué pérdidas corresponde la potencia absorbida durante la prueba de vacío?

4.3.1.6. Prueba de corto circuito

- ¿Cuál es el objetivo de realizar la prueba de cortocircuito?
- ¿Qué rama del circuito equivalente del transformador se determina por medio de esta prueba?
- ¿A qué valor de tensión se realiza esta prueba?
- ¿A qué pérdidas corresponde la potencia absorbida durante la prueba de vacío?
- ¿Por qué se desprecian las pérdidas en el hierro en esta prueba?

- Mencione algunos factores que puedan afectar esta prueba.
- ¿Qué devanado del transformador es recomendado para realizar esta prueba?

4.3.1.7. Prueba de sonido audible

- ¿Cuál es el objetivo de realizar la prueba de sonido audible a un transformador?
- ¿Qué instrumento se utiliza para realizar la prueba de sonido audible?
- ¿Cuántos decibeles debe haber en el ambiente donde se realiza la prueba?
- ¿En qué caso es necesario realizar una corrección para el nivel de ruido?
- ¿Por qué se emplean los tercios de octavas para la prueba de sonido audible en un transformador?
- Si la prueba se realiza cerca de superficies reflejantes de sonido, ¿a qué distancia de las superficies debe estar el transformador?

4.3.1.8. Prueba de factor de potencia a los aislamientos

- ¿Cuál es el objetivo de realizar la prueba de factor de potencia a los aislamientos de un transformador?

- ¿Cuál es la temperatura de referencia aproximada para realizar la prueba?
- ¿El factor de potencia es la relación entre el producto de la tensión efectiva y la potencia disipada en el aislamiento?
- ¿A qué temperatura es recomendable realizar la prueba?
- ¿De qué factores depende la corrección de temperatura para esta prueba?
- ¿A qué frecuencia se debe realizar la prueba?
- ¿A qué valor de tensión se realiza la prueba?
- A su criterio, ¿qué factores podrían afectar la prueba? suciedad, humedad relativa, temperatura.
- Investigue que equipos se utilizan para realizar la prueba de factor de potencia a los aislamientos.

4.3.2. Pruebas al aceite dieléctrica

A continuación, se presentan diversas preguntas de las pruebas que se realizan al aceite dieléctrico de un transformador, divididas cada una; en su respectiva prueba.

4.3.2.1. Rigidez dieléctrica

- ¿Qué se entiende por rigidez dieléctrica del aceite?

- ¿Qué información se obtiene al realizar esta prueba al aceite?
- ¿Qué elementos componen el medidor de rigidez dieléctrica?
- ¿Qué normas se aplican para la rigidez dieléctrica del aceite?
- Indique la forma que tienen los electrodos según las normas de la pregunta anterior.
- Indique la norma en la cual el voltaje se aplica en crecimiento de 3 kV/seg.
- ¿Qué norma, dentro de su método, utiliza un agitador y porque se utiliza?
- Dentro de una prueba realizada a un aceite de un transformador de una subestación se encontró que el valor de rigidez dieléctrica es de 15,5 kVA. Según la norma de la pregunta anterior, ¿es necesario cambiar el aceite?
- En esta norma el voltaje se aplica en crecimiento de 0,5 kV/seg.
- Mencione algunos aspectos que se deben tener en cuenta previo a realizar la prueba de rigidez dieléctrica.

4.3.2.2. Tensión interfacial

- ¿Qué se entiende por tensión interfacial del aceite?
- ¿Qué normas se aplican para determinar la tensión interfacial del aceite?
- ¿Cuál es el objetivo de realizar esta prueba al aceite del transformador?

- ¿La oxidación formada por el envejecimiento de los compuestos polares aumenta o disminuye la tensión interfacial de aceite?
- ¿Cuáles son los métodos que determinan la tensión interfacial del aceite?
- Si se tiene una alta tensión interfacial se dice que se tiene:
 - o Poca rigidez dieléctrica
 - o Elevada rigidez dieléctrica
 - o Contenido de humedad bajo
 - o Contenido de humedad alto
- ¿A qué norma pertenece el método del anillo?
- Nombre del equipo utilizado para realizar esta prueba:
 - o Densímetro
 - o Tensiómetro
 - o Óhmetro
 - o Megger
- Mencione algunos aspectos que se deben tener en cuenta previo a realizar la prueba de rigidez dieléctrica.

4.3.2.3. Factor de potencia

- ¿Cuál es el objetivo de realizar la prueba de factor de potencia al aceite del transformador?
- ¿Qué pérdidas del aceite se obtiene al realizar esta prueba?
- ¿Qué efectos se producen en un líquido dieléctrico (aceite) cuando se somete a campos de corriente alterna?
- ¿Qué norma se aplica a la prueba del factor de potencia?
- ¿A este valor de temperatura, es más sensible los pequeños cambios que se presenten en las características del aceite?
 - o 100 °C
 - o 25 °C
 - o 20 °C
- ¿A qué temperatura se realiza la prueba?
 - o 100 °C
 - o 25 °C
 - o 20 °C

- En esta prueba ¿A qué se le conoce como celda de prueba?

4.3.2.4. Color

- ¿Cuál es el objetivo de realizar la prueba de color al aceite del transformador?
- ¿Qué nombre recibe el equipo utilizado en esta prueba?
- Según la norma de la pregunta anterior, el color determina:
 - o La calidad del aceite
 - o El estado del aceite
 - o El estado de refinación
 - o Cantidad de partículas presentes en el aceite
- Un incremento en el color del aceite indica:
 - o La calidad del aceite
 - o El estado del aceite
 - o Contaminantes presentes
 - o El estado de refinación

- ¿Qué norma se aplica a la prueba de color?
- EL color del aceite esta expresado por medio de:
 - o Una letra
 - o Un numero
- ¿En esta prueba se determina la calidad del aceite?
- Cuál de las siguientes nomenclaturas es la correcta para dar el resultado de la prueba de color:
 - o Color 7,5 ASTM
 - o Color ASTM 7,5
 - o Color 7,5
- ¿Cómo se le llama al objeto utilizado para comparar la muestra obtenida en la prueba?
- Dentro de una prueba realizada a un aceite de un transformador de una subestación se encontró que el color del aceite fue un amarillo brillante; en estas condiciones, ¿es necesario cambiar el aceite?
- Cuál de las siguientes nomenclaturas es la correcta para dar el resultado de la prueba de color, si este está entre dos colores del colorímetro:

- o Color L7,5 ASTM
- o Color ASTM L7,5
- o Color D8 ASTM
- o Color ASTM D8

4.3.2.5. Contenido de humedad

- ¿Cuál es el objetivo de realizar la prueba de humedad al aceite del transformador?
- Un aumento de humedad en el aceite hace que:
 - o Aumente la rigidez dieléctrica
 - o Disminuye la rigidez dieléctrica
 - o Eleva la tensión interfacial
 - o Disminuye la tensión interfacial
 - o Ninguna de las anteriores
- ¿Qué norma se aplica a la prueba de contenido de humedad?
- ¿Cuál es el método de prueba en el cual se basa la norma de la pregunta anterior?

- Mencione algunos aspectos que se deben tener en cuenta previo a realizar la prueba de rigidez dieléctrica.
- Según la tensión del transformador, cuanto es la cantidad de agua que debe poseer un transformador con tensión de 30 kV:
 - o 35 ppm
 - o 25 ppm
 - o 20 ppm
- ¿Nombre del instrumento utilizado en la prueba?
- La cantidad de agua presente en un transformador puede estar dada por:
 - o Porcentaje de humedad por peso seco
 - o Porcentaje de saturación

4.3.2.6. Inspección visual

- ¿Cuál es el objetivo de realizar la prueba de inspección visual al aceite del transformador?
- Considera que la apariencia que posee un aceite está relacionada con el grado de deterioro de este, ¿por qué sí o por qué no?

- ¿Qué efectos contribuyen a la presencia de impurezas, partículas sólidas, lodos, entre otros, dentro del aceite?
- ¿Qué norma se aplica a la prueba de contenido de humedad?
- Según la norma de la pregunta anterior, ¿qué elementos se utilizan para realizarla prueba?
- La turbidez en el aceite denota:
 - o Humedad en suspensión
 - o Lodos
 - o Oxidación
 - o Presencia de partículas
- ¿Qué aspectos debe presentar un aceite en buen estado tomando en cuenta solamente la inspección visual?

4.3.2.7. Gravedad específica

- ¿Qué es la gravedad específica del aceite?
- ¿Cuál es el objetivo de realizar la prueba de gravedad específica aceite del transformador?

- ¿Qué factores afectan a la gravedad específica del aceite? Presencia de agua, sedimentos, el medio ambiente.
- ¿Qué instrumento se utiliza para realizar la prueba?
 - o Densímetro
 - o Tensiómetro
 - o Óhmetro
 - o Hidrómetro
- ¿Qué norma se aplica para la prueba de gravedad específica del aceite?
- Según la norma de la pregunta anterior, la densidad es un indicador de:
 - o La calidad del aceite
 - o Presencia de sedimentos
 - o El color del aceite
 - o El tipo de aceite
 - o Ninguna de la anteriores
- ¿Qué sucedería si la temperatura de la prueba fuera muy alta?

- ¿Qué sucedería si la temperatura de la prueba fuera muy baja?
- Cuando los climas son fríos ¿Esta prueba determina la formación de hielo en el aceite?

4.3.2.8. Número de neutralización o acidez

- ¿Qué se entiende por acidez del aceite?
- ¿Cuál es el objetivo de realizar la prueba de numero de neutralización al aceite del transformador?
- ¿La capacidad dialéctica del aceite se ve afectada debido a la acidez?
¿Por qué si por qué no?
- ¿En qué unidades se expresa el contenido de acidez? Miligramos de óxido de potasio (KOH)
- Mencione algunos aspectos que se deben tomar previo a realizar la prueba.
- Dentro de una prueba realizada a un aceite de un transformador de una subestación se encontró que el número de neutralización fue de 0,5, en estas condiciones, ¿cuál es el estado del aceite; es necesario cambiar el aceite?
- La formación del lodo comienza cuando la acidez del aceite esta entre valore de (mgKOH/gr):

- o 0,05 y 0,01
- o 0,005 y 0,1
- o 0,1 y 0,2

4.3.2.9. Contenido inhibidor

- ¿Qué se entiende por contenido de inhibidor del aceite?
- ¿Cuál es la función de los antioxidantes del aceite dieléctrico?
- ¿Con el paso del tiempo la cantidad de inhibidores en el aceite disminuye o aumenta?
- Cuando el aceite sufre deterioros afectado su contenido de inhibidores; para este caso, ¿es posible recuperarlo o se desecha?
- ¿Qué normas se aplican a esta prueba?
- De las normas de la pregunta anterior, ¿en cuál de estas utiliza un espectrómetro para realizar la prueba?
- Según la norma ASTM D-4768, ¿qué equipo se utiliza para realizar la prueba?
- La tasa de consumo de los inhibidores del aceite depende de:
 - o Cantidad de oxígeno

- o Contaminantes y temperatura
- o Nivel de tensión del transformador
- o Todas las anteriores

5. EVALUACIONES

5.1. Evaluaciones de contenidos en general

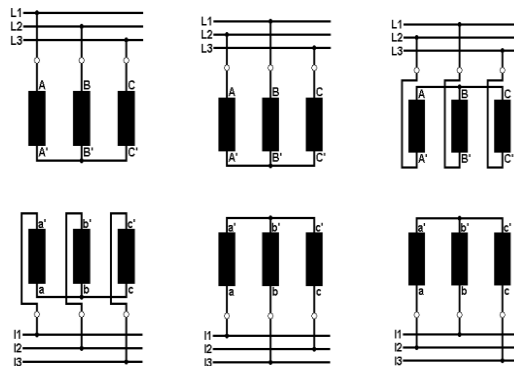
Se dan una serie de evaluaciones las cuales incluyen problemas de aplicación y preguntas de los diferentes temas vistos en el capítulo 2.

5.1.1. Ejercicios para resolver

- Evaluación 1
 - o Se quiere utilizar un autotransformador para alimentar una carga de 180 A a 150 V desde una línea de 220 V. Si puede considerarse ideal el transformador determine: a) ¿Cuál debe ser la razón entre los números de espiras de los devanados serie y común?, b) ¿Cuál será la intensidad de la corriente extraída del generador de 220 V?, c) ¿Qué tanto por ciento de la polaridad suministrada a la carga circula conductivamente?, d) ¿Cuáles deberían ser la tensión y potencia aparente nominal de transformador si se utiliza como transformador ordinario de dos devanados?
 - o Determine el índice horario de las figuras pertenecientes a la figura 123.
 - o Determine la polaridad del transformador de la figura 124.

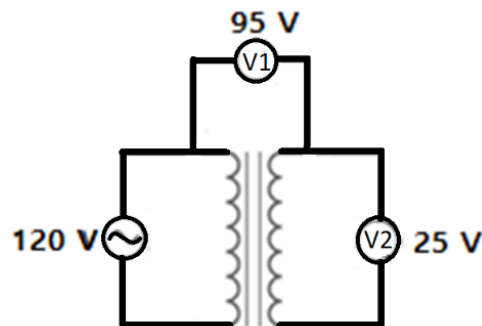
- o Mencione por los menos tres ventajas de la conexión delta-estrella frente a una conexión delta-delta.

Figura 123. Figuras problema 2, evaluación 1



Fuente: elaboración propia.

Figura 124. Figura problema 3, evaluación1

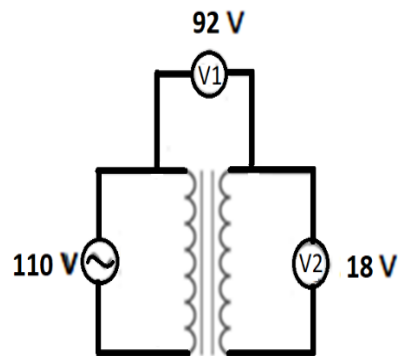


Fuente: elaboración propia.

- o Un transformador de 5 kVA 240 / 480 se desea conectar como transformador elevador para obtener una tensión de salida de 720 V. Determine los voltajes y corrientes del autotransformador.

- Evaluación 2
 - o Es posible obtener una polaridad aditiva de un transformador que posee polaridad sustractiva ¿Por qué sí, por qué no?
 - o Realice las siguientes conexiones: ΔY_2 , $Y\Delta_2$.
 - o Determine la polaridad del transformador de la figura 125.

Figura 125. **Figura problema 3, evaluación 2**

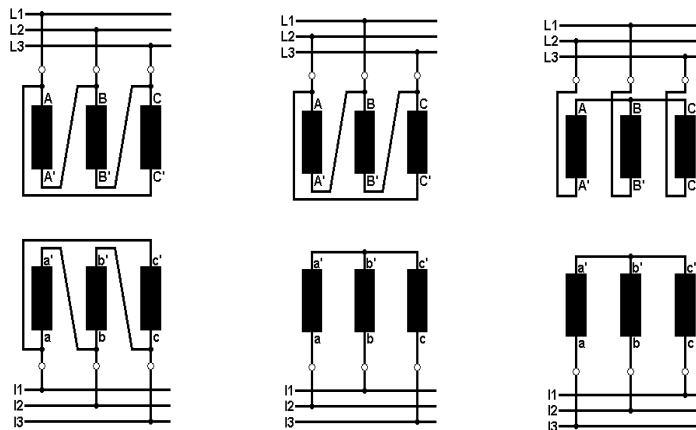


Fuente: elaboración propia.

- o Se dice que un transformador tiene polaridad aditiva cuando:
 - Los flujos giran en el mismo sentido.
 - El devanado secundario está arrollado en el mismo sentido que el primario.
 - Las corrientes están en sentido contrario.

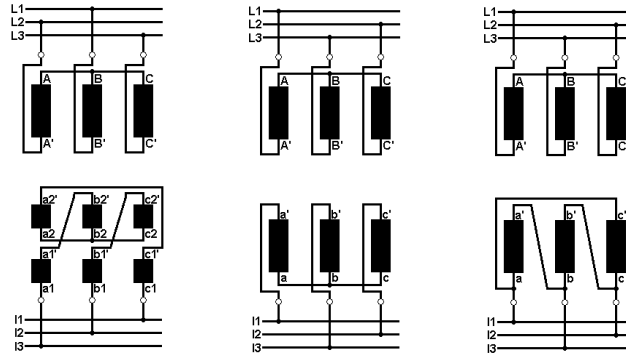
- El devanado secundario está arrollado en sentido opuesto al primario.
 - o Considere un transformador que tiene valores nominales de 50 kVA, 11 500 / 2300 V, este se conecta para formar un autotransformador reductor para obtener un voltaje de 2 300 V, para el autotransformador determine a) los voltajes del lado primario y secundario del autotransformador, b) las corrientes que circulan en el autotransformador.
- Evaluación 3
 - o Utilizando el método del reloj determine el índice horario de la figura 126.
 - o Realice las siguientes conexiones: YY_0 , $\Delta\Delta_0$, YY_{12} , $\Delta\Delta_{12}$.

Figura 126. **Figura problema 1, evaluación 3**



Fuente: elaboración propia.

Figura 127. Figuras problema 5, evaluación 3



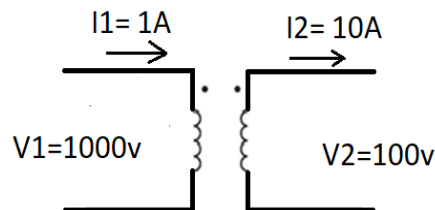
Fuente: elaboración propia.

- o Un transformador de dos bobinados de 5 kVA, 600 / 200 V, 60 Hz. se va a conectar como autotransformador para transformar 800 V a 600 V. ¿Cuáles son los voltamperes máximos de salida que el transformador puede entregar trabajando como autotransformador sin exceder las corrientes y voltajes nominal de los dos bobinados?
- o ¿Cuáles son las conexiones que permiten transformar un sistema bifásico a un sistema trifásico?
- o Para las figuras pertenecientes a la figura 127, determine su índice horario.
- Evaluación 4
 - o Un transformador de 10 kVA, 200 / 400 V se conecta como autotransformador para transformar 200 a 600 V. Si la eficiencia

nominal del transformador de dos bobinados es de 95 % cuando el factor de potencia de la carga es la unidad, determinar su eficiencia como autotransformador cuando está entregando su salida máxima segura a factor de potencia unitario.

- o Utilizando el método del reloj realice las siguientes conexiones: YY_4 , $\Delta\Delta_6$, $Y\Delta_{11}$, ΔY_2 .
- o Para la figura 128, conecte el transformador de tal forma que se obtenga un autotransformador con voltajes 1 000 / 900 V. Determine las corrientes que circulan en este y la potencia del autotransformador sabiendo que la potencia como transformador es de 1 kVA.

Figura 128. **Figura problema 3, evaluación 4**

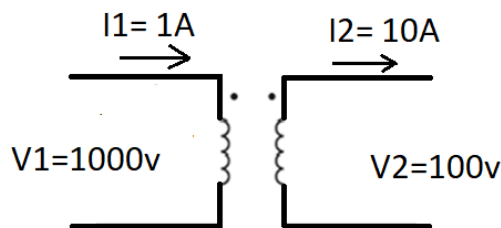


Fuente: elaboración propia.

- o Explique brevemente de qué forma se hace para determinar la polaridad de un transformador cuando este no posee marcas que la indiquen.
- o ¿Por qué los autotransformadores pueden manejar más potencia que los transformadores convencionales del mismo tamaño?

- Evaluación 5
 - o Si los terminales de diversos arrollamientos de un transformador no están identificados, ¿se les puede conectar juntos para elevar el voltaje?
 - o Obtenga dos tipos de conexión en el cual el resultado sea una conexión $Y\Delta_9$.
 - o ¿En qué difiere un sistema bifásico de uno trifásico?
 - o Se emplea un autotransformador de subida para abastecer 5 kV a partir de una línea de suministro de 2,5 kV. Si la carga en el secundario es de 50 A, desprecie las pérdidas y la corriente de magnetización, determine: a) las corrientes de cada parte del autotransformador, b) la corriente que se toma del suministro de 2,5 kV, c) los kVA nominales del autotransformador, d) los kVA nominales de un transformador convencional equivalente de dos devanados, necesario para llevar a cabo la misma transformación que el autotransformador.

Figura 129. **Figura problema 5, evaluación 5**



Fuente: elaboración propia.

- o Para la figura 129, conecte el transformador a forma de obtener un autotransformador: a) reductor con polaridad sustractiva b) reductor con polaridad aditiva. Para ambos casos determine la potencia de salida, compare los datos de potencia obtenidos en ambos casos y de una breve descripción del porque se obtienen estos datos de potencia.

5.1.2. Preguntas relacionadas a la teoría

- Evaluación 1
 - o Mencione algunas ventajas y desventajas del autotransformador frente a un transformador convencional.
 - o En qué devanado se realiza la prueba de corriente de excitación.
 - o En la prueba de polaridad, ¿en qué consiste el método de comparación?
 - o En la prueba de vacío la potencia que se absorbe durante la prueba, ¿a qué pérdidas corresponde?
 - o En la prueba de tensión interfacial, ¿qué norma se aplica?
 - ASTM D-971
 - ASTM D-2285
 - ASTM D-1500

- Ninguna de las anteriores
- Evaluación 2
 - o Realice la conexión que se utiliza para realizar la prueba de vacío.
 - o ¿En qué prueba se desprecian las pérdidas del hierro y por qué?
 - o ¿Cuál es la función del devanado terciario en un transformador?
 - o En esta prueba se utiliza como instrumento un hidrómetro:
 - Vacío
 - Tensión interfacial
 - Gravedad específica
 - Número de neutralización
 - o Esta prueba determina el estado del aceite basado en la presencia de turbulencia o nubosidad, lodo o partículas sólidas.
 - Tensión interfacial
 - Gravedad específica
 - Contenido de humedad

- Inspección visual
- Evaluación 3
 - o De una breve descripción de la prueba de relación de transformación.
 - o Mencione 5 pruebas que se le realizan al aceite dieléctrico del transformador.
 - o ¿Qué sucede si en la prueba de corriente de excitación no se toma en cuenta el magnetismo residual presente en el transformador?
 - o ¿Qué métodos son utilizados en la prueba de relación de transformación?
 - o En la prueba de gravedad específica ¿De qué forma afecta el medio ambiente al realizar la prueba?
- Evaluación 4
 - o En esta conexión se carece de terceras armónicas:
 - $\Delta\Delta$
 - YY
 - ΔY

- $Y\Delta$
- o En esta conexión se obtiene dos fases separadas 90° a partir de un sistema trifásico:
- Scott-T
 - D abierta
 - Y abierta-D abierta
 - Trifásica T
- o En esta conexión se obtiene voltaje trifásico a partir de una conexión trifásica, pero utilizando solo dos transformadores:
- Scott-T
 - D abierta
 - Y abierta-D abierta
 - Trifásica T
- o En una conexión estrella-estrella, ¿es posible formar un sistema balanceado de 4 hilos?
- o En esta conexión se puede obtener un voltaje trifásico a partir de dos fases:

- Scott-T
 - D abierta
 - Y abierta-D abierta
- Evaluación 5
 - o Mencione algunas de las formas que se utilizan para llevar a cabo la transformación trifásica con solo dos transformadores.
 - o ¿Cuál es la función de un devanado terciario?
 - o En una configuración estrella-estrella, ¿si se daña una fase, esta puede seguir funcionando?
 - o En la prueba de factor de potencia, ¿qué es una celda de prueba?
 - o Describa la forma correcta que se utiliza para dar el resultado en la prueba de color del aceite del transformador.
 - Evaluación 6
 - o En la prueba de inspección visual, ¿se determina el grado de deterioro del aceite?
 - o En la prueba de número de acidez, ¿en qué unidades se expresa el contenido de acidez del aceite del transformador?

- o Si el aceite de un transformador posee un color marrón, se dice que está:
 - En buen estado
 - Aceite nuevo
 - Mala condición
 - Condición crítica

- o Esta conexión es comúnmente usada cuando se quiere reducir de una tensión alta a una baja o media, debido a que el primario solo debe estar aislado para el voltaje de fase y no el de línea:
 - Estrella-delta
 - Estrella-estrella
 - Delta-delta
 - Delta-estrella

- o Esta configuración es comúnmente usada en transformadores elevadores de voltaje:
 - Estrella-delta
 - Estrella-estrella

- Delta-delta
 - Delta-estrella
- Evaluación 7
 - o En una conexión delta-delta, ¿es posible obtener una salida monofásica?
 - o ¿En un autotransformador aumenta la potencia que se puede transferir respecto a un transformador convencional?
 - o Nombre del equipo utilizado para la prueba de tensión interfacial:
 - Densímetro
 - Tensiómetro
 - Megger
 - Hidrómetro
 - o ¿Cuál es la función que cumplen los antioxidantes en aceite dieléctrico del transformador?
- Evaluación 8
 - o En un autotransformador, ¿la polaridad de los arrollamientos influye en los voltajes de salida?

- o En la polaridad aditiva, ¿las marcas de polaridad se encuentran en el mismo extremo (primario y secundario)?
- o En un autotransformador, ¿el devanado serie debe estar aislado para una tensión igual a la tensión a tierra del circuito de alta tensión?
- o ¿Por qué un autotransformador posee mayor rendimiento que un transformador convencional?
- o Mencione algunas pruebas eléctricas que se realizan al transformador.
- Evaluación 9
 - o Desarrolle una de las pruebas eléctricas realizadas al transformador.
 - o ¿Por qué es importante saber la polaridad de un transformador?
 - o ¿Por medio de que prueba es posible determinar conexiones defectuosas en un transformador?
 - Relación de transformación
 - Resistencia de los devanados
 - Prueba de polaridad

5.1.3. Laboratorios

Utilizando el software índices horarios realice las conexiones de transformadores que se presentan a continuación. Puede verificarlas por medio del método del reloj.

- Realice la conexión ΔY_1 de todas las formas posibles. Observe las diferentes formas de conexión que hay para obtener una misma conexión.
- Realice la conexión $Y\Delta_3$. interactúe con el software índices horarios, de forma que obtenga la misma configuración, pero con diferentes conexiones entre los transformadores.
- A forma de interactuar, realice todas las conexiones que se dan en una configuración estrella-estrella.
- Realice todas las posibles conexiones para una configuración $\Delta\Delta_8$.
- Seleccione una configuración deseada estrella-estrella; luego varíe solamente las posiciones de las líneas de entrada y observe las conexiones que se obtienen con solo cambiar de posición estas líneas.
- Realice una configuración YZ_5 .
- Escoja una conexión YZ , interactue solamente con el secundario de los transformadores cambiando de posición las líneas y observe las diferentes conexiones que se obtienen.

- Escoja una conexión YZ, interactúe solamente con el secundario de los transformadores cambiando solamente la forma de conexión del dl devanado secundario y observe las diferentes conexiones que se obtienen.
- Para una conexión YZ_{11} , obtenga esta misma conexión de todas las formas posibles de obtenerla.
- Con ayuda del software realice las conexiones que desee y practique realizando estas en su cuaderno de forma que se familiarice como realizar las conexiones.

En su cuaderno realice las conexiones que se le dificultan y luego con ayuda del software compruébelas

6. CALENDARIZACIÓN DE LOS TEMAS

A continuación, se presenta el programa del curso de Conversión de Energía Electromecánica 2, en el cual se incluyen los temas descritos en el presente trabajo.

Figura 130. Programa del curso



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE MECANICA ELECTRICA

PROGRAMA DEL CURSO CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECÁNICA 2

CÓDIGO:	213	CREDITOS:	5
ESCUELA:	Mecánica eléctrica	AREA A LA QUE PERTENECE:	Potencia
PRE REQUISITO:	Conversión de Energía Electromecánica 1	POST - REQUISITO:	Análisis de sistemas de potencia 1, alta tensión, subestaciones
CATEGORIA:	Obligatorio	SECCION:	
HORAS POR SEMANA DEL CURSO:	2.5 horas	HORAS POR SEMANA DEL LABORATORIO:	
DÍAS QUE SE IMPARTE EL CURSO:	Lunes, Miércoles y Viernes	DÍAS QUE SE IMPARTE EL LABORATORIO:	
HORARIO DEL CURSO:		HORARIO DEL LABORATORIO:	

DESCRIPCIÓN DEL CURSO: Curso orientado a mostrar al estudiante el concepto físico, los principios de funcionamiento, tipos, modos de operación, consideraciones técnicas para su instalación y mantenimiento, y cualquier aplicación de ingeniería en los transformadores como una máquina eléctrica.

OBJETIVOS GENERALES: Formar en el estudiante criterios de ingeniería para la toma de decisiones en cuanto a la instalación, operación y mantenimiento de un transformador según la aplicación para la que se requiera.

METODOLOGIA: La metodología a utilizar será por medio de clases magistrales, vista técnica, trabajos asistidos en grupo en clase.

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO ACADEMICO: La ponderación para evaluar el rendimiento académico de los estudiantes será realizado por medio de exámenes, en grupo, tareas, reporte de visitas, evaluaciones cortas
Se realizará dos exámenes parciales, una visita técnica a subestaciones de alta tensión.

EVALUACION	
<i>Dos exámenes parciales</i>	45%
<i>Asistencia a clases magistrales</i>	05%
<i>Evaluaciones cortas</i>	10%
<i>Reporte de visita técnica</i>	05%
<i>Tareas</i>	10%
<i>Zona</i>	75%
<i>Examen final</i>	25%
<i>Nota de promoción</i>	100%

Continuación de la figura 130.

CONTENIDO DEL CURSO	
UNIDAD No. 1: INTRODUCCIÓN A LOS TRANSFORMADORES	
1	<i>Introducción</i>
2	<i>Tipos y construcción de transformadores</i>
3	<i>Tipos según utilización de los transformadores.</i>
UNIDAD NO 2: ANALISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR	
1	<i>Transformador Ideal</i>
2	<i>Transformador Real.</i>
3	<i>Circuito Equivalente del Transformador</i>
4	<i>Diagrama Vectorial del Transformador</i>
5	<i>Regulación de Voltaje del Transformador</i>
6	<i>Eficiencia del Transformador</i>
7	<i>Valores por unidad para un transformador</i>
UNIDAD NO 3: GRUPOS DE CONEXIÓN DE LOS TRANSFORMADORES	
1	<i>Formas de conexión de los devanados de un transformador</i>
	1.1 <i>Conexión estrella</i>
	1.2 <i>Conexión delta</i>
	1.3 <i>Otras conexiones</i>
2	<i>Designación de los terminales de un transformador</i>
	2.1 <i>Según la norma IEEE C57.12.70</i>
3	<i>Polaridad aditiva y sustractiva de los transformadores</i>
	3.1 <i>Verificación de polaridad</i>
4	<i>Índice horario</i>
	4.1 <i>Método del reloj</i>
5	<i>Tipos de conexión de los transformadores</i>
	5.1 <i>Conexión Estrella – Estrella</i>
	5.2 <i>Conexión Estrella – Delta</i>
	5.3 <i>Conexión Delta – Estrella</i>
	5.4 <i>Conexión Delta – Delta</i>
	5.5 <i>Conexiones de Finalizada Especial</i>
6	<i>Ventajas y desventajas de las diferentes conexiones</i>
UNIDAD NO. 4: AUTOTRANFORMADOR	
1	<i>Introducción</i>
2	<i>Aspecto constructivo</i>
	2.1 <i>Polaridad en un autotransformador</i>
	2.2 <i>Autotransformador elevador</i>
	2.3 <i>Autotransformador reductor</i>
3	<i>Circuito equivalente</i>
4	<i>Ventajas y Desventajas de un Autotransformador</i>
5	<i>Cálculos asociados a un transformador</i>
	5.1 <i>Perdidas y rendimiento en un autotransformador</i>
UNIDAD NO. 5: PROYECTO DE INSTALACIÓN, PUESTA EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN TRANSFORMADOR	
1	<i>Accesorios</i>
2	<i>Esquemas de Protección</i>
3	<i>Protocolos de Pruebas en un Transformador</i>
	3.1 <i>Pruebas eléctricas</i>
	3.1.1 <i>Prueba de corriente de excitación</i>
	3.1.2 <i>Prueba de relación de transformación</i>
	3.1.3 <i>Prueba de polaridad</i>
	3.1.4 <i>Prueba de resistencia de los devanados</i>
	3.1.5 <i>Prueba de vacío</i>
	3.1.6 <i>Prueba de cortocircuito</i>
	3.1.7 <i>Prueba de factor de potencia a los aislamientos</i>

Continuación de la figura 130.

	3.2 Pruebas al aceite dieléctrico
	3.2.1 Rigidez dieléctrica
	3.2.2 Tensión interfacial
	3.2.3 Factor de potencia
	3.2.4 Color
	3.2.5 Contenido de humedad
	3.2.6 Inspección visual
	3.2.7 Gravedad específica
	3.2.8 Número de neutralización
	3.2.9 Contenido inhibitor
4	Puesta en Operación de un Transformador
5	Mantenimiento predictivo
6	Mantenimiento preventivo
7	Mantenimiento correctivo
8	El transformador como parte de un sistema de potencia

BIBLIOGRAFIA:	
•	Gourischankar, V. <i>Conversión de energía electromecánica</i> . Editorial Alfaomega. México, 1990. 638pp.
•	Fitzgerald A. E., Kinsley y Umans. 5ta edición. <i>Máquinas Eléctricas</i> . México, 1999. 670pp.
•	Chapman, Stephen J. 2da edición. <i>Máquinas Eléctricas</i> . Colombia, 1998. 740pp.
•	Grainger y Stevenson. <i>Análisis de Sistemas de Potencia</i> . 1ra Edición. México: McGraw Hill, 1996. 739pp
•	Valenzuela, Julio Cesar. <i>Estudio y Aplicación de los Grupos de Conexión de Transformadores Eléctricos de Potencia</i> . Tesis, Facultad de Ingeniería USAC, 1992, 100pp. T621.314 V161
•	Gómez Expósito y otros. <i>Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica</i> . 1ra edición. España: McGraw-Hill, 2002. 769pp
•	<i>Manuales de Fabricante</i> ,
•	<i>Mejoramiento del rendimiento académico a través de la estructuración virtual constructivista de los temas autotransformadores, conexiones y pruebas de transformadores, del curso de conversión de energía electromecánica 2, de la escuela de ingeniería mecánica eléctrica, facultad de ingeniería de la universidad de San Carlos de Guatemala,</i>

Fuente: elaboración propia.

6.1. Distribución de los temas de la clase y material audiovisual

Para determinar de qué forma se deben dar los temas descritos en el presente trabajo y de qué forma se deben de ver los videos en un semestre de clases, se creó una calendarización, una para el contenido de clase, tabla XVII, en esta tabla se observa la distribución de los temas y de los videos, tabla XVIII; se observa la calendarización de los videos enumerados según su orden. En ambas tablas, las celdas que no contienen ningún tipo de marcada, representan los descansos y feriados que se dan a lo largo del semestre.

CONCLUSIONES

1. Se implementó una guía teórica y una serie de material audiovisual para el curso de Conversión de Energía Electromecánica 2, perteneciente a la escuela Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con los temas: autotransformadores, conexiones y pruebas de transformadores.
2. En los temas desarrollados se incluyeron ejemplos de aplicación; en la sección de aplicación se incluyeron problemas que evalúan la comprensión de lectura y ejercicios de aplicación.
3. Para determinar lo aprendido a lo largo de esta guía, se implementaron evaluaciones que incluyen problemas y ejercicios de los temas en general.
4. La implementación de esta guía teórica permite a los estudiantes de la Escuela Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad de San Carlos de Guatemala y personas interesadas, aprender a distancia, así como servir de apoyo al curso de Conversión de Energía Electromecánica 2.

RECOMENDACIONES

1. Para que el estudiante pueda desempeñarse de la mejor manera se les debe capacitar por medio de diferentes herramientas que tengan como fin, adquirir nuevos conocimientos.
2. Realizar los ejercicios propuestos en el capítulo 4 de este trabajo con el fin de aclarar dudas que puedan surgir en el transcurso de la resolución.
3. Consultar el material adicional a este trabajo, en específico los videos realizados; en los cuales se da un concepto general de los diferentes temas, así como ejemplos de estos.
4. Para consultar los videos diríjase al siguiente enlace:
https://drive.google.com/open?id=1HtRyHb6m6_4F3fFI016mo4QiXNGU-yRT
5. Hacer uso de las diferentes herramientas que ofrece hoy en día la tecnología para poder capacitar de la mejor manera a los estudiantes de la Escuela Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Aplicaciones del autotransformador.* [en línea]. <<https://es.scribd.com/doc/185340023/Aplicaciones-Del-Autotransformador>>. [Consulta: agosto de 2019].
2. CARNOY, Martin. *Las TIC en la enseñanza: posibilidades y retos.* En: *Lección inaugural del curso académico 2004-2005 de la UOC (2004: Barcelona)* [en línea]. UOC. <<http://www.uoc.edu/inaugural04/dt/esp/carnoy1004.pdf>>. [Consulta: agosto de 2019].
3. CARRETERO, Mario. *Constructivismo y educación.* 2a ed. México: Progreso S.A., 2005. 144 p.
4. CEVALLOS ALEAGA, Juan Pablo. *Diseño de un laboratorio de pruebas para transformadores de distribución para la empresa eléctrica regional del sur S.A.–Loja.* Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ingenierías, 2010. 134 p.
5. CHAPMAN, Stephen. *Máquinas eléctricas.* 5a ed. México: McGraw-Hill, 2012. 502 p.
6. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética Universidad de Cantabria. *Autotransformadores.* [en línea]. <https://www.academia.edu/12112222/TRANSFORMADORES_Miguel_Angel_Rodr%C3%ADguez_Pozueta_Doctor_Ingeniero_Indu>

trial_UNIVERSIDAD_DE_CANTABRIA_DEPARTAMENTO_DE_I
NGENIER%C3%8DA_EL%C3%89CTRICA_Y_ENERG%C3%89TI
CA>. [Consulta: julio de 2019].

7. E.E. Staff. del M.I.T., *Circuitos magnéticos y transformadores*. España: Reverté, 1965. 697 p.
8. FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. 6a ed. España: McGraw-Hill, 2008. 809 p.
9. GALÁN, José Manuel; IZQUIERDO, Luis; MARTÍNEZ, Ricardo; SANTOS, José Ignacio. *Aplicaciones de las TIC en el nuevo modelo de enseñanza del eees. Dirección y organización: Revista de dirección, organización y administración de empresas*, ISSN 1132-175X, N° 39, 2009, p. 5-11.
10. GLOVER, Duncan; SARMA, Mulukutla. *Sistemas de potencia análisis y diseño* 3a ed. México: Cengage Learning Editores S.A. de C.V., 2003. 672 p.
11. GOURISHANKAR, VEMBU. *Conversión de energía electromecánica*. México: Litoarte. S. de R. L., 1975. 638 p.
12. KOSOW, Irving. *Máquinas eléctricas y transformadores*, 2a ed. México: Prentice-hall hispanoamericana, S.A., 1991. 704 p.
13. MORALES CAPILLA, Marina. *Percepción del profesorado y del alumnado de la Facultad de Ciencias de la Educación de la Universidad de Granada acerca de la utilización de las TIC por parte*

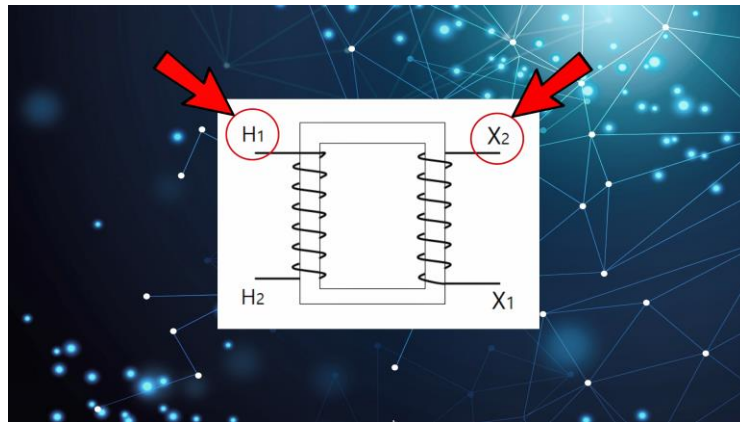
del profesorado universitario y de su integración en el proceso de enseñanza-aprendizaje. España: Universidad de Jaén, Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación, Departamento de Pedagogía, 2014. 550 p.

14. NÚÑEZ FORESTIERI, Juan. *Guía para el mantenimiento de transformadores de potencia*. Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, 2004. 358 p.
15. PÉREZ RIVERA, Michael Isaí. *Implementación del mantenimiento predictivo de los transformadores de potencia de la ccc Iberdrola Energía Tamazunchale SA de CV, a través de las técnicas de diagnóstico de análisis del aceite dieléctrico*. México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Coordinación Académica Regional Huasteca Sur, 2018. 86 p.
16. PRADO ALVAREZ PAULA JUDITH, *Actitud de los docentes de la carrera de magisterio primaria y preprimaria del instituto belga guatemalteco ante la utilización de las tecnologías de Información y Comunicación dentro del proceso de enseñanza y aprendizaje*. Guatemala: Universidad Rafael Landívar, Facultad de Humanidades, Departamento de Educación, 2012. 80 p.
17. OMICRON. *Pruebas a transformadores*. [en línea]. <<https://www.omicronenergy.com/es/#contact-menu-open>>. [Consulta: julio de 2019].

18. _____ *Pruebas de diagnósticos y monitoreo de transformadores de potencia.* [en línea]. <https://www.omicronenergy.com/es/aplicaciones/pruebas-de-transformadores-de-potencia/?gclid=CjwKCAiA5o3vBRBUEiwA9PVzajqf6jooGB_ZDCqhHkp0rxJLMsr-E-3U5cT7FwS3u03aUuQIDrkhtxoCnLcQAvD_BwE>. [Consulta: agosto de 2019].
19. RODRÍGUEZ, Jesús; MARTÍNEZ, Nerwis; LOZADA, Joan Manuel. *Las TIC como recursos para un aprendizaje constructivista.* Revista de Artes y Humanidades UNICA 2009, 10(2), 118-132 ISSN: 1317-102X. [en línea]. <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=170118863007>>. [Consulta: febrero de 2020].

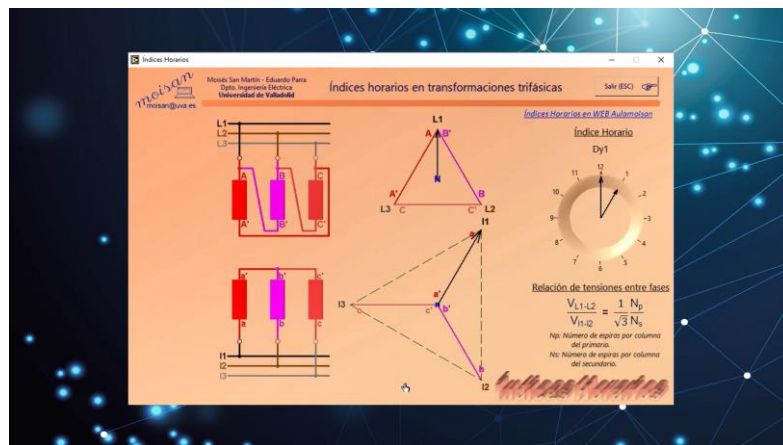
APÉNDICES

Apéndice 1. Video de polaridad aditiva y sustractiva



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Video software índices horarios



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Video autotransformador elevador

The diagram shows an autotransformer with a common winding of N_C turns and a series winding of N_{SE} turns. The primary is connected across the common winding, and the secondary is connected across the entire winding. Currents I_L and I_H flow into and out of the secondary terminals, respectively. The common winding carries current I_C , and the series winding carries current I_{SE} . Voltages V_L , V_H , V_C , and V_{SE} are indicated across their respective sections.

- V_L : Voltaje del lado de bajo voltaje
- V_H : Voltaje del lado de alto voltaje
- I_L : Corriente del lado de bajo voltaje
- I_H : Corriente del lado de alto voltaje
- V_C : Voltaje en el devanado comun
- V_{SE} : Voltaje en el devanado serie
- I_C : Corriente en el devanado comun
- I_{SE} : Corriente en el devanado serie
- N_C : Numero de espiras del devanado comun
- N_{SE} : Numero de espiras del devanado serie

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Video ejemplo de autotransformador elevador

The example shows a transformer with two windings. The primary has $I_1 = 1\text{ A}$ and $V_1 = 1000\text{ V}$. The secondary has $I_2 = 10\text{ A}$ and $V_2 = 100\text{ V}$. The autotransformer configuration is shown with the common winding carrying $I_C = 10\text{ A}$ and the series winding carrying $I_{SE} = 1\text{ A}$. The total current entering the secondary is $I_L = 11\text{ A}$. The total voltage across the secondary is $V_H = 1100\text{ V}$.

$$V_L = V_C = V_1 = 1000\text{V}$$

$$V_{SE} = V_2 = 100\text{V}$$

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

$$1000\text{V} + 100\text{V} = 1100\text{V}$$

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

$$m = \frac{V_L}{V_H} = \frac{1000}{1100} = \frac{10}{11} = 0.9$$

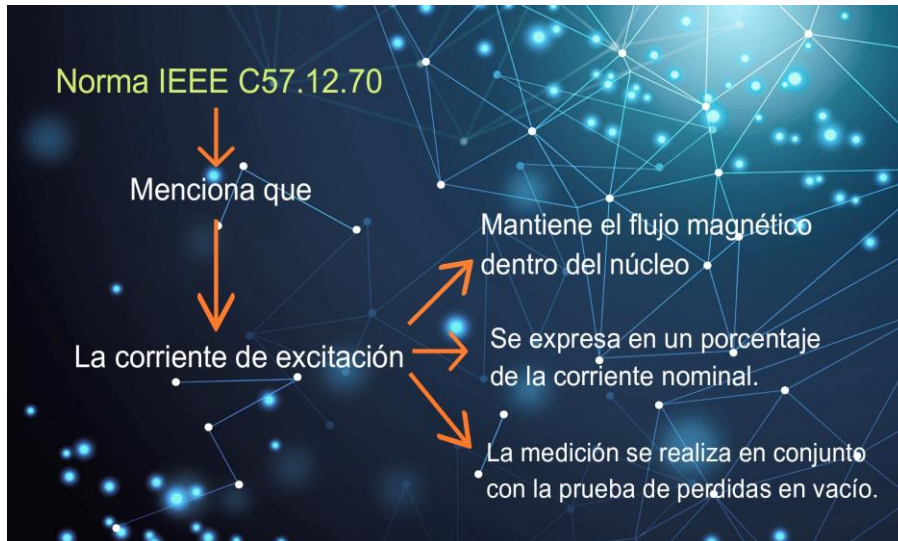
$$I_L = I_C + I_{SE}$$

$$I_L = 1\text{A} + 10\text{A} = 11\text{A}$$

$$I_H = I_{SE} = I_{2, \text{TRAF0}}$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Video prueba de corriente de excitación



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Video prueba de relación de transformación



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Material audiovisual**

Detalle del material audiovisual descrito en la carta de constancia de entrega, a la Escuela Ingeniería Mecánica Eléctrica.

- Contenido de los videos:
 - o Descripción de la conexión delta, estrella y zig-zag.
 - o Designación de los terminales de un transformador.
 - o Polaridad aditiva y sustractiva de un transformador.
 - o Verificación de la polaridad de un transformado y ejemplo del mismo.
 - o Descripción del índice horario.
 - o Descripción del método del reloj para realizar conexiones en transformadores.
 - o Descripción del software índices horarios.
 - o Tipos de conexiones en los transformadores.
 - o Descripción de la conexión estrella-estrella.
 - o Ejemplo de la conexión estrella-estrella por medio del método del reloj.
 - o Descripción de la conexión estrella-delta.
 - o Ejemplo de la conexión estrella-delta por medio del método del reloj.
 - o Descripción de la conexión delta-estrella.
 - o Ejemplo de la conexión delta-estrella por medio del método del reloj.
 - o Descripción de la conexión delta-delta.
 - o Ejemplo de la conexión delta-delta por medio del método del reloj.
 - o Descripción de las conexiones de finalizada especial (Scott-T, T-trifásica y estrella-abierta delta-abierta).

Continuación del apéndice 8.

- o Descripción del autotransformador, ventajas y desventajas del mismo.
 - o Polaridad aditiva y sustractiva en un autotransformador.
 - o Descripción de un autotransformador elevador.
 - o Descripción de un autotransformador reductor.
 - o Descripción de la potencia en un autotransformador.
 - o Descripción de las pérdidas y rendimiento de un autotransformador.
 - o Descripción de la prueba de corriente de excitación en un transformador.
 - o Descripción de la prueba de relación de transformación en un transformador.
 - o Descripción de la prueba de polaridad en un transformador.
 - o Descripción de la prueba de resistencia de los devanados en un transformador.
 - o Descripción de la prueba de vacío en un transformador.
 - o Descripción de la prueba de cortocircuito en un transformador.
 - o Descripción de la prueba de factor de potencia a los aislamientos en un transformador.
- Videos demostrativos de las siguientes pruebas
 - o OMICRON 1. Pruebas a transformadores de potencia.
 - o OMICRON 2. Ejemplificación prueba de corriente de excitación y relación de transformación.
 - o OMICRON 3. Ejemplificación de medición de remanencia del núcleo.

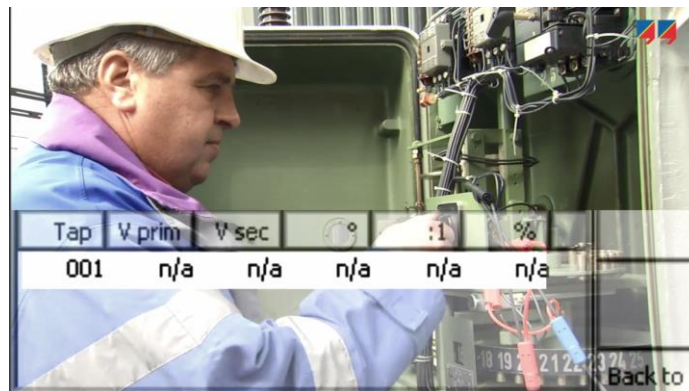
Continuación del apéndice 8.

- o OMICRON 4. Ejemplificación medición de la resistencia del devanado y cambiador de tomas.

Fuente: elaboración propia.

ANEXO

Anexo 5. Video demostrativo de las pruebas



Fuente: Youtube. *OMICRON, 2012. Medición de la relación y de la corriente de magnetización.*
<https://www.youtube.com/watch?v=8EZ5IX6VLbo&list=PLXePrgctTsaEWFwNq3OIOP110iKAGo1&index=2&t=0s> Consulta: septiembre de 2019.

