



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

**FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN, PRUEBAS Y MANTENIMIENTO DE CAMBIADORES DE  
DERIVACIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

**Werner Macario Maldonado Cornejo**

Asesorado por el Ing. Carlos Alberto Quijivix Racancoj

Guatemala, julio de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN, PRUEBAS Y MANTENIMIENTO DE CAMBIADORES DE  
DERIVACIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**WERNER MACARIO MALDONADO CORNEJO**

ASESORADO POR EL ING. CARLOS ALBERTO QUIJIVIX RACANCOJ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, JULIO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

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

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

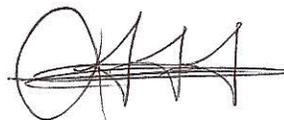
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
EXAMINADOR	Ing. Jorge Armando Cortez Chanchavac
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN, PRUEBAS Y MANTENIMIENTO DE CAMBIADORES DE  
DERIVACIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha noviembre de 2010.



Werner Macario Maldonado Cornejo

Guatemala, 23 de Abril de 2012

Ingeniero  
Jorge Pérez  
Coordinador del Área de Potencia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC  
Ciudad Universitaria

Ingeniero Pérez:

Me es grato dirigirme a usted, para informarle que he concluido con la **ASESORIA** del trabajo de Tesis denominado: **FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN, PRUEBAS Y MANTENIMIENTO DE CAMBIADORES DE DERIVACION DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA**, presentado por el estudiante **WERNER MACARIO MALDONADO CORNEJO**, previo a optar el título de Ingeniero Electricista.

El contenido hace una importante aportación a la Ingeniería, debido a que en su contenido se presentan los diferentes tipos de cambiadores de derivación que se utilizan en transformadores de potencia, así como de su control automático para la operación. En tal sentido, me permito informarle que encuentro satisfactorio el trabajo realizado y lo remito a usted para trámites respectivos de aprobación.

Finalmente, debo comunicarle que el desarrollo del trabajo y las conclusiones del mismo son responsabilidad del autor y del asesor.

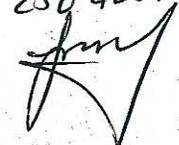
Sin otro particular, me suscribo de usted.

Atentamente,



ING. CARLOS ALBERTO QUIJIVIX RACANCOJ  
ASESOR



Recibido  
25/04/2012  


Recibido  
18/05/2012  




Ref. EIME 23. 2012  
Guatemala, 24 de MAYO 2012.

FACULTAD DE INGENIERIA

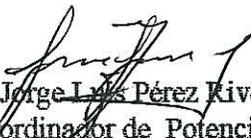
Señor Director  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
**FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN, PRUEBAS Y  
MANTENIMIENTO DE CAMBIADORES DE DERIVACIÓN DE  
TRANSFORMADORES DE POTENCIA,** del estudiante Werner  
Macario Maldonado Cornejo, que cumple con los requisitos  
establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
D D Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Jorge Luis Pérez Rivera  
Coordinador de Potencia

JLPR/sro





FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 31. 2012.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Werner Macario Maldonado Cornejo titulado: **FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN, PRUEBAS Y MANTENIMIENTO DE CAMBIADORES DE DERIVACIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA**, procede a la autorización del mismo.

  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

GUATEMALA, 04 DE JUNIO 2,012.

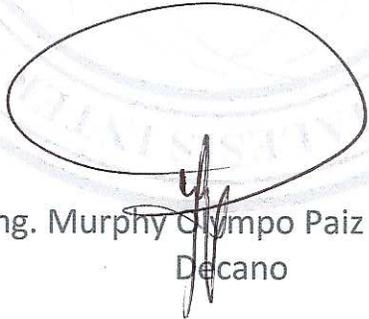




DTG. 360.2012

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN, PRUEBAS Y MANTENIMIENTO DE CAMBIADORES DE DERIVACIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA**, presentado por el estudiante universitario **Werner Macario Maldonado Cornejo**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 30 de julio de 2012.



/gdech

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por brindarme siempre lo necesario para desarrollarme como persona y por darme el conocimiento para realizar este trabajo.
- Mis padres** Sebastián Maldonado García y Tomasa Cornejo Sam, quienes con sus ejemplos me han instruido desde pequeño para ser un buen ciudadano.
- Mis hermanos** Fredy Sebastián, Maynor Giovanni, Jorge Elías, Magdalena Migdalia, Elisa Aracely y Edilzar Guadalupe, por brindarme todo su apoyo y colaboración incondicionalmente.
- Todos mis maestros y catedráticos** Por compartirme sus valiosos conocimientos.
- Mis amigos** Por todos los buenos momentos compartidos.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por brindarme la oportunidad de vivir y darme la sabiduría para concluir el presente trabajo.
<b>Mis padres</b>	Ya que gracias a su esfuerzo y sacrificio tuve la oportunidad de estudiar y concluir esta carrera.
<b>La Facultad de Ingeniería</b>	Por todos los conocimientos y experiencias adquiridos durante mi vida universitaria.
<b>Mi asesor Ing. Carlos Alberto Quijivix</b>	Por todos los consejos y ayuda prestados en la elaboración de este trabajo.
<b>Mis amigos y compañeros de la Facultad</b>	Por su apoyo y colaboración incondicional.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XV
GLOSARIO .....	XIX
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN .....	XXVII
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Ley de Faraday.....	1
1.2. Ley de Lenz.....	1
1.3. El transformador .....	2
1.3.1. Transformador ideal .....	3
1.3.2. Transformador real.....	6
1.3.3. Circuito equivalente del transformador real.....	6
1.3.4. Diagrama vectorial del transformador .....	8
1.4. El autotransformador .....	9
1.4.1. Análisis del autotransformador.....	11
2. REGULADORES DE TENSIÓN .....	15
2.1. Subestaciones variadoras de tensión.....	15
2.1.1. Subestaciones elevadoras de tensión.....	15
2.1.2. Subestaciones reductoras de tensión .....	16
2.2. Regulación de tensión .....	16
2.3. Métodos de regulación de tensión.....	17
2.3.1. Bancos de capacitores.....	18

2.3.2.	Bancos de reactores .....	21
2.3.3.	Regulador de voltaje por pasos .....	23
2.3.4.	Transformadores con derivaciones .....	30
2.3.4.1.	Tomas de regulación .....	36
2.4.	Autotransformador regulador.....	38
3.	TIPOS DE CAMBIADORES DE DERIVACIÓN .....	41
3.1.	Cambiadores de derivación sin carga (OCTC).....	41
3.1.1.	Según la ubicación de las derivaciones en el devanado.....	42
3.1.1.1.	Cambiador de derivaciones sin tensión, conexión lineal .....	44
3.1.1.2.	Cambiador simple de derivaciones sin tensión central.....	46
3.1.1.3.	Cambiador doble de derivaciones sin tensión central.....	48
3.1.1.4.	Cambiador de derivaciones sin tensión, serie – paralelo.....	49
3.1.1.5.	Cambiador de derivaciones sin tensión, estrella-triángulo.....	50
3.1.1.6.	Cambiador inversor de tomas sin tensión .....	51
3.1.2.	Según su fabricante .....	52
3.2.	Cambiador de derivaciones bajo carga (OLTC) .....	57
3.2.1.	Tipos de cambiadores de derivación bajo carga, según su configuración.....	58
3.2.1.1.	Cambio de derivación, tipo lineal .....	58
3.2.1.2.	Cambio de derivación, tipo más/menos.....	59

	3.2.1.3.	Conmutación gruesa/fina .....	60
	3.2.2.	Tipos de OLTC según su tecnología .....	62
	3.2.2.1.	OLTC, con conmutación en aceite.....	62
	3.2.2.2.	OLTC, con conmutación en vacío.....	68
	3.2.3.	Designación de cambiadores de derivaciones bajo carga (como seleccionar un OLTC marca MR).....	75
4.	PARTES Y ACCESORIOS DEL CAMBIADOR DE DERIVACIONES BAJO CARGA .....		81
4.1.	Accesorios del cambiador de derivaciones bajo carga .....		81
	4.1.1.	Tanque conservador de aceite.....	82
	4.1.2.	Sistema de secado de aire.....	84
	4.1.3.	Mecanismo de accionamiento a motor (AM).....	85
	4.1.4.	Árbol de accionamiento.....	87
	4.1.5.	Cabeza.....	88
	4.1.6.	Cuba .....	89
	4.1.7.	Sistema de filtrado de aceite .....	90
	4.1.8.	Indicador de posición .....	92
4.2.	Partes del cambiador de derivaciones bajo carga .....		93
	4.2.1.	Conmutador (Diverter Switch).....	93
	4.2.2.	Selector.....	95
	4.2.3.	Preselector.....	97
	4.2.4.	Impedancias de transición .....	99
5.	SECUENCIA DE OPERACIÓN DE LOS CAMBIADORES DE DERIVACIÓN BAJO CARGA.....		101
5.1.	Ciclos de transferencia de corriente .....		102
	5.1.1.	Ciclo de bandera (Flag Cicle, en figura 69).....	102

5.1.2.	Ciclo de banderín simétrico (simetrical pennant cycle en figura 69) .....	103
5.1.3.	Ciclo de banderín asimétrico (Asimmetrical pannant cycle en figura 69) .....	103
5.2.	Proceso de cambio de derivación .....	105
5.3.	Operación del selector.....	107
5.4.	Operación del conmutador .....	109
5.4.1.	Secuencia de conmutación con resistencia de transición .....	110
5.4.2.	Ciclos de conmutación con impedancia de transición de tipo reactor .....	125
5.5.	Funcionamiento del preselector .....	130
5.5.1.	Posiciones intermedias .....	132
6.	CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LOS CAMBIADORES DE DERIVACIONES BAJO CARGA .....	135
6.1.	Condiciones ambientales .....	135
6.1.1.	Temperatura del cambiador de derivaciones.....	135
6.1.2.	Temperatura interior del accionamiento a motor...	137
6.2.	Condiciones de operación en sobrecarga .....	138
6.3.	Condiciones físicas.....	139
6.4.	Vigilancia durante el servicio .....	140
6.5.	Condiciones de falla .....	141
6.6.	Clasificación de las operaciones de los cambiadores de derivaciones .....	142
7.	CONTROL DE LOS CAMBIADORES DE TOMAS BAJO CARGA.....	145
7.1.	Control a distancia.....	145
7.2.	Control remoto.....	145

7.3.	El control local .....	146
7.4.	Control mecánico.....	146
7.5.	Control automático .....	147
7.5.1.	Controladores automáticos de OLTC marca MR (TAPCON).....	148
7.5.2.	Parámetros para el regulador automático .....	149
7.5.2.1.	Valor teórico.....	149
7.5.2.2.	Ancho de banda.....	150
7.5.2.3.	Tiempo de retardo (T).....	152
7.5.2.4.	Tiempo de retardo lineal/integral .....	153
7.5.3.	Esquema del regulador automático.....	154
8.	MANTENIMIENTO DEL CAMBIADOR DE DERIVACIONES BAJO CARGA .....	157
8.1.	Tipos de mantenimientos .....	159
8.1.1.	Mantenimiento preventivo .....	160
8.1.2.	Mantenimiento correctivo .....	160
8.1.3.	Mantenimiento predictivo .....	160
8.2.	Causas que producen envejecimiento del aislamiento.....	161
8.2.1.	Humedad .....	161
8.2.2.	El oxígeno .....	163
8.2.3.	El calor .....	164
8.2.4.	Contaminación externa .....	165
8.3.	Fallas que originan gases combustibles en un OLTC .....	165
8.3.1.	Operación en paralelo.....	165
8.3.2.	Erosión de los contactos y contaminación del líquido .....	165

8.3.3.	Sobrecalentamiento de los contactos del selector cuando se opera en una posición de derivación fija.....	167
8.3.4.	Descargas durante la operación del preselector ...	169
8.4.	Mantenimiento del OLTC.....	169
8.4.1.	Mantenimiento predictivo .....	169
8.4.1.1.	Diagnóstico del OLTC mediante análisis de gases disueltos en el aceite (DGA).....	170
8.4.1.2.	Pruebas al aceite .....	175
8.4.1.3.	Termografía infrarroja .....	182
8.4.2.	Mantenimiento preventivo .....	184
8.4.2.1.	Pruebas de relación de transformación (Transformer Turns Ratio TTR).....	186
8.4.2.2.	Prueba de corriente de excitación ....	191
8.4.3.	Mantenimiento correctivo .....	194
8.4.3.1.	Condiciones para un mantenimiento correctivo.....	195
8.4.3.2.	Proceso de un mantenimiento correctivo .....	197
8.5.	Medidas a tomar en las distintas fallas en los cambiadores de derivación bajo carga tipo MR.....	205
9.	PROTECCIÓN DEL CAMBIADOR DE DERIVACIONES BAJO CARGA.....	209
9.1.	Elementos de protección de los cambiadores de tomas bajo carga .....	209
9.1.1.	Relevador de flujo (RS1000 O RS2001) .....	209

9.1.2.	Válvula de sobrepresión.....	214
9.1.3.	Relevador de sobrepresión .....	216
9.2.	Sistemas adicionales de protección .....	218
9.2.1.	Protección de conmutación en una sobrecarga excesiva o en condiciones de cortocircuito.....	219
9.2.2.	Protección contra operación a temperaturas excesivas del líquido.....	219
9.2.3.	Sistema de supervisión de interruptores de vacío .....	220
9.2.4.	Circuito de control y protección de desequilibrio de fases .....	223
CONCLUSIONES .....		227
RECOMENDACIONES .....		229
BIBLIOGRAFÍA.....		231
APÉNDICES .....		237



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Transformador monofásico .....	2
2.	Circuitos eléctricos y magnéticos del transformador .....	3
3.	Circuito equivalente del transformador .....	7
4.	Diagrama vectorial del transformador monofásico .....	8
5.	a) El autotransformador, b) Circuito eléctrico del autotransformador .....	9
6.	Voltaje del primario transferido al secundario en un autotransformador .....	10
7.	Transformador conectado como autotransformador .....	12
8.	Banco de capacitores automático .....	20
9.	Reactor de potencia para media tensión .....	22
10.	Reactor de potencia para una línea de 400KV .....	23
11.	Banco de reguladores por pasos .....	24
12.	Diagrama eléctrico de un regulador por pasos .....	25
13.	Diagrama esquemático de regulador de tensión por pasos .....	26
14.	Banco de reguladores conectados en estrella aterrizada .....	27
15.	Banco de reguladores conectados en delta abierta .....	28
16.	Transformador con derivaciones .....	31
17.	Devanados de un transformador regulador de tensión .....	32
18.	Capacidad de voltaje para las derivaciones .....	35
19.	Derivaciones en un autotransformador .....	39
20.	Cambiador de derivaciones sin tensión .....	42
21.	Placa de características de transformador con derivaciones en el primario y secundario .....	43

22.	OCTC, conexión lineal .....	45
23.	Cambiador simple de derivaciones sin tensión central .....	47
24.	Cambiador doble de derivaciones sin tensión central .....	48
25.	Cambiador de derivaciones, serie - paralelo .....	49
26.	Cambiador de derivaciones estrella-triángulo .....	51
27.	Cambiador inversor de derivaciones sin tensión.....	52
28.	Cambiador de derivaciones sin carga de arranque retardado .....	53
29.	Cambiador de derivaciones sin carga de avance retardado ARS.....	54
	derivaciones sin carga de avance retardado como inversor de polaridad	
	55	
30.	Combinación del COMTAP® ARS con un OLTC.....	56
	del cambiador de derivaciones bajo carga en la cuba del transformador.....	58
31.	Esquema eléctrico de OLTC con conmutación lineal.....	59
32.	Esquema de conmutación más/menos .....	60
33.	Esquema de conmutación gruesa /fina .....	61
34.	OLTC con conmutación en vacío .....	63
35.	Cambiador de derivaciones bajo V .....	64
36.	Cambiador de derivaciones bajo carga MS .....	65
37.	Cambiador de derivaciones bajo carga modelo M .....	65
38.	Cambiador de derivaciones bajo carga, modelo R.....	66
39.	Cambiador de derivaciones bajo carga, modelo RM.....	67
40.	Cambiador de derivaciones bajo carga, modelo G .....	67
41.	a) Conmutación en vacío, b) Interruptor al vacío .....	68
42.	Cambiador de derivaciones bajo carga en vacío modelo VV.....	71
43.	Cambiador de derivaciones bajo carga VR.....	71
44.	Cambiador de derivaciones bajo carga VT .....	72
45.	Cambiador de derivaciones bajo carga AVT .....	73
46.	Cambiador de derivaciones bajo carga RMV .....	74
47.	Cambio de derivación con reactores.....	74

48.	Código de un OLTC .....	75
49.	Designación de la conexión de un OLTC .....	76
50.	Cuadro para selección del tipo de OLTC marca MR .....	79
51.	Accesorios para el OLTC .....	81
52.	Altura mínima del tanque conservador del OLTC .....	83
53.	Tanque conservador del OLTC, independiente.....	83
54.	Sistemas de secado de aire: a) deshumificador, b) silica-gel.....	85
55.	Accionamiento a motor de OLTC marca ABB .....	86
56.	Árbol de accionamiento.....	87
57.	Cabeza del cambiador de derivaciones bajo carga.....	88
58.	Unidad para filtrado de aceite .....	91
59.	Sistema de filtrado de aceite en un OLTC.....	92
60.	Partes del OLTC .....	93
61.	Conmutador insertable .....	94
62.	Selector de derivaciones .....	95
63.	Boca de hombre para la inspección del selector en cambiadores de tomas internos.....	97
64.	Arreglo del selector y preselector .....	98
65.	Engranajes de cruz de Malta.....	98
66.	Impedancias y corrientes de transición .....	102
67.	Disposición esquemática del conmutador y selector.....	105
68.	Diagrama eléctrico selector – conmutador .....	108
69.	Ciclo de conmutación de un OLTC con resistencias de transición.....	111
70.	Secuencia de cambio de derivación de un OLTC marca ABB, tipo UZ.....	115
71.	Tiempos de operación de las ramas de un OLTC marca MR, modelo OILTAP® M.....	116
72.	Secuencia de operación del conmutador en un OLTC marca MR, modelo OILTAP® M .....	120

73.	Secuencia de conmutación de un VACUTAP VT .....	121
74.	Cambiador de derivaciones bajo carga con reactores de transición ..	126
75.	Secuencia de conmutación de un OLTC marca MR modelo VACUTAP®RMV .....	129
76.	Conmutación más/menos y gruesa/fina .....	131
77.	Operación del preselector .....	133
78.	Temperaturas de operación de un cambiador de derivaciones bajo carga modelo UZ, marca ABB.....	137
79.	Temperaturas de operación del accionamiento a motor para un cambiador de derivaciones bajo carga modelo UZ, marca ABB .....	138
80.	Consola para control de los elementos de una subestación .....	146
81.	Control automático de regulación de Tensión .....	148
82.	Pantalla de un control automático TAPCON .....	149
83.	Ancho de banda para el control automático de un OLTC .....	151
84.	Tiempo de retardo integral .....	154
85.	Esquema de control automático de regulación de tensión.....	155
86.	Curva de vida útil de un equipo.....	157
87.	Relación ente la humedad en el aceite y la rigidez dieléctrica .....	162
88.	Relación entre temperatura del aceite y la solubilidad .....	163
89.	Muestreo de aceite con jeringa de vidrio.....	172
90.	Muestreo con cilindro de acero inoxidable .....	174
91.	Prueba de rigidez dieléctrica del aceite aislante .....	178
92.	Cámara termográfica .....	184
93.	Gráfica de pruebas de relación de transformación sobre todos los tap .....	187
94.	Gráfica de pruebas de resistividad óhmica sobre todos los tap .....	190
95.	Gráfica de pruebas de corriente de excitación sobre todos los tap....	193
96.	Extracción de la cabeza del cambiador de derivaciones.....	198
97.	Bomba para extracción y llenado de aceite .....	198

98.	Extracción del conmutador de la cuba .....	199
99.	Envoltura del conmutador .....	199
100.	Lavado a presión del conmutador .....	200
101.	Medición de los contactos del conmutador (izquierda), contactos sustituidos por nuevos (derecha) .....	201
102.	Medición de la resistencia de transición.....	201
103.	Comparación entre contactos viejos y nuevos .....	202
104.	Cuba del conmutador de un OLTC .....	203
105.	Seguros desgastados de la transmisión del OLTC .....	205
106.	Esquema de un relevador de flujo RS 2001 .....	210
107.	Relevador de flujo 1 .....	212
108.	Relevador de flujo 2 .....	214
109.	a) Relevador de flujo y Válvula de sobrepresión b) Relevador de sobrepresión .....	217
110.	Supervisión de los interruptores en vacío .....	221
111.	Supervisor de conmutación.....	224
112.	Sistema de supervisión de conmutación .....	225

## **TABLAS**

I.	Arreglos para el ciclo de transferencia de corriente en un OLTC.....	104
II.	Temperaturas admisibles del aceite para un OLTC .....	136
III.	Temperatura límite de los contactos de un OLTC.....	139
IV.	Rigidez dieléctrica y contenido de agua para un cambiador de derivaciones bajo carga marca MR tipo V.....	181
V.	Condiciones de mantenimiento para un cambiador de derivaciones bajo carga marca MR tipo V.....	181
VI.	Soluciones a las diferentes fallas en un OLTC tipo VR.....	206



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>AM</b>	Accionamiento a motor
<b>AT</b>	Alta Tensión
<b>A</b>	Amperes
<b>BT</b>	Baja Tensión
<b>Fem</b>	Fuerza electromotriz
<b>Fmm</b>	Fuerza Magneto motriz
<b>° C</b>	Grados centígrados
<b>K</b>	Grados Kelvin
<b>Hz</b>	Hertz
<b>kΩ</b>	Kilo Ohm
<b>kV</b>	Kilo Volts
<b>kVA</b>	Kilo Volts Ampere

<b>MT</b>	Media Tensión
<b>MVA</b>	Mega Volts Amper
<b>m</b>	Metros
<b>mΩ</b>	Mili Ohm
<b>ms</b>	Mili segundo
<b>NTSD</b>	Normas Técnicas del Servicio de Distribución
<b>N1</b>	Número de espiras del devanado primario
<b>N2</b>	Número de espiras del devanado secundario
<b>OCTC</b>	<i>Off-circuit Tap-changer</i>
<b>PPM</b>	Partes por millón
<b>RFC</b>	Regulación de la tensión de flujo constante
<b>a</b>	Relación de Transformación
<b>s</b>	Segundos
<b>Std</b>	Stándard

<b>TTR</b>	<i>Transformer Test-Turn Ratio</i> (prueba de relación de transformación)
<b>Vp</b>	Voltaje primario
<b>Vs</b>	Voltaje secundario
<b>V</b>	Voltios



## GLOSARIO

<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista.
<b>ANSI</b>	American National Standards Institute.
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials.
<b>Capacidad de un transformador</b>	Es la máxima carga permitida que se puede conectar al transformador, expresada en kVA o MVA.
<b>CDBC</b>	Cambiadores de Derivaciones Bajo Carga.
<b>CNEE</b>	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
<b>Conmutador</b>	Es un dispositivo que tiene la capacidad de cortar la corriente de carga y se combina con el selector de derivaciones para realizar un cambio de derivación bajo carga.
<b>Cuba</b>	También llamado tanque, es un recipiente cerrado donde se aloja algún dispositivo o equipo, en este caso el equipo puede ser el conmutador (cuba del cambiador de derivaciones) o los devanados del transformador (cuba principal).

<b>Derivación</b>	Es un punto de conexión en el devanado de un transformador que no es la terminal del devanado, de manera que el voltaje en la derivación es diferente al voltaje nominal del devanado.
<b>Dieléctrico</b>	Materiales que no conducen la electricidad, por lo que pueden ser utilizados como aislantes.
<b>ETCEE</b>	Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica.
<b>Impedancia de transición</b>	Es un elemento que puede ser una resistencia o una reactancia que sirve para limitar la corriente circulante que se forma cuando dos derivaciones adyacentes de un devanado de regulación se cortocircuiten, durante el proceso de cambio de derivación bajo carga.
<b>Interruptor selector</b>	Es un dispositivo que combina las propiedades del conmutador y del selector de derivaciones para poder realizar el cambio de derivación bajo carga.
<b>OLTC</b>	<i>On-Load Tap-Changer</i> (Cambiadores de Derivaciones Bajo carga).

<b>Preselector</b>	Es un interruptor simple polo/doble tiro que es utilizado para invertir la polaridad del devanado de regulación conectado al devanado principal de un transformador para duplicar el rango de regulación.
<b>SCADA</b>	Siglas en idioma inglés ( <i>Supervisory Control And Data Acquisition</i> ) de control de supervisión y adquisición de datos.
<b>Selector de derivación</b>	También llamado únicamente como selector, es un dispositivo diseñado para tener un movimiento y seleccionar las distintas derivaciones del transformador pero sin la capacidad de cortar o restablecer la corriente de carga.
<b>SNI</b>	Sistema Nacional Interconectado.
<b>Sobrecarga</b>	Se dice que en un circuito o instalación hay sobrecarga o está sobrecargada, cuando la suma de la potencia de los aparatos que están a él conectados, es superior a la potencia para la cual está diseñado el circuito de la instalación.
<b>Sobrecorriente</b>	Se refiere a una corriente mayor que la corriente nominal debido a una sobrecarga.
<b>Sobretensión</b>	Aumento de tensión capaz de poner en peligro el material o el buen servicio de una instalación eléctrica.



## RESUMEN

La elaboración de este trabajo se basó en recolección de información de varios medios como: manuales técnicos de equipos instalados en la red eléctrica de la Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica ETCEE - INDE, reportes de trabajos realizados a cambiadores de derivaciones bajo carga de ETCEE, participación en programas de mantenimiento de cambiadores de derivaciones bajo carga y entrevista con personas, con experiencia en mantenimiento de Subestaciones Eléctricas.

En el primer capítulo se hace un pequeño recordatorio del funcionamiento de los transformadores, que es importante para comprender el propósito y el funcionamiento de los cambiadores de derivación. Posteriormente en el segundo capítulo, se describe la regulación de tensión así como las diferentes formas de obtener un voltaje regulado, especialmente el transformador con derivaciones. En el tercer capítulo se describen los diferentes tipos de cambiadores de derivación tanto bajo carga como sin carga, también se comenta sobre algunos modelos de cambiadores de derivación de marca MR.

En el cuarto capítulo se describen las partes y accesorios necesarios para el funcionamiento de los cambiadores de derivación bajo carga. El quinto capítulo describe las diferentes configuraciones de cambio de derivación bajo carga y ejemplifica las diferentes configuraciones con cambiadores de derivación bajo carga de marca MR y marca ABB. En el sexto capítulo explica las diferentes condiciones que deben cumplir las diferentes partes y accesorios del cambiador de derivaciones bajo carga para su correcto funcionamiento. El séptimo capítulo describe las diferentes formas en que se puede operar el

cambiador de derivaciones, especialmente describe el control automático. Posteriormente el octavo capítulo describe los diferentes tipos de mantenimiento, las causas que causan la degradación del aislamiento; describe las diferentes pruebas que puede realizarse al aceite del cambiador de derivaciones y al transformador para diagnosticar el estado del equipo. Finalmente, se concluye el trabajo en el noveno capítulo donde se describen los diferentes elementos y sistemas de protección del cambiador de derivaciones bajo carga.

Para propósitos de explicación, este trabajo contiene fotografías tomadas a equipos instalados en distintas Subestaciones Eléctricas de la Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica ETCEE-INDE; algunas de estas fotografías fueron tomadas de trabajos de mantenimiento realizados en cambiadores de derivación bajo carga de dicha empresa.

# OBJETIVOS

## General

Elaborar un documento que describa el funcionamiento y operación de los diferentes cambiadores de derivaciones en transformadores de potencia y técnicas para detección y corrección temprana de fallas, para reducir las desconexiones imprevistas del transformador.

## Específicos

1. Describir los distintos métodos existentes para regulación de tensión, como introducción a la necesidad del uso de los cambiadores de derivación.
2. Identificar los beneficios que brinda un cambiador de derivaciones bajo carga y los límites en los que puede operar.
3. Identificar y describir claramente las distintas formas de secuencia de operación de los cambiadores de derivación bajo carga.
4. Hallar la mejor técnica para realizar el mantenimiento a los cambiadores de derivaciones bajo carga, basados en normas y experiencias, esto para garantizar el buen funcionamiento, tanto del cambiador de derivaciones, como de todo el transformador y a su vez garantizar la confiabilidad del sistema eléctrico.

5. Describir las protecciones con las que debe contar un cambiador de derivaciones bajo carga, para garantizar que el cambiador de derivaciones y por lo tanto el transformador, no opere en condiciones de falla.
6. Definir las condiciones de operación de los cambiadores de derivación bajo carga.
7. Identificar y describir los métodos de detección de fallas en cambiadores de derivaciones bajo carga.

## INTRODUCCIÓN

La demanda eléctrica varía constantemente durante períodos en un día, una semana o un año, esta variación en la demanda produce variaciones del voltaje en los distintos puntos de un sistema eléctrico, los cuales deben ser compensados con algún método de regulación de tensión, para proporcionar una buena calidad de energía al usuario final, en cualquier momento. Existen normas que especifican las variaciones de voltaje tolerables, en caso de salirse de estos rangos, quien provoque el problema puede ser sancionado.

Existen distintas técnicas para la regulación de tensión en un sistema eléctrico, sin embargo, una buena técnica es colocar cambiadores de derivaciones en los transformadores de potencia, de manera que varíen la relación de transformación y logren un voltaje mayor o menor a la salida del transformador, según se requiera. La técnica de regulación de tensión con cambiadores de derivaciones bajo carga, prácticamente no tiene efecto en el factor de potencia. Para aplicaciones en las que se tenga un voltaje fuera del rango tolerable pero con factores de potencia bajos, se debe utilizar un método de regulación por inserción de potencia reactiva.

En los cambiadores de derivaciones bajo carga convencionales la conmutación se lleva a cabo en el aceite de la cuba del cambiador de derivaciones, lo cual produce una degradación progresiva del aceite aislante; sin embargo, actualmente existe una tecnología de conmutación en vacío, la cual se basa en integrar pequeñas cámaras al vacío en el recipiente del cambiador de derivaciones y dentro de estas cámaras se alojan los contactos de conmutación que cortan la corriente de carga, esta técnica elimina los arcos

eléctricos, con lo cual el aceite aislante no se degradará rápidamente. Los cambiadores de derivaciones bajo carga con tecnología de vacío prácticamente son libres de mantenimiento.

Los cambiadores de derivaciones bajo carga deben construirse de tal manera que no condicionen la operación del transformador. Para tener una buena confiabilidad del cambiador de derivaciones bajo carga, por lo tanto del transformador, es necesario realizar mantenimientos predictivos, preventivos y correctivos. Los tipos y períodos de mantenimiento óptimos son obtenidos de una combinación entre los datos del fabricante, de inspecciones rutinarias y de la experiencia del personal que realiza los trabajos.

Existen varios dispositivos destinados a proteger el cambiador de derivaciones bajo carga con el objeto de detectar anomalías en él, y desconectar el transformador de potencia para evitar que la falla cause daños severos, tanto en el cambiador de derivaciones como en el transformador en general.

# 1. GENERALIDADES

## 1.1. Ley de Faraday

Esta ley indica que, si un conductor eléctrico se mueve cortando las líneas de un campo magnético, se producirá una fuerza electromotriz (fem) inducida en las terminales del conductor, la magnitud depende de la intensidad del campo magnético, la longitud del conductor y de la velocidad con la que el conductor corta las líneas de flujo magnético. Si se tratase de un circuito cerrado se produciría una corriente inducida.

El fenómeno de inducción también sucedería si el flujo magnético que atraviesa al conductor es variable, tal como ocurre en los transformadores que el conductor de las espiras permanece estático, mientras que el campo magnético que los atraviesa es variable.

## 1.2. Ley de Lenz

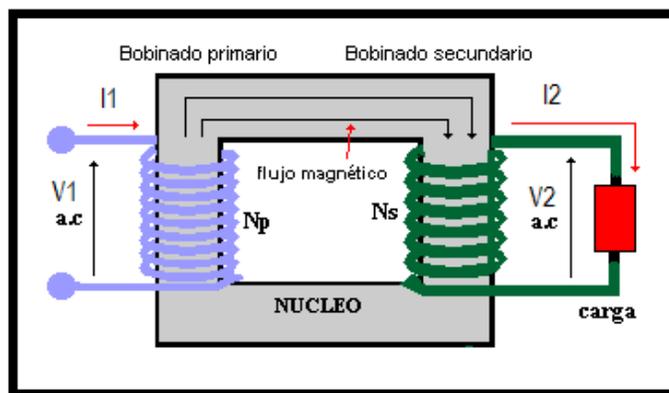
La ley de Lenz, dice que las fuerzas electromotrices o las corrientes inducidas serán de un sentido tal que se opongan a la variación del flujo magnético que las produjo. Esta ley es una consecuencia del principio de conservación de la energía.

### 1.3. El transformador

Es una máquina eléctrica y está constituido por un núcleo de material magnético que forma un circuito magnético cerrado y sobre de cuyas columnas o piernas se localizan dos devanados, uno denominado primario que recibe la energía y el otro el secundario, que se cierra sobre un circuito de utilización (carga) al cual entrega la energía, con  $N_1$  espiras en el primario y  $N_2$  espiras en el secundario, respectivamente. Los dos devanados se encuentran eléctricamente aislados entre sí.

Debido a que el transformador, es un dispositivo que no tiene partes móviles, transfiere la energía eléctrica de un devanado a otro bajo la ley de inducción de Faraday. Para comprender mejor este fenómeno se puede considerar un transformador ideal.

Figura 1. Transformador monofásico

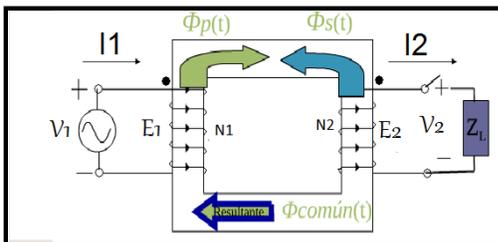


Fuente: transformadores eléctricos, [www.unicrom.com](http://www.unicrom.com). Consulta: 02/03/2012.

### 1.3.1. Transformador ideal

En un transformador ideal, se considera que no existen pérdidas de energía de ningún tipo, de esta manera puede decirse que existe un único flujo magnético que concatena tanto al devanado primario como al devanado secundario. Además de tener un único flujo, cuando se realiza el estudio del transformador ideal, se considera que el núcleo es totalmente permeable, por lo que el flujo generado en la bobina primaria es totalmente capturado por la bobina secundaria.

Figura 2. Circuitos eléctricos y magnéticos del transformador



Fuente: [www.unicrom.com](http://www.unicrom.com). Consulta: 02/03/2012.

De cursos de electromagnetismo se sabe que si se tiene una señal sinusoidal aplicada al primario tal y como sucede con la corriente alterna entonces se tendrá:

$$E = E_g = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{\text{máx}} \quad (1.1)$$

Con lo que se tiene que las fem inducidas en ambos devanados, son iguales a los voltajes en los extremos de los devanados, puesto que no existen pérdidas.

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_{\text{máx}} = V_1 \quad (1.2)$$

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_{\text{máx}} = V_2 \quad (1.3)$$

Donde:

$E_1$  = es la fuerza electromotriz (FEM) inducida en la bobina primaria.

$E_2$  = es la fuerza electromotriz (FEM) inducida en la bobina secundaria.

$V_1$  = es el voltaje aplicado en las terminales del devanado primario.

$V_2$  = es el voltaje obtenido en las terminales del devanado secundario.

Con lo que se tiene:

$$E_1/E_2 = N_1/N_2 = V_1/V_2 = a \quad (1.4)$$

Si se tiene una carga  $Z$  conectada en el lado secundario del transformador, entonces existirá una corriente circulante  $I_2$  en el lado secundario que, por la ley de Ohm, es:

$$I_2 = E_2 / Z \quad (1.5)$$

Además, por la ley de Lenz, la corriente  $I_2$  producirá un flujo magnético que se opone al flujo magnético existente en el núcleo, de tal manera que el flujo total en el núcleo disminuye, esto provocará una disminución de las fem  $E_1$  y  $E_2$ , por lo que al aumentar la diferencia entre  $V_1$  y  $E_1$ , existirá una mayor corriente en el primario que se compone de la corriente original  $I_0$  y una corriente  $I_1$ . La corriente  $I_1$  producirá un flujo magnético dado por  $N_1 \cdot I_1$  que es igual y opuesto al flujo producido por  $N_2 \cdot I_2$ , esto provocará que el flujo neto en el núcleo del devanado permanecerá prácticamente constante en condiciones

de operación normal, además permanecerán constantes las fem  $E_1$  y  $E_2$ , lo que a su vez provocará que el voltaje en el secundario permanezca a un valor estable.

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \quad (1.6)$$

Por lo tanto

$$I_1/I_2 = N_2/N_1 = 1/a \quad (1.7)$$

Donde:

$I_1$  = es la corriente que pasa por la bobina primaria

$I_2$  = es la corriente que pasa por la bobina secundaria

$N_1$  = es el número de espiras de la bobina primaria

$N_2$  = es el número de espiras de la bobina secundaria

$a$  = es la relación de espiras entre la bobina primaria y la bobina secundaria.

Un transformador elevador recibe la potencia eléctrica a un valor de voltaje, y la entrega a un valor más elevado, en tanto que un transformador reductor recibe la potencia a un valor alto de voltaje y la entrega a un valor más bajo, esto se logra debido a la relación entre el número de espiras del primario y el secundario como se ve en las ecuaciones anteriores.

### **1.3.2. Transformador real**

En un transformador real existen pérdidas por varios motivos, tales como:

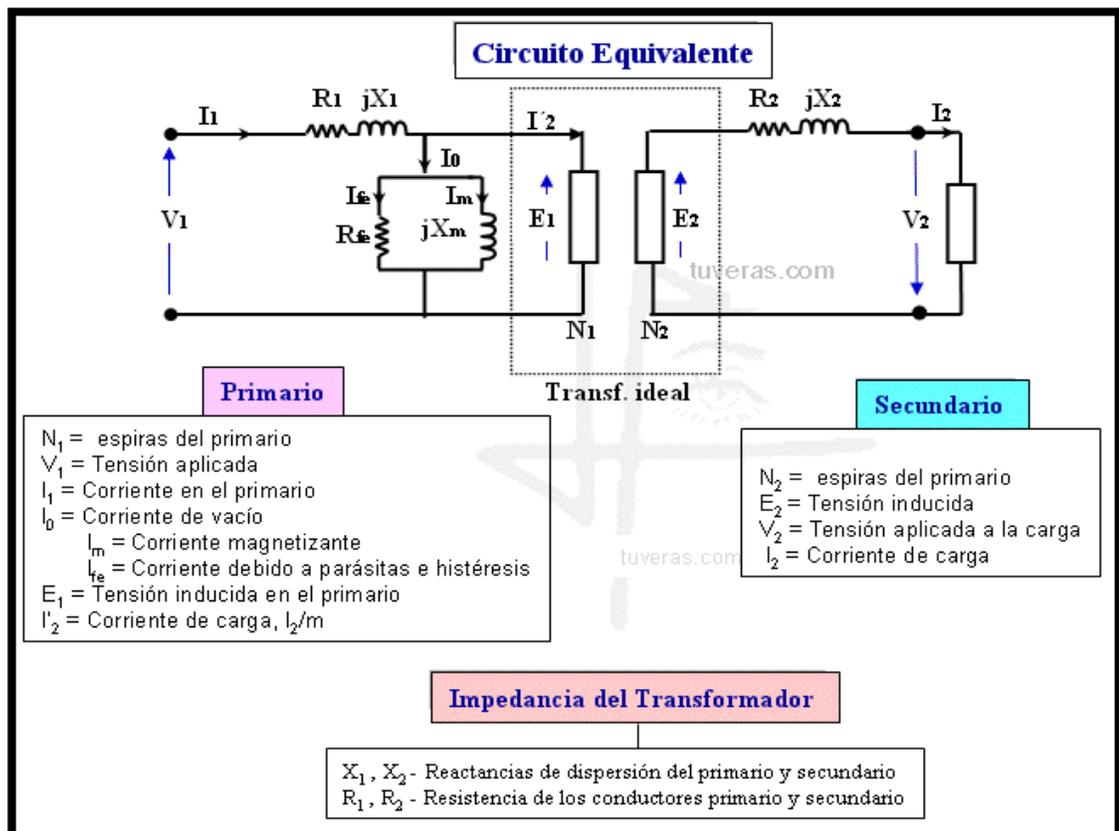
- Corrientes parásitas en el núcleo, esto porque el núcleo también es un conductor eléctrico en el que existirá una pequeña inducción y a su vez pequeñas corrientes circulando, lo que provoca calentamiento.
- Pérdidas por histéresis debido a la saturación del núcleo.
- Pérdidas por flujos de dispersión debido a líneas de flujo magnético que no concatenan con ambos devanados.
- Pérdidas por efecto Joule al presentar una resistencia los devanados.

### **1.3.3. Circuito equivalente del transformador real**

Cuando los transformadores se usan dentro de una red compleja, para estudiar el comportamiento del sistema es muy importante representarlo como un circuito; por ejemplo, para estudiar la distribución de la carga, las caídas de tensión, el corto circuito, etcétera, conviene; considerar lo que se conoce como: el circuito equivalente que en su forma más completa está constituido por un transformador ideal (de relación  $N_1/N_2$ ) conectado a las resistencias  $R_0$ ,  $R_1$  y  $R_2$  y a las reactancias  $X_0$ ,  $X_1$  y  $X_2$  y como se estudia en el curso de Máquinas Eléctricas, este circuito equivalente puede referirse al lado primario o al secundario, según sea requerido.

En un transformador, la resistencia  $R_0$  representa el efecto disipativo debido a las pérdidas en vacío,  $R_1$  es la resistencia del devanado primario,  $R_2$  la del secundario. En forma análoga  $X_0$  representa el efecto de absorción de la corriente de magnetización, en tanto que  $X_1$  y  $X_2$  representan los efectos de los flujos dispersos en los devanados primario y secundario.

Figura 3. Circuito equivalente del transformador



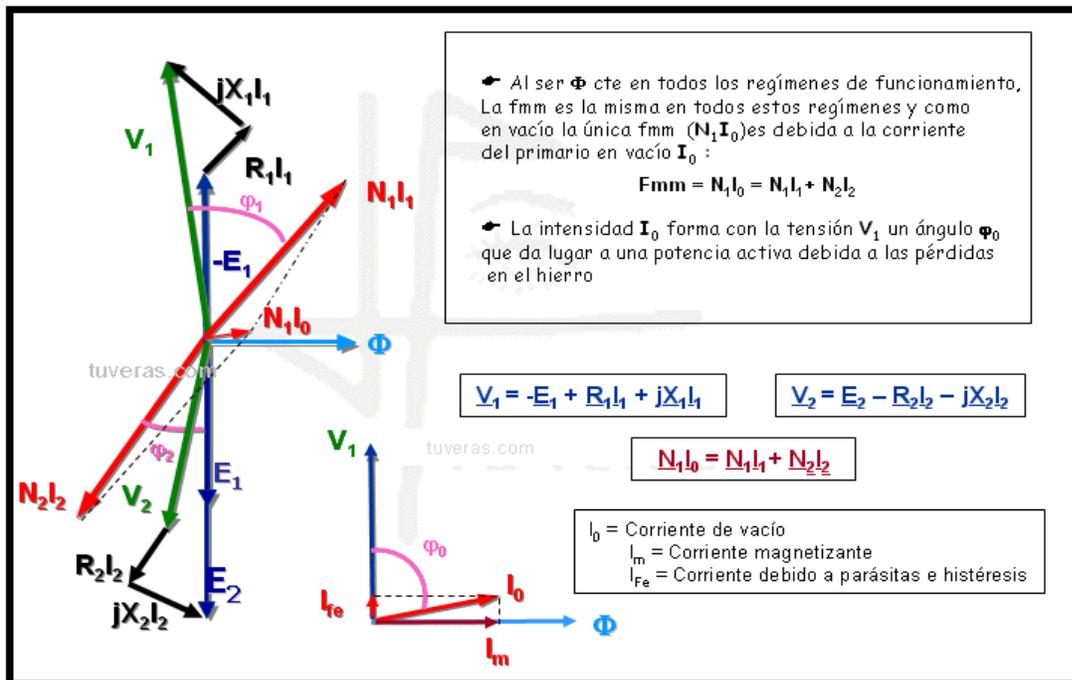
Fuente: <http://www.tuveras.com/transformador/eltransformador.htm>. Consulta: 02/03/12.

Los valores reales de estos parámetros pueden hallarse con pruebas de laboratorio y cálculos matemáticos, los cuales ayudan a la comprensión del funcionamiento del transformador.

### 1.3.4. Diagrama vectorial del transformador

Los distintos fenómenos que producen pérdidas en el transformador, también causan una caída de tensión en el transformador y a su vez una pérdida de potencia. Para poder comprender de mejor manera este fenómeno es con el que se construye el diagrama vectorial del transformador, donde se puede apreciar la caída de tensión como en la figura 4.

Figura 4. Diagrama vectorial del transformador monofásico



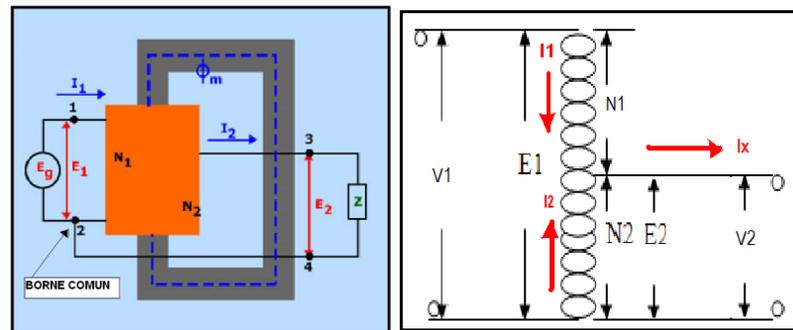
Fuente: <http://www.tuveras.com/transformador/eltransformador.htm>. Consulta 02/03/12.

En esta gráfica puede verse fácilmente que existe una caída de tensión en el transformador (el vector  $V_2$  es de menor magnitud que el  $V_1$  y están desplazados aproximadamente 180 grados).

## 1.4. El autotransformador

El autotransformador es, un transformador especial formado por un devanado continuo que se utiliza a la vez como primario y secundario, por lo que las tensiones de entrada y salida están aisladas entre sí. A diferencia del transformador de dos devanados, un autotransformador transfiere energía entre los dos circuitos, en parte por acoplamiento magnético y en parte por conexión eléctrica directa (el primario y secundario no son eléctricamente aislados como en el transformador). El transformador necesita  $N_1$  espiras en el primario y  $N_2$  espiras en el secundario; en cambio, el autotransformador solo emplea un devanado dividido en dos segmentos; el primario es conformado por  $N_1+N_2$  espiras, mientras que el secundario emplea  $N_2$  espiras.

Figura 5. a) El autotransformador, b) circuito eléctrico del autotransformador



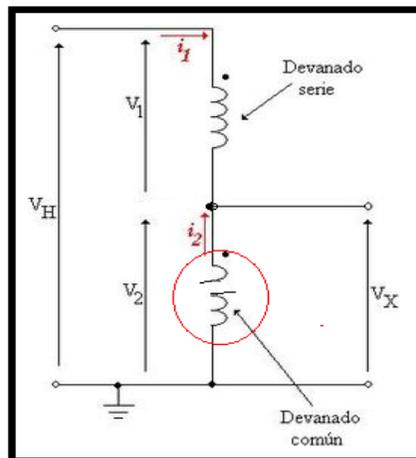
Fuente: a) <http://www.nichese.com/trans-auto.html>; b) <http://www.monografias.com/trabajos58/transformadores/transformadores2>. Consulta: 02/03/12.

Una de las ventajas de los autotransformadores frente a los transformadores, es el ahorro de material, el cual se mide de la siguiente forma: porcentaje de ahorro =  $(1 - V_p/V_s) \cdot 100$  (donde  $V_p$  es el voltaje del primario y  $V_s$  es el voltaje del secundario), esto supone también una reducción en el peso, en

consecuencia el autotransformador tiene menores pérdidas en el cobre y hierro, lo que mejora el rendimiento y la caída de tensión frente al transformador.

Sin embargo, también presentan dos inconvenientes fundamentales, por una parte al tener menor resistencia y reactancia, tendrá mayores corrientes de cortocircuito. Por otra parte, si la relación de transformación es muy elevada, se corre el riesgo de tener una sobretensión elevada en el secundario; por ejemplo, si se rompieran las espiras que comparten el primario y secundario, como se ve en la figura 6, se transmitirá la tensión del primario hacia el secundario, lo que causaría daños a los equipos conectados al secundario. Por lo que el uso de los autotransformadores se limita generalmente a relaciones menores de 2 ( $m \leq 2$ ).

Figura 6. **Voltaje del primario transferido al secundario en un autotransformador**



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Autotransformador>. Consulta: 02/03/12.

En el autotransformador existe una parte del devanado que es compartido tanto para el primario como para el secundario, a este segmento de devanado se le conoce como devanado común. Al otro segmento del devanado se le conoce como devanado serie, ver figura 6.

#### 1.4.1. Análisis del autotransformador

Para este estudio, cabe mencionar que las ecuaciones de la (1.1) a la (1.7) son aplicables también al autotransformador. En un transformador se tienen las siguientes condiciones:

- $V_1$ : tensión en el devanado primario.
- $i_1$ : corriente en el devanado primario.
- $V_2$ : tensión en el devanado secundario.
- $i_2$ : corriente en el devanado secundario.

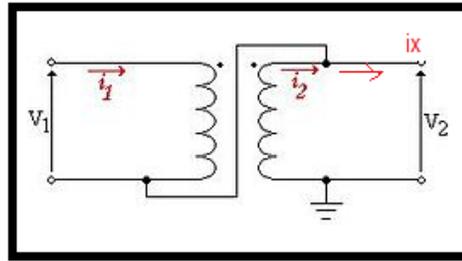
Y en un autotransformador se tiene:

- $V_H = V_1 + V_2$  : tensión en el primario (devanado serie + común)
- $V_X = V_2$ : tensión en el secundario (devanado común)
- $I_H = I_1$ : corriente de entrada en las terminales del primario
- $I_X = I_1 + I_2$  : Corriente de salida en las terminales del secundario
- $N_1 + N_2$ : número de espiras en el primario.
- $N_2$ : número de espiras en el secundario

Como se mencionó anteriormente, los autotransformadores tienen una mayor capacidad comparado con un transformador del mismo volumen. Un transformador puede conectarse como autotransformador, como se ve en la

figura 7. El análisis de este caso ayuda a comprender mejor la mayor capacidad de un autotransformador.

Figura 7. Transformador conectado como autotransformador



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Autotransformador>.

$$V_H = V_1 + V_2 \quad (1.8)$$

$$V_X = V_2 \quad (1.9)$$

$$i_X = i_1 + i_2 \quad (1.10)$$

$$i_H = i_1 \quad (1.11)$$

$$V_1 = \left( \frac{N_1}{N_2} \right) * V_2 \quad (1.12)$$

$$i_1 = \left( \frac{N_2}{N_1} \right) * i_2 \quad (1.13)$$

Si se sustituye (1.12) en (1.8) y se simplifica, se tiene:

$$V_H = \left( \frac{N_1}{N_2} + 1 \right) * V_2 \quad (1.14)$$

Si se despeja  $i_2$  en (1.13) y se sustituye en (1.10), luego se sustituye (1.11) en (1.10), por último se simplifica y se tiene:

$$i_X = i_H + i_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} + 1\right) i_H \quad (17)$$

Finalmente se tiene:

$$i_H = \left(\frac{N_2}{N_1 + N_2}\right) * i_X \quad (1.18)$$

Con respecto a la potencia, para el transformador se cumple que:

$$S = V_1 * i_1 \quad (1.19)$$

O bien, despreciando las pérdidas

$$S = V_2 * i_2 \quad (1.20)$$

La potencia en el autotransformador es:

$$S' = V_H * i_H \quad (1.21)$$

O bien, despreciando las pérdidas

$$S' = V_X * i_X \quad (1.22)$$

Por último, se obtiene:

$$S' = \left(\frac{N_2}{N_1} + 1\right) * S \quad (1.23)$$

De esta deducción matemática se comprueba que un autotransformador tiene una mayor capacidad que un transformador del mismo volumen.



## **2. REGULADORES DE TENSIÓN**

### **2.1. Subestaciones variadoras de tensión**

En los sistemas eléctricos existen distintos tipos de subestaciones eléctricas, entre ellos están las subestaciones variadoras de tensión. En estas subestaciones, como su nombre lo indica, lo que se hace es variar la tensión a distintos valores comprendidos entre 750, 500 400, 230, 138, 69, 34,5, 13,8 kilovoltios y en algunos casos 2,4 kilovoltios, motivo por el cual en dichas subestaciones se cuenta con transformadores de potencia para realizar el trabajo de conversión, según sea el caso puede ser una subestación elevadora o una subestación reductora de tensión.

#### **2.1.1. Subestaciones elevadoras de tensión**

Generalmente estas subestaciones son colocadas en la salida de un generador con el objeto de transmitir la energía a través de las líneas de transmisión, hacia algún lugar remoto con el mínimo de pérdidas, puesto que el efecto Joule se ve reducido cuando se eleva el voltaje y reduce la corriente, ya que este efecto es proporcionalmente al cuadrado de la corriente. Además, es importante exponer que en la mayoría de ocasiones en las subestaciones elevadoras de tensión los transformadores se conectan en YnD (el primario conectado en estrella aterrizada y el secundario en delta), esto para que los armónicos de secuencia cero que se producen en la generación, no se transmitan hacia las líneas de transmisión.

### **2.1.2. Subestaciones reductoras de tensión**

Estas subestaciones son aquellas en las que la tensión que se tiene es mayor a la que se necesita por el usuario. En estos casos en su mayoría los transformadores se conectan en Dyn (delta en el primario y estrella aterrizada en el secundario), puesto que debe de tratarse que los desbalances ocasionados por la carga, no pasen hacia las líneas de transmisión.

## **2.2. Regulación de tensión**

La regulación de tensión consiste en evitar las variaciones de tensión que se detectan en puntos receptores de un sistema de transmisión o distribución de energía. El problema de regulación difiere según se trate de una red de transmisión o una red de distribución.

En el sistema eléctrico interesa mantener la tensión lo más constante posible, si la tensión es demasiado alta, pueden originarse los siguientes problemas:

- La vida útil de los artefactos se deteriora, produciéndose en algunos casos daños irreparables.
- Una tensión muy elevada puede dañar el aislamiento de los equipos o saturar a los transformadores de potencia o distribución.

En redes de transmisión (alta tensión AT), se acepta una fluctuación máxima del voltaje de más o menos 5 por ciento del valor nominal (según el artículo 24 de las normas NTCSTS creadas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica y publicado en Guatemala, el 18 de noviembre de 1999).

Los artículos 19, 20 y 21 de las normas NTCSTS, establecen que, para efectos de estudio de regulación de voltaje en sistemas de transmisión, el período de medición debe ser en meses y el intervalo de medición de 15 minutos.

En redes de distribución (media tensión MT), se acepta una fluctuación máxima del voltaje de más o menos 7 por ciento para servicio rural mientras que para servicios urbanos se acepta una fluctuación máxima de más o menos 6 del valor nominal (según la normas NTSD creadas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica y publicados en Guatemala, el 7 de abril de 1999).

Los artículos 20, 21 y 23 de las normas NTSD, establecen que para efectos de estudio de regulación de voltaje en sistemas de distribución, el período de medición debe de ser de por lo menos siete días consecutivos en un mes y con intervalos de medición de 15 minutos.

### **2.3. Métodos de regulación de tensión**

Actualmente la solución al problema de regulación se hace más complicada debido a la complejidad y gran desarrollo de las redes de transmisión y distribución de energía. En todos los puntos de un sistema eléctrico, es indispensable utilizar algún elemento que garantice tener el valor del voltaje entre un rango tolerable, para proporcionar una buena calidad de energía al usuario final.

Existen distintos métodos para mantener regulado el nivel de voltaje en un valor específico, estos métodos pueden utilizar:

- Bancos de capacitores.
- Bancos de reactores.
- Reguladores de voltaje.
- Transformadores con derivaciones y mecanismo de cambio de derivaciones. (transformadores reguladores).

Los métodos para lograr la regulación de tensión por medio de bancos de capacitores y bancos de reactores, se conoce con el nombre de regulación de tensión por compensación de potencia reactiva. Cabe mencionar, además que el artículo 23.2 de las normas NTCSTS, establece lo siguiente: los distribuidores y grandes usuarios deberán contar con el equipo necesario que permita el control de tensión y suministro de potencia reactiva, debiendo tener en sus puntos de conexión con el sistema de transporte un factor de potencia inductivo, a toda hora, de 0,90 o superior.

### **2.3.1. Bancos de capacitores**

Para reducir la caída de tensión, es necesario minimizar el transporte de potencia reactiva a través de las líneas de transmisión o distribución, por lo que dicha potencia reactiva deberá ser suministrada, en la medida de lo posible, en el mismo punto de consumo (debe compensarse la potencia reactiva cerca de la carga para evitar que fluya en las líneas de transmisión o distribución). La función de un condensador estático conectado en paralelo, sea una unidad o un banco de capacitores, es suministrar la potencia reactiva demandada en el punto en qué está instalado. Por sus características, de tomar una corriente adelantada prácticamente en 90 grados con respecto al voltaje, un

condensador estático tiene el efecto de compensar en forma parcial o total la componente reactiva de la corriente demandada por un consumo inductivo.

Los beneficios de los bancos de capacitores en paralelo son:

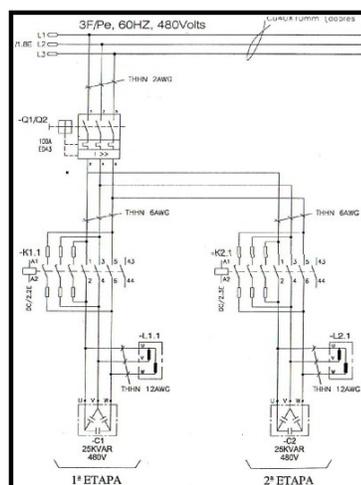
- Permite reducir al valor deseado, la componente reactiva de la corriente de línea.
- Mejora la regulación de tensión de la línea.
- Reduce las pérdidas en la línea.
- Mejora el factor de potencia.
- Permite obtener mayor potencia activa de los generadores, transformadores y líneas.

Los bancos de capacitores de potencia, son agrupamientos de unidades montadas sobre bastidores metálicos que se instalan en un punto de la red (en subestaciones o en alimentadores de distribución), con el objeto de suministrar potencia reactiva y regular la tensión del sistema. El diseño de los bancos debe atender a los siguientes criterios:

- Lograr la potencia reactiva deseada en un punto del sistema, dividiendo este valor en una determinada cantidad de capacitores monofásicos de una potencia unitaria normalizada.

- Conectar las unidades en una conexión definida generalmente en estrella aterrizada. De este modo normalmente los capacitores tienen una tensión nominal igual a la tensión de fase del sistema.
- Efectuar el conexionado de modo tal que permita el uso de un esquema de protección seguro, sencillo y económico. Si fuera conveniente, dividir la potencia total del banco en escalones, de modo de insertarlos progresivamente en función de las necesidades de potencia reactiva del sistema en cada momento (a esto también se le conoce como un banco de capacitores automático y es usado generalmente en la industria), como se observa en la figura 8.
- Instalar el banco en un sitio que satisfaga condiciones de seguridad, comodidad, facilidad para su operación, control y mantenimiento y que esté protegido contra intervenciones no autorizadas.

Figura 8. **Banco de capacitores automático**



Fuente: Manual de Subestación Eléctrica. Banco de capacitores de 600 kvar diagrama de fuerza. Definición, Clasificación y Tipos de Transformadores. p. 0029.

Los capacitores o bancos de capacitores, se instalan regularmente donde se tiene una considerable caída de tensión, debido a un bajo factor de potencia en atraso. Generalmente, se da en lugares donde se tiene una gran carga inductiva como en las industrias o en subestaciones de distribución, cuando la mayoría de cargas son residenciales. Se conectan en un punto de la red donde se quiere mantener el voltaje estable, por medio de interruptores y seccionadores, que se cierran en horas del día, cuando el voltaje caiga debajo de un rango tolerable y se abre en horas del día, cuando los parámetros del voltaje se encuentren entre valores tolerables. Los bancos de capacitores pueden incluir además, elementos de protección, sistemas de protección por desequilibrio, controladores automáticos, reactancias de inserción, etcétera.

Así mismo, los bancos de capacitores, son de gran utilidad en las líneas de transmisión cortas, en las que el efecto inductivo es significativo y el efecto capacitivo es despreciable, para mejorar el factor de potencia y a su vez la caída de voltaje.

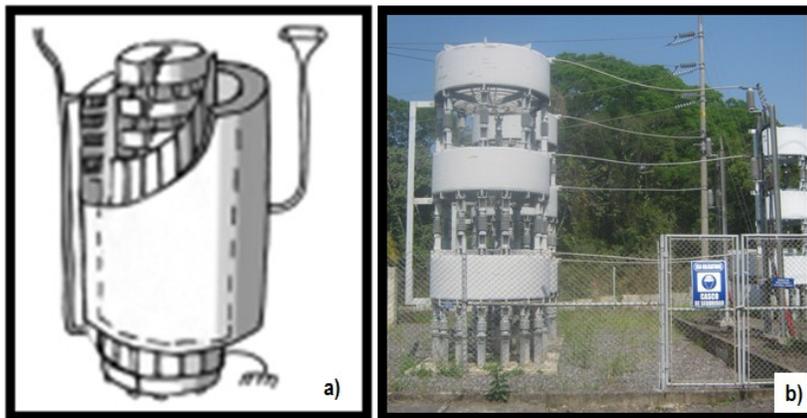
### **2.3.2. Bancos de reactores**

Los reactores de potencia son el medio más compacto y de mejor relación coste-eficacia, para compensar el efecto capacitivo en líneas de transmisión largas de alta tensión o en sistemas de cables de gran longitud.

Los bancos de reactores se instalan en las líneas de transmisión mediana y larga puesto que en estas, el efecto capacitivo es considerable, causando un incorrecto voltaje elevado, de este modo al introducir bancos de reactores eléctricos, se compensa esta elevación indeseada de voltaje y se mejora el factor de potencia.

La construcción de los reactores es muy compleja, de manera que; cada reactor es único y construido para aplicaciones con especificaciones predeterminadas, ya que exige diseño de ingeniería avanzada y mano de obra de alta calidad.

Figura 9. **Reactor de potencia para media tensión**



Fuente: Banco de reactores de 13.8KV, Subestación Los Brillantes Retalhuleu.

En la figura 9, se muestra como un diseño del devanado, con una entrada central y una pantalla electrostática entre el núcleo y el devanado. En ocasiones, según sea el nivel de voltaje y la capacidad, los reactores pueden tener tamaños tan grandes que se construyen sumergidos en aceite y pueden parecer transformadores de potencia, tal es el caso de los reactores en la subestación Brillantes de la línea Tapachula-Brillantes 400 kilovatios, en el cual la longitud de la línea es mayor de 100 kilómetros.

Figura 10. **Reactor de potencia para una línea de 400KV**



Fuente: Banco de reactores, línea Tapachula en subestación Los brillantes.

### **2.3.3. Regulador de voltaje por pasos**

Se instalan en lugares donde se tienen problemas de variaciones de voltaje, pero un factor de potencia aceptable ya que este únicamente eleva o baja el nivel de voltaje pero tiene un efecto muy pequeño en el factor de potencia. Estos reguladores tienen generalmente un rango de regulación de más o menos 10 por ciento y se fabrican hasta con un máximo de 32 pasos.

Figura 11. **Banco de reguladores por pasos**



Fuente: Banco de reguladores de 13,8 kV, subestación La Esperanza Quetzaltenango.

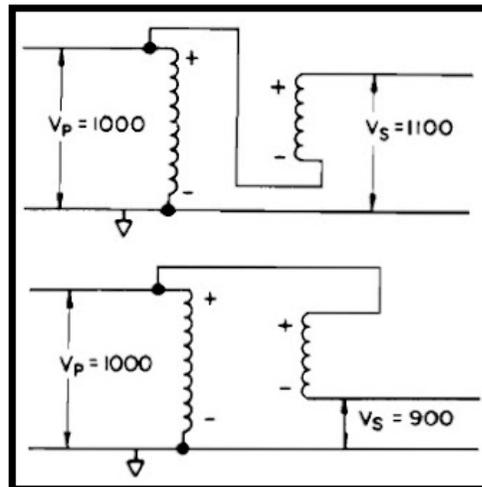
El regulador de tensión por pasos es prácticamente un transformador que tiene su devanado de alta y de baja tensión, con la condición que existe una conexión eléctrica entre ambos devanados y se arreglan de tal manera que en la terminal de salida pueda haber mayor o menor tensión que en la terminal de entrada. En la posición central, prácticamente la terminal de entrada y la de salida están conectadas al mismo punto, y por lo tanto el voltaje de salida es exactamente igual que el de entrada.

Cuando ocurre un sobre voltaje o bajo voltaje en la entrada, los devanados primario y secundario se conectan de manera tal que el voltaje de salida es la suma o la diferencia de los voltajes de los devanados, como se ve en el ejemplo 2.1, este es el principio por el cual se puede realizar una regulación del voltaje en la salida.

Ejemplo 2.1. Si un transformador tiene una relación de vueltas de 10:1 con 1 000 voltios aplicada en el primario, entonces, la tensión del secundario será de 100 voltios. La adición o sustracción entre las tensiones de ambos devanados mediante las conexiones eléctricas, resulta en que la tensión de salida será 1 100 o 900 voltios respectivamente, como se puede ver en la figura 12. Por lo tanto, el transformador se convierte en un autotransformador con la capacidad para aumentar o disminuir el voltaje del sistema en un 10 por ciento.

En el devanado secundario generalmente existen varias derivaciones para poder regular paulatinamente los cambios de voltaje en el secundario.

Figura 12. **Diagrama eléctrico de un regulador por pasos**

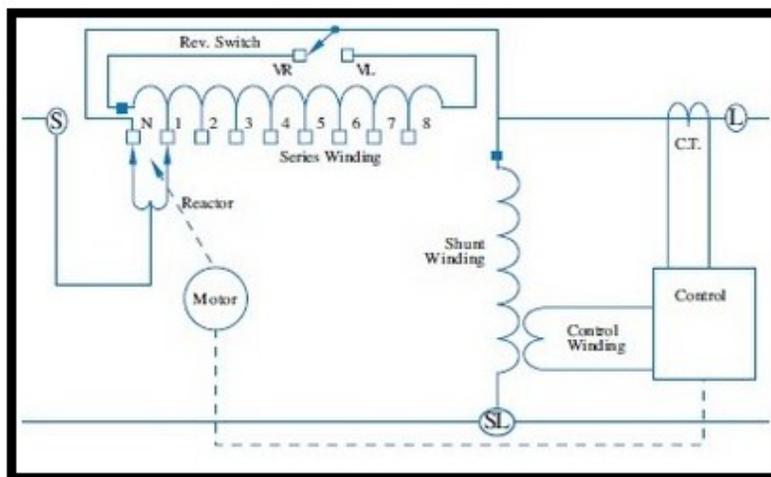


Fuente: Step-Voltage Regulators, <http://www.powerqualityworld.com/2011/04/step-voltage-regulator-utility.html>.

La tensión del sistema se ajusta al nivel requerido por medio del selector de derivaciones, y cambio de posición del interruptor de inversión que hace que los pasos del secundario se sumen o resten del primario. Esto es posible ya

que el regulador de voltaje automático incluye controles basados en microprocesadores o mecánicos que le dicen a la unidad cuándo y cómo cambiar los pasos. Por otra parte, los controladores modernos están equipados con capacidades de adquisición de datos y la comunicación para aplicaciones remotas.

Figura 13. **Diagrama esquemático de regulador de tensión por pasos**

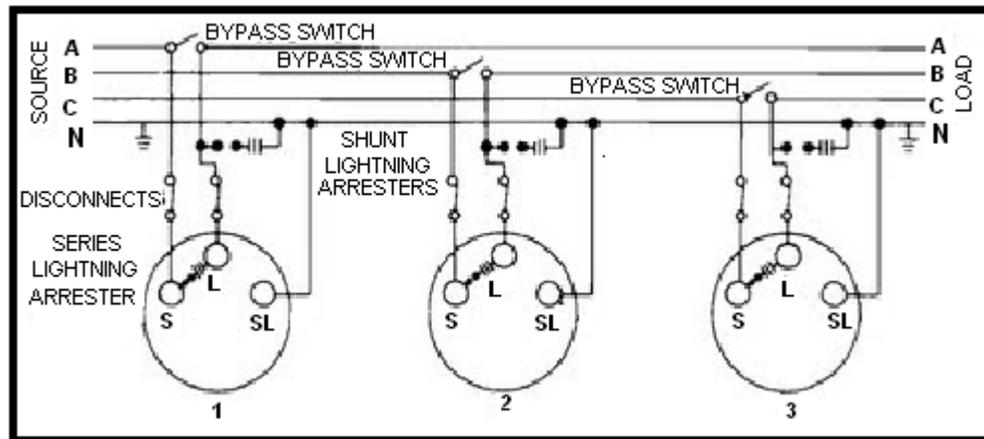


Fuente: Step-Voltage Regulators, <http://www.powerqualityworld.com/2011/04/step-voltage-regulator-utility.html>. Consulta: 02/03/12.

Los reguladores pueden ser monofásicos o trifásicos. Sin embargo, en un alimentador de tres fases, son más comunes las aplicaciones monofásicas conectadas en bancos de tres, conectadas generalmente en estrella aterrizada. El uso de bancos de reguladores, es porque las líneas de servicio de distribución son típicamente desequilibradas en su construcción, añadido a este desequilibrio cargas monofásicas que crean un significativo desequilibrio en las corrientes de línea. Por lo tanto, tres reguladores controlados de forma

independiente pueden obtener un mejor equilibrio entre las tensiones de fase que una sola unidad trifásica.

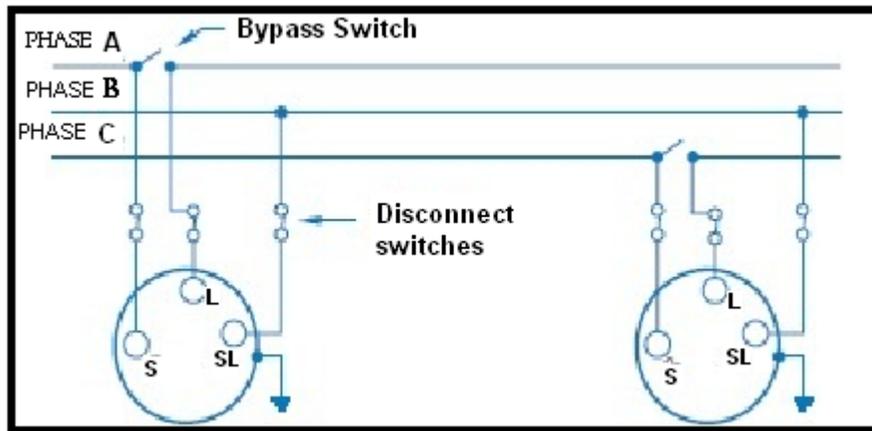
Figura 14. **Banco de reguladores conectados en estrella aterrizada**



Fuente: Step-Voltage Regulators, <http://www.powerqualityworld.com/2011/04/step-voltage-regulator-utility.html>. Consulta: 02/03/12.

Además, existe una posibilidad de hacer un banco en delta abierta con lo que solo se requiere de dos reguladores; por lo tanto, son menos costosos que un completo banco trifásico como se ve en la siguiente figura, con la única desventaja que su capacidad se reduce.

Figura 15. Banco de reguladores conectados en delta abierta



Fuente Step-Voltage Regulators, <http://www.powerqualityworld.com/2011/04/utility.html>.

Consulta: 02/03/12.

### Aplicaciones del regulador de voltaje

Se dice que los reguladores de tensión por pasos son relativamente lentos. Estos tienen un retardo de tiempo de al menos 15 segundos. Por lo tanto, no son adecuados para aplicaciones en las que la tensión varía en ciclos o segundos. Su utilización principalmente es para aumentar la tensión en los alimentadores largos, donde la carga está cambiando lentamente durante varios minutos u horas. La banda de tensión típicamente varía desde 1,5 hasta 3,0 V en una base de 120-voltios.

### Designación de un regulador de tensión por pasos

Estos son los pasos básicos para determinar el tamaño y tipo de conexión del regulador de tensión para aplicaciones de servicios públicos:

- Determinar la configuración del sistema (es decir, 3-fases, 4 hilos estrella aterrizada o 3 fases, 3 hilos delta). Esta será la base para el tipo de conexión del regulador.
- Establecer el rango de regulación de voltaje necesario (por ejemplo más o menos 5 por ciento, más o menos 10 por ciento).
- Determinar el voltaje de fase del sistema en el que será conectado. Recordar que el voltaje de fase se ve afectada por la configuración del sistema, delta o estrella.
- Calcular la corriente máxima de carga del alimentador o de la línea.
- Multiplicar el rango de regulación de voltaje (2), voltaje de fase del sistema (3) y la corriente máxima de la línea (4) para obtener el tamaño deseado kilo voltios amperios del regulador automático de tensión.

Ejemplo 2.2. Hallar el tamaño del regulador de tensión por pasos necesarios para un banco de 3 fases, 4 hilos conexión estrella aterrizada, con una tensión del sistema de 13800Y /7970 V. La regulación de la tensión requerida es de 10 por ciento y la carga máxima conectada es de 6,0 mili voltios amperios.

- Configuración del sistema es de 3 fases, 4 hilos, conexión en estrella aterrizada.
- La regulación de voltaje = 10 por ciento.

- La tensión de fase es el voltaje de línea a neutro = 7,97 kilo voltios (ya que es estrella con 4 hilos)
- Corriente de carga =  $6,0 \text{ milivoltios amperios} / (1,732 \times 13,8 \text{ kilo voltios})$   
= 251 amperios
- Regulador de voltaje tamaño kilo voltios amperios = 10 por ciento x 7,97 x 251 kilo voltios amperios = 200 kilo voltios amperios

Se elegirán tres reguladores de voltaje de 32 pasos, cada uno con una calificación de nivel de 250 kilo voltios amperios amperios, 7970 voltios, la regulación de más o menos 10 por ciento.

#### **2.3.4. Transformadores con derivaciones**

En su mayoría, los transformadores de potencia son construidos con un número determinado de derivaciones, con el objetivo de poder cambiar la relación de transformación a distintos valores y de este modo variar el voltaje en la salida del transformador en determinado momento. Para realizar la selección de las distintas derivaciones, estos transformadores contienen un mecanismo de cambio de derivación, los diferentes tipos se verán en el siguiente capítulo.

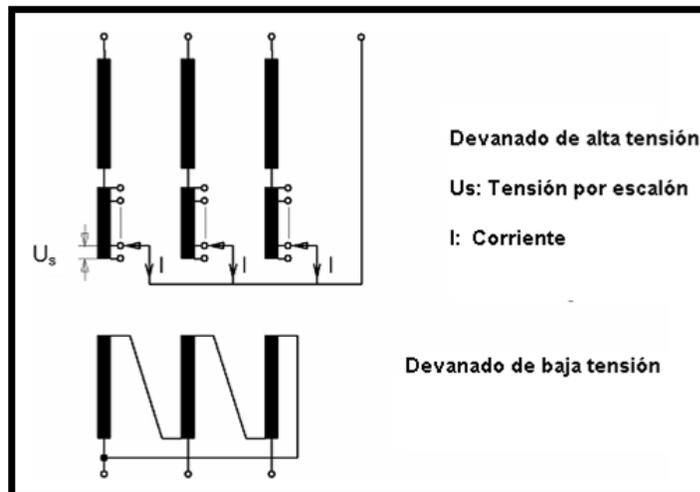
Figura 16. **Transformador con derivaciones**



Fuente: Fotografía tomada a video, Maintenance-free. VACUTAP® VR 1300  
[[www.keepvid.com](http://www.keepvid.com)].

Los transformadores reguladores de tensión tienen la propiedad de poder hacer cambios de derivación, aún cuando la carga este siendo alimentada y sin dejar de suministrarle energía en algún momento. Estos transformadores, en su construcción, cuentan con un devanado principal, además, un devanado de regulación (devanado al cual se conecta el mecanismo de cambio de derivación), como se ve en la figura 17.

Figura 17. **Devanados de un transformador regulador de tensión**



Fuente: document en pdf. On-Load Tap-Changers for Power Transformers, A Technical Digest, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com).

Estos transformadores se instalan en lugares donde se trata de tener un valor más o menos constante de voltaje, cuando haya variaciones de voltaje en el primario.

Aunque el primario y el secundario no están conectados entre sí, la potencia en el primario está acoplada al secundario por medio del campo magnético del núcleo. Cada vez que la carga requiera un voltaje mayor o menor al proporcionado por la red, el transformador puede aumentar o disminuir el voltaje de salida si se incrementa o reduce el número de vueltas del devanado secundario LS (comparado con las vueltas del primario LP) a fin de proporcionar la cantidad de voltaje necesaria en el secundario.

Nota: en la construcción de equipos de regulación de voltaje, ya sean cambiadores de derivaciones bajo carga en transformadores de potencia o

reguladores por pasos, se basan en la norma ANSI C-84 1989. Esta norma indica una tolerancia de más o menos 10 por ciento de variación del voltaje.

Relación de vueltas: al igual que en los transformadores convencionales, el cociente entre el número de vueltas del devanado primario y el secundario, es la relación de vueltas del transformador. Por ejemplo, 500 vueltas en el primario y 50 en el secundario dan una relación de vueltas de 500/50 o 10:1. Es preciso establecer que en un transformador con derivaciones existen varias relaciones según sea la derivación que se tome; sin embargo, siempre que se hable de relación de transformación se tomará como la derivación central a menos que se diga lo contrario.

Relación de voltaje: cuando el secundario tiene un mayor número de vueltas que el primario, el voltaje en aquel es mayor que en el primario y por consiguiente el transformador aumenta el voltaje. Cuando el secundario tiene un número menor de vueltas que el primario, el transformador reduce el voltaje.

Por lo anteriormente expuesto, puede verse qué; si variara el número de vueltas del primario sin que varié el número de vueltas del secundario entonces se tendrá un cambio en la relación de vueltas, lo que a su vez causaría un aumento o disminución en el voltaje secundario para un mismo valor del voltaje primario, este efecto es el que se aprovecha para tratar de mantener un voltaje constante en el secundario cuando existen variaciones en el primario.

Al igual que en un transformador de potencia convencional, en un transformador con derivaciones también existe una caída de tensión diferente para cada una de las derivaciones; sin embargo, para efectos de cálculos y análisis de sistemas, se tomará únicamente el diagrama vectorial y caída de tensión de la derivación central.

Número de derivaciones: es el número de terminales que tiene el devanado de regulación.

Número de pasos: es el número de los distintos niveles de voltaje que pueden obtenerse de un transformador regulador sin tomar en cuenta el voltaje nominal.

Número de posiciones: es el número de los distintos niveles de voltaje que pueden obtenerse de un transformador regulador, tomando en cuenta el voltaje nominal. El número menor debe corresponder con la derivación en la que se tenga un menor voltaje de salida en el devanado secundario, por consiguiente, la posición más alta corresponde al mayor voltaje de salida posible.

La figura 18 muestra la capacidad de voltaje para cada una de las derivaciones que se encuentran en el devanado primario, para una configuración con 20 pasos, 21 posiciones y regulación de más o menos 10. En esta gráfica puede verse que la posición nominal es la posición 11, en la posición 1 (derivación +1) se tendrá que el devanado primario soporta el 110 por ciento del voltaje nominal y en la posición 21(derivación -11) soporta únicamente el 90por ciento del voltaje nominal.

Por otro lado si el voltaje primario permanece constante, para la posición 1 (derivación +1) se tendrá una reducción en 10 por ciento del voltaje secundario; en la posición 21 (derivación -1) se tendrá un aumento en 10 por ciento del voltaje nominal secundario.

Figura 18. Capacidad de voltaje para las derivaciones

POSICION DEL CAMBIADOR	CONEXION	TAPS	VOLTAJE kV	CORRIENTE		
				ONAN	ONAF	ONAF
				AMPERES		
1	K+	1	440/√3	177	236	295
2		2	436/√3	179	238	298
3		3	432/√3	180	241	301
4		4	428/√3	182	243	304
5		5	424/√3	184	245	306
6		6	420/√3	186	247	309
7		7	416/√3	187	250	312
8		8	412/√3	189	252	315
9		9	408/√3	191	255	318
10		10	404/√3	193	257	322
11A		11				
11B	K+/-	K	400/√3	195	260	325
11C		1				
12	K-	2	396/√3	197	262	328
13		3	392/√3	199	265	331
14		4	388/√3	201	268	335
15		5	384/√3	203	271	338
16		6	380/√3	205	273	342
17		7	376/√3	207	276	345
18		8	372/√3	210	279	349
19		9	368/√3	212	282	353
20		10	364/√3	214	286	357
21		11	360/√3	217	289	361
B.T.			230/√3	339	452	565
TERCIARIO			13,8	1087	1449	1812

Fuente: Transformador de reserva 400/230kV subestación Los Brillantes Retalhuleu.

Hay varios tipos de equipos cambiadores de derivaciones que dependen del valor de voltaje y los kilo voltios amperio del equipo se construyen de acuerdo al rango de regulación en 8, 16 y 32 pasos y un rango de regulación de hasta más o menos 10 por ciento del voltaje nominal. Por ejemplo, considerando un transformador con cambiador de derivaciones de 16 pasos, si se tienen 17 posiciones diferentes (8 derivaciones para subir el voltaje y 8 para disminuir el voltaje en la salida), entonces cada paso representaría (10/8) por ciento del cambio de voltaje.

Corriente en el secundario: de acuerdo con la ley de Ohm, la cantidad de corriente en el secundario es igual al voltaje del secundario, dividiendo entre la impedancia de la carga, con lo que puede verse que la corriente se mantendrá más o menos constante para un cambio de derivación, a menos que varíe la carga o el voltaje en el secundario del transformador, por lo tanto, la potencia de la carga permanece prácticamente invariante para un cambio de derivación.

#### **2.3.4.1. Tomas de regulación**

Para regular la tensión de salida de un transformador monofásico, se establecen diversas derivaciones también llamadas tomas, las derivaciones pueden estar ubicadas en distintos puntos del devanado según se requiera.

En el caso de transformadores trifásicos conectados en estrella existe más de una posibilidad para la posición de las derivaciones: pueden disponerse las tomas en las entradas de las fases, en el centro del devanado o en el punto de estrella, de modo que cuando se haga la conmutación de las derivaciones se haga un corrimiento del punto neutro; tratándose de una conexión delta, la colocación de las derivaciones al inicio o al final de cada devanado es lo mismo.

Las derivaciones física y eléctricamente pueden colocarse ya sea en el devanado de alta o de baja tensión, sin embargo, desde el punto de vista económico no es indiferente el empleo de cualquiera de las posibles soluciones técnicas (derivaciones en alta tensión o en baja tensión) por varios motivos:

- Es poco económico disponer la toma en baja tensión o en general en arrollamientos con tensiones relativamente bajas, la razón es que se tendría un número relativamente reducido de espiras entre derivaciones y la corriente de corte sería elevada con lo que se requeriría de contactos de conmutación muy robustos en caso de cambiadores de derivación bajo carga. Lo anterior se debe a que las derivaciones de los devanados y los contactos de los conmutadores deberían preverse para elevadas intensidades, por lo que es más económico conmutar en alta tensión, ya que se presenta una menor corriente en los contactos y además se cuenta con un mayor número de espiras para hacer las derivaciones.
- Si ambos devanados son para alta tensión, desde el punto de vista del conmutador, pueden ser aceptables cualquiera de las dos soluciones. En tal caso, es preferible disponer la conmutación en el arrollamiento correspondiente a la tensión variable. El propósito es poder proyectar el transformador con la mayor economía posible.
- Un aspecto técnico adicional que condiciona la colocación de las tomas en el devanado de alta tensión es que cuando se trata de transformadores con una tensión reducida en el lado de baja tensión, al tener entre las tomas un número entero de espiras, el escalón mínimo que puede conseguirse en baja tensión puede ser superior al exigido. Por ejemplo, considere un transformador con una tensión de 260 voltios/fase y 15 voltios/espira: si se ponen tomas entre dos espiras consecutivas se obtiene un cambio relativo de  $15/260 = 5,77$  por ciento que representa el escalón mínimo posible y supone un cambio relativamente grande en la variación de tensión del transformador.

Es preciso destacar que un devanado con tomas debe tener una sección constante (todas sus tomas están previstas para la máxima intensidad asignada  $I_{1n}$ ).

En principio puede establecerse cualquier número de derivaciones o tomas, y así: (30,000 voltios más o menos 2,5 por ciento, más o menos 5 por ciento, más o menos 7,5 por ciento) / 380 voltios-220 voltios, que corresponde a un campo de regulación desde más 7,5 por ciento a –menos 7,5 por ciento. Desde el punto de vista económico, no es conveniente excederse innecesariamente en el margen de 10 por ciento de regulación, ya que encarece el precio del transformador.

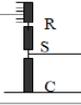
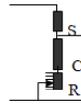
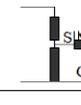
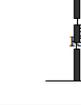
Un aspecto importante a tener en cuenta es la situación de las derivaciones frente a la posición geométrica de los devanados. En una conexión delta conviene que las tomas se realicen en la parte central del devanado de alta tensión del transformador, pues con esto se logra reducir los esfuerzos axiales en las terminales del devanado y en una conexión estrella conviene más ubicarlos en el punto de estrella (recordar que los extremos de los devanados están expuestos a un mayor esfuerzo eléctrico, por lo que generalmente se refuerza el aislamiento en este punto), que pueden ser muy fuertes en casos de cortocircuitos.

#### **2.4. Autotransformador regulador**

Al igual que los transformadores, existen autotransformadores que también se construyen con un determinado número de derivaciones para regular la tensión.

Figura 19. Derivaciones en un autotransformador

Tabla 2.1. Disposición de arrollamientos en el autotransformador

LUGAR	FIGURA	INCONVENIENTE
En el extremo de línea		Los elementos del regulador (conmutador, selector) están al potencial de la línea. Elementos en tensión poco separados físicamente
En el extremo de neutro		Al actuar el regulador varía la tensión de AT y la de BT Necesidad de aumentar el número de espiras eliminadas para una determinada variación en la relación de transformación
En serie con la salida de BT		Tomas diseñadas para soportar más corriente Encarece el regulador
En la unión entre el arrollamiento común y el arrollamiento serie		La corriente en las espiras de regulación cambia de valor en función de la toma seleccionada Dificultad para compensar axialmente los amperios vuelta entre arrollamientos

Fuente: Detección de Averías en OLTC con el patrón de vibraciones,  
Universidad Carlos III de Madrid. p. 009.

Como se observa en la figura 19, en el caso de un autotransformador regulador las derivaciones pueden estar situados en distintos puntos como; el devanado común, el devanado serie o en el punto de unión de ambos devanados. La recomendación es que las derivaciones se ubiquen en el devanado serie, puesto que es un devanado que pertenece propiamente al lado de alta tensión, aunque cabe mencionar que ninguna de todas las posibilidades se tiene una excelente satisfacción.



### **3. TIPOS DE CAMBIADORES DE DERIVACIÓN**

Según su operación, básicamente existen dos tipos de cambiadores de tomas o derivaciones para transformadores: cambiadores de derivaciones sin carga OCTC por sus siglas en inglés *Off-circuit Tap-changer* y cambiadores derivaciones bajo carga CDBC, por sus siglas en español u OLTC. por sus siglas en inglés *On-Load Tap-Changer*.

#### **3.1. Cambiadores de derivación sin carga (OCTC)**

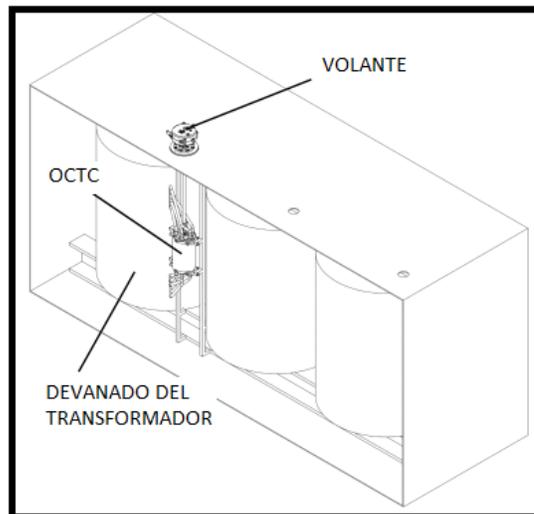
Este tipo de cambiadores se usan en lugares donde la variación de voltaje ocurre a largo plazo (también llamado regulación estacional, estas variaciones generalmente son entre 5 y 10 por ciento en una misma operación). Estos cambios se llevan a cabo con el transformador completamente desenergizado o sin tensión, la mayoría de cambiadores de derivación sin carga, cuentan con 4 derivaciones de 2,5 por ciento de la tensión nominal aunque existen una gran número de derivaciones posibles.

En los cambiadores de derivaciones, ya sea sin carga o con carga, todas las derivaciones deben soportar la potencia nominal (corriente nominal) del transformador, para que la capacidad del transformador no se vea limitada por el OCTC o OLTC, según sea el caso.

Como los cambiadores de derivaciones sin carga se operan únicamente cuando el transformador está desenergizado, se instalan sumergidos en el aceite de la cuba principal con un volante o control instalado sobre la cuba del transformador para poder realizar las operaciones de forma manual, como se

ven en la figura 20. Algunas veces el volante manual se instala en cualquier punto, pero es recomendable que se instale sobre la cuba principal para que no sea accesible cuando el transformador esté energizado.

Figura 20. **Cambiador de derivaciones sin tensión**



Fuente: Instrucciones de operación del OCTC tipo VACUTAP® VR marca MR.

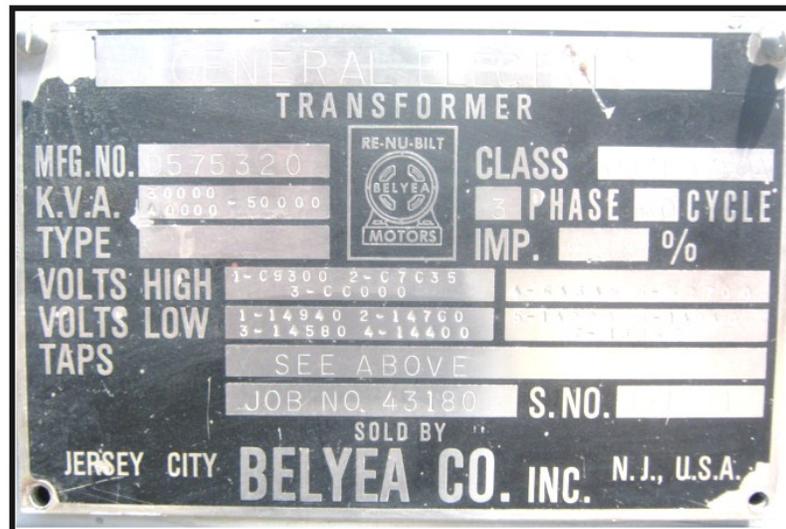
### **3.1.1. Según la ubicación de las derivaciones en el devanado**

Los cambiadores de derivaciones sin carga son equipos que pueden configurarse para distintas aplicaciones. A continuación se explica cada una de las configuraciones más usuales para cambiadores de derivación sin carga.

Todos los tipos de cambiadores de derivaciones están generalmente ubicados en el primario (devanado de alta tensión), ya que en este devanado se puede tener una mayor regulación por existir más espiras y por circular una corriente menor en condiciones normales. Sin embargo, en algunas ocasiones por requerimientos específicos se pueden instalar las derivaciones en el

secundario o en ambos, como es el caso del transformador para distribución de 69/13,8 kilo voltios, 50 mili voltios amperios instalado en Subestación La Esperanza, Quetzaltenango, en el que se tiene tres derivaciones en el lado de alta tensión y cuatro derivaciones en el lado de baja tensión.

Figura 21. **Placa de características de transformador con derivaciones en el primario y secundario**



Fuente: Transformador 69/13.8kV Subestación La Esperanza Quetzaltenango.

En seguida se describen las distintas posibilidades de ubicar las derivaciones en el devanado del transformador, también se describe su forma de operación.

### 3.1.1.1. Cambiador de derivaciones sin tensión, conexión lineal

En este caso, las derivaciones se ubican en un extremo del devanado del transformador. Esta es la forma más sencilla y más económica de cambio de derivación sin carga, en el cual el devanado de alta se toma desde el terminal 1 al 2. En condiciones normales (voltaje nominal), el selector de derivaciones se encuentra en la derivación central (posición 5 de la figura 22), de manera que tenga el mismo número de posiciones para elevar el voltaje, que para reducirlo; para poder realizar este proceso es necesario que el devanado de alta tensión del transformador cuente con sus derivaciones en un extremo. Los criterios de cambio son:

- Si se supone un voltaje constante en el devanado primario, cuando se tenga un nivel de voltaje en el secundario menor al nominal y que salga de las tolerancias establecidas, es preciso hacer un cambio de derivación hacia las derivaciones 4 y 3 de la figura 22, lo que causará que el número de espiras en el primario se reduzca de manera que la relación de voltaje de la ecuación 3.1 sea menor a la nominal; como se considera al voltaje primario constante se tendrá un aumento en el voltaje secundario.

$$\frac{N1}{N2} = \frac{Vp}{Vs} = m1 < m \quad (3.1)$$

Dónde:

$V_p$  es el voltaje del devanado primario.

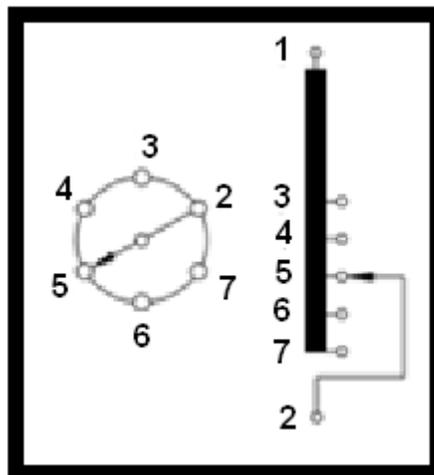
$V_s$  es el voltaje del devanado secundario.

$N_1$  y  $N_2$ : los respectivos números de espiras de cada devanado.

$m_1$ : es la nueva relación de transformación y  $m$  es la relación de transformación nominal.

Si se tiene una tensión en el devanado secundario mayor a la nominal, se debe hacer un cambio hacia las derivaciones superiores (6 y 7 de la figura 22), de manera que el número de espiras del devanado primario aumenta y la relación de voltaje de la ecuación 3.1 será mayor a la nominal, por lo que se tendrá una reducción del voltaje en el devanado secundario.

Figura 22. **OCTC, Conexión lineal**



Fuente: Datos Técnicos de OCTC marca MR tipo DEETAP® DU.

### **3.1.1.2. Cambiador simple de derivaciones sin tensión central**

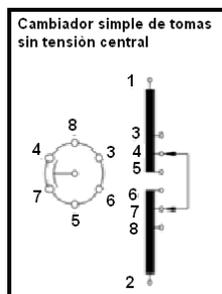
En este caso es necesario que el devanado del transformador esté dividido en dos partes (dos devanados en serie). El inicio de una de las dos partes del devanado será donde se conectará una terminal del transformador y se designará con el número 1, mientras que al final de este devanado se deja un número determinado de derivaciones para el proceso de cambio. En el inicio de la otra parte del devanado, se tendrá un número determinado de derivaciones, de manera que ambas partes tengan una misma cantidad de derivaciones y el final de este segundo devanado se designará como número 2. El número 1 y 2 son los extremos del devanado de alta tensión, mientras las derivaciones son designadas con los números del 3 en adelante como se muestra en la figura 23.

Las derivaciones quedan en el centro del devanado (en medio de dos devanados que forman el devanado de regulación). Los cambios de derivación se llevan a cabo en el centro del devanado. En esta configuración, no existe una terminal común como en el caso anterior donde se conmutaba el terminal 2 con las distintas derivaciones, en este caso se combinan dos derivaciones según sean los requerimientos de subir o bajar la tensión secundaria suponiendo constante la tensión primaria.

En condiciones normales o a tensión nominal, se tendrán conectadas las derivaciones centrales de ambos devanados (terminales 4 y 7, figura 23). Los criterios de cambio de derivación son:

- Si el voltaje del secundario es menor a la tensión nominal, se hará un cambio de derivación, hacia las terminales 3 u 8. Como se puede ver en la figura 23, el primer paso será mover el selector inferior de la posición 7 hacia la 8, si es necesario, puede subirse el selector de la posición 4 hacia la 3; en tales casos, lo que se hará físicamente es disminuir el número de espiras del devanado primario, de manera que la relación de transformación de la ecuación 3.1, será menor a la nominal y de este modo se tendrá un aumento en el voltaje secundario para un valor constante de voltaje secundario.
- Si la tensión en el devanado secundario es mayor que la nominal, entonces se hará un cambio de derivaciones hacia el centro del devanado. El proceso sería subir de la derivación 4 a la 5, si es necesario, bajar de la derivación 7 a la 6. Lo que físicamente se realiza en este procedimiento es un proceso de aumento del número de espiras del devanado primario, con lo que causará un aumento en la relación de transformación de la ecuación 3.1, suponiendo que el voltaje primario es constante, se tendrá una reducción del voltaje secundario.

Figura 23. **Cambiador simple de derivaciones sin tensión central**

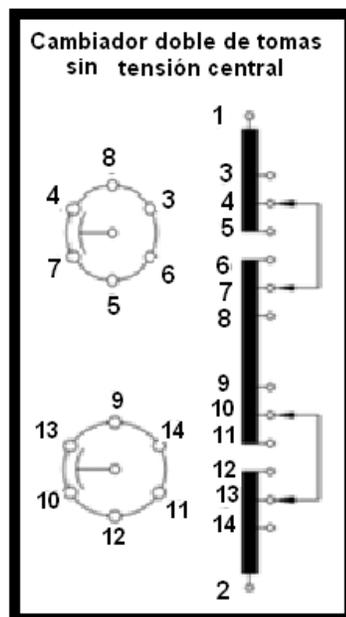


Fuente: Datos Técnicos de OCTC marca MR tipo DEETAP® DU.

### 3.1.1.3. Cambiador doble de derivaciones sin tensión central

Esta configuración funciona igual a la anterior, con la única diferencia que el devanado se divide en 3 segmentos para proporcionar el doble de derivaciones, por lo tanto, una mayor posibilidad de regulación de la tensión; por lo anterior, el cambiador también debe de poseer el doble de puntos para conmutar.

Figura 24. Cambiador doble de derivaciones sin tensión central

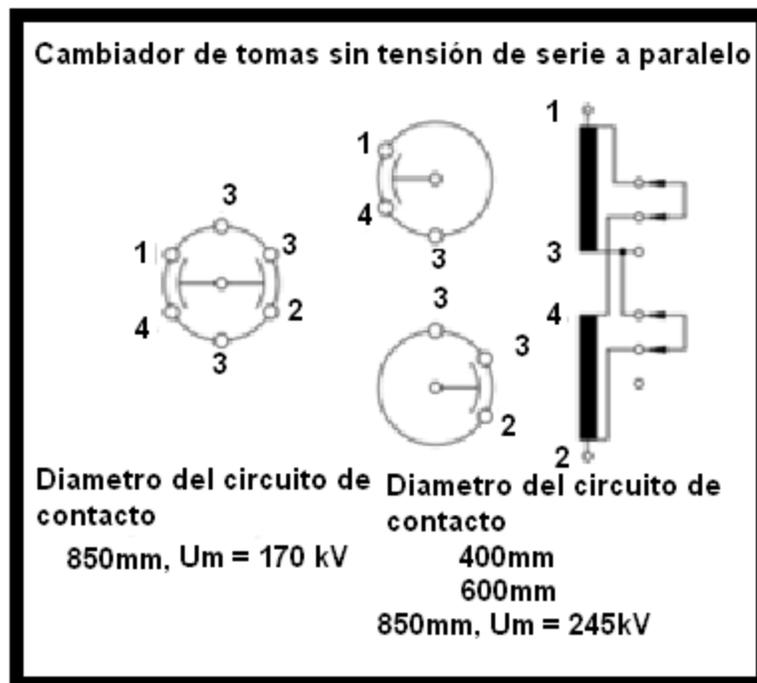


Fuente: Datos Técnicos de OCTC marca MR tipo DEETAP® DU.

### 3.1.1.4. Cambiador de derivaciones sin tensión, serie – paralelo

Este es un caso especial, en el cual se usa el cambiador de derivaciones para configurar el devanado para dos tensiones diferentes. En este caso se necesita que el devanado este dividido en dos partes iguales. Puede trabajarse a una determinada tensión cuando ambos arrollamientos son conectados en serie, mientras que se operará a la mitad de esta tensión cuando ambos arrollamientos se encuentren conectados en paralelo y por lo tanto, aumentará al doble la tensión de salida en el secundario.

Figura 25. Cambiador de derivaciones, serie - paralelo



Fuente: datos técnicos de OCTC marca MR tipo DEETAP® DU.

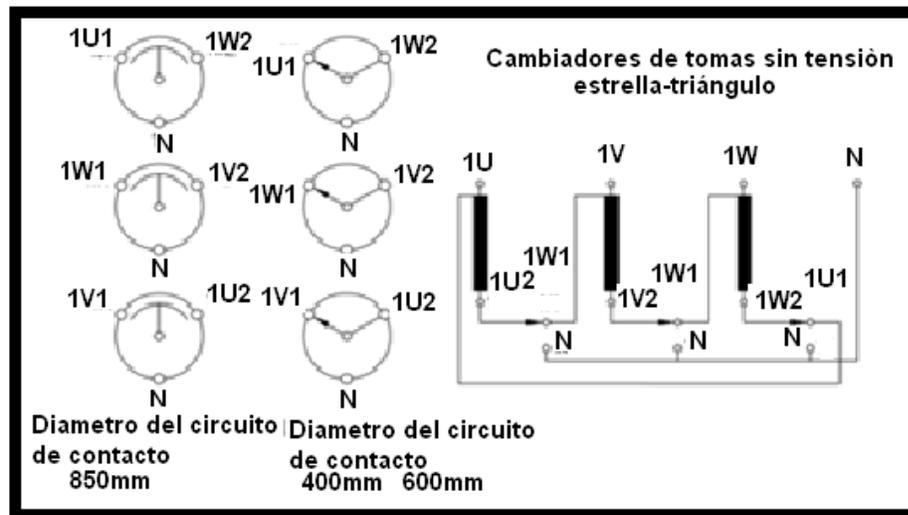
### **3.1.1.5. Cambiador de derivaciones sin tensión, estrella-triángulo**

Este equipo es de uso exclusivo en transformadores trifásicos. En esta situación se utiliza el cambiador de derivaciones sin carga. Para cambiar el grupo de conexión del transformador de delta a estrella o viceversa, puede hacerse tanto en el devanado de alta como en el de baja tensión, aunque generalmente se lleva a cabo en el devanado de alta tensión.

Conectado en el lado primario: en este caso, cuando el primario del transformador se encuentre conectado en estrella, existirá un voltaje determinado en la salida del transformador, al existir un cambio de derivación (cuando se pase a delta), existirá un incremento en la salida del transformador, en un factor de  $\sqrt{3}$ . Por otra parte, cuando el primario se encuentre conectado en delta y el cambiador de derivaciones opere para colocarlo en estrella, existirá una reducción del voltaje en la salida del transformador en un factor de  $1/\sqrt{3}$ .

Conectado en el lado secundario: en este caso, cuando el devanado secundario se encuentre conectado en estrella, existirá un voltaje determinado en las terminales de este, para un valor constante del voltaje en el devanado primario. Cuando se realice un cambio de derivación (cambio a delta), existirá una reducción del voltaje a la salida del transformador. Por otro lado, si primeramente existe una conexión en triángulo en el secundario y luego se cambiará a una conexión Estrella, existirá un incremento en el voltaje en la salida del transformador. En ambos casos el aumento o reducción del voltaje será en un factor de  $\sqrt{3}$  y  $1/\sqrt{3}$ , respectivamente.

Figura 26. **Cambiador de derivaciones estrella-triángulo**



Fuente: datos técnicos de OCTC marca MR tipo DEETAP® DU.

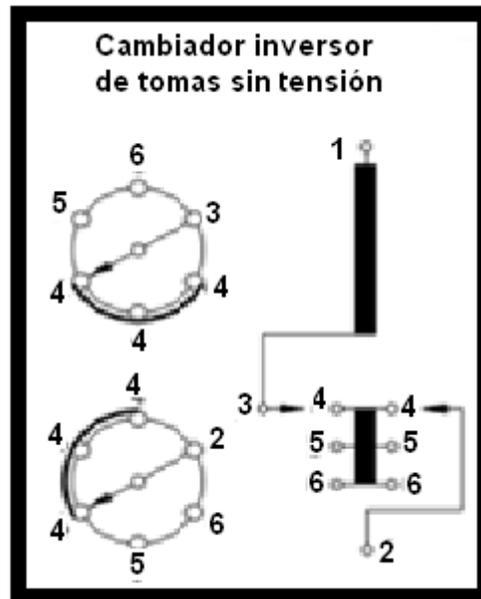
### 3.1.1.6. **Cambiador inversor de tomas sin tensión**

Esta modalidad requiere que el devanado del transformador este compuesto por un devanado principal y un devanado de regulación. La propiedad de inversión se refiere a la capacidad de tener dos formas de conectar el devanado de regulación con el devanado principal. Por una parte, el devanado de regulación puede conectarse con el devanado principal, de manera que el voltaje del devanado de regulación se suma al voltaje del devanado principal; por otro lado, el devanado de regulación puede conectarse al devanado principal, de manera que el voltaje del devanado de regulación se reste al voltaje del devanado principal.

Este tipo de cambiador es muy utilizado ya que, el número de voltaje de salida es mayor que el número de derivaciones físicas del devanado de

regulación debido a la propiedad de inversión, con lo que se tiene un mayor rango de regulación.

Figura 27. **Cambiador inversor de derivaciones sin tensión**



Fuente: datos técnicos de OCTC marca MR tipo DEETAP® DU.

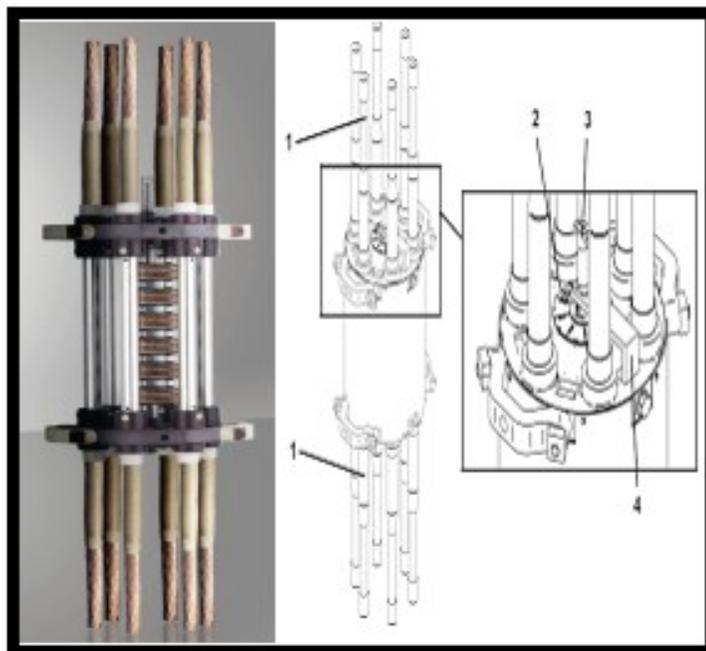
### 3.1.2. Según su fabricante

La empresa mayor productora en el mundo de cambiadores de derivaciones, tanto bajo carga como sin carga, es MR (*Maschinenfabrik Reinhausen*). Además de esta empresa son la mayoría de cambiadores de derivación instalados en transformadores de potencia del Sistema Nacional Interconectado (SNI), motivo por el cual se hablará de algunos de sus productos. Dicha empresa provee el 50 por ciento de los cambiadores de derivaciones en todo el mundo.

MR provee 3 tipos de cambiadores de derivaciones sin carga, con un máximo de 17 derivaciones para cada uno de los modelos. A continuación se mencionarán las características de los modelos más usados. Es necesario mencionar que cada uno de los distintos modelos puede ser suministrado en los arreglos descritos en 3.1.1.

- Cambiador de derivaciones sin carga de arranque retardado (DEETAP<sup>®</sup> AR)

Figura 28. **Cambiador de derivaciones sin carga de arranque retardado**



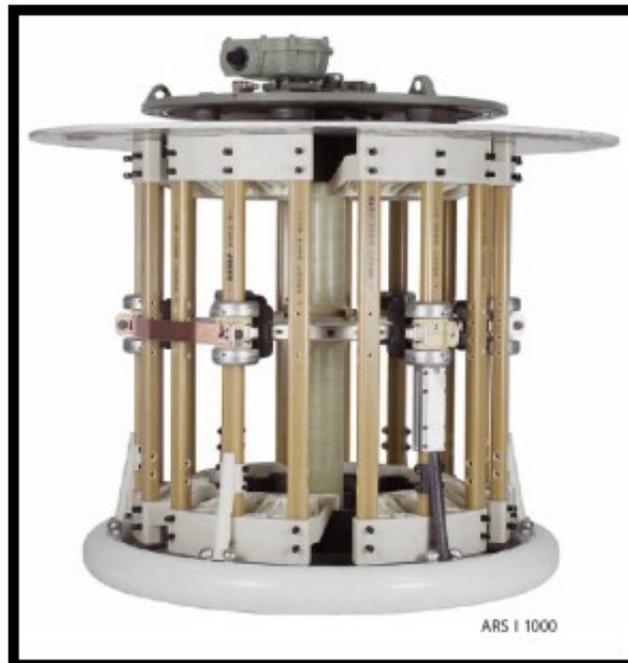
Fuente: instrucciones de operación del OCTC tipo VACUTAP<sup>®</sup> VR marca MR.

Este modelo es ideal cuando se tienen espacios reducidos dentro del transformador y es proporcionado solo para transformadores monofásicos. Además, este modelo puede instalarse cerca de la parte activa del

transformador y tiene un máximo de 5 posiciones de operación. El uso más común para este cambiador es como cambiador de tomas sin tensión central.

- Cambiador de derivaciones sin carga de avance retardado (COMTAP® ARS)

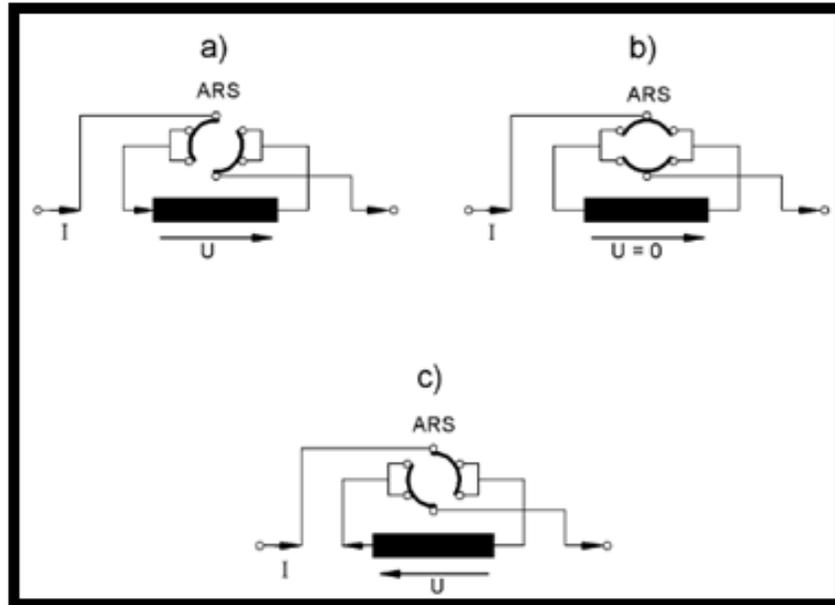
Figura 29. **Cambiador de derivaciones sin carga de avance retardado ARS**



Fuente: datos técnicos de COMTAP® ARS marca MR.

Este cambiador es especialmente utilizado para inversión de la polaridad del devanado de regulación en transformadores como se ve en la figura 30, cuando se tiene o requiere un largo rango de regulación. Este cambiador únicamente tiene dos posibles posiciones de operación.

Figura 30. **Cambiador de derivaciones sin carga de avance retardado como inversor de polaridad**

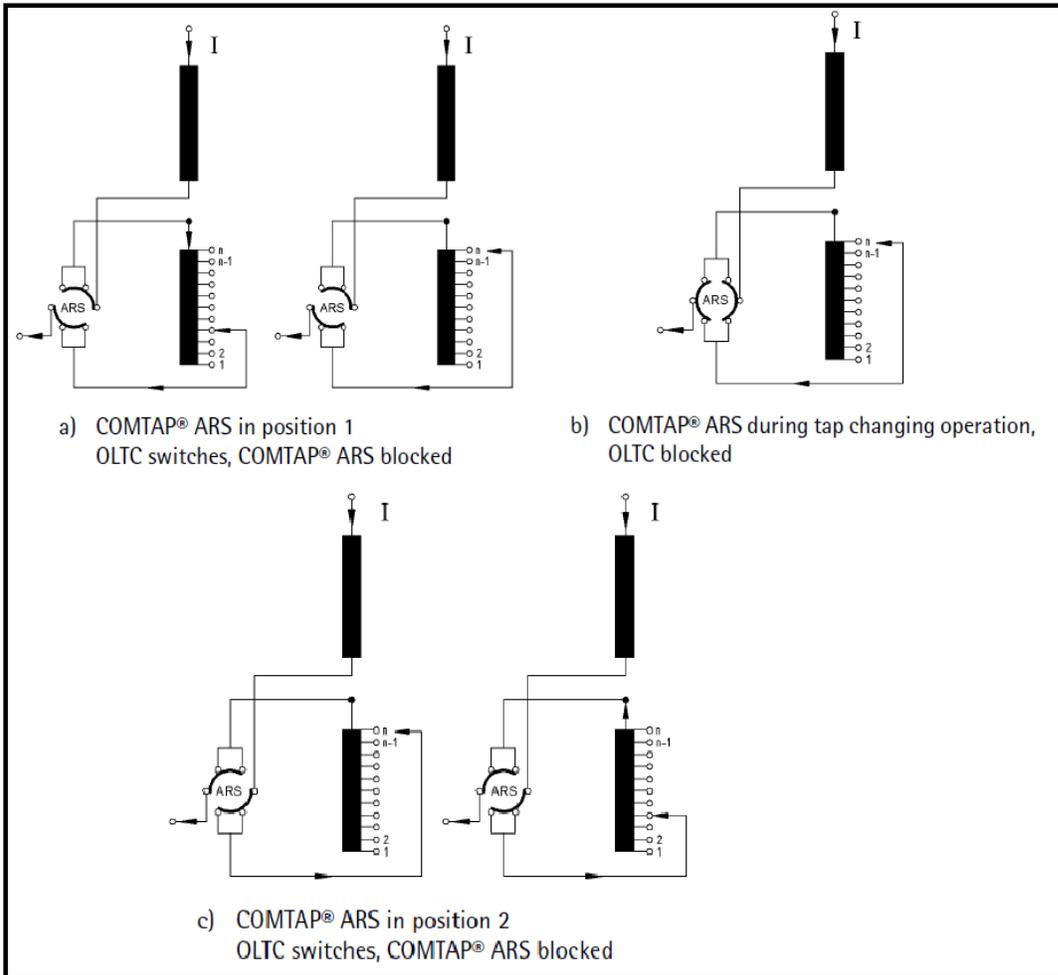


Fuente: datos técnicos de COMTAP® ARS marca MR.

Como se ve en la figura 30, se tienen tres posiciones posibles, pero en una de las posiciones no es posible operarlo, puesto que se encuentra cortocircuitado el devanado (figura 30b), de manera que como se dijo anteriormente, únicamente se tendrán dos posiciones de operación posibles.

Al hacer una operación en el cambiador de derivaciones lo que realmente se hace, es invertir la polaridad del devanado de regulación; por esta propiedad, este cambiador de tomas sin carga es usado para diferentes aplicaciones combinado con el cambiador de derivaciones bajo carga.

Figura 31. **Combinación del COMTAP® ARS con un OLTC**



Fuente: datos técnicos de COMTAP® ARS marca MR.

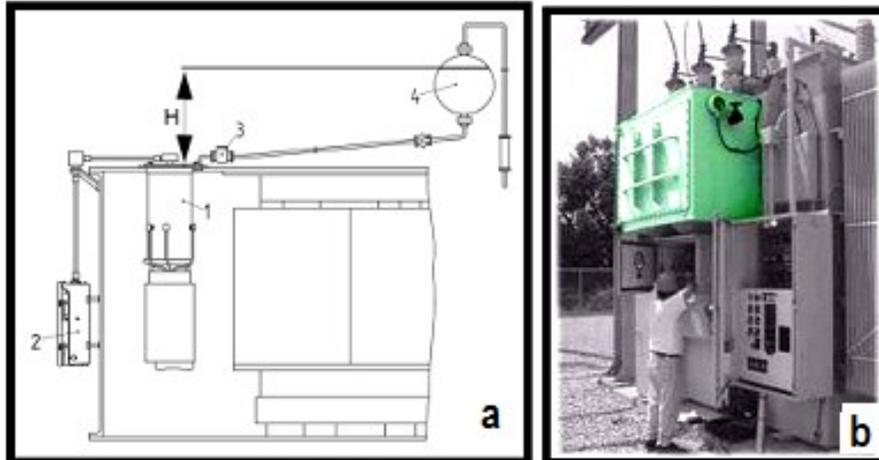
Cuando el COMTAP@ARS es combinado con un OLTC, el COMTAP@ARS, únicamente puede ser operado cuando todo el devanado de regulación está desconectado; por esta razón, debe ser bloqueada la operación simultánea de los dos cambiadores por medio de una unidad control asociado, pudiendo operarse únicamente en las posiciones intermedias, es decir; cuando no circule corriente en el devanado de regulación.

### **3.2. Cambiador de derivaciones bajo carga (OLTC)**

Es importante considerar que uno de los principales problemas que enfrentan las distribuidoras de energía y los grandes usuarios, como industrias químicas y metalúrgicas, es la de mantener los valores de tensión en una red dentro de un umbral controlado, para cualquier requerimiento de carga. Para ello se crearon los cambiadores de tomas bajo carga. Estos son elementos que permiten intercalar, sin interrupciones en el servicio, distintas derivaciones del bobinado de un transformador, logrando de este modo un abastecimiento de energía con buena calidad hacia la carga.

Los cambiadores de tomas en carga, mediante derivaciones dispuestas en el arrollamiento primario, deben ser de categoría de regulación de la tensión de flujo constante (R.F.C). Lo anterior quiere decir que los OLTC deben poder regular la tensión por medio de los cambios de derivaciones sin variar considerablemente el flujo de carga. Los OLTC, en su mayoría, se instalan sobre la cuba del transformador, pero en algunos casos se instalan a un costado de la cuba para mejorar su accesibilidad como se ve en la figura 32b (estos últimos son también llamados tipo mochila).

Figura 32. Disposiciones del cambiador de derivaciones bajo carga en la cuba del transformador



Fuente: a) Datos técnicos para OLTC marca MR, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com), b) *On-Load Tap-Changers for Power Transformers, A Technical Digest*, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com).

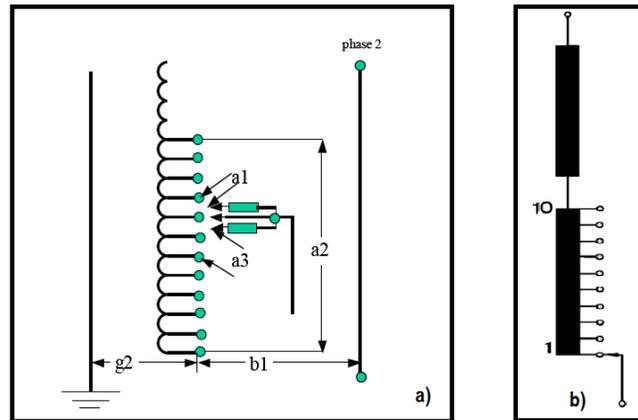
### 3.2.1. Tipos de cambiadores de derivación bajo carga, según su configuración

A continuación se hace mención de los diferentes tipos de intercambiadores de derivación bajo carga y su respectiva configuración usados en las diferentes subestaciones.

#### 3.2.1.1. Cambio de derivación, tipo lineal

En este tipo de cambio de derivación bajo carga, puede obtenerse un número de voltaje diferente, igual al número de derivaciones.

Figura 33. **Esquema eléctrico de OLTC con conmutación lineal**

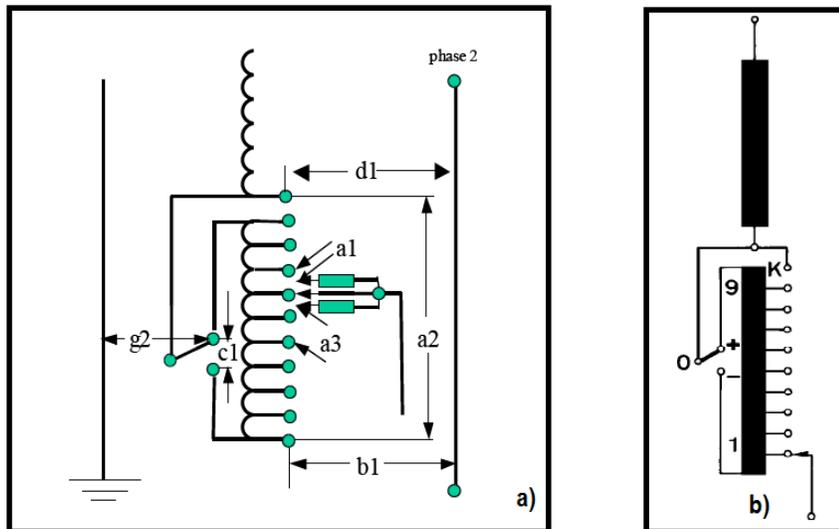


Fuente: a) Manual de usuario de OLTC marca tipo UZ marca ABB, b) datos técnicos para OLTC marca MR, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com).

### 3.2.1.2 Cambio de derivación, tipo más/menos

En este caso, el número posible de regulaciones de voltaje es mayor al número de derivaciones, debido a que el arrollamiento de las derivaciones pueden conectarse en sustracción o en adición con el devanado principal. También es conocido como cambio de derivación con inversor. Para este caso se puede ver en la figura 34b que, cuando el interruptor inversor se coloca en la posición +, el voltaje de las derivaciones se sumará al voltaje del devanado principal del primario y esto causará un decremento en el voltaje del secundario; por otro lado, cuando el selector se coloque en la posición -, el voltaje de las derivaciones se restará con el voltaje del devanado principal y esto causará un aumento del voltaje secundario.

Figura 34. Esquema de conmutación más/menos



Fuente: a) Manual de usuario de OLTC marca tipo UZ marca ABB, b) datos técnicos para OLTC marca MR, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com).

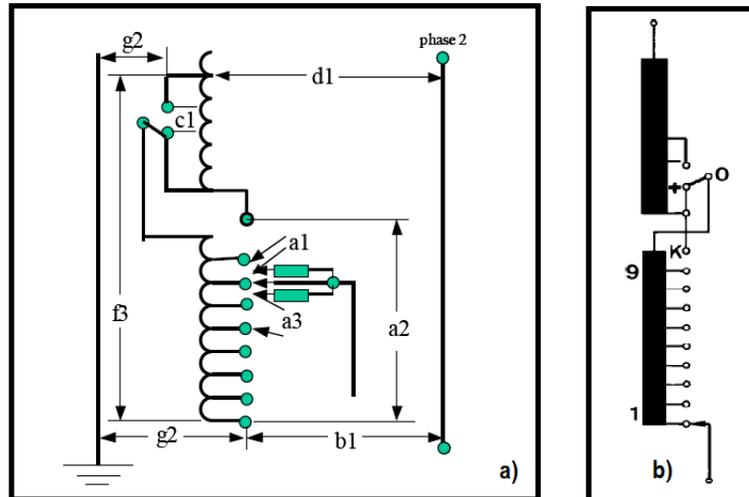
### 3.2.1.3 Conmutación gruesa/fina

La conmutación gruesa/fina, necesita que el devanado principal, cuente con una derivación que contenga un número de espiras igual al número total de espiras del devanado de regulación. Este tipo de conmutación logra la misma cantidad de distintos valores de voltaje, como en la conmutación más/menos. En este tipo de conmutación, el preselector conecta o desconecta el bobinado de la derivación gruesa.

Esta modalidad también es llamada cambio de derivación rústico, la principal ventaja comparado con la conmutación con inversor es que presenta una reducción en las pérdidas en el cobre del transformador cuando el preselector conecta en la posición menos ( - ) ya que la corriente circula por menores espiras que en la posición nominal.

Si se supone un voltaje constante en el primario, cuando se tenga un voltaje menor al nominal en el lado secundario, se coloca el preselector en la posición menos ( - ) y se seleccionan las derivaciones de la 1 a la 9, esto causará una reducción en las espiras del devanado primario causando que la relación de voltaje se reduzca y esto causará un incremento en el voltaje del secundario; por otro lado, cuando se tenga un voltaje elevado en el lado secundario, lo que procede es colocar el preselector en la posición más ( + ) e ir seleccionando las derivaciones de la 9 a la 1, esto causará un aumento en las espiras del devanado primario, lo que a su vez causará un aumento en la relación de voltaje, por lo tanto, se reducirá el voltaje de salida del devanado secundario.

Figura 35. **Esquema de conmutación gruesa /fina**



Fuente: a) Manual de usuario de OLTC marca tipo UZ marca ABB, b) datos técnicos para OLTC marca MR, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com).

### **3.2.2 Tipos de OLTC según su tecnología**

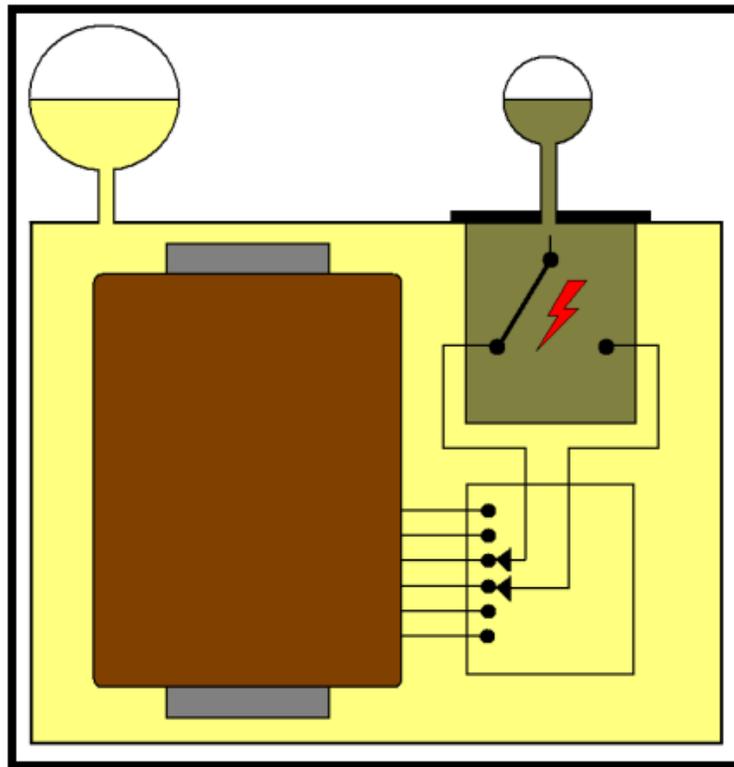
Los conmutadores de tomas en carga se utilizan para conmutar las tomas intermedias de los devanados de un transformador en tensión. A continuación se mencionan algunos de ellos.

#### **3.2.2.2 OLTC, con conmutación en aceite**

Los cambiadores de derivaciones bajo carga convencionales se instalan dentro del tanque principal del transformador, pero con los interruptores del conmutador ubicados en un recipiente lleno de aceite e independiente del tanque principal. En ocasiones se instalan a un costado del transformador, pero siempre en un recipiente individual lleno de aceite.

En esta tecnología, la conmutación se lleva a cabo en el recipiente lleno de aceite del cambiador de derivaciones bajo carga. Cuando ocurren los cambios de derivaciones, se forma un arco eléctrico en las terminales de los interruptores del conmutador lo que causa que el aceite se carbonice. Por el nivel de contaminación que genera este tipo de OLTC, pueden instalarse equipos de filtrado de aceite.

Figura 36. **OLTC con conmutación en vacío**



Fuente: presentación de Introducción del grupo REINHAUSEN, impartido por Moritz Werner Gerente Regional de Ventas 1 de diciembre de 2009.

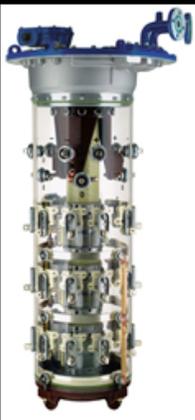
El arqueo en la conmutación implica que se tenga también un desgaste de los contactos del interruptor, de esta manera son necesarios mantenimientos frecuentes y por consiguiente un incremento en el costo de operación del transformador.

Según la marca MR (*Maschinenfabrik Reinhausen*) existen distintos modelos de cambiadores de derivación bajo carga, los que llevan las iniciales OILTAP son de tecnología de conmutación en aceite a continuación se describen algunos:

- Cambiador de derivaciones bajo carga con conmutación en aceite modelo V (OILTAP® V)

Este modelo de cambiador de tomas bajo carga sumamente compacto para transformadores reguladores de baja y media potencia.

Figura 37. **Cambiador de derivaciones bajo V**

	<b>Documentación técnica</b>	
	Corriente pasante nominal max., (trifásica)	200 / 400 A
	Tensión de escalón nominal max.	1.500 V
	Potencia de ruptura nominal max.	525 kVA
	Tensión máxima para medios operativos Um:	40 - 123 kV
	Aplicación del modelo trifásico: en punto neutro o en cualquier punto del bobinado	
	Posiciones de operación:	
	sin preselector:	max. 14
	con preselector:	max 27

Fuente: datos técnicos de OILTAP® MS, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com). Consulta 02/03/12.

Este cambiador de derivaciones puede ser instalado en cualquier punto de una configuración estrella.

- Cambiador de derivaciones bajo carga con conmutación en aceite, modelo MS (OILTAP® MS)

Es diseñado para un rango de potencia media. Presenta las mismas ventajas que el tipo OILTAP® V, pero soporta un voltaje mayor.

Figura 38. **Cambiador de derivaciones bajo carga MS**

	<b>Documentacion tecnica</b>	
	Corriente pasante nominal max., (trifásica)	300 A
	Tensión de escalón nominal max.	3.300 V
	Potencia de ruptura nominal max.	1.000 kVA
	Tensión máxima para medios operativos Um:	72,5 – 245 kV
	Aplicación del modelo trifásico: en punto neutro o en cualquier punto del bobinado	
	Posiciones de operación sin preselector:	max. 14
	Posiciones de operación con preselector:	max 27

Fuente: datos técnicos de OILTAP® MS, www.reinhausen.com. Consulta 02/03/12.

- Cambiador de derivaciones bajo carga con conmutación en aceite, modelo M (OILTAP®M)

Este es el OLTC con el mayor rango de aplicación, comenzando por transformadores de potencia media, pasando por grandes transformadores y transformadores de proceso, llegando hasta transformadores especiales.

Figura 39. **Cambiador de derivaciones bajo carga modelo M**

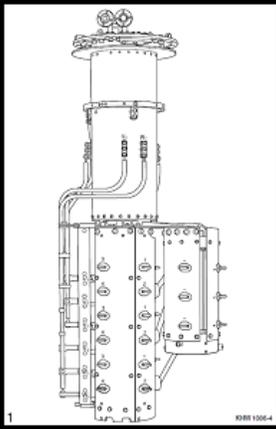
	<b>Documentacion tecnica</b>	
	Corriente pasante nominal max. monofásica:	1500 A
	trifásica:	600 A
	Tensión de escalón nominal max	3.300 V
	Potencia de ruptura nominal max.	3.500 kVA
	Tensión máxima para medios operativos Um:	72,5 - 300 kV
	Aplicación del modelo trifásico: en punto neutro (trifásico) o en cualquier punto del bobinado	
	Posiciones de operación:	
	sin preselector:	max. 22
	con preselector:	max. 35
con selector grueso múltiple	max. 107	

Fuente: datos técnicos de OILTAP® MS, www.reinhausen.com. Consulta 02/03/12.

- Cambiador de derivaciones bajo carga modelo R, con interruptores en aceite (OILTAP® R)

Este es diseñado para máximas tensiones y máximas corrientes, este cambiador es de uso especial para conmutación con reactores.

Figura 40. **Cambiador de derivaciones bajo carga, modelo R**

	<b>Documentación técnica</b>	
	Corriente pasante nominal max. monofásica:	3.000 A
	Corriente pasante nominal max. trifásica:	1.200 A
	Tensión de escalón nominal max.	4.000 V
	Potencia de ruptura nominal max. monofásica:	6.000 kVA
	Potencia de ruptura nominal max. trifásica:	3.000 kVA
	Tensión máxima para medios operativos Um:	72,5 – 362 kV
	Aplicación del modelo trifásico: en punto neutro (trifásico) o monofásico hasta 3.000 A en cualquier punto del bobinado	
	Posiciones de operación sin preselector:	max. 18
	Posiciones de operación con preselector:	max. 35

Fuente: datos técnicos de OILTAP® MS, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com). Consulta 02/03/12.

- Cambiador de derivaciones bajo carga modelo RM, con conmutación en aceite (OILTAP® RM)

Consiste en una combinación del conmutador de cargas R y del selector M.

Figura 41. **Cambiador de derivaciones bajo carga, modelo RM**

	Documentacion tecnica	
	Corriente pasante nominal max. monofásica:	1500 A
	Corriente pasante nominal max. trifásica:	600 A
	Tensión de escalón nominal max.	4.000 V
	Potencia de ruptura nominal max. monofásica:	4.280 kVA
	Potencia de ruptura nominal max. trifásica:	2.400 kVA
	Tensión máxima para medios operativos Um:	72,5 - 300 kV
	Aplicación del modelo trifásico: en punto neutro (trifásico) o monofásico hasta 1.500 A en cualquier punto del bobinado	
	Posiciones de operación sin preselector:	max. 18
	Posiciones de operación con preselector:	max. 35

Fuente: datos técnicos de OILTAP® MS, www.reinhausen.com. Consulta 02/03/12.

- Cambiador de derivaciones bajo carga con conmutación en aceite modelo G (OILTAP® G)

El cambiador de tomas bajo carga para transformadores de gran potencia.

Figura 42. **Cambiador de derivaciones bajo carga, modelo G**

	Documentacion tecnica	
	Corriente pasante nominal max. monofásica/trifásica:	2000 A
	Tensión de escalón nominal max.	5.000 V
	Potencia de ruptura nominal max. monofásica/trifásica	5.000 kVA
	Tensión máxima para medios operativos Um:	72,5 – 362 kV
	Aplicación del modelo trifásico: en punto neutro (trifásico) o monofásica en cualquier punto del bobinado	
	Posiciones de operación sin preselector:	max. 18
	Posiciones de operación con preselector:	max. 35

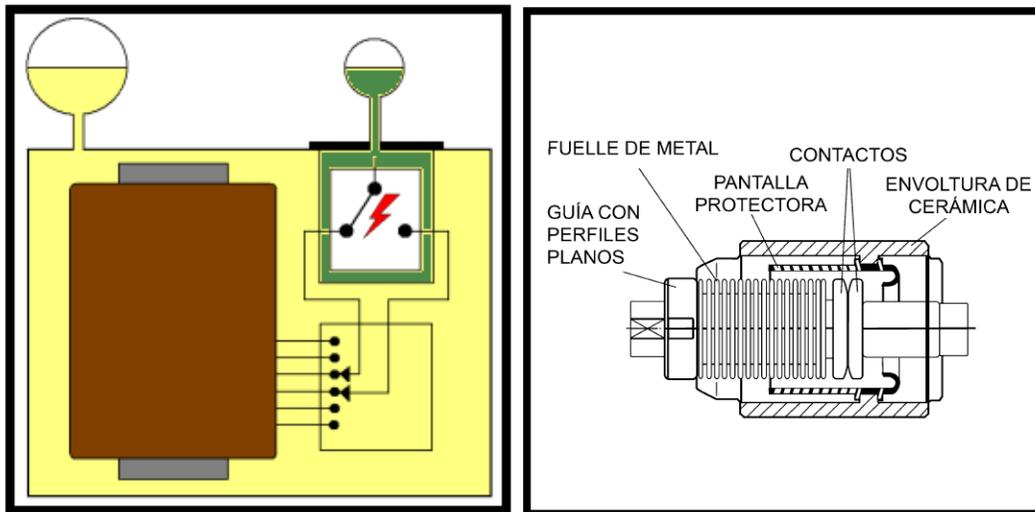
Fuente: datos técnicos de OILTAP® MS, www.reinhausen.com. Consulta 02/03/12.

Este OLTC es especialmente diseñado para altas potencias y altos niveles de voltaje hasta 362kV por fase.

### 3.2.2.3 OLTC, con conmutación en vacío

Actualmente existe una tecnología de conmutación en vacío, esto consiste en que dentro del recipiente del OLTC, se instalan pequeñas cámaras al vacío, dentro de las cuales se ubican los interruptores del conmutador. Con esto se logra que no se generen arcos eléctricos, de manera que el aceite del recipiente del OLTC no es contaminado y entonces no se necesita de un sistema de filtrado de aceite. Por otro lado, la carencia de arcos eléctricos, resulta en una larga vida útil de los contactos de conmutación (no hay que cambiarlos), la vida útil de dichos contactos es igual a la vida útil del OLTC.

Figura 43. a) Conmutación en vacío, b) Interruptor al vacío



Fuente: presentación de Introducción del grupo REINHAUSEN, impartido por Moritz Werner Gerente Regional de Ventas, 1 de diciembre de 2009.

Como consecuencia de lo anteriormente descrito se tiene una reducción en los costos de operación del transformador y una mayor disponibilidad del transformador.

Las ventajas de esta tecnología, en comparación con los la tecnología convencional de conmutación, son:

- Con un máximo de 200 000 operaciones de cambio de tomas por año y hasta 100 cambio de tomas de operaciones por hora.
- Soportan un cambio frecuente de sobre corriente.
- Puede trabajar en un entorno agresivo o contaminante.
- Menor consumo de energía durante la desconexión en la cámara de vacío.
- La cámara de interrupción de vacío está sellado herméticamente, de modo que cualquier arco eléctrico, con un agente de contaminación se evita.
- No hay generación de carbono en el proceso de cambio de derivación.
- No es necesario un sistema de filtrado de aceite.
- El aceite limpio facilita y acelera las inspecciones.
- Eliminación de la problemática de aceite de conmutación.

- Capacidad de conmutación uniforme durante toda la vida útil del interruptor en vacío.
- Mejora la operación de cambio de derivación, ya que no se genera un efecto capacitor como ocurre en la tecnología convencional cuando el vapor (gas) metálico produce un plasma.
- No hay oxidación en la superficie de los contactos y por lo tanto habrá buena resistencia de en los mismos.

Los OLTC, que son designados con las iniciales VACUTAP, son de tecnología de conmutación en vacío. En este caso los interruptores son aislados en pequeñas cámaras en vacío y son accionados por un sistema mecánico. Los distintos modelos de OLTC con esta tecnología que produce MR, son los siguientes:

- Cambiadores de derivación con tecnología de vacío modelo VV y modelo RV (VACUTAP® VV y VACUTAP® RV)

Estos están diseñados para operar en transformadores de potencia sumergidos en aceite, además son aptos para casi todas las aplicaciones en la red y no requiere mantenimiento hasta las 300 000 conmutaciones independientemente del tiempo y una vida útil máxima de 600 000 operaciones.

Figura 44. **Cambiador de derivaciones bajo carga en vacío modelo VV**

	Documentación técnica	
	Corriente pasante nominal max. monofásica	400 A
	Corriente pasante nominal max. trifásica	600 A
	Tensión de escalón nominal max.	2.000 V
	Potencia de ruptura nominal max.	7.000kVA
	Tensión máxima para medios operativos Um:	40 – 145 kV
	Aplicación en punto neutro (trifásico) o en cualquier punto del bobinado	
	Posiciones de operación sin preselector:	max. 12
	Posiciones de operación con preselector:	max 23

Fuente: datos técnicos de VACUTAP® VV, www.reinhausen.com. Consulta: 02/03/12.

- Cambiador de derivaciones bajo carga modelo VR, con conmutación en vacío (El VACUTAP®VR)

En comparación con el VV y RV, este soporta mayores valores de tensión y corriente.

Figura 45. **Cambiador de derivaciones bajo carga VR**

	Documentación técnica	
	Corriente pasante nominal max., monofásica/trifásica	1.300 A
	Tensión de escalón nominal max.	4.000 V
	Potencia de ruptura nominal max. monofásica/trifásica	3.000 kVA
	Tensión máxima para medios operativos Um:	72,5 – 362 kV
	Aplicación en punto neutro (trifásico) o en cualquier punto del bobinado (monofásico hasta 2.600 A / 6.000 kVA)*	
	Posiciones de operación sin preselector:	max. 18
	Posiciones de operación con preselector:	max 35

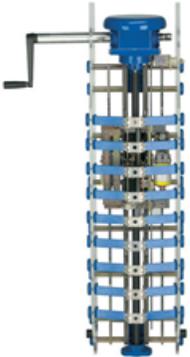
Fuente: datos técnicos de VACUTAP® VR, www.reinhausen.com. Consulta: 02/03/12.

- Cambiador de derivaciones bajo carga tipo seco, con conmutación en aceite modelo VT (VACUTAP® VT)

Este OLTC, es de uso especial en transformadores reguladores de tensión, tipo seco y cuenta con la tecnología de cambio de derivación con interruptores en vacío, lo que provee de una menor contaminación ambiental que los OLTC convencionales para transformadores tipo seco. Esto garantiza excelentes propiedades eléctricas y mecánicas a través de una vida útil extremadamente larga.

Cada módulo VT contiene un selector y conmutador de alta velocidad basado en un mecanismo de resortes, la resistencia del tipo de operación de cambio de toma en un diseño compacto.

Figura 46. **Cambiador de derivaciones bajo carga VT**

	<b>Documentación técnica</b>	
	Corriente pasante nominal max., (trifásica)	500 A
	Tensión de escalón nominal max.	900 V
	Potencia de ruptura nominal max. (monofásica)	250 kVA
	Tensión máxima para medios operativos Um:	40,5 kV
	Aplicación en cualquier punto del bobinado	
	Posiciones de operación: (lineal)	max. 9

Fuente: datos técnicos de VACUTAP® VT, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com). Consulta: 02/03/12.

- Cambiador de derivaciones bajo carga tipo seco con conmutación en vacío, modelo AVT (VACUTAP® AVT)

Este modelo de OLTC, tiene las mismas propiedades y ventajas que VACUTAP® VT, con la diferencia que la forma es cuadrada y está diseñado para instalarse a un costado, en transformadores tipo seco. Además, el rango de voltajes es menor, está diseñado para transformadores de tensiones relativamente bajas, como máximo 11,5 kilo voltios.

Figura 47. **Cambiador de derivaciones bajo carga AVT**



Fuente: datos técnicos de VACUTAP® VT, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com). Consulta: 02/03/12.

- Cambiador de derivaciones bajo carga para impedancia de transición tipo resistivo (VACUTAP® RMV)

Este tipo de OLTC, funciona basándose en el principio de conmutación mediante autotransformador preventivo (reactancia) con interruptores al vacío para llevar a cabo el cambio de tomas. Los interruptores al vacío se utilizan para interrumpir o transferir la carga a otra derivación.

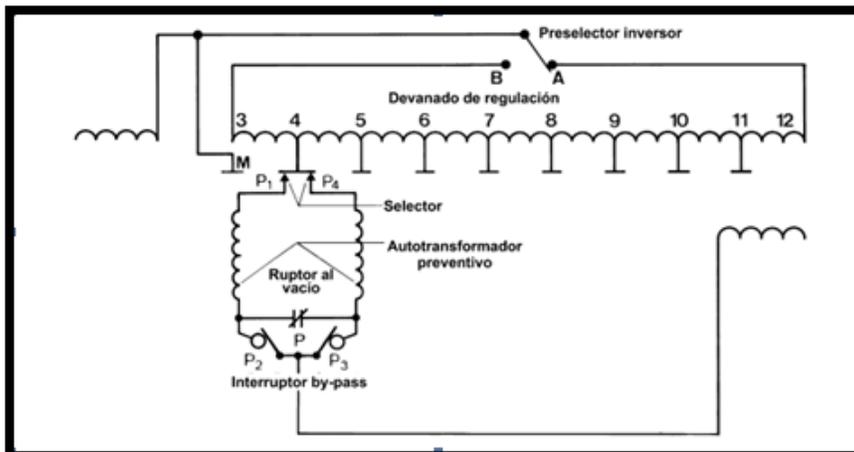
Figura 48. **Cambiador de derivaciones bajo carga RMV**



Fuente: datos técnicos de VACUTAP® MRV, www.reinhausen.com. Consulta: 02/03/12.

A diferencia del tipo VT, este tipo está diseñado para una tensión máxima de 15 kilo voltios.

Figura 49. **Cambio de derivación con reactores**



Fuente: Instrucciones de servicio de OLTC tipo RMV, www.reinhausen.com. Consulta: 02/03/12.

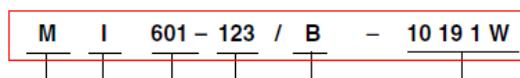
El VACUTAP<sup>®</sup> RMV-II, es un modelo mejorado de este tipo de OLTC tipo reactor, con la ventaja que soporta tensionas hasta 70 kilo vatios.

### 3.2.3 Designación de cambiadores de derivaciones bajo carga (como seleccionar un OLTC marca MR)

Para este caso es necesario basarse en la forma de selección del cambiador de derivaciones bajo carga marca MR, aunque la técnica es similar la para selección de OLTC's de otras marcas.

Cada tipo de cambiador de derivaciones bajo carga está disponible con varias características, variando el número de polos, mayor rango de corrientes, voltaje máximo del equipo, el tamaño del selector y el diagrama básico de conexión. Por esta razón, la designación de cierto modelo de cambiador de derivaciones bajo carga debe indicar también estas características. Esto da una identificación única a cada cambiador de derivaciones bajo carga. Como se puede ver en la siguiente figura.

Figura 50. Código de un OLTC



Fuente: Technical Data TD 61, para cambiadores de derivación marca MR.

Donde:

Primera cifra (M), indica el tipo de OLTC.

Segunda cifra (I), indica el número de polos (I o III).

Tercera Cifra (601), indica el rango máximo de corriente, en Amperios.

Cuarta Cifra (123), indica el voltaje de alta del equipo, en kV.

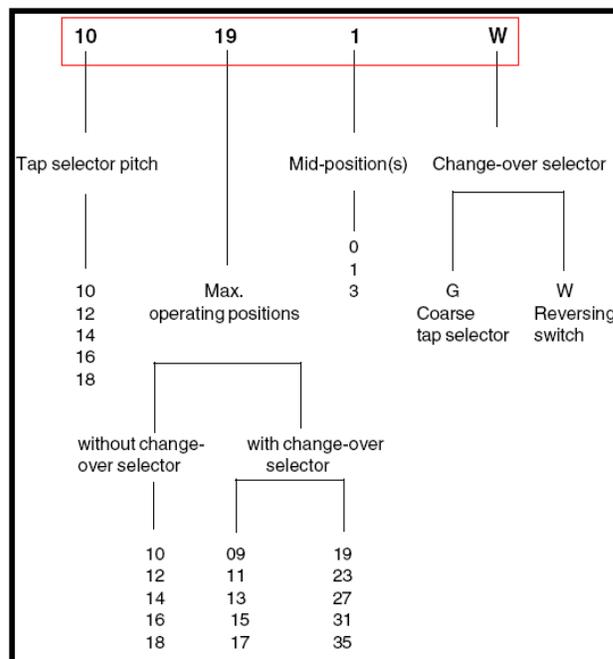
Quinta cifra (B), indica el tamaño del selector de derivaciones.

Sexta cifra (10 19 1 W), indica el número de pasos y el diagrama de conexión básico del selector de derivaciones.

Número de pasos y diagrama de conexión básico (10 19 1 W):

El selector de derivaciones debe necesariamente indicar, el número requerido de pasos y la conexión de derivaciones del devanado. Existe un código especial que define a cada uno de los distintos tipos de selectores de los OLTC, este código se describe como sigue. La figura 51 muestra las conexiones básicas.

Figura 51. **Designación de la conexión de un OLTC**



Fuente: Technical Data TD 61, para cambiadores de derivación marca MR.

Donde:

Primera cifra; número de contactos de 10 hasta 18.

Segunda cifra: número de posiciones de operación, que depende del número de contactos y del tipo de selector de derivaciones. Si es de conmutación lineal será en una unidad menor al número de contactos, mientras que si es de conmutación más/menos o gruesa/fina será uno menos que el doble de los contactos.

Tercera cifra: número de posiciones intermedias, el número de operaciones en las que no existirá un cambio en la relación de transformación y pueden ser de 0, 1 y 3.

Cuarta cifra: esta cifra va solo si existe pre selector en el cual se pueden elegir las opciones de W o G, que significan preselector para inversor y preselector para grueso/fino respectivamente.

La posición intermedia es cuando el contacto K es conectado por el selector de derivaciones y de este modo puede operar el preselector para seleccionar más/menos o grueso/fino respectivamente. La posición media es usualmente también el puesto para ajuste de posición.

Con una posición central, no existirá una posición con la misma tensión después de la operación del contacto K.

Con tres posiciones centrales, no existirá cambio de voltaje antes o después de que opere el contacto K.

El código que designa a un cambiador de derivaciones es como el siguiente:

El ejemplo anterior se interpreta como: cambiador de derivaciones bajo carga, tipo M, 1 Polo, rango máximo de corriente 600A, voltaje máximo del equipo 123kV, tamaño del selector de derivaciones B, Selector de derivaciones en W. Diagrama de conexión básico 10 19 1 W.

Figura 52. Cuadro para selección del tipo de OLTC marca MR

		X	X	XXXX	X	XXX	X	XX	XX	XX																							
Type	OILTAP <sup>®</sup> V OILTAP <sup>®</sup> M / MS OILTAP <sup>®</sup> R / RM OILTAP <sup>®</sup> G VACUTAP <sup>®</sup> VT VACUTAP <sup>®</sup> VV									Basic connection diagram																							
No. of poles	I 1 pole II 2 pole III 3 pole																																
U <sub>m</sub>	A 200 V (not V II) 250 V (special design, not V II), VV 300 MS 350 M, V 400 V (special design), VV 500 M, VT I 600 M, RM, VV 800 MI 1200 MI, RMI; R 1500 MI, RMI 1600 G 2000 RI 2400 RI (forced current division) 3000 RI, GI																																
No. of configured sectors (only 1-pole)	1 1 sector 2 2 sectors 3 3 sectors																																
Application	Y Application with neutral point D Application not with neutral point Not for single-pole tap-changers																																
U <sub>m</sub>	kV 36 VT 40 V, VV 72,5 MS, M, RM, R, G, 76 V, VV 123/76 V III D 123 MS, M, RM, R, G, VIII Y 145 VV 170 MS, M, RM, R, G 245 M, MS, RM, R, G 300 MI, RMI, RI, GI 362 On request																																
Tap selector size	B M, MS C M, RM, R D M, RM, R, G DE M, RM E R, G Not with selector switches and VACUTAP <sup>®</sup> VV																																
Contacts	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>without change-over</th> <th>with change-over selector</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>9</td> <td>VT</td> <td></td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>M, MS, R, RM, G, V, VV</td> <td>M, MS, R, RM, G, V, VV</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>M, MS, R, RM, G, V, VV</td> <td>M, MS, R, RM, G, V, VV</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>V, M, MS, R, RM, G</td> <td>V, M, MS, R, RM, G</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>M, R, RM, G</td> <td>M, R, RM, G</td> </tr> <tr> <td>18</td> <td>M, R, RM, (G)</td> <td>M, R, RM, (G)</td> </tr> <tr> <td>22</td> <td>M</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		without change-over	with change-over selector	9	VT		10	M, MS, R, RM, G, V, VV	M, MS, R, RM, G, V, VV	12	M, MS, R, RM, G, V, VV	M, MS, R, RM, G, V, VV	14	V, M, MS, R, RM, G	V, M, MS, R, RM, G	16	M, R, RM, G	M, R, RM, G	18	M, R, RM, (G)	M, R, RM, (G)	22	M									
	without change-over	with change-over selector																															
9	VT																																
10	M, MS, R, RM, G, V, VV	M, MS, R, RM, G, V, VV																															
12	M, MS, R, RM, G, V, VV	M, MS, R, RM, G, V, VV																															
14	V, M, MS, R, RM, G	V, M, MS, R, RM, G																															
16	M, R, RM, G	M, R, RM, G																															
18	M, R, RM, (G)	M, R, RM, (G)																															
22	M																																
Number of max. operating positions	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>without change-over</th> <th>with change-over selector</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>9</td> <td>9</td> <td></td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>10</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>12</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>14</td> <td>27</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>16</td> <td>31</td> </tr> <tr> <td>18</td> <td>18</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>22</td> <td>22</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		without change-over	with change-over selector	9	9		10	10	19	12	12	23	14	14	27	16	16	31	18	18	35	22	22									
	without change-over	with change-over selector																															
9	9																																
10	10	19																															
12	12	23																															
14	14	27																															
16	16	31																															
18	18	35																															
22	22																																
Mid-positions	0 0 mid-positions (without change-over selector) 1 1 mid-position 3 3 mid-positions																																
Reversing switch / coarse tap 1)	W Reversing switch G Coarse tap																																

Fuente: Technical Data TD 61, para cambiadores de derivación marca MR.

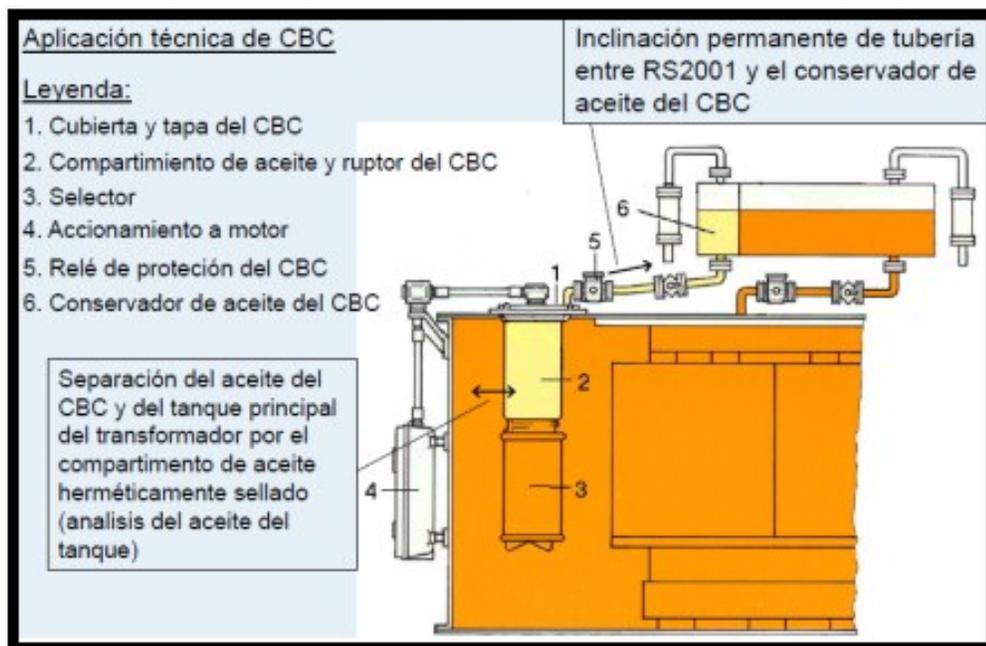


## 4 PARTES Y ACCESORIOS DEL CAMBIADOR DE DERIVACIONES BAJO CARGA

### 4.2 Accesorios del cambiador de derivaciones bajo carga

Para asegurar el correcto funcionamiento de los OLTC, son necesarios varios accesorios como se ve en la figura No. 53. Cada uno de los accesorios se describe a continuación.

Figura 53. Accesorios para el OLTC



Fuente: presentación de Seminario MR, introducción al equipo Reinhausen, de diciembre de 2009.

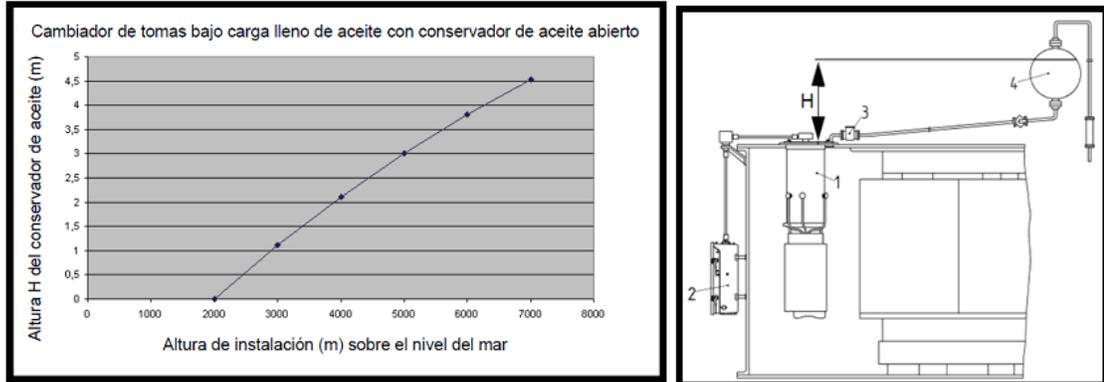
#### **4.2.1 Tanque conservador de aceite**

Su función es mantener el nivel normal del aceite en el compartimiento que contiene al cambiador de derivaciones bajo carga, es diseñado para contener aproximadamente el 10 por ciento del volumen total del OLTC, esto permite compensar las variaciones del nivel de aceite originado por cambios en la temperatura, es decir que el volumen del conservador ha de ser tal que quede aceite incluso a la temperatura mínima prevista del aceite y que no se desborde a la temperatura máxima prevista.

En ocasiones se instala prácticamente en el mismo tanque conservador del tanque principal, con una división que no permite que los aceites se mezclen, por otro lado, también pueden instalarse en tanques completamente independientes.

Para alturas mayores a 2 000 metros sobre el nivel mar, el tanque conservador del OLTC debe ser instalado a cierta altura (H) respecto a la cabeza del OLTC, como se ve en la figura 54. La altura del conservador de aceite para el cambiador de tomas bajo carga se calcula a partir del canto superior de la cabeza del cambiador de tomas bajo carga, hasta el nivel de aceite del conservador de aceite.

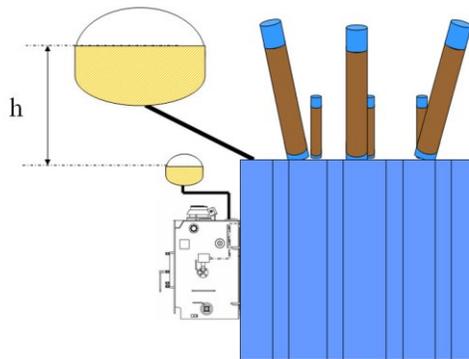
Figura 54. **Altura mínima del tanque conservador del OLTC**



Fuente: Manual de usuario de cambiadores de derivaciones marca MR, Technical Data TD 61

El tubo de conexión al conservador debe tener un diámetro interior de aproximadamente 20 milímetros y una inclinación de al menos, tres grados para evitar que se formen bolsas de gas en su interior. Se recomienda instalar una válvula en la conexión al conservador.

Figura 55. **Tanque conservador del OLTC, independiente**



Fuente: Manual de usuario de Cambiador de Tomas Tipo UZ, ABB.

En caso de mantenimiento, antes de decidir hacer vacío a un tanque conservador, deberá tenerse plena seguridad de que fue diseñado para soportar la presión de vacío, ya que en caso contrario se corre riesgo de destruirlo por implosión.

#### **4.2.2 Sistema de secado de aire**

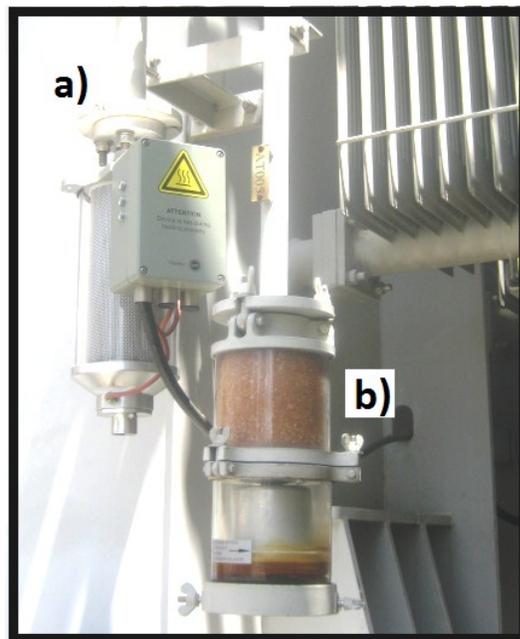
Como se sabe que a diferentes temperaturas el nivel del líquido aumentará o disminuirá en el tanque de expansión, este tanque entonces necesita de un medio de ventilación por el cual pueda entrar o salir aire, para no impedir el movimiento del aceite y evitar una sobrepresión entre el recipiente del OLTC y el tanque conservador. Es decir, que el transformador respira y lo hace por medio de una tubería que debe contener un dispositivo de secado del aire para evitar que la humedad entre al tanque conservador y dañe al aceite aislante.

El dispositivo de secado de aire debe ser adecuado, que impida la entrada de aire húmedo y permita la expulsión de los gases que producen los arcos eléctricos, preferiblemente de mayor tamaño del que correspondería por volumen de aceite, ya que el cambiador de tomas se des gasifica más a menudo de lo normal a causa del gas que se genera en cada maniobra de cambio de toma. Este equipo puede ser silica-gel o un des humificador.

El silica-gel es un compuesto secante formado por óxido de silice amorfo, tratado químicamente para formar un gel que varía de color con la humedad. El silica-gel debe ser cambiado cuando presente colores intermedios de seco y húmedo (50 por ciento de humedad). Este gel se regenera calentándolo en horno a una temperatura de 150 grados centígrados.

El deshumificador es más costoso en su instalación; sin embargo, es más conveniente que la silica-gel, puesto que posee un sistema de regeneración del material secante, de manera que cuando el material secante presente un determinado nivel de humedad, se activa un sistema de calefacción que regenera el material secante, desecha la humedad y queda listo para seguir funcionando.

Figura 56. **Sistemas de secado de aire: a) deshumificador, b) silica-gel**



Fuente: Banco de Transformación 230/69 kilo voltios, subestación La Esperanza, Quetzaltenango.

### **4.2.3 Mecanismo de accionamiento a motor (AM)**

Accionamiento a motor: es el elemento donde se aloja el motor eléctrico que por medio de ejes y engranajes, realiza los cambios de derivación.

Este control debe seguir el principio de paso a paso, es decir, que para un pulso que se le envíe realizará únicamente una operación independientemente del tiempo que dure el pulso. El gabinete de accionamiento contendrá todas las partes mecánicas y eléctricas para el mando del cambiador de tomas y estará moldeado en fundición de aluminio exento de porosidades, o acero inoxidable. El armario tendrá como mínimo un grado de protección IP 54, según las normas IEC 60214 (ver grados IP en apéndice A).

El armario contiene los elementos de mando y maniobra del cambiador (contactores de arranque del motor, pulsadores de mando, motor eléctrico, etcétera.). Se encuentra equipado con una manivela de emergencia que permite accionar el cambiador cuando falla la fuente de alimentación auxiliar o se requiere solo movimientos de prueba. Además, presenta un enclavamiento mecánico, al introducir la manivela se bloquea el funcionamiento eléctrico. Su funcionamiento puede ser automático (SCADA), manual (local-distancia) y emergencia (manivela).

Figura 57. **Accionamiento a motor de OLTC marca ABB**



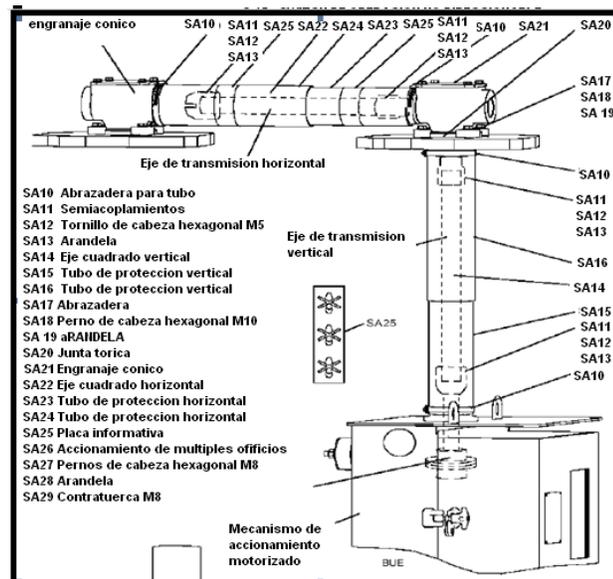
Fuente: Banco de Transformación 230/69KV, Subestación Los Brillantes Retalhuleu.

#### 4.2.4 Árbol de accionamiento

El árbol de accionamiento es, la conexión mecánica entre el accionamiento por motor y el cabezal del cambiador de tomas bajo carga.

Para realizar cambios de una toma a otra, el cambiador de tomas en carga es movido por un mecanismo de accionamiento motorizado, a través de los ejes de transmisión vertical y horizontal y cajas de reenvío en ángulo, al cual se le denomina mecanismo de transmisión o árbol de accionamiento. Un funcionamiento anómalo de cualquiera de los elementos de la transmisión puede provocar una desregulación, es decir una situación en la que la posición real del cambiador de tomas en carga no corresponda con la posición indicada en el armario de mando.

Figura 58. Árbol de accionamiento



Fuente: Guía para Mantenimiento de Transformadores de Potencia, Escuela Superior Politécnica del Litoral, p. 84.

#### **4.2.5 Cabeza**

La cabeza del cambiador de tomas en carga es un receptáculo metálico situado en la parte superior del cambiador de tomas en carga al que sirve de soporte, como se ilustra en la figura 59. En su interior se encuentran los mecanismos acumuladores de energía del conmutador y las cruces de malta de accionamiento del selector.

En la cabeza del cambiador, se dispone de una serie de tuberías para la conexión del conmutador con el depósito de expansión de aceite, para la toma de muestras de aceite, el vaciado del depósito del conmutador y el filtrado de aceite. Además, cuenta con un visor para ver la posición de derivación en la que se encuentra.

Figura 59. **Cabeza del cambiador de derivaciones bajo carga**



Fuente: Banco II de Transformadores de potencia de Subestación Guatemala – Norte.

#### **4.2.6 Cuba**

Como ya se ha mencionado anteriormente, al operar el cambiador de tomas en carga, se forma un arco en el conmutador. Para evitar la contaminación del aceite del transformador, el conmutador tiene su propio recinto separado del resto del transformador.

La sección superior forma la brida que se utiliza para el montaje en la tapa del transformador, y soportar la cabeza del cambiador. Además, la parte superior del recinto incluye una conexión para tubería al conservador, conexiones de vaciado y filtrado, un terminal de puesta a tierra, el relé de presión y la tapa o cabeza.

La sección inferior tiene cojinetes, abrazaderas para el montaje del selector de tomas y terminal de corriente para el conmutador. Hay también una válvula de vaciado en la parte inferior que solamente deberá abrirse durante el proceso de secado del transformador.

En el caso de los cambiadores de derivaciones de marca MR, se tienen las siguientes tuberías de conexión:

Conexión para tubería R: esta conexión se ha previsto para el montaje del relé de protección por flujo de aceite. Desde el punto de vista de su funcionamiento las conexiones para tuberías Q y R son intercambiables. Es decir, el relé de flujo se puede conectar también a la conexión para tubería Q y el accionamiento a motor al dispositivo para supervisión de conmutación a través de la conexión para tubería R.

Conexión para tubería S: la conexión para tubería S está provista de un tornillo de purga de aire y ha de ser conectada a una tubería que, bajando por el costado de la cuba del transformador, acaba en un grifo de purga a una altura del hombre para poder hacer muestreos del aceite del OLTC cuando sea necesario. Esta tubería también puede ser utilizada para aspiración de aceite del recipiente del OLTC o para conectar el filtro de aceite, ya que internamente tiene una tubería que conecta hacia el fondo del recipiente. Todos los cambiadores de derivaciones bajo carga sumergidos en aceite tienen esta conexión de tubería para aspiración aunque no esté necesariamente indicado con la designación S.

Conexión para tubería Q: la conexión Q está cerrada con una tapa ciega y acondicionada para conectar el accionamiento a motor al dispositivo para supervisión de conmutación, que opcionalmente puede adaptarse al cambiador de derivaciones.

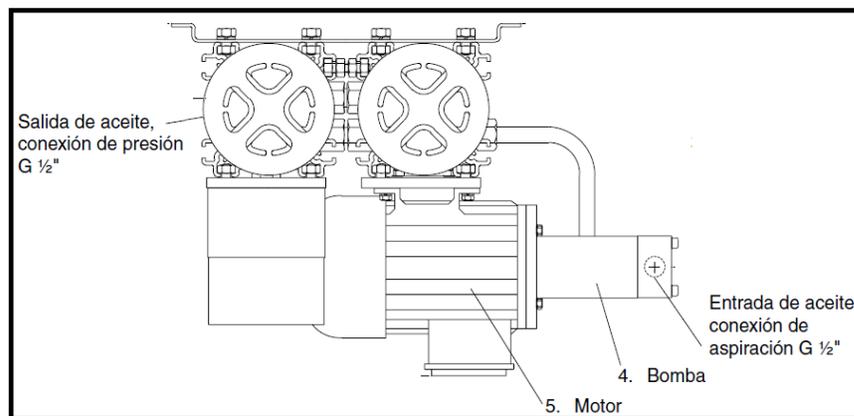
Conexión para tubería E2: la conexión para tubería E2 está cerrada con una tapa ciega. Esta conduce directamente debajo de la cabeza del cambiador de tomas bajo carga al interior de la cuba del transformador, y puede en caso de ser requerido, conectarse a una tubería colectora hacia el relé *Buchholz*.

#### **4.2.7 Sistema de filtrado de aceite**

Opcionalmente y dependiendo de la frecuencia de operaciones del conmutador puede proveerse con una unidad de filtrado de aceite. Este sistema permite el funcionamiento continuo del transformador durante el filtrado, es recomendado instalar sistemas de filtrado cuando los cambiadores operan a más de 15 000 veces por año.

La unidad de filtrado de aceite, está diseñado exclusivamente para la purificación y el secado del aceite de cambiadores de derivaciones bajo carga instalados en transformadores de potencia. El sistema de filtrado está compuesto por un filtro, un motor que acciona una bomba para succionar el aceite por medio de una tubería de succión que extrae el aceite de la parte más baja del recipiente del OLTC, lo hace pasar por el filtro y posteriormente lo vuelve a entregar en el recipiente del OLTC, como se ve en las figuras 60 y 61.

Figura 60. **Unidad para filtrado de aceite**



Fuente: Unidad de filtro de aceite para cambiadores de tomas en carga ABB, p. 8.

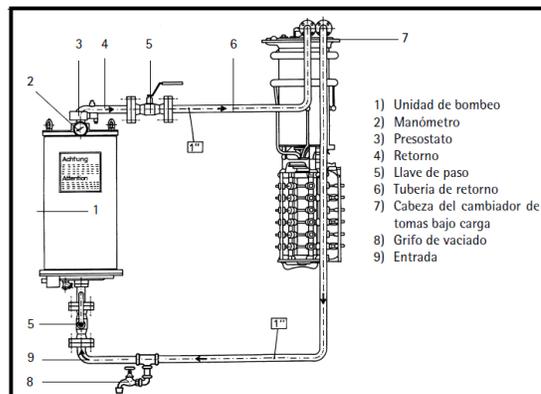
El filtrado tiene las siguientes ventajas:

- Mantiene alta la rigidez dieléctrica del aceite. Resulta importante en la utilización final del proceso.
- Elimina el riesgo de depósitos de sedimentos en las áreas eléctricas de máximo esfuerzo.

- Reduce el desgaste de los elementos mecánicos. Resulta beneficioso en aplicaciones con alta frecuencia de funcionamiento.
- Simplifica el mantenimiento porque la limpieza y los posteriores filtrados de aceite dejan de ser necesarios. Esto también es importante desde el punto de vista de la salud para los miembros del servicio técnico y, además acorta el tiempo en fuera de servicio del transformador.

El filtro de aceite funciona de acuerdo al principio de operación continua, mediante el cual el filtrado se realiza en forma continua con un régimen de flujo lento y parejo.

Figura 61. **Sistema de filtrado de aceite en un OLTC**



Fuente: Manual de Unidad de filtrado OF 100, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com).

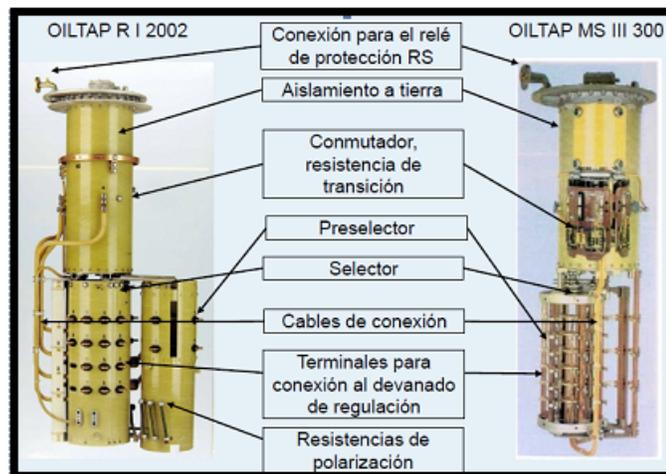
#### 4.2.8 Indicador de posición

Estos están en varios lugares, como en la cabeza el OLTC y en el control motorizado, es necesario asegurarse que todos los indicadores de posición coincidan.

### 4.3 Partes del cambiador de derivaciones bajo carga

A continuación se mencionan las partes del cambiador de derivaciones bajo carga. La siguiente figura muestra un cambiador tradicional de una subestación eléctrica típica.

Figura 62. Partes del OLTC



Fuente: presentación de Seminario MR, introducción al equipo Reinhausen, de diciembre de 2009, impartido por Moritz Werner Gerente Regional de Ventas.

En seguida se describen las partes principales del OLTC que sirven para la operación de cambio de derivación bajo carga.

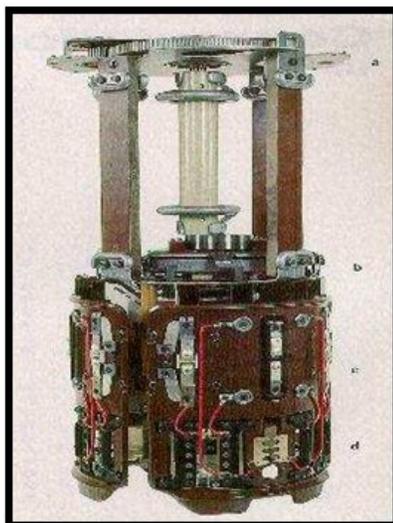
#### 4.3.1 Conmutador (*Diverter Switch*)

Es un mecanismo que contiene interruptores que sirven para cortar o habilitar el paso de corriente en determinada rama del circuito de conmutación, para transferir la carga de una derivación a otra próxima sin dejar de suministrar energía a la carga. Incorpora unos contactos fijos y otros móviles y

está conectado al selector. El conmutador se encuentra inmerso en un depósito de aceite (cuba del OLTC) independiente de la cuba del transformador, para evitar contaminarlo, debido a la degradación que sufre el aceite durante el proceso de conmutación, en caso de conmutación en el aceite.

El conmutador está unido a la cabeza del cambiador, de manera que forma un único cuerpo extraíble para efectuar las operaciones rutinarias de mantenimiento y está conectado mecánica y eléctricamente al selector que se encuentra debajo de él, pero en el aceite del tanque principal del transformador. Durante el cambio de toma, es accionado por un mecanismo acumulador de energía de resortes ubicado en la cabeza del cambiador, que almacena energía durante la mayor parte del tiempo del cambio (entre 5 y 7 segundos) y libera la energía al final de la maniobra (40 milisegundos, conmutador de alta velocidad).

Figura 63. **Conmutador insertable**



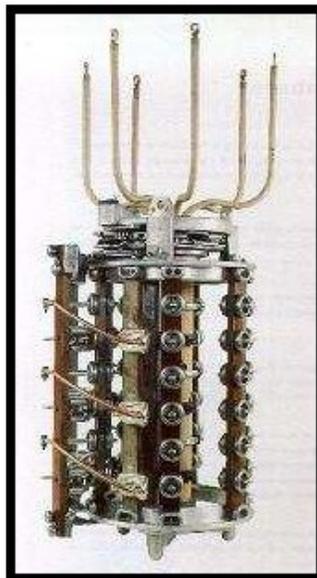
Fuente: Guía para Mantenimiento de Transformadores de Potencia, Escuela Superior Politécnica del Litoral, p. 96.

Por su tecnología existen conmutadores en vacío y conmutadores en aceite como se vio en el capítulo anterior.

#### **4.3.2 Selector**

El selector de tomas, que está montado debajo del recinto del conmutador, consiste de un selector fino de tomas, generalmente, también de un pre selector de conmutación.

Figura 64. **Selector de derivaciones**



Fuente: Guía para Mantenimiento de Transformadores de Potencia, Escuela Superior Politécnica del Litoral, p. 80

Los contactos fijos están montados verticalmente en un círculo alrededor de los ejes centrales. Los contactos móviles se montan, y están accionados por los ejes ubicados en el centro del selector. Los contactos móviles se conectan al conmutador por medio de colectores de corriente, constituidos por

conductores de cobre aislados con papel, con los cables que se ven en la parte de arriba de la figura 64.

Según la corriente de carga, los contactos móviles tienen uno, dos o más brazos de contacto en paralelo con dos o cuatro dedos de contacto cada uno. Los dedos hacen contacto en un extremo con el contacto fijo y en el otro, con el colector de corriente. Los contactos móviles se deslizan sobre los contactos fijos y los anillos del colector de corriente, dando lugar a una acción de limpieza que hace que los contactos se autolimpie. Esta disposición asegura una buena conductividad y un desgaste de contactos despreciable.

El selector es movido por un sistema mecánico sincronizado con el conmutador; sin embargo, el selector, junto con el mecanismo acumulador de energía, es el primer elemento en moverse al recibir una orden de cambio. El selector solo debe permitir el cambio desde una determinada toma a la siguiente o a la precedente, pero nunca el cambio entre dos tomas no correlativas.

El selector se encuentra unido de forma rígida al devanado del transformador, debido a ello no es posible extraerlo para realizar inspecciones durante el mantenimiento rutinario. En el caso de selectores internos, la cuba dispone de una tapadera llamada boca de hombre que se puede abrir (previo vaciado parcial de aceite del transformador) en el caso de que existan sospechas fundadas de que existe una avería en el selector (figura 65).

Figura 65. **Boca de hombre para la inspección del selector en cambiadores de tomas internos**



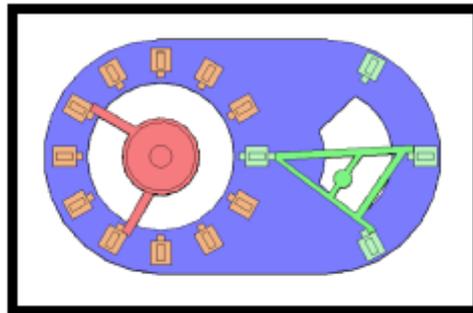
Fuente: Guía para Mantenimiento de Transformadores de Potencia, Escuela Superior Politécnica del Litoral, p. 82.

### **4.3.3 Preselector**

El preselector se utiliza para invertir el devanado de regulación o para cambiar la conexión en la regulación gruesa/fina, con el objeto de obtener un mayor número de pasos que el número de derivaciones.

Es un sistema formado por un contacto móvil y dos contactos fijos. El contacto móvil está unido a un eje y descansa en un soporte de la pieza moldeada como se ve en la figura 66. La corriente de carga se transmite por los cuatro dedos de contacto del brazo móvil hasta los contactos fijos. El funcionamiento del preselector no afecta al paso o la interrupción de la corriente ya que este únicamente opera en posiciones intermedias, como se verá en el capítulo 6.

Figura 66. **Arreglo del selector y preselector**



Fuente: Universidad Carlos III de Madrid Y Simulación del selector y preselector de un OLTC, p 16.

Engranaje de cruz de Malta: el principio en que se basa el engranaje de cruz de Malta, permite convertir un movimiento giratorio en un movimiento escalonado. La fuerza motriz que genera el mecanismo de accionamiento motorizado se transmite a la cruz de Malta, que acciona el selector de carga y el preselector. Este engranaje se utiliza también para bloquear el sistema de contactos móviles cuando está transportando corriente de carga.

Figura 67. **Engranajes de cruz de Malta**



Fuente: Manual de pedidos para OLTC tipo UZ marca ABB.

#### **4.3.4 Impedancias de transición**

Tiene el propósito de reducir la corriente de cortocircuito generado al conectar dos derivaciones de un diferente potencial a un mismo punto durante el cambio de derivaciones y pueden ser de tipo resistivo o de tipo inductivo.

Impedancia de transición tipo resistivo: las resistencias que se insertan durante el cambio de toma suelen disponerse en un cilindro de fibra de vidrio, baquelita u otro material. Si las tomas del transformador se encontraran en el extremo de línea del arrollamiento, las resistencias (y otros elementos del cambiador de tomas) deberían aislarse para la plena tensión de la red. Sin embargo, en transformadores en estrella, uno de los extremos del arrollamiento del transformador está al potencial del neutro, con lo que el aislamiento de las resistencias se reduce considerablemente, reduciéndose a su vez la probabilidad de averías. De hecho, la posibilidad de disponer de las tomas en el extremo de neutro es una de las razones por las que los transformadores de red suelen tener arrollamientos en estrella.

Las resistencias, están colocadas encima de los contactos del conmutador. Las resistencias son robustas y están diseñadas para soportar un número ilimitado de operaciones.

Impedancia de transición tipo inductivo: en el caso de utilizar inductancias de transición, estos deben alojarse dentro de la cuba del transformador; sin embargo, son muy poco usados, puesto que el transformador debe ser más grande y más caro, es el motivo principal por el que prácticamente no se utilizan.

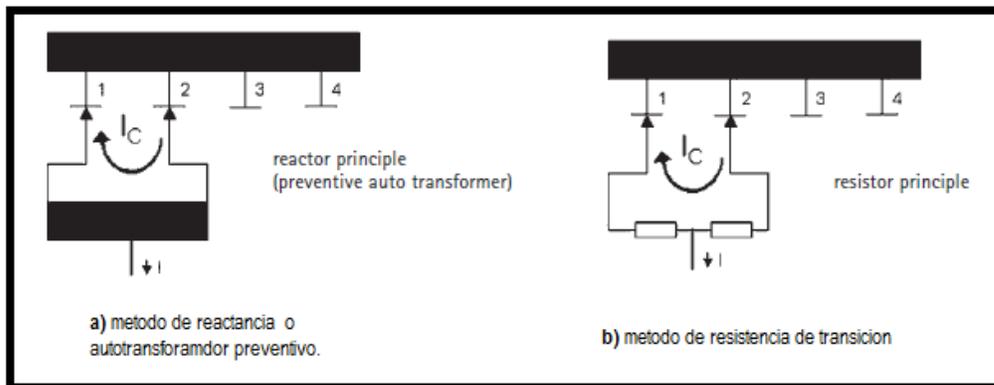


## **5 SECUENCIA DE OPERACIÓN DE LOS CAMBIADORES DE DERIVACIÓN BAJO CARGA**

Como se mencionó anteriormente, con el fin de regular la tensión a la salida de los transformadores de potencia, en uno de los arrollamientos del transformador, denominado arrollamiento de regulación (frecuentemente conectado en serie con el arrollamiento de alta tensión, se realizan unas conexiones o derivaciones que conectaran con la borna de salida del transformador mediante el cambiador de tomas. Si durante el cambio de una toma a la siguiente existe un instante en el cual ninguna toma queda conectada a la borna de salida, la línea de salida queda sin tensión, lo cual no es deseable, pues produciría un hueco de tensión. Si por el contrario, el cambiador de tomas en carga toca dos tomas simultáneamente, se produce un cortocircuito en un cierto número de espiras ( $I_c$ , en figura 68a), originando una corriente de circulación importante. La solución es conectar una impedancia de transición (resistencia o reactancia, entre los tomas que están siendo cortocircuitadas para limitar la corriente de cortocircuito), como se ve en la figura 68b.

Para la impedancia de transición, es más común el uso de resistencias, puesto que son compactos, en cambio las reactancias generalmente son grandes y necesitan un lugar dentro del transformador para alojarse, lo que hace que el transformador sea más grande y termine por ser más caro.

Figura 68. Impedancias y corrientes de transición



Fuente: On-Load Tap-Changers for Power Transformers, a Technical Digest, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com). Consulta: 02/03/12.

## 5.2 Ciclos de transferencia de corriente

En el apéndice A de las normas IEC 60214-1 se expone que, para el proceso de cambio de derivación en un OLTC, existen tres métodos diferentes para las secuencias de cambio de derivación, utilizando resistencias de transición. Los cuales son:

### 5.2.1 Ciclo de bandera (*Flag Cycle*, en tabla I)

Es un método para realizar una operación de cambio de derivación, en las que la corriente de carga se desvía de los contactos principales de conmutación, antes de que comience a fluir la corriente circulante que se forma debido a la conexión de dos derivaciones en un mismo punto.

NOTA: este método requiere que la impedancia de transición conste de dos segmentos, de manera que en el momento de la transición la corriente de carga se tome del centro de esta impedancia de transición.

### **5.2.2 Ciclo de banderín simétrico (*simetrical pennant cycle* en tabla I)**

Método para realizar una operación de cambio de derivación en el que la corriente circulante comienza a fluir a través de las derivaciones, antes de que la corriente de carga se desvíe de los contactos de conmutación principal independientemente de la dirección de conmutación (hacia la izquierda o hacia la derecha).

NOTA: este método requiere que la conexión de la corriente de carga este en el punto medio de la impedancia de transición, cuando existe la corriente circulante.

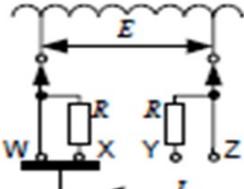
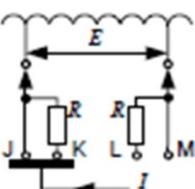
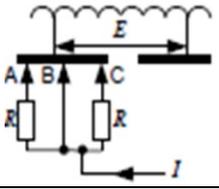
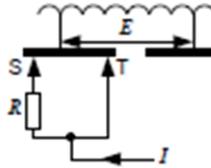
### **5.2.3 Ciclo de banderín asimétrico (*Asimetrical pannant cycle* en tabla I)**

Para este método, se realiza una operación de cambio de derivación; en una dirección de movimiento del interruptor, la corriente circulante comienza a fluir antes de que la corriente de carga se desvíe de los contactos principales de conmutación; mientras que en la otra dirección de movimiento, la corriente se desvía antes de que la corriente circulante comience a fluir.

NOTA: este método requiere que la conexión a través de corriente de carga este en un extremo de la impedancia de transición, en el momento que existe la corriente circulante.

En la práctica existen varios arreglos para la secuencia de cambio de derivación según su fabricante; sin embargo, todos están basados o son una extensión del método de bandera o el método de banderín. Los arreglos antes mencionados pueden apreciarse mejor en la siguiente tabla.

Tabla I. **Arreglos para el ciclo de transferencia de corriente en un OLTC**

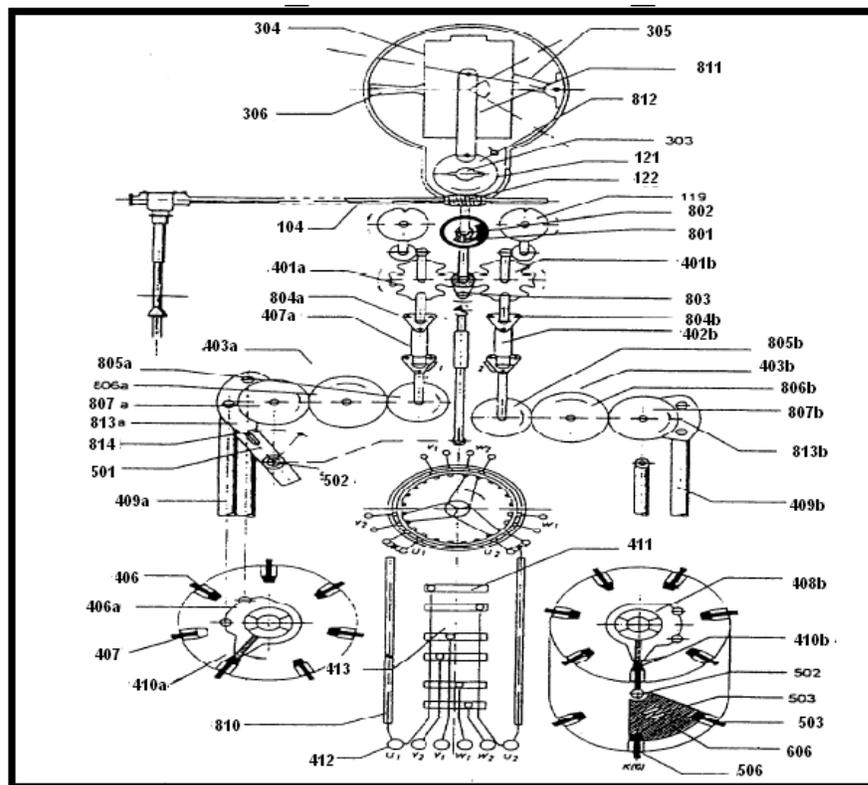
Tipo de Interruptor	Ciclo de operación	Diagrama de conexiones
<b>Conmutador</b> <i>(Diverter switch)</i>	<b>Ciclo de bandera</b> <i>(Flag cycle)</i>	
	<b>Ciclo de banderín simétrico</b> <i>(Symmetrical pannant cycle)</i>	
<b>Interruptor Selector</b> <i>(selector switch)</i>	<b>Ciclo de bandera</b> <i>(Flag Cycle)</i>	
	<b>Ciclo de banderín asimétrico</b> <i>(Asymmetrical pennant cycle)</i>	

Fuente: apendeice A de Normas IEC 60214-2.

### 5.3 Proceso de cambio de derivación

Para explicación del funcionamiento de los OLTC se utilizará el cambiador de derivaciones bajo carga fabricado por MR (*Maschinenfabrik Reinhausen*), cambiador de tipo D monofásico (ver la figura 69).

Figura 69. Disposición esquemática del conmutador y selector



Fuente: Detección de Averías en OLTC, Universidad Carlos III de Madrid.

El proceso de cambio de toma es independiente, de si el cambiador de tomas en carga está equipado o no con preselector (inversor o gran escalón) y de la posición del mismo, por lo cual no se tendrá en cuenta para describir el proceso de cambio de toma. En la figura 69 se muestra una representación

figurada desglosada del conjunto selector-conmutador, con sus mecanismos de actuación asociados.

Para una transición (cambio de toma) entre una toma inicial B y una toma final C, siendo la toma precedente la posición A, el proceso de transición es el siguiente:

El proceso se inicia al dar la orden de cambio de toma, la orden puede ser suministrado por el regulador automático de tensión o por manipular los botones de operación subir o bajar del accionamiento a motor (am). El accionamiento a motor, a través de los ejes de transmisión hace girar el tornillo sin fin (122 en la figura 69) y este a la rueda helicoidal (121 en dicha figura). La actuación de la rueda helicoidal desencadena dos procesos simultáneos que desembocaran en la actuación del selector y en la actuación del conmutador (*divertir switch* o *selector switch*). Para hacer referencia a cuál de estos dos elementos actúa, se indica entre paréntesis S (para describir la secuencia de acontecimientos que desembocan en la actuación del selector) o C (para describir los acontecimientos de actuación del conmutador).

2(C). La rueda helicoidal, a través del acoplamiento (303), arrastra la biela, con lo que un acumulador de energía empieza a cargarse.

2(S). Simultáneamente, la rueda helicoidal arrastra el sistema de leva manivela (801 y 803), que produce el movimiento de la cruz de Malta (401) correspondiente (existen dos cruces de Malta, una para las posiciones pares del selector y otra para las posiciones impares), la cual a través del eje (402) hace girar los contactos móviles del selector que se encuentran en la toma precedente (toma A).

3(S). El contacto móvil del selector llega a la toma final (toma C). El mecanismo de actuación del selector ha finalizado su misión.

3(C). Mientras tanto, el mecanismo de resortes continúa aún cargándose.

4(C). Cuando el resorte se ha cargado, el mecanismo acumulador de energía se auto-libera (gracias a una leva que impacta contra una palanca liberadora, no se muestra en la figura 69) y la energía almacenada se transmite al conmutador, el cual transfiere la carga (intensidad) en 46 milisegundos de la derivación B a la derivación C. Hasta el inicio de la conmutación se ha consumido prácticamente todo el tiempo del cambio de toma (4,3 segundos). El accionamiento a motor para y finaliza la actuación del cambiador de tomas en carga. Más adelante se adentrará mejor en la forma de operación del selector y del conmutador respectivamente.

Independientemente de la duración del pulso eléctrico, únicamente deben realizar una operación de cambio de derivación a una derivación adyacente, de manera que nunca se salten derivaciones. El accionamiento a motor será capaz de recibir una orden para realizar otra operación hasta que se haya completado la operación anterior y todas las partes del OLTC se encuentren estáticas.

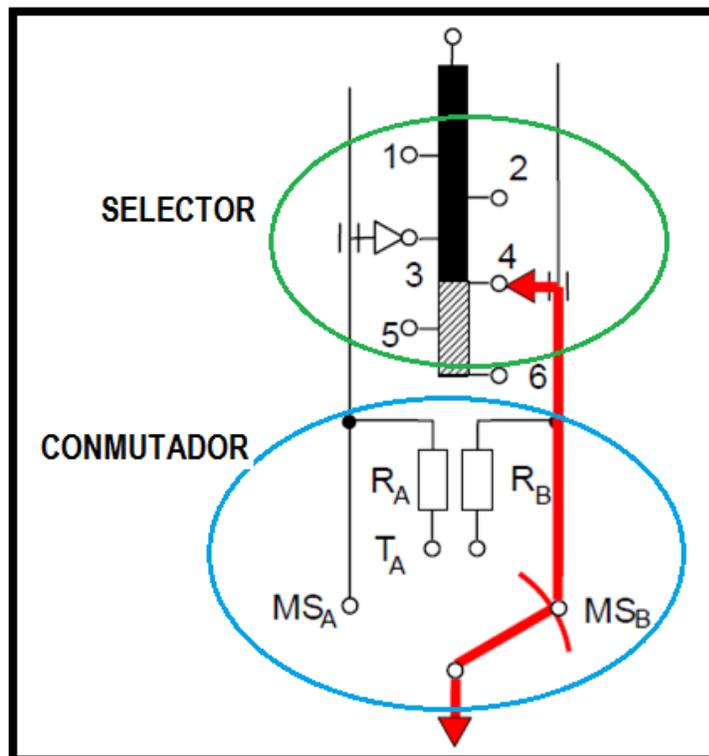
#### **5.4 Operación del selector**

Como se dijo anteriormente el proceso de cambio de derivación, es un proceso combinado entre el selector y el conmutador. La figura 70 da una idea clara sobre el selector que generalmente está compuesto por dos contactos móviles por cada fase del transformador y se conectan a los contactos fijos de las distintas derivaciones de cada fase cuando se requiere.

En condiciones normales uno de los contactos móviles del selector está estático sobre la derivación que está llevando corriente a la carga (derivación m), mientras que el otro contacto móvil está disponible y puede deslizarse para seleccionar cualquiera de las derivaciones adyacentes (derivación m-1 o derivación m+1).

Es necesario exponer que los contactos del selector no están diseñados para cortar o restablecer la corriente de carga del circuito y generalmente se aloja debajo del recipiente del conmutador, aislado en el aceite del tanque principal del transformador.

Figura 70. **Diagrama eléctrico selector – conmutador**



Fuente: presentación pdf, Introducción al grupo Reinhausen, Moritz Werner Gerente Regional de Ventas, 1 de septiembre de 2009.

## 5.5 Operación del conmutador

En la figura 70 se muestra una modalidad del conmutador, en el que existen cuatro contactos fijos y un contacto móvil de manera que para conmutar se necesita que el contacto móvil se deslice sobre los contactos fijos y de esta manera realizar la transferencia de corriente de carga de una derivación a la siguiente o anterior, esta modalidad de transferencia de la corriente de carga es usado en algunos casos para conmutación en aceite. Existe otra modalidad de transferencia de la corriente de carga, en la cual no se requiere que un contacto conmute entre los contactos fijos, sino únicamente se tienen interruptores que funcionan en conjunto con el selector para realizar la transferencia de carga como se verá adelante.

En todos los OLTC, el tiempo de transferencia del conmutador se encuentra entre 40 y 60 milisegundos. Durante la operación del conmutador, las resistencias de transición se insertan y se cargan de 20 a 30 milisegundos. El tiempo de operación total de un OLTC es entre 3 y 10 segundos, dependiendo del diseño. En la parte 5.4.1 se presentan varios ejemplos y se explica la secuencia de funcionamiento para cada uno respectivamente.

Existe una modalidad en algunos cambiadores de derivaciones, los cuales únicamente cuentan con un elemento denominado interruptor selector (*selector switch*, ver tabla I), en el cual se combinan las propiedades de un selector y un conmutador.

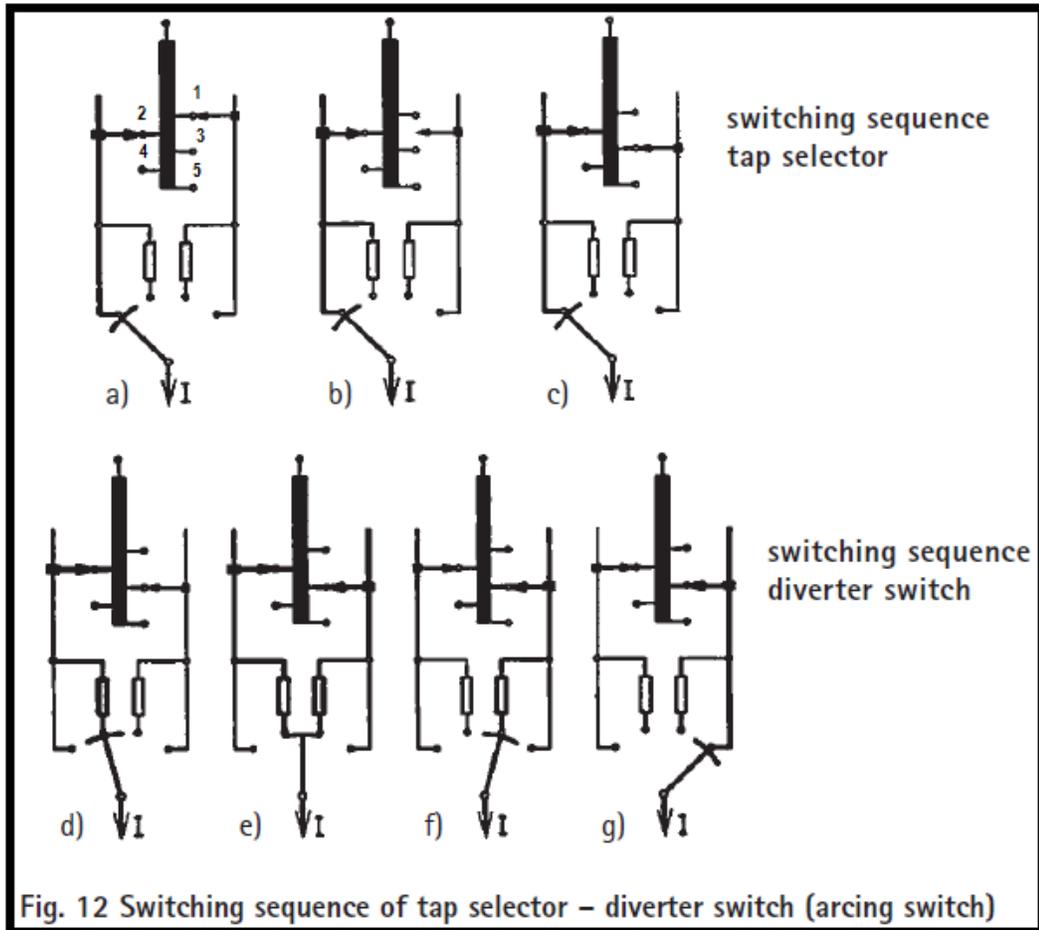
### **5.5.1      Secuencia de conmutación con resistencia de transición**

Ejemplo No. 5.1: secuencia de conmutación en un OLTC con conmutación en aceite de marca MR modelo OILTAP<sup>®</sup> M.

Este es un OLTC que comprende de un conmutador y un selector tal y como en la figura anterior. En este caso, el selector es operado por un engranaje directamente desde el mecanismo de accionamiento. Al mismo tiempo, un resorte acumulador de energía se tensa, este opera el conmutador después de su liberación en un tiempo muy corto - independientemente del movimiento del mecanismo de accionamiento. El acumulador de energía (resorte) asegura que la operación del conmutador siempre tenga lugar después de que la operación de preselección de derivación ha terminado.

La operación de cambio de toma se lleva a cabo en dos etapas. En primer lugar la derivación próxima está preseleccionada por el selector de derivaciones sin carga (figura 71 posición a-c.) seguidamente, el conmutador transfiere la corriente de carga de la derivación en funcionamiento a la derivación preseleccionada (figura 71 posiciones del c-g).

Figura 71. **Ciclo de conmutación de un OLTC con resistencias de transición**



Fuente: Pdf, On-Load Tap-Changers for Power Transformers, A Technical Digest, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com).

En este caso la corriente de carga circula por la derivación 2 como se ve en la figura 71 y quiere cambiar a la derivación 3, el procedimiento es como se describe a continuación.

- Paso 1: en este momento la corriente se encuentra circulando en la derivación 2 pasando por uno de los contactos móviles del selector y pasando por una rama principal del conmutador (figura 71 a). Después de que el accionamiento a motor (am) ha recibido la orden de cambio, energiza el motor de manera que este a través del árbol de accionamiento arrastre al selector, este deslizará su contacto móvil que se encuentra libre, hacia la derivación requerida.
- Paso 2: en este caso se ve que el contacto móvil del selector que se encontraba en la derivación 1, ya se encuentra libre y en movimiento hacia la derivación 3 (figura 71 b). La corriente de carga sigue circulando a través de la derivación 2.
- Paso 3: en este momento, el contacto libre del selector se ha ubicado en la derivación 3 y el acumulador de energía se debe encontrar listo para realizar la acción de conmutación (ver figura 71 c). En este esquema de conmutación, el selector ha terminado su misión.
- Paso 4: en este momento el contacto móvil del conmutador inicia su movimiento trasladándose de la rama principal de la derecha, hacia la rama de transferencia adyacente (figura 71 d). Cuando el contacto móvil del conmutador conecta a ambas ramas (rama principal y de transición de la izquierda) la mayor parte de la corriente circula a través de la rama principal, puesto que es donde hay menor oposición a la corriente. Sin embargo, cuando el contacto móvil ha abandonado completamente el contacto fijo de la rama principal, la corriente forzosamente circulará en la rama de transición pasando por la resistencia de transición ( $R_a$  en la figura 70).

Paso 5: el contacto móvil del conmutador se ha desplazado hasta conectar con ambas ramas de transición (figura 71 e). En este momento la corriente de carga se divide, pasando a través de ambas resistencias de transición. En este momento, también se genera una corriente circulante  $I_c$  que es producto de cortocircuitar la derivación 2 y la 3, la resistencia se opone a esta corriente para que no cause grandes daños.

Paso 6: el contacto móvil del conmutador, ha abandonado el contacto fijo de la rama de transición  $R_a$ , de manera que la corriente de carga circulará a través de la rama de transición de  $R_b$  de la figura 70.

Paso 7: en este momento el contacto móvil del conmutador ha completado su misión, llegando hasta la rama principal del lado derecho. La consecuencia de este cambio es que ahora la corriente que se suministra a la carga proviene en la derivación 3 y el voltaje ha disminuido o aumentado en la salida del transformador.

Ejemplo No. 5.2: Secuencia de conmutación en OLTC marca ABB modelo UZ.

En la figura 72 se muestra que el cambiador de derivaciones bajo carga tipo UZ, utiliza un interruptor selector (*selector switch*) para el proceso de cambio de derivación.

La secuencia de conmutación sigue el principio de ciclo de banderines simétrico. Esto significa que el contacto de conmutación principal del selector de carga se abre antes de que las resistencias de paso se conecten en el

escalón de regulación, el resultado es una fiabilidad óptima en caso de sobrecargas.

A carga nominal, la interrupción se produce en el primer cero de corriente tras la separación de los contactos, lo que supone una duración media del arco de aproximadamente 6 milisegundos a 60 hertz. La duración total de la secuencia completa es de unos 50 milisegundos. El tiempo de cambio de toma del mecanismo de accionamiento motorizado es de aproximadamente 3 segundos por escalón.

La secuencia de conmutación del paso de posición 1 a la posición 2 se muestra en los diagramas de las figuras 72 a –e. El contacto móvil H aparece representado como uno solo, aunque de hecho es doble y está formado por el contacto principal y el contacto de conmutación principal. El contacto principal se abre antes que el contacto de conmutación principal, y se cierra después de este. La secuencia de conmutación es la siguiente.

Paso 1: el contacto principal H conduce la corriente de carga, los contactos de paso M1 y M2 están abiertos y situados en los espacios entre los contactos fijos.

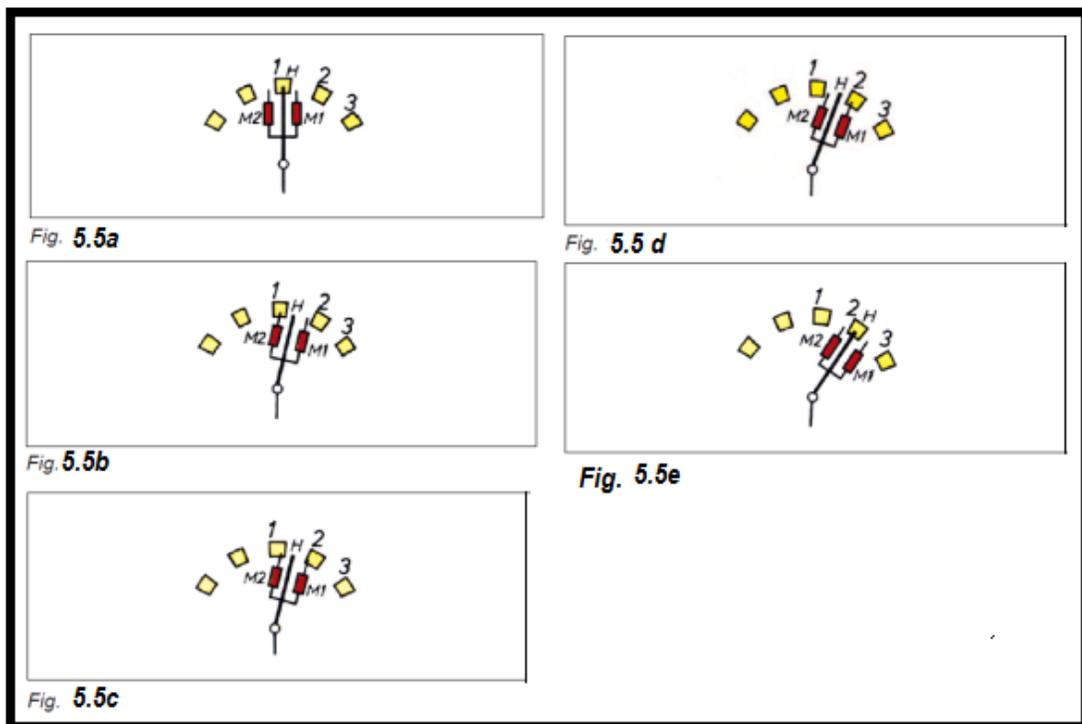
Paso 2: el contacto de paso M2 conecta con el fijo 1 y posteriormente el contacto de conmutación principal H se abre. La resistencia de paso y el contacto de paso M2 conducen la corriente de carga (figura 72 b).

Paso 3: el contacto de paso M1 conecta con el contacto fijo 2. La corriente de carga está dividida entre los contactos de paso M1 y M2. La corriente circulante que se formará por cortocircuitar dos derivaciones, está limitada por las resistencias de transición (figura 72 c).

Paso 4: el contacto de paso M2 se separa del contacto fijo 1 (figura 72 d). La resistencia de paso y el contacto de paso M1 conducen la corriente de carga.

Paso 5: el contacto de conmutación principal H conecta con el contacto fijo 2. El contacto de paso M1 se separa del contacto fijo 2. El contacto principal H conduce la corriente de carga.

Figura 72. **Secuencia de cambio de derivación de un OLTC marca ABB, tipo UZ**



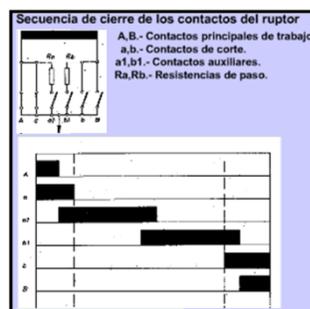
Fuente: Manual de usuario de OLTC tipo UZ, marca ABB.

Ejemplo 5.3: secuencia de conmutación de un cambiador de derivaciones bajo carga marca MR modelo M

La siguiente figura muestra otra modalidad de conmutación basado en el ciclo de bandera, en el cual se tienen dos ramas de transferencia con dos resistencias de paso ( $R_a$  y  $R_b$ ) respectivamente, 2 ramas principales con dos contactos principales de trabajo (A y B) y dos ramas de corte con dos contactos de corte (a y b) respectivamente. Para un OLTC marca MR tipo OILTAP® M, que es un equipo de conmutación en aceite, los contactos forman dos grupos de conmutación (grupo A y grupo B).

En este caso no están ilustrados los contactos del selector; por lo tanto, cabe mencionar que en este caso, el contacto móvil disponible del selector deberá estar ubicado en la derivación que se desea entre la operación, antes de que empiece la secuencia de conmutación (como se mencionó anteriormente para la figura 71). En las siguientes posiciones se muestra la secuencia.

Figura 73. **Tiempos de operación de las ramas de un OLTC marca MR, modelo OILTAP® M**



Fuente: [www.slideshare.net/teoriaelectro/cambiadores-de-derivaciones-bajo-carga-uacj-1555671](http://www.slideshare.net/teoriaelectro/cambiadores-de-derivaciones-bajo-carga-uacj-1555671). Consulta: 02/03/12.

Descripción de la secuencia de conmutación (el selector ya ha elegido la derivación deseada):

Paso 1: inicialmente puede verse que tanto los contactos principales como los contactos principales de corte del grupo A están conectados a una derivación determinada n. La tensión resultante es igual a la tensión de la derivación (figura 74 posición 1).

Cuando se recibe la orden de cambio de derivación, el accionamiento a motor (am) arrastra al árbol de accionamiento y este coloca al contacto disponible del selector en la posición requerida, como también carga al acumulador de energía; cuando al acumulador de energía se ha cargado, libera la energía para realizar la transferencia de carga hacia la derivación seleccionada y el proceso es como sigue:

Paso 2: cuando empieza la secuencia de conmutación, lo que ocurre es que se cierra el interruptor de la rama auxiliar de transferencia y se abre el interruptor de la rama principal, quedando de esta manera circulando la corriente a través de la rama principal de corte y la rama de transferencia (la mayor parte de la corriente circula por la rama principal de corte porque es la que no tiene resistencia).

Paso 3: se abre el interruptor de la rama principal de corte y la corriente queda circulando únicamente por la rama de transferencia, por medio de la resistencia de paso Ra (figura 74, posición 3).

Paso 4: se cierra el interruptor de la rama auxiliar de transferencia del grupo B. Este es un momento crucial, puesto que se conectan dos derivaciones a un único punto (derivación actual y derivación seleccionada). La

corriente de carga circula en las dos ramas auxiliares de transferencia a través de las corrientes  $R_a$  y  $R_b$ ; sin embargo, también se crea una corriente de cortocircuito circulando entre ambas derivaciones ( $I_c$ ).

Las resistencias de las ramas auxiliares de transferencia, tienen el propósito de reducir la corriente de cortocircuito ( $I_c$ ), y de esta manera evitar daños irreversibles en el devanado.

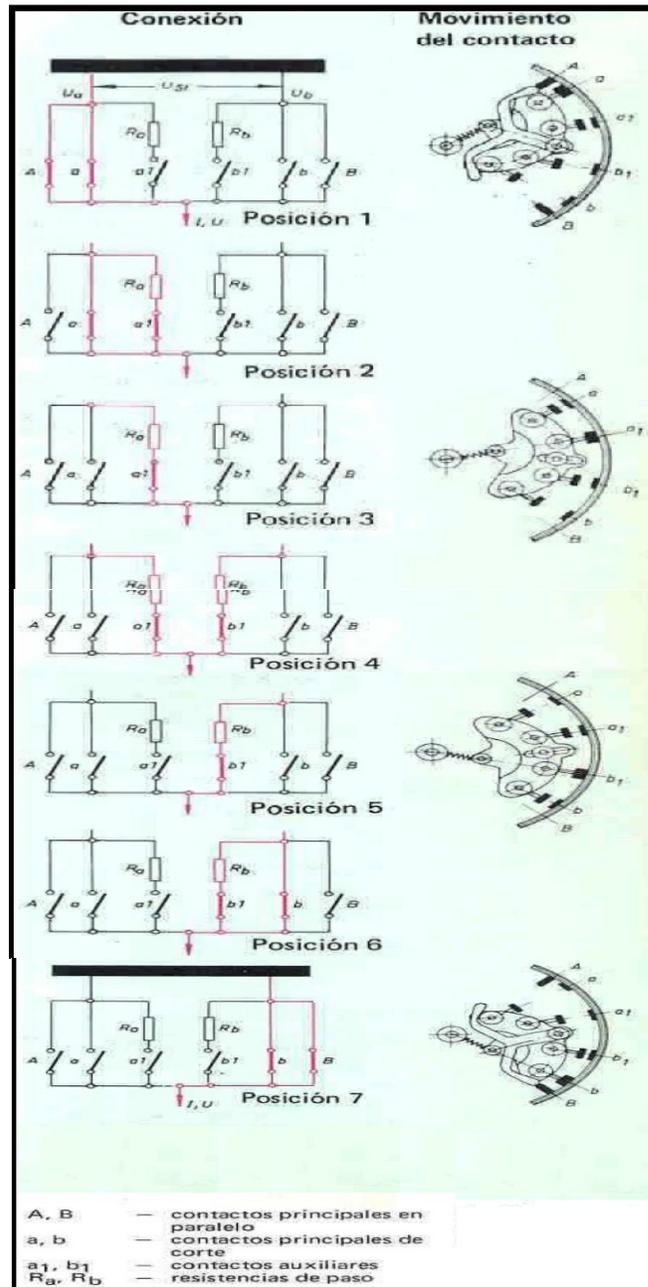
Paso 5: ahora se procede a abrir el interruptor de la rama auxiliar de transferencia del grupo A. Esto provoca que la corriente de carga se transfiera en su totalidad a la derivación elegida por el selector. El total de la corriente de carga circula a por la rama auxiliar de transferencia del grupo B a través de la resistencia de transferencia  $R_b$  (figura 74, posición 5).

Paso 6: se cierra el interruptor de la rama principal de corte, de manera que una parte de la corriente de carga circulara a través de la rama auxiliar de transferencia y otra parte de esta corriente circulará por la rama principal de paso (la mayor parte de la corriente circulará por esta rama por no tener resistencia.)

Paso 7: finalmente se cierra el interruptor de la rama principal y se abre el interruptor de la rama auxiliar de transferencia, para finalmente dejar la corriente de carga circulando a través de la rama principal y corte del grupo B.

De esta manera se ha realizado el cambio de derivación causando una disminución o aumento del total de espiras del devanado de regulación. Si el devanado de regulación está en el primario y el voltaje suministrado al primario permanece constante, se tendrá una elevación si el número de espiras se redujo mientras que se tendrá una reducción en el voltaje de salida, si el número de espiras aumento. En este caso se tiene libre el grupo de conmutación A, de manera que cuando se requiera un cambio de derivación este grupo está listo para seleccionar y conmutar a otra derivación adyacente.

Figura 74. Secuencia de operación del conmutador en un OLTC marca MR, modelo OILTAP® M

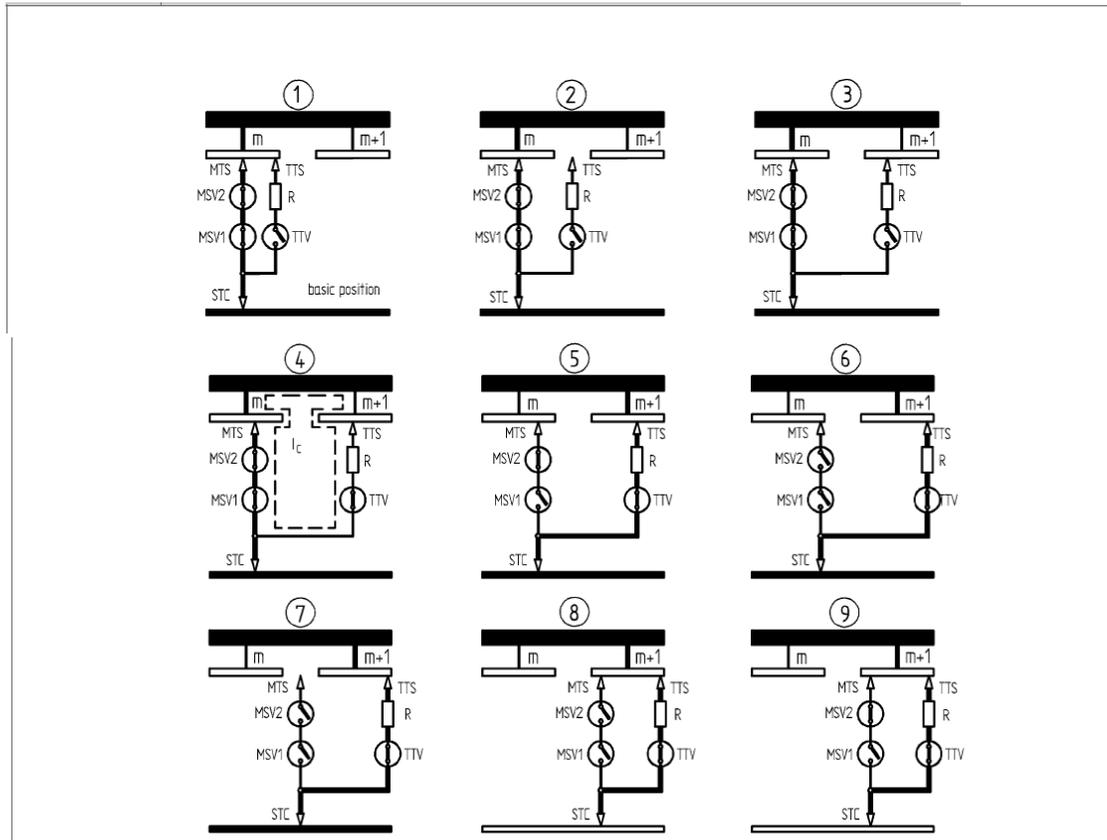


Fuente: [www.slideshare.net/teoriaelectro/cambiadores-de-derivaciones-bajo-carga](http://www.slideshare.net/teoriaelectro/cambiadores-de-derivaciones-bajo-carga). Consulta: 02/03/12.

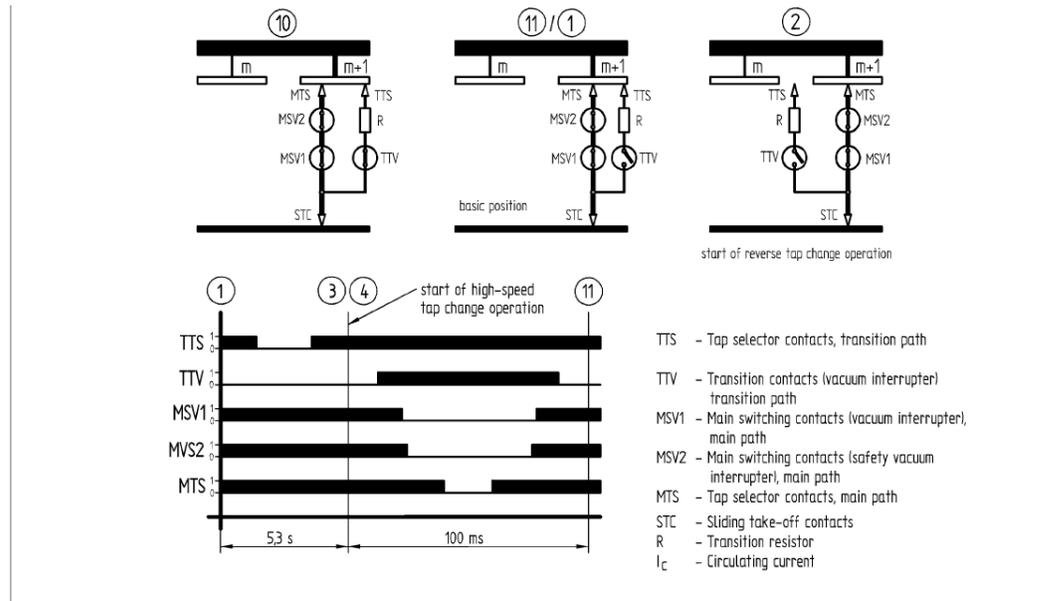
Ejemplo 5.4: secuencia de conmutación de un cambiador de derivaciones bajo carga modelo VT marca MR con conmutación en vacío (VACUTAP® VT).

En la siguiente gráfica puede verse otra modalidad del cambio de derivación, el cual se basa en el ciclo de banderín simétrico. En este caso se tiene únicamente dos ramas, una rama principal (en la cual se tienen dos interruptores, uno principal y uno de respaldo) y una rama de transición (en la cual se tiene un interruptor de transferencia y una resistencia de paso para limitar la corriente de cortocircuito), por lo tanto también se tiene una única resistencia de transición.

Figura 75. **Secuencia de conmutación de un VACUTAP VT**



Continuación de la figura 75.



Fuente: Pdf, On-Load Tap-Changers for Power Transformers, A Technical Digest, www.reinhausen.com. Consulta: 02/03/12.

- TTS = selector de contactos de derivaciones, camino de transición
- TTV = contactos de Transición (interruptor de vacío)
- MSV1 = contactos de conmutación principal (interruptor en vacío), la ruta principal
- MSV2 = contactos de conmutación principal (la seguridad del interruptor en vacío), la ruta principal)
- MTS = selector de contactos de derivaciones, vía principal
- STC = correderas despegue contactos
- R = resistencia de transición
- I<sub>c</sub> = corriente circulante.

Cuando se da una orden al OLTC para que cambie de la derivación  $m$  a la derivación  $m+1$ , el proceso es como se describió anteriormente, de tal manera que el selector coloca a la rama de transición en la derivación  $m+1$ , esperando que el conmutador posteriormente realice su trabajo. La secuencia del conmutador es como se describe a continuación.

Paso 1: cuando se recibe la orden de cambio de derivación, la rama principal del conmutador y la rama de transición se encuentran conectadas a la derivación  $m$ , pero con el interruptor de la rama de transición abierto. En este momento el selector inicia el movimiento para retirar la rama de transición de la derivación  $m$  sin realizar ningún movimiento en la rama principal (figura 75, 1).

Paso 2: en este momento el selector ha concluido con la separación de la rama de transición de la derivación  $m$ , dejando de esta manera que la corriente circule a través de la rama principal; sin embargo, el movimiento del selector continua para mover la rama de transición hacia la derivación  $m+1$  (figura 75, 2).

Paso 3: el selector ha llegado a hacer contacto con la derivación  $m+1$ ; sin embargo, sigue en movimiento para ubicar la rama de transferencia en el centro del contacto fijo de la derivación  $m+1$ .

Paso 4: el selector finalmente ha ubicado, la rama de transición en el centro del contacto fijo de la derivación  $m+1$  y se procede a cerrar el interruptor de la rama de transición. El cierre del interruptor de la rama de transición provoca que la corriente de carga se divida a través de las ramas de transición y principal. Sin embargo, el cierre del interruptor de transición crea un cortocircuito en el devanado que

separa a las dos derivaciones, lo que a su vez crea una corriente circulante  $I_c$  que es limitada por la resistencia de transición.

Paso 5: en este momento se abre el interruptor de la rama principal, transfiriendo la corriente de carga hacia la rama de transición. El selector inicia el movimiento sobre el contacto móvil de la rama principal para pasarlo hacia la derivación  $m+1$ .

A pesar de que la corriente de carga ya fue transferido a la derivación  $m+1$ , es necesario que la rama principal sea la que lleve la corriente para que no haya una caída de tensión en la resistencia, además, que la rama de transición este libre para realizar otra operación de cambio de derivación.

Paso 6: en este momento, se abre el interruptor de respaldo de la rama principal, antes que el contacto móvil del selector de la rama principal abandone el contacto fijo de la derivación  $m$ .

Paso 7: el contacto móvil del selector de la rama principal ha abandonado el contacto fijo de la derivación  $m$  y se dirige al contacto fijo de la derivación  $m+1$ . En este momento la corriente continúa circulando por la rama de transición, pasando por la resistencia de transición, pero sin la corriente circulante.

Paso 8: en este momento el contacto móvil del selector de la rama principal ha alcanzado al contacto fijo de la derivación  $m+1$ , pero la corriente de carga circula aún por la rama de transición, puesto que los dos interruptores principales se encuentran abiertos (figura 75).

Paso 9: se cierra el interruptor de respaldo de la rama principal.

Paso 10: se cierra el interruptor principal de la rama principal. De este modo la corriente de carga circula por ambas ramas (en su mayoría la rama circulará por la rama principal, puesto que no tiene oposición a la corriente), ver figura 75.

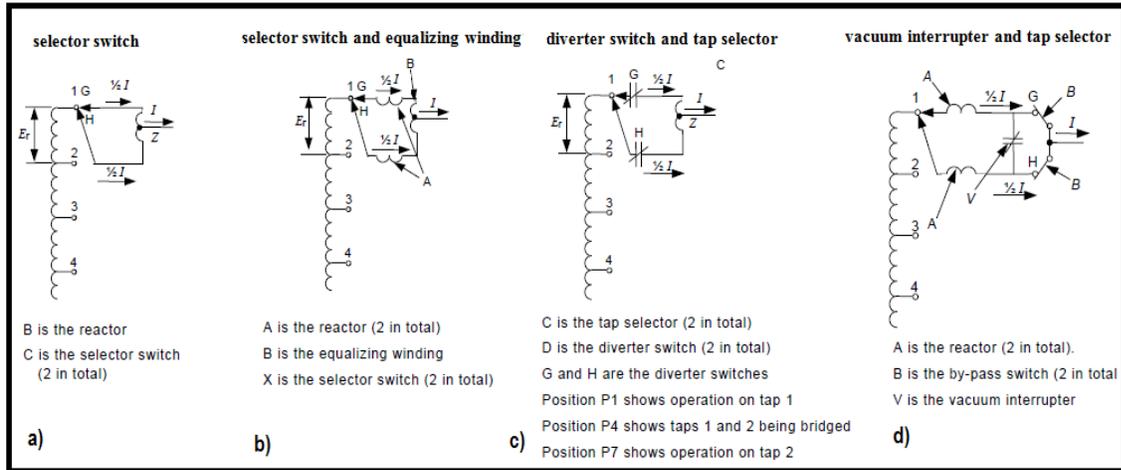
Paso 11: finalmente se abre el conmutador de la rama de transferencia, de manera que queda listo para otra operación de cambio de derivación.

### **5.5.2 Ciclos de conmutación con impedancia de transición de tipo reactor**

El apéndice B de las normas IEC 60214-1, expone que existen cuatro formas de conmutación en cambiadores de derivaciones bajo carga con reactores de transición, estas modalidades pueden verse en la figura 76.

- Conmutador (*selector switch*).
- Conmutador y devanado ecualizador (*selector switch and equalizing winding*).
- Conmutador y selector de derivaciones (*diverter switch and tap selector*).  
Selector de derivaciones e interruptor de vacío (*vacuum interrupter and tap selector*).

Figura 76. **Cambiador de derivaciones bajo carga con reactores de transición**



Fuente: Apéndice B de las normas IEC 60214-1

Como se ve en la figura 76, para cualquiera de las cuatro disposiciones, en condiciones normales, ambas ramas están conectadas a la derivación actual y llevan el 50 por ciento de la corriente de carga. Como se mencionó anteriormente los, OLTC con reactores son poco utilizados y actualmente el más utilizado es el que se basa en el principio de selector e interruptor de vacío, por lo cual solo se estudiará este diseño.

Ejemplo 5.5: Conmutación de un OLTC, MR con reactores de transición, modelo VACUTAP® RMV

Este diseño incorpora dos contactos auxiliares (*by-pass*) y un interruptor o interruptor al vacío, este arreglo permite reducir el número de interruptores de vacío que necesita el OLTC, figura 77.

El selector se compone de dos juegos de contactos, los cuales son operados por dos mecanismos independientes. Al igual que cualquier cambiador de derivaciones con reactor de transición, este cambiador de derivaciones se puede operar de forma continua en las posiciones con puente y sin puente. Posiciones de puente son llamadas las posiciones en que los dos contactos del selector de tomas se conectan en dos derivaciones adyacentes de la bobina de regulación. Cuando se diga que no hay puente, significa que los dos contactos del selector están conectados a la misma derivación del devanado de regulación.

Paso 1: inicialmente, en condiciones normales, ambas ramas del cambiador de derivaciones están conectadas a la derivación actual  $m$ , de manera que cada rama lleva la mitad de la corriente de carga, en este caso se dice que es una conexión sin puente.

Paso 2: en este momento se abre el *by-pass* P3. La corriente de carga continúa circulando por medio de las dos ramas con el 50 por ciento del total de la corriente en cada rama, ya que el interruptor de vacío se encuentra cerrado para alimentar a ambas ramas.

Paso 3: se abre el interruptor de vacío por acción del acumulador de energía. La apertura de este interruptor causa que deje de circular corriente por en la rama P4-P4 y de este modo el total de la corriente de carga circulará por medio de la rama P1-P2.

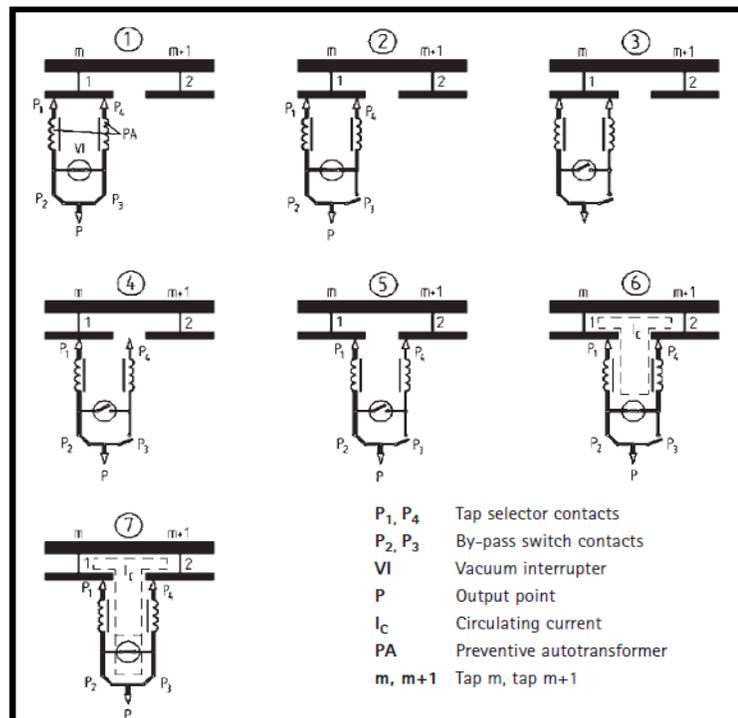
Paso 4: en este momento el selector desliza al contacto móvil P4 hacia la derivación actual  $m$  a la derivación siguiente ( $m+1$ ).

- Paso 5: el contacto móvil del selector ha completado su movimiento hasta la derivación  $m+1$ , pero no existe efecto alguno en la corriente de carga ni en el voltaje de salida.
- Paso 6: se cierra el interruptor de vacío, en este momento empieza a fluir parte de la corriente a través de las dos ramas y también se presenta la corriente circulante como se ve en la figura 77 (6). La corriente circulante es limitada por los reactores de transición.
- Paso 7: se cierra el contacto del *By-pazz* P3. En este momento la corriente de carga no tiene ninguna modificación y la corriente circulante también permanece circulando.
- Paso 8: se abre el contacto de *by-pazz* P2, lo cual no tiene ningún efecto sobre las corrientes y voltajes existentes.
- Paso 9: en este momento se corta la corriente circulante en la rama P1-P2 cuando se abre el interruptor de vacío ya que este era el que suministraba la corriente a esta rama. La corriente de carga queda circulando completamente en la derivación 2 y la corriente circulante desaparece.
- Paso 10: el contacto móvil del selector P1 es desplazado de la derivación 1 hacia la derivación 2, en donde deberá permanecer para transportar la mitad de la corriente de carga.
- Pasó 11: en este momento el contacto móvil P1 del selector ha sido ubicado sobre la derivación 2, sin embargo aún no circula corriente por esta rama.

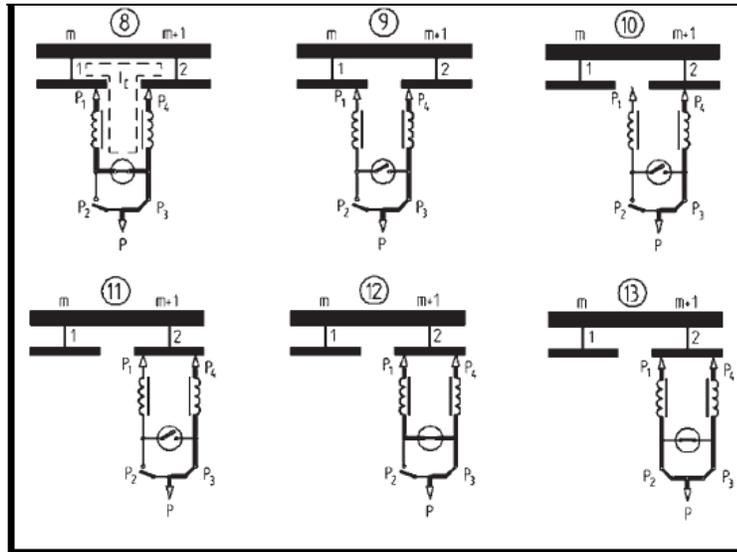
Paso 12: se cierra interruptor de vacío y posteriormente se cerrará el contacto de *by-pazz* P2. De esta manera la corriente de carga queda circulando con el 50 por ciento en cada una de las ramas, que es el estado normal que tendrá este tipo de OLTC cuando no está realizando un cambio de derivación.

Puede verse que independientemente del sentido de cambio de derivación, ambas ramas pueden usarse para la transición de la corriente de cara.

Figura 77. **Secuencia de conmutación de un OLTC marca MR modelo VACUTAP®RMV**



Continuación de la figura 77.



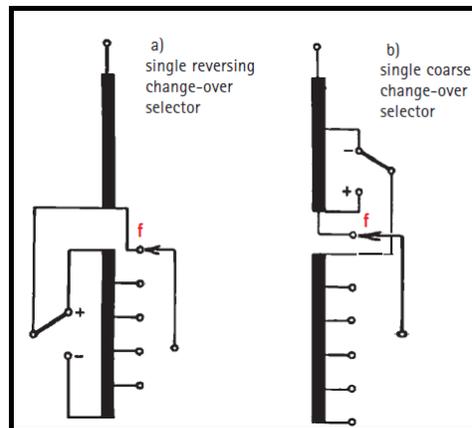
Fuente: Pdf, *On-Load Tap-Changers for Power Transformers, A Technical Digest*,  
www.reinhausen.com. Consulta: 02/03/12.

## 5.6 Funcionamiento del preselector

Como ya se mencionó anteriormente, es un conmutador que conecta uno de los extremos del devanado principal con el final o inicio del devanado de regulación de manera que el voltaje de las derivaciones se sume o resten vectorialmente con el voltaje del devanado principal. Por lo tanto, es usado en la conmutación más/menos y en la conmutación gruesa/fina o gran escalón, figura 78.

Para operar este conmutador, es importante que la corriente de carga este tomado del extremo del devanado principal que para la conmutación más/menos o gruesa/fina corresponde a la derivación central (terminal f en la figura 78) o en una posición intermedia, esto con el propósito de que no se deje de alimentar a la carga al momento de operar el preselector.

Figura 78. **Conmutación más/menos y gruesa/fina**



Fuente: Technical Data TD 61, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com).

Si el devanado de regulación está en el primario del transformador y se supone una tensión constante en la entrada del transformador se tendrá lo siguiente: Si el preselector se coloca en la posición más (+), se tendrá una tensión menor a la nominal en la salida del transformador, cuando se seleccionen las derivaciones; mientras que el voltaje en la salida del transformador será mayor a la nominal si el preselector es colocado en la posición menos (-).

### **5.6.1 Posiciones intermedias**

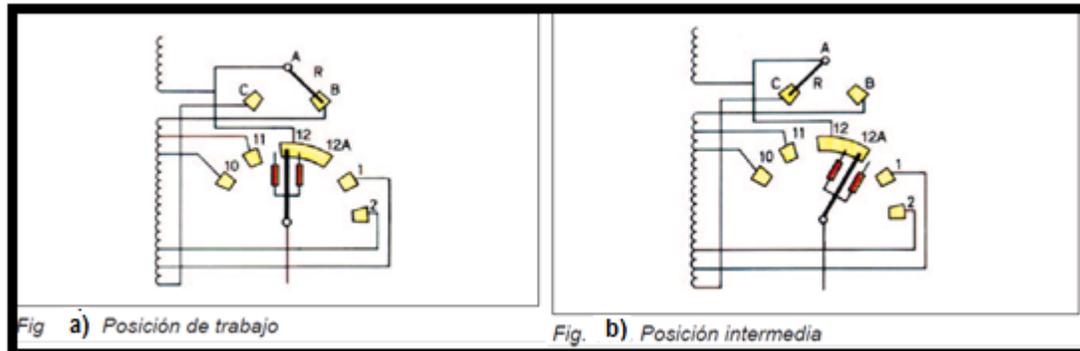
Se denomina posición intermedia a aquella por la que el cambiador de tomas debe pasar sin modificar la relación del transformador. La figura 79a y 79b muestran cómo se acciona el preselector, mientras el selector se desplaza sobre el contacto fijo doble. La posición adicional está representada con el mismo número en la escala del indicador de posición, acompañada de una letra (por ejemplo, 12A). Es posible que se requiera un número mayor de posiciones intermedias en el rango de funcionamiento si el número de tomas del bobinado es inferior al número de posiciones mecánicas del selector.

En la figura 79, el brazo de contacto del selector de carga pasa del contacto fijo 11 al contacto fijo 12. El contacto fijo 12 es lo bastante ancho para cubrir toda la distancia entre las dos posiciones del selector de carga. Está conectado al extremo del contacto principal.

En la Figura 79a, el brazo de contacto del selector de carga se ha desplazado hasta el contacto 12, y el preselector R puede abrirse y ubicarse en la posición B o C según se requiera. En la figura 79b, el brazo de contacto del selector de carga se ha seguido desplazando y ha pasado al contacto 12A sin establecer ni interrumpir la corriente.

Entonces ahora se puede decir que la operación del preselector se da generalmente en una operación del cambiador de derivaciones bajo carga en el cual no se realiza cambio de derivación, por consiguiente, los voltajes no son modificados, esta operación se da en una posición intermedia.

Figura 79. Operación del preselector



Fuente: Manual de OLTC tipo UZ, marca ABB.



## **6       CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LOS CAMBIADORES DE DERIVACIONES BAJO CARGA**

### **6.2       Condiciones ambientales**

Este punto establece los requerimientos funcionales aplicables y ambientales para los cambiadores de derivaciones bajo carga en subestaciones de distribución.

#### **6.2.1       Temperatura del cambiador de derivaciones**

Según el capítulo 4.1 de las normas IEC 602-14-1, los cambiadores de derivaciones bajo carga aislados en aceite, deben poder operarse únicamente para una temperatura mayor a - 25 grados centígrados y menor a 100 grados centígrados, como se ve en la tabla II extraída de dichas normas. En condiciones de sobrecarga, esta norma indica que un OLTC debe poderse trabajar hasta un máximo de 115 grados centígrados. Por otro lado, para cambiadores de derivaciones bajo carga tipo seco, debe operarse únicamente a temperaturas comprendidas entre -25 y 40 grados centígrados.

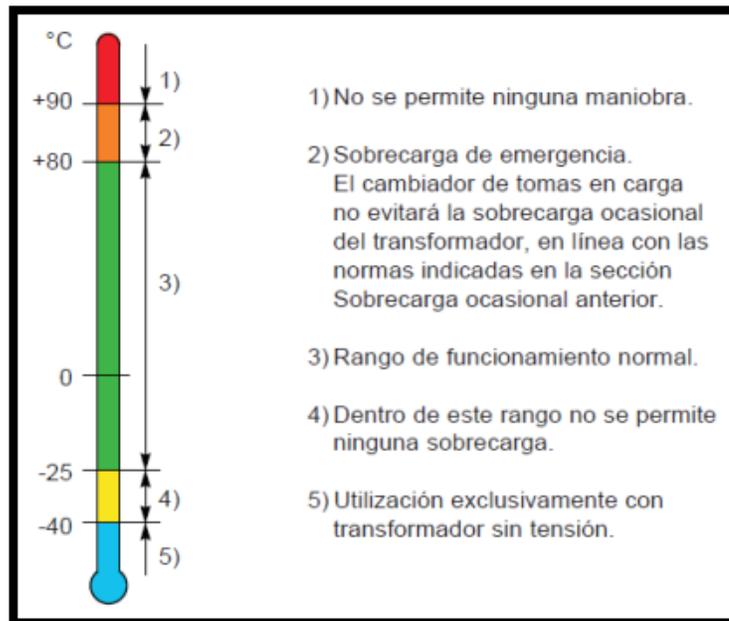
Tabla II. **Temperaturas admisibles del aceite para un OLTC**

Entorno del cambiador de derivaciones	Temperatura	
	Máxima	Mínima
Aire	25° C	40 ° C
Líquido	- 25° C	100° C
Nota 1: Para las definiciones del entorno del cambiador de derivaciones, vea 3.55 y 3.56 de las normas IEC 60214-1		
Nota 2: el valor de 100grados centígrados mencionado anteriormente se basa en la carga nominal normal y una temperatura ambiente máxima de 40grados centígrados como se especifica en la norma IEC 60076-1		

Fuente: Normas IEC 60214-1, p. 29.

Algunos fabricantes hacen sus equipos para poderse operar hasta en los límites indicados por estas normas, como lo son los equipos de marca MR, otros fabricantes diseñan sus equipos para temperaturas comprendidas dentro de estos rangos, tal es el caso de los equipos de marca ABB, como se ve en la figura 80; para este caso el cambiador puede ser operado en un rango de temperaturas entre -25 grados centígrados y + 80 grados centígrados, en condiciones de transformador con carga normal.

Figura 80. **Temperaturas de operación de un cambiador de derivaciones bajo carga modelo UZ, marca ABB**



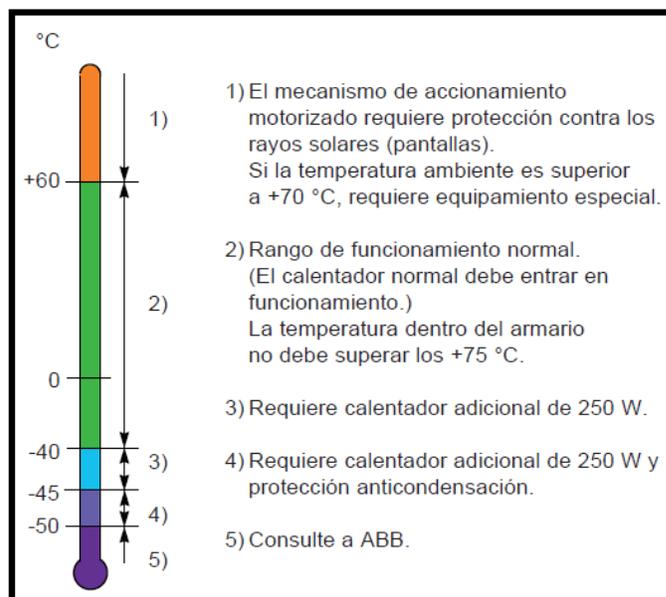
Fuente: manual de OLTC tipo UZ marca ABB.

### 6.2.2 Temperatura interior del accionamiento a motor

Las normas IEC 60214-1, en su capítulo 4.2 indica que la temperatura interna del accionamiento a motor (am) únicamente debe ser operado para una temperatura entre -25 grados centígrados 40 grados centígrados ya que se encuentra aislado en aire. Para preservar los distintos dispositivos que contiene este gabinete, es necesario que cuente con un elemento calefactor para reducir la humedad, pero siempre y cuando se opere a las temperaturas antes mencionadas.

Con inserción de elementos adicionales para calentamiento y enfriado, algunos equipos pueden operarse a temperaturas fuera de estos rangos como se ve en la figura 81, para un cambiador de derivaciones bajo carga tipo UZ de marca ABB.

Figura 81. **Temperaturas de operación del accionamiento a motor para un cambiador de derivaciones bajo carga modelo UZ, marca ABB**



Fuente: manual de OLTC tipo UZ marca ABB.

### 6.3 Condiciones de operación en sobrecarga

La norma IEC 60214-2 en su capítulo 4.3 indica que el cambiador de derivaciones no debe restringir la carga de emergencia del transformador, lo que podría dar lugar a que la temperatura del aceite hasta un máximo de 115 grados centígrados. Además, en el capítulo 5.2.1 de estas normas, se

especifica que la corriente de sobrecarga no debe ser mayor a 1,2 veces la corriente nominal del cambiador de derivaciones bajo carga y que la temperatura de los contactos no debe superar los 20 grados kelvin.

Tabla III. **Temperatura límite de los contactos de un OLTC**

Material del contacto	En aire ° K	En liquido ° K
Cobre desnudo	35	20
Plata con cara de cobre/aleaciones	65	20
Otros materiales	Por acuerdo	20

Fuente: Capítulo 5.2.1 de Normas IEC 60214-1.

La duración de los contactos especificada en la placa de características únicamente es válida a condición de que no se produzcan corrientes de sobrecarga equivalentes a 1,5 veces la corriente de paso nominal como máximo en más del 3 por ciento de las maniobras del cambiador de tomas. Por encima de estos valores, las sobrecargas aumentan el desgaste de los contactos y reducen su vida útil.

#### **6.4 Condiciones físicas**

Antes de operar un cambiador de derivaciones bajo carga, especialmente después de un mantenimiento, debe verificarse que no existe ningún tipo de falla como: fuga de aceite, humedad en el gabinete del accionamiento a motor, transmisión mecánica no defectuosa (todos los ejes y seguros deben estar bien

asegurados), relevador de flujo no operado, nivel de aceite del tanque conservador normal, válvula o relé de presión no activo.

También debe verificarse que en cada posición de servicio coincidan las indicaciones de posición del accionamiento a motor y del cambiador de tomas bajo carga (a través de la mirilla de la cabeza del cambiador de tomas bajo carga).

Luego de efectuado un trabajo de mantenimiento en los cambiadores de derivaciones, es muy importante realizarle pruebas eléctricas y mecánicas para asegurar que este en buen estado y listo para operar, estas pruebas se estudiarán en los siguientes capítulos.

Es obligatorio que todos los dispositivos de seguridad previstos en el cambiador de tomas bajo carga estén listos para el funcionamiento. En un caso extremo, la tapa del cambiador de tomas bajo carga podría estallar, con el consecuente peligro de que las piezas saliesen disparadas o salpicase aceite caliente. Los dispositivos de protección se deben conectarse al circuito de disparo de los interruptores de potencia, de manera que al reaccionar aseguren la inmediata desconexión del transformador mediante los interruptores de potencia.

## **6.5 Vigilancia durante el servicio**

La vigilancia del cambiador de tomas bajo carga y del accionamiento a motor se reduce a controles visuales ocasionales de la cabeza del cambiador de tomas bajo carga, del relé de protección y del accionamiento a motor. Estos controles se pueden combinar con los trabajos de control habituales en el transformador.

Prestar especial atención a:

- La estanqueidad de las juntas de la cabeza del cambiador de tomas bajo carga, del relé de protección y de las tuberías conectadas.
- Las juntas de la caja de protección del accionamiento a motor.
- El perfecto funcionamiento de la calefacción eléctrica incorporada en la caja de protección del accionamiento a motor.
- Perfecto estado de la carga del silica-gel, del respiradero del conservador del cambiador de tomas bajo carga, a una prueba de funcionamiento del relevador de protección.

Los aceites aislantes en el transformador deben ser controlados por el usuario del transformador, de acuerdo a las prescripciones correspondientes. Comprobar periódicamente la rigidez dieléctrica del aceite del cambiador de tomas bajo carga (por ejemplo, en relación con otros trabajos en el transformador). Al cambiar la carga de gel de sílice se debería comprobar la rigidez dieléctrica.

## **6.6 Condiciones de falla**

- Cuando algún equipo de protección ha reaccionado, es indispensable revisar el cambiador de tomas bajo carga y el transformador. Para ello, extraer el cuerpo insertable del conmutador y controlarlo de acuerdo a las instrucciones de mantenimiento.

- No volver a poner el cambiador de tomas bajo carga en marcha, hasta haberse asegurado de que no haya un daño en el cambiador de tomas bajo carga y en el transformador. Es inadmisibles energizar el transformador sin comprobación dado que puede causar graves daños en el cambiador de tomas bajo carga y en el transformador.

## **6.7 Clasificación de las operaciones de los cambiadores de derivaciones**

Los cambios de derivaciones se clasifican en:

- Cambio de derivación tipo estacional (5 a 10 por ciento)

Este tipo de operación se lleva a cabo generalmente en cambiadores de derivaciones sin carga ya que las operaciones se dan a un tiempo relativamente largo. La forma de operación estacional generalmente se basa en el cambio del consumo eléctrico debido a las diferentes estaciones de un año y las operaciones con programadas.

- Cambio de derivación diario (3 a 5 por ciento)

Este tipo de operación se lleva a cabo en cambiadores de derivaciones bajo carga o en ocasiones sobre cambiadores de derivaciones en vacío y se basa en que la demanda en el sistema varía conforme a los días de la semana. En este tipo de operación, se realiza un número de operaciones programadas dependiendo de la caída de tensión esperada para los diferentes días de la semana.

- Cambio de derivación de corta duración (1 a 2 por ciento)

Este tipo de operación se lleva a cabo únicamente en cambiadores de derivaciones bajo carga y se cambia a la derivación requerida dependiendo de la caída de tensión a las diferentes horas del día, en este caso las operaciones no pueden ser programadas ya que se basa en compensar la tensión en cualquier momento y se llevan a cabo de forma remota o automática.

Los ajustes o modificaciones estacionales se realizan con el transformador sin tensión. Los cambios diarios o de corta duración se realizan con el transformador en carga y generalmente son operaciones de forma remota.

En las redes de transporte, y debido a la naturaleza mallada de las mismas, el efecto de los transformadores con cambio de tomas sobre las tensiones en las barras y sobre el flujo de potencia reactiva depende de la configuración del sistema. Por lo general, para controlar la tensión de una parte del sistema es necesario operar de forma coordinada sobre todos los transformadores con cambio de tomas que conectan esa parte del sistema. Con frecuencia, los cambiadores de derivaciones se instalan en todos los transformadores que conectan subsistemas a diferentes tensiones. Esta situación podría darse, en todos los transformadores a la salida de los generadores síncronos, o en todos los que conectan la red de 400 kilo vatios con la de 230 kilo vatios o en todos los que conectan la red de transporte a alta tensión con las redes de distribución a media tensión.

En las redes de distribución, el carácter radial de las mismas simplifica el control de tensión. Él mismo, suele realizarse a lo largo de las líneas, mediante la conexión de condensadores y mediante el uso de autotransformadores reguladores. Consecuentemente, estos transformadores no cambian la tensión nominal entre sus terminales, por lo que su único cometido es regular la tensión mediante el cambiador de derivaciones del regulador de voltaje por pasos (SVR por sus siglas en inglés, *boosters* o *step voltage regulators*).

## **7 CONTROL DE LOS CAMBIADORES DE TOMAS BAJO CARGA**

Para facilitar el control de los cambiadores de derivaciones bajo carga instalados en una red eléctrica, deben poder operarse en distintos puntos, los controles son como se describen a continuación.

### **7.2 Control a distancia**

Esta modalidad de control del cambiador de derivaciones bajo carga, se refiere a una forma de control que se lleva a cabo desde un lugar distante a la subestación donde se encuentra el OLTC correspondiente, este control se lleva a cabo por medio de un sistema de telecomunicaciones vía SCADA que envía una señal al accionamiento al motor para realizar un cambio de derivación. El propósito de este control, es poder controlar el flujo de potencia y la regulación del voltaje en todo el sistema.

### **7.3 Control remoto**

Este control se lleva a cabo en una sala de mando ubicado en la subestación en la que se ubica el OLTC. En este control, una persona ubicada en la sala de mando de la subestación puede realizar operaciones según las necesidades de la subestación o por fallo del control a distancia. La orden puede enviarse hacia el cambiador de derivaciones bajo carga por medio de un protocolo de comunicaciones o por circuitos que harán operar el accionamiento a motor para realizar un cambio de derivación.

Figura 82. Consola para control de los elementos de una subestación



Fuente: subestación Los Brillantes, Retalhuleu.

#### 7.4 El control local

Se refiere a una forma de operación del cambiador de derivaciones bajo carga por medio de las botoneras de control, ubicadas en el gabinete del accionamiento a motor.

#### 7.5 Control mecánico

En gabinete de accionamiento a motor, debe contar con una posibilidad de control mecánico por medio de una manivela insertable. Este tipo de operación debe realizarse únicamente cuando ha fallado el control eléctrico del accionamiento a motor o por carencia de fuente de alimentación y nunca

cuando el accionamiento a motor este bloqueado por un elemento de protección del OLTC.

## **7.6 Control automático**

Existe un dispositivo llamado control automático, que tiene la propiedad de realizar automáticamente los cambios de derivaciones según las necesidades. El control automático requiere de transformadores de corriente y potencial conectados a la red, de manera que mide constantemente los valores de corriente y el voltaje a la salida del transformador. El control automático es programado para mantener el nivel de voltaje a un nivel determinado, con una tolerancia correspondiente. Si el nivel de voltaje a la salida del transformador se sale de la tolerancia programada, enviará una señal para activar un temporizador que a su vez, al terminar el conteo enviará una señal de cambio de derivación al mecanismo de accionamiento a motor. Por otro lado si el nivel de voltaje se normaliza antes de que el temporizador termine el conteo, se anulará el conteo y se evitará una operación incorrecta del cambiador de derivaciones.

Actualmente en el sistema eléctrico de Guatemala se utilizan controles automáticos para regulación de voltaje en transformadores con cambiador de derivaciones bajo carga, TAPCON 230 y TAPCON 240 de marca MR.

Figura 83. **Control automático de regulación de tensión**



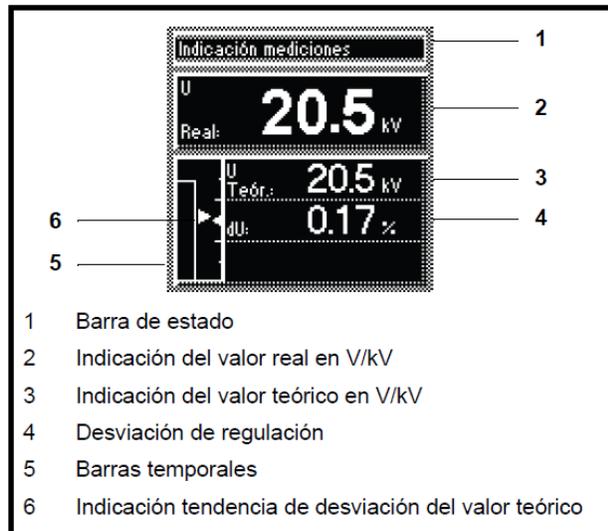
Fuente: Banco de Transformación 400/230kV Subestación Los Brillante Retalhuleu.

#### 7.6.1 **Controladores automáticos de OLTC marca MR (TAPCON)**

Los reguladores automáticos de tensión TAPCON de marca MR, comparan continuamente el valor real  $U_{real}$  (tensión de salida del transformador de potencia) con un valor teórico ( $U_{teórico}$ ) que puede fijarse según las necesidades.

Este equipo emite un impulso de ajuste para el cambiador de tomas bajo carga del transformador (en función de la desviación del valor real con respecto al valor teórico). El cambiador de tomas bajo carga realiza la conmutación cuando se supera el límite superior o inferior del ancho de banda B ( $U_{teórico} \pm B$  por ciento). De este modo se mantiene constante la tensión de salida en el transformador. Las oscilaciones dentro del ancho de banda admitido no influyen en el proceso de regulación ni en la operación de conmutación.

Figura 84. Pantalla de un control automático TAPCON



Fuente: Instrucciones de Servicio de TAPCON 230.

## 7.6.2 Parámetros para el regulador automático

A continuación se mencionan los parámetros del regulador automático para el buen funcionamiento de la subestación eléctrica. Los cuales se controlan desde el panel de control.

### 7.6.2.2 Valor teórico

El valor teórico de tensión,  $U_{teórico}$ , se establece como magnitud fija como referencia para mantener el nivel de voltaje aproximadamente a este valor. El ajuste de valor teórico en kilo voltios hace referencia a la tensión primaria del transformador de tensión (PT) y el ajuste del valor teórico en voltios hace referencia a la tensión secundaria del transformador de tensión (PT), aunque pueden usarse ambos casos, generalmente los ajustes se

realizan con valores en voltios (valores secundarios del PT). Esta indicación precisa, que se introduzcan correctamente los datos del transformador de tensión. Generalmente el ajuste de fábrica para el voltaje teórico es 100 voltios.

### **7.6.2.3 Ancho de banda**

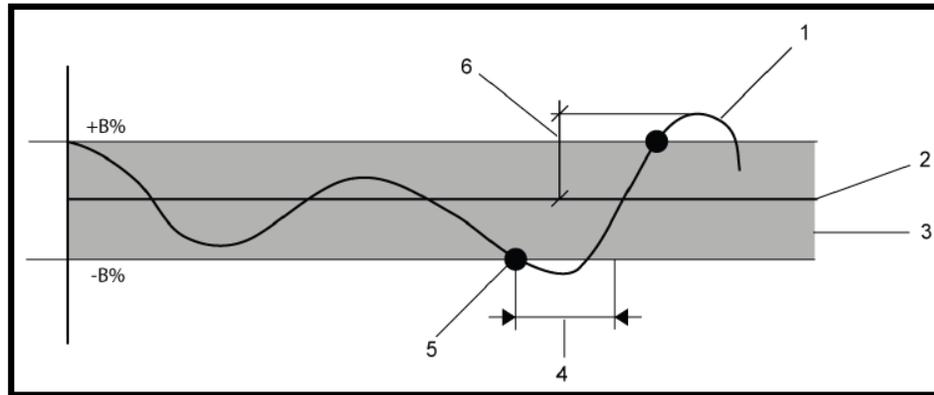
Es la desviación admitida de la tensión de medición del valor teórico seleccionado. Si la tensión de medición actual se encuentra dentro del ancho de banda, no se emite ninguna orden de mando al cambiador de tomas.

Si la tensión de medición sale del ancho de banda establecido (desviación de regulación  $\Delta U$ ), tras el tiempo de retardo  $T$  ajustado, se produce un impulso de salida y por lo tanto el cambiador de tomas bajo carga realiza una conmutación en dirección positiva o negativa según sea el caso.

El ancho de banda, es decir, la desviación porcentual positiva o negativa con respecto del valor teórico ( $U_{teórico}$  más o menos por ciento), debe seleccionarse de forma que, una vez concluido el proceso de conmutación, la tensión de salida del transformador ( $U_{real}$ ) regrese dentro del margen del ancho de banda establecido.

Si se estableciese un ancho de banda demasiado bajo, en caso de que se superase el límite superior  $B+$  por ciento del ancho de banda, se produciría una conmutación a niveles inferiores. Sin embargo, se conmutaría a un nivel tan bajo que se superaría el límite inferior  $B-$  por ciento del ancho de banda. La consecuencia sería la conmutación constante entre niveles, así como oscilaciones involuntarias del cambiador de tomas. El valor ajustado no debe ser en ningún caso inferior al 60 por ciento del valor calculado.

Figura 85. Ancho de banda para el control automático de un OLTC



Fuente: instrucciones de servicio de TAPCON 230.

- 1 =  $U_{real}$ : tensión de medición
- 2 =  $U_{teórico}$ : valor teórico en kV/V
- 3 = ancho de banda en por ciento
- 4 =  $T_1$ : tiempo de retardo ajustado (sin operación de conmutación)
- 5 = Superación del ancho de banda
- 6 =  $\Delta U$ : desviación de regulación

Si cuando se supera el límite inferior o superior del ancho de banda en un período de 15 minutos, no se produce una regulación, se activa el mensaje de alarma control de funcionamiento que acciona el relé correspondiente. El mensaje de alarma se restablece cuando la desviación vuelve a encontrarse dentro del ancho de banda.

Para poder ajustar correctamente el valor, deben conocerse el ancho de banda admitido B por ciento y el escalonamiento del transformador. Para el ancho de banda B por ciento se recomienda el siguiente valor:

$$[\pm B \%] > 0.6 \Delta U_{\text{toma}}$$

$$\Delta U_{\text{toma}} = RR/Nd$$

Donde:

$\Delta U_{\text{toma}}$  = Escalonamiento

Nd = Número de Derivaciones

RR = Rango de Regulación en por ciento

$\pm B \%$  = ancho de banda en porcentaje

Por ejemplo: calcular el ancho de banda para un cambiador de derivaciones bajo carga con un rango de regulación de más o menos 15 por ciento = 30 por ciento y un número de derivaciones de 30.

$$\Delta U_{\text{toma}} = RR/Nd = 30 \text{ por ciento} / 30 = 1 \text{ por ciento}$$

$$[\pm B \%] \geq 0.6 * 1 \text{ por ciento} = 0,6 \text{ por ciento}$$

#### **7.6.2.4 Tiempo de retardo (T)**

Durante este tiempo no debe producirse una acción de conmutación si un valor de medición se encuentra fuera del ancho de banda. Comienza en cuanto la tensión de medición salga del margen del ancho de banda. Esta función sirve para evitar operaciones de conmutación innecesarias cuando se abandona brevemente el margen del ancho de banda.

Si la actual tensión de medición sale del ancho de banda, el control automático inicia el conteo. Si todavía existe desviación de regulación una vez transcurrido el tiempo de retardo, se emite un impulso de salida. La duración del retardo se determina con el tiempo de retardo T. En caso de que la tensión de medición regrese dentro del margen del ancho de banda durante el tiempo

de retardo, se comienza la cuenta del tiempo de retardo en sentido inverso, en segundos, empezando por el tiempo ya transcurrido.

En caso de que la tensión de medición supere nuevamente el ancho de banda ajustado mientras se borra el tiempo, el retardo de tiempo se reinicia a partir del tiempo restante. La ventaja de la cuenta atrás es que, en caso de que se supere con frecuencia el ancho de banda del regulador, no es necesario volver a empezar la cuenta desde cero segundos sino que se utiliza el tiempo transcurrido como punto de salida para el comienzo del siguiente tiempo de retardo.

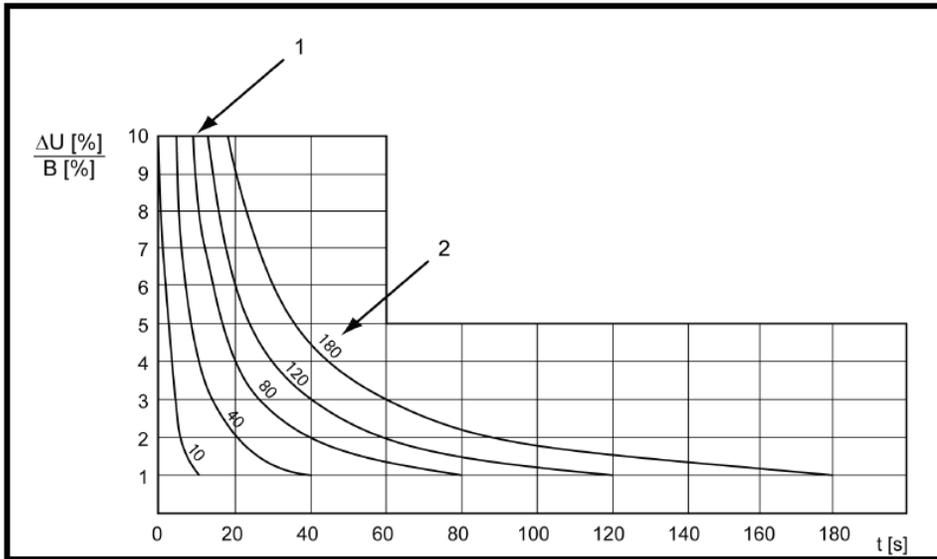
El fabricante generalmente ajusta el tiempo de retardo a 40 segundos; sin embargo, puede ajustarse en un rango entre 0 y 600 segundos.

#### **7.6.2.5 Tiempo de retardo lineal/integral**

El tiempo de regulación  $T$  puede ajustarse como lineal o integral. Si se ajusta el tiempo lineal, el regulador reacciona con un tiempo de retardo constante independientemente de la desviación de la regulación.

Si se ajusta el tiempo integral, el tiempo de retardo se reduce hasta un mínimo de 1 segundo en función del comportamiento de la desviación de regulación actual para el ancho de banda ajustado  $B$ . Cuanto mayor sea la desviación de regulación ( $U_{real}$  de  $U_{teórico}$   $B$  más o menos por ciento), menor será el tiempo de reacción. De este modo, el regulador de tensión reacciona con mayor rapidez ante grandes variaciones de tensión en la red surgidas de forma imprevista. Así, la precisión de la regulación aumenta mientras que la frecuencia de conmutación disminuye como, se ve en la figura 86.

Figura 86. **Tiempo de retardo integral**

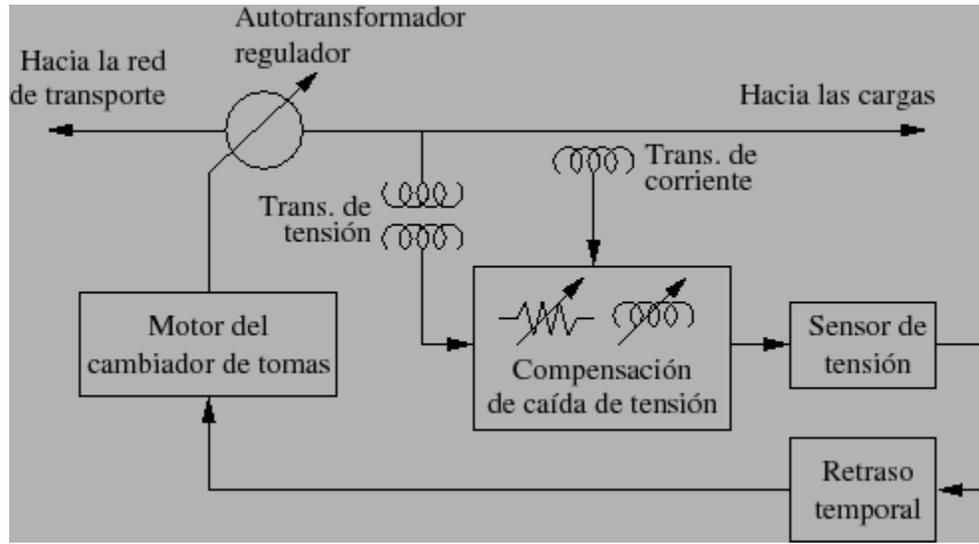


Fuente: Manual de usuario de TAPCON 240.

### 7.6.3 Esquema del regulador automático

El sistema trata de mantener una tensión constante, en su devanado secundario, o en algún punto situado aguas abajo en la línea de distribución y determinado por un mecanismo llamado compensador de caída de tensión. Si el sensor de tensión detecta una desviación respecto a la tensión de referencia superior a un determinado umbral (por ejemplo un 1 por ciento), manda una orden al motor para que éste modifique la toma del secundario. El retraso temporal impide que el autotransformador responda a sobretensiones temporales o a variaciones rápidas que no necesitan corrección. Un retraso de 30 segundos es un valor típico.

Figura 87. Esquema de control automático de regulación de tensión



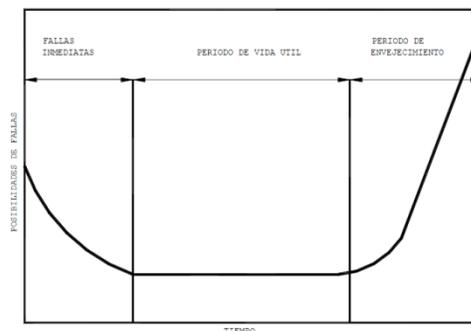
Fuente: Step-Voltage Regulators, <http://www.powerqualityworld.com/2011/04/step-voltage-regulator-utility.html>. Consulta: 08/04/12.



## 8 MANTENIMIENTO DEL CAMBIADOR DE DERIVACIONES BAJO CARGA

En lo que respecta a mantenimiento de los equipos eléctricos, todos siguen el principio de la curva de la bañera, la cual dice que la vida de los equipos se basa en una curva muy similar a una bañera, en el cual posteriormente a haber puesto a trabajar un equipo nuevo se tendrá un considerable número de fallas, llamadas fallas inmediatas que durarán un tiempo de establecimiento. Pasado el período de establecimiento inicia el período de vida útil del equipo, en el que se tendrán mínimas fallas y por lo tanto el mantenimiento será óptimo. Posteriormente de haber terminado el tiempo de vida útil nuevamente se incrementaran las fallas y se requerirá de un demasiado mantenimiento que se incrementará mientras pasa el tiempo, este período es conocido como período de envejecimiento y el equipo necesita ser sustituido por uno nuevo o en mejor estado.

Figura 88. Curva de vida útil de un equipo



Fuente: Mantenimiento de subestaciones de distribución, comisión federal de electricidad México, gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/LASE/CAP.01.pdf.

Los objetivos principales de un mantenimiento son:

- Establecer los requisitos de mantenimiento del equipo

Para este caso deben considerarse tres criterios principales.

- Criterio de crítico contra no crítico: el equipo que provoque serias consecuencias en la operación del sistema, seguridad, producción, costos, etcétera. Es considerado crítico, de lo contrario será considerado no crítico. Un programa de mantenimiento preventivo se realizará sobre el equipo crítico y un programa de mantenimiento predictivo se realizará sobre el equipo no crítico.
  - Criterio de límites permisibles: comprende en establecer valores, generalmente resultados de pruebas, que deben indicar cuando el equipo se acerca a una condición límite y que su condición es peligrosa. Si fuese así el caso, es necesaria una reposición del mismo.
  - Criterio de datos del fabricante: en ocasiones permite obtener información sobre límites de vida esperada, o sugiere intervalos de tiempo para mantenimiento en función del servicio del equipo. Estos tres criterios deben considerarse para definir y establecer los requisitos de mantenimiento para cada uno de los equipos.
- Recolección, análisis y archivo de resultados

Esto requiere contar con un archivo adecuado de historiales del equipo correctamente clasificado, revisiones y técnicas de pruebas bien definidas con el fin de normalizar el criterio para el análisis de resultados obtenidos y conformados.

- Determinación de programas de mantenimiento

Con el conocimiento de las condiciones del equipo y el establecimiento de los requisitos de mantenimiento, se formarán los programas de mantenimiento sobre la base del mantenimiento predictivo. Es decir, el equipo que es considerado crítico, queda programado bajo el criterio del mantenimiento preventivo y es función de la condición en que se encuentra.

El equipo que se considera no crítico, queda programado dentro del criterio de mantenimiento predictivo, que es función de la condición en que se encuentra y del conocimiento técnico para establecer un período determinado para su próxima revisión.

- Características del personal de mantenimiento

Para realizar trabajos de mantenimiento de algún equipo, se requiere de personal capacitado y consiente de realizar correcta y eficientemente las tareas tanto como el reporte de lo realizado.

## **8.2 Tipos de mantenimientos**

Es importante darle el mantenimiento adecuado a los interruptores, y no esperar hasta hacer una reparación, a continuación se mencionan los tipos de mantenimiento.

### **8.2.1 Mantenimiento preventivo**

Este tipo de mantenimiento tiene como objetivo prevenir las interrupciones y fallas al mismo tiempo que prolongar los tiempos de operación por medio de inspecciones programadas y revisiones periódicas del equipo. En general, logra su objetivo pero actualmente se considera que los costos de este tipo de mantenimiento son relativamente elevados.

### **8.2.2 Mantenimiento correctivo**

Este es el tipo de mantenimiento más antiguo y conocido, puesto que permite operar el equipo hasta que la falla ocurra antes de su reparación o sustitución. En este tipo de mantenimiento, todo el trabajo es hecho sobre una base de emergencia, la cual resulta en un ineficiente empleo de la mano de obra y en excesivas interrupciones.

### **8.2.3 Mantenimiento predictivo**

En este caso, la finalidad es combinar las ventajas de los dos tipos de mantenimiento antes descritos, para lograr el máximo tiempo de operación del equipo y eliminar el trabajo innecesario. Esto exige técnicas de revisión y pruebas más avanzadas para determinar con mejor certeza la condición del equipo y un control más riguroso para lograr la planeación correcta y efectuar las revisiones verdaderamente necesarias.

Nota: cuando se realice un trabajo de mantenimiento en el cambiador de derivaciones bajo carga, es importante tener un registro de los trabajos realizados para en el futuro poder consultarlos si fuera necesario, para este propósito puede utilizarse un documento como el que se ve en la tabla 89.

### **8.3 Causas que producen envejecimiento del aislamiento**

El sistema de aislamiento de un equipo eléctrico especialmente los que contienen aceites dieléctricos tienen potenciales enemigos: la humedad, el oxígeno, el calor, la contaminación externa y el desgaste de los contactos de conmutación.

#### **8.3.1 Humedad**

La humedad especialmente en presencia de oxígeno, es extremadamente peligroso para el aislamiento de un transformador. Cada vez que la humedad aumenta al doble en el equipo, la vida útil del aislamiento se reduce en la mitad.

La humedad ingresa en el OLTC en su construcción, si el OLTC es abierto para una inspección o mantenimiento la humedad puede ser absorbida de la atmósfera. La humedad también puede ingresar al recipiente del OLTC por fuga en la cabeza el cambiador o por las diferentes tuberías de conexión. La presencia de empaques deteriorados también puede ser una fuente de ingreso de humedad. La degradación del aislamiento también es producto del envejecimiento del mismo y del desgaste de los contactos.

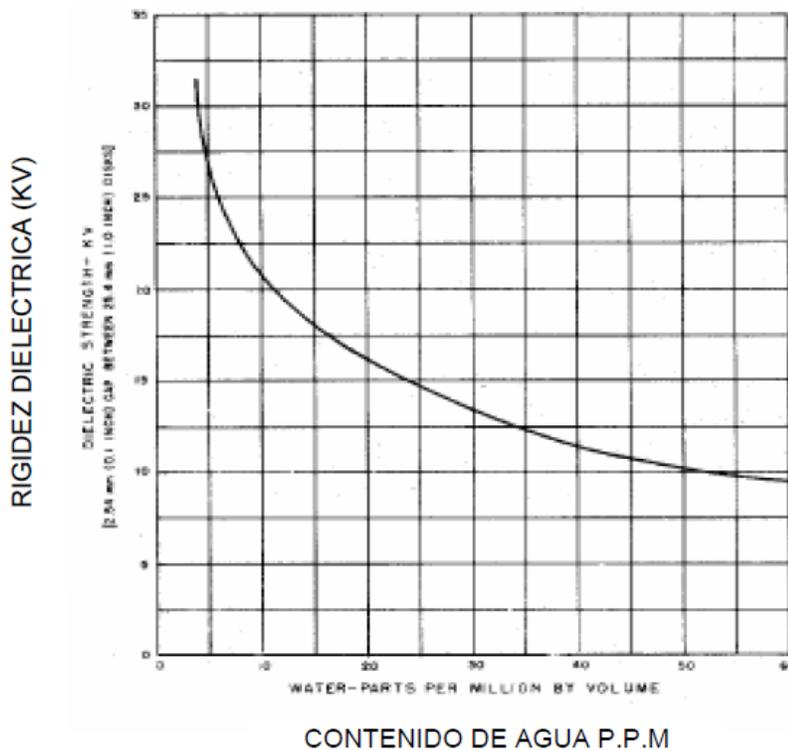
El agua puede estar presente en las siguientes formas:

- De forma disuelta.
- En forma de una emulsión agua/aceite.
- En estado libre al fondo del tanque.

Una pequeña cantidad de agua en forma de emulsión agua/aceite tiene una marcada influencia en la rigidez dieléctrica del aceite. En cambio, hasta cierto punto, el agua disuelta en el aceite tiene poco o ningún efecto sobre la rigidez dieléctrica del mismo.

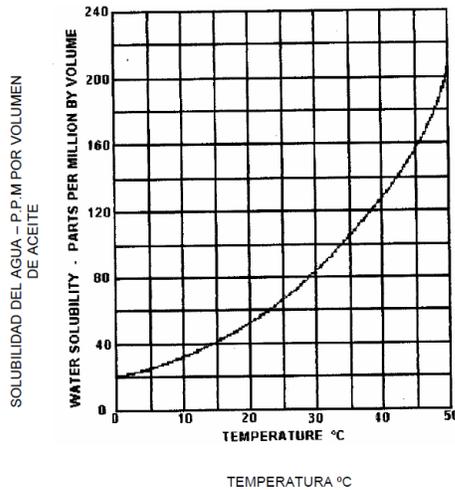
La cantidad de humedad que puede estar disuelta en el aceite se incrementa rápidamente con la temperatura, es decir, a medida que la temperatura del aceite se eleve la cantidad de humedad que puede ser disuelta en él también se incrementa.

Figura 89. **Relación ente la humedad en el aceite y la rigidez dieléctrica**



Fuente: Mantenimiento de subestaciones de distribución, comisión federal de electricidad México, gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/LASE/CAP. 01.pdf. Consulta: 02/03/12.

Figura 90. **Relación entre temperatura del aceite y la solubilidad**



Fuente: Mantenimiento de subestaciones de distribución, comisión federal de electricidad México, [gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/LASE/CAP.01.pdf](http://gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/LASE/CAP.01.pdf).

La cantidad de humedad en un equipo se mide en partes por millón (PPM), la mayoría de veces la cantidad de agua que posee un transformador es proporcionado por los laboratorios que realizan análisis de gases disueltos.

La cantidad máxima permitida de agua en los OLTC depende de la posición en la que esté ubicado el cambiador y del tipo de conexión del transformador como se verá más adelante.

### 8.3.2 El oxígeno

Es otro de los potenciales enemigos del aislamiento y del OLTC, ya que reacciona con el aceite para formar ácidos orgánicos, agua y lodo que podrían dañar la lubricación de las piezas. El oxígeno proviene de la atmósfera, por otro

lado también puede provenir del proceso de fabricación ya que no es posible liberar todo el oxígeno existente incluso si el llenado se ha realizado en vacío.

De acuerdo con las Normas ASTM, la oxidación del aceite comienza cuando el oxígeno presente en el transformador se combina con las impurezas de hidrocarburos inestables existentes en el aceite, bajo el efecto catalítico de los otros materiales presentes en el OLTC.

Hidrocarburos inestables + oxígeno + catalizadores + aceleradores = oxidación

Catalizadores = humedad y cobre

Aceleradores = calor, vibración, sobre-voltajes y elevados esfuerzos eléctricos debido a fallas eléctricas internas.

Es necesario destacar que la oxidación del aceite se debe a la oxidación de las impurezas contenidas en él, más no de los hidrocarburos puros. La presencia de lodos en el aceite es indicación de que el óxido lleva mucho tiempo existiendo.

El lodo proviene del tanque de ácidos al hierro, cobre barniz y especialmente del desgaste de los contactos y la carbonización del aceite al extinguir el arco durante el proceso de conmutación.

### **8.3.3 El calor**

A elevadas temperaturas, es mayor la humedad que puede absorber el aceite. Las altas temperaturas también causan una aceleración del envejecimiento del aislamiento.

#### **8.3.4 Contaminación externa**

Los contaminantes externos pueden presentarse en forma de caspa, proveniente del proceso de manufactura del equipo y que no han sido previamente eliminados en el proceso de llenado del transformador con aceite.

#### **8.4 Fallas que originan gases combustibles en un OLTC**

La velocidad de formación de los gases puede ser muy variada, y según sea la naturaleza de falla puede ser rápida, lenta, moderada o normal son productos de la pirolisis (descomposición térmica) de los aislantes.

##### **8.4.1 Operación en paralelo**

En el caso de funcionamiento en paralelo, se debe tener cuidado por el fabricante y el usuario del transformador para asegurar que las corrientes que circulan entre los transformadores están limitados a valores aceptables, ya que si existiera una alta corriente producirá calentamiento lo que puede llevar a una falla grave.

##### **8.4.2 Erosión de los contactos y contaminación del líquido**

Los cambiadores de derivaciones tienen partes en movimiento en su construcción, por lo cual en la guía proporcionada por el fabricante se indican períodos de mantenimiento según el número de operaciones y el tiempo de servicio.

Generalmente la vida esperada para los contactos para el conmutador o interruptor selector (*diverter* or *selector switch*) de un OLTC, en particular se asume que lleva la corriente máxima nominal. Si la corriente de carga del transformador es menor a este, entonces la vida del contacto será mayor. Para un cambiador de derivaciones tipo reactor, la vida de los contactos puede ser afectado por la tensión de recuperación ya que la extinción del arco puede no ocurrir con corriente cero.

Es necesario conocer el número de operaciones del conmutador o interruptor selector (*diverter* or *selector switch*) antes de un cambio del líquido ya que es condicional de que el líquido pueda estar en buenas condiciones originalmente y mantenido en un estado seco.

La instalación de un filtro de líquido fijo (o combinación de filtro y secador) se puede considerar para proporcionar un servicio de filtrado (o filtrado y secado) del líquido del conmutador, para extender el período al que el líquido debe ser cambiado. Esto también puede reducir el desgaste mecánico mediante la eliminación de partículas a tiempo. El filtrado únicamente se considera necesario para los OLTC que realizan un número muy elevado de operaciones, cuando los OLTC operan a tensiones de alta tensión o en condiciones de temperatura extrema y/o se considera necesario un elemento combinado de secado y filtrado cuando hay humedad.

### **8.4.3 Sobrecalentamiento de los contactos del selector cuando se opera en una posición de derivación fija**

El sobrecalentamiento de los contactos del selector puede ocurrir por los siguientes motivos:

- Baja presión de los resortes de contactos del selector.
- Operación en la misma posición durante largos períodos de tiempo (meses).
- Alta temperatura del aceite.

Si la presiones de los contactos disminuye y la resistencia del contacto es mayor de lo normal es posible que comience a producirse calentamiento en la superficie de los contactos, generando crecimiento de carbono lo que empeorará la situación y esto a la larga puede generar liberación de gases y finalmente puede conducir a una situación catastrófica que puede dañar el transformador. En casos extremos el crecimiento de carbono (también llamado carbono pirolítico) entre y alrededor de los contactos puede enlazar los contactos juntándolos e impidiendo el movimiento de las piezas móviles, lo que puede causar daños mecánicos si se realizan intentos de operación del cambiador de derivaciones.

Cuando los cambiadores de derivaciones permanecen por largos períodos (meses) en una posición fija, la acción normal de limpieza que limpia la superficie de los contactos durante la operación de los contactos del selector de derivaciones, no se produce. Dependiendo del diseño, esto puede ser un problema potencial para los OCTC y para el preselector en el cambiador de

derivaciones bajo carga. Cabe señalar que incluso cuando el cambiador de derivaciones bajo carga es operado con frecuencia, el preselector puede permanecer en la misma posición durante largos períodos y esto puede provocar problemas similares.

Las altas temperaturas ambientales del aceite combinado con una subida normal de temperatura de contacto puede conducir a formaciones de carbono pirolítico en condiciones extremas.

Análisis de gases disueltos en períodos regulares, pueden conducir a la detección temprana de los problemas anteriormente mencionados. El hidrógeno puede ser un indicador temprano, aunque una interpretación positiva es difícil, con la generación de metano, etano y etileno que ocurren a medida que el problema se agrava, por lo que se recomienda que estas pruebas sean realizadas en laboratorios certificados.

Si los resultados del análisis de gases disueltos en el aceite indican sobrecalentamiento, se debe asumir que el aumento de carbón pirolítico y unión de contactos posiblemente ya ha ocurrido. Tales casos producen niveles elevados (decenas o cientos de partes por millón) de metano y en particular de etileno con característica T3 según la norma IEC 60599. Cuando la evidencia sugiere que el crecimiento de carbón pirolítico y unión de contactos puede haber ocurrido, el selector debe ser abierto para su inspección antes de ser operado, de lo contrario pueden ocurrir daños mecánicos.

Cuando se sabe que un selector (especialmente el preselector y selector de un OCTC) se ha mantenido en una posición durante un período de tiempo prolongado, se recomienda una operación del selector a través de toda la gama

de derivaciones durante el mantenimiento rutinario del transformador, así como limpiar las superficies de los contactos.

#### **8.4.4 Descargas durante la operación del preselector**

Las descargas que se producen entre los contactos de apertura y cierre de un preselector generan gases, en particular acetileno y el hidrógeno que si bien no es particularmente significativo puede enmascarar otros efectos cuando se utiliza análisis de gases disueltos en el aceite (DGA) para vigilar el aceite de los problemas continuos. En casos extremos los gases pueden contribuir a la ruptura dieléctrica, pero esto es muy raro. Los cambiadores de derivaciones que realizan un elevado número de operaciones a través de pre-posiciones pueden generar cantidades considerables de acetileno e hidrógeno en el aceite. Las medidas de control tales como la inclusión de empaque en las resistencias pueden reducir la generación de gases, pero no eliminarlos por completo.

### **8.5 Mantenimiento del OLTC**

Según el grado de contaminación detectado, el técnico deberá decidir el procedimiento a emplear, a los efectos de recuperar las aptitudes del cambiador de derivación de bajo voltaje.

#### **8.5.1 Mantenimiento predictivo**

El mantenimiento predictivo consiste en revisiones y pruebas para identificar el estado del equipo y realizar los trabajos verdaderamente necesarios.

### **8.5.1.2 Diagnóstico del OLTC mediante análisis de gases disueltos en el aceite (DGA)**

La técnica de diagnóstico de equipos por medio de análisis de gases disueltos en el aceite, aunque es muy raramente utilizado en los cambiadores de derivaciones bajo carga, por ser un equipo que incluso en condiciones de operación normal presenta una considerable contaminación del aceite, puede ayudar a identificar el estado del equipo si se realiza una buena interpretación de los resultados.

La rutina de análisis de gases disueltos en el aceite de los compartimientos del selector de derivaciones o tanques incluido, el cambiador de derivaciones sin carga proporciona una poderosa herramienta de monitoreo para identificar los problemas en curso desarrollándose lentamente. Se sugiere que una frecuencia anual es un compromiso razonable entre el costo y la capacidad de encontrar defectos de desarrollo lento antes de que provoquen un fallo.

El análisis de gases disueltos puede ser de ayuda en las siguientes situaciones:

- En el desarrollo de sobrecalentamientos de los contactos o conexiones, incluidas las situaciones de crecimiento de carbono, que se caracterizan por niveles crecientes en particular de metano y etileno.
- Descarga capacitiva, tales como partes sueltas por fatiga, artículos en diferente potencial u operación del preselector, caracterizado por niveles crecientes de acetileno e hidrógeno, pero con poco o ningún gas generado por sobrecalentamiento.

- Arco de potencia, por circuitos abiertos o ruptura de corriente en los selectores, que se caracterizan por altos niveles de acetileno y etileno con aumentos significativos en los demás gases en estudio.

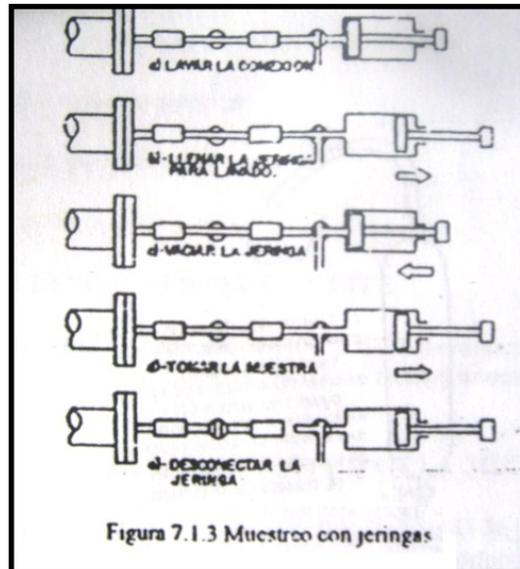
Análisis de gases disueltos en el aceite del conmutador o interruptor selector (*diverter* or *selector switch*) puede ser de algún beneficio para determinar posibles sobrecalentamientos en los contactos. Un asesoramiento en la interpretación de resultados puede ser conseguido en IEC 60599.

Muestreo: la muestra se toma en un recipiente totalmente hermético a la atmósfera, tanto en la toma de muestra como en el transporte del mismo al laboratorio. Los recipientes de muestreo pueden ser una jeringa de vidrio o un cilindro de acero inoxidable.

Al tomar la muestra es necesario tomar ciertas consideraciones. Las conexiones entre el equipo a muestrear y el recipiente de muestreo deben ser herméticas para evitar la contaminación con la atmósfera. Si se contaminan las muestras con agua o aire, puede llegarse a conclusiones erróneas. Es importante tomar muestras cuando el equipo esté operando en condiciones normales para evaluar la velocidad de producción de los gases. El oxígeno presente disuelto en la muestra puede consumirse por oxidación, por lo que se deben cubrir de la luz los recipientes de muestreo transparentes utilizando papel aluminio.

El método de muestreo con jeringa es adecuado, independientemente de la forma de transporte de las muestras, puesto que las expansiones y contracciones provocadas por los cambios de temperatura del aceite serán absorbidas por los movimientos del embolo de la jeringa.

Figura 91. **Muestreo de aceite con jeringa de vidrio**



Fuente: Operación y Mantenimiento de Transformadores de Potencia, centro de capacitación Celaya.

La jeringa debe ser de vidrio aproximadamente de 100 mililitros, con una válvula de tres vías adaptada en el pivote. El émbolo debe sellar perfectamente con el barril de la jeringa para evitar contaminación del aceite al muestrear.

Primeramente, después de conectar la manguera flexible a la válvula de muestreo del OLTC, se desecha una cantidad de aceite para eliminar posibles contaminantes en la manguera y la válvula y luego se conecta el otro extremo de la manguera a la válvula de tres vías. Una vez hecho esto último se realizarán los siguientes pasos:

- Lavar las conexiones
- Llenar e impregnar la jeringa con aceite

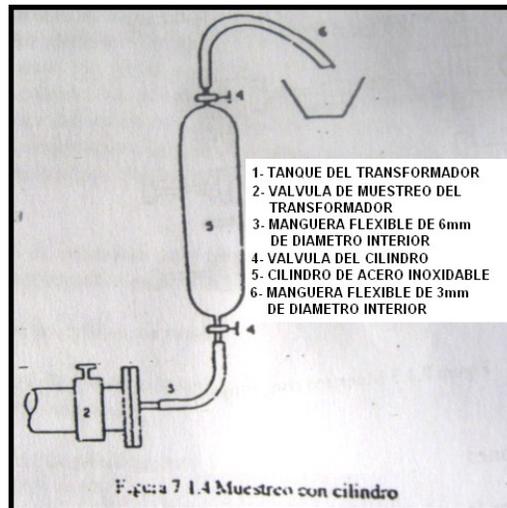
- Vaciar la jeringa
- Tomar la muestra
- Desconectar la jeringa

Nota: el segundo y tercer paso, deben efectuarse dos o más veces hasta que no existan burbujas dentro de la jeringa para realizar el paso 4to paso).

Finalmente la jeringa se protege con papel aluminio y se coloca en un recipiente adecuado para su protección durante el transporte al laboratorio.

El método de muestreo con cilindro de acero inoxidable tiene la propiedad que el recipiente puede ser utilizado repetidamente con un alto grado de confiabilidad durante un largo período de tiempo. Si la temperatura del aceite en el cilindro al momento del muestreo es menor que en el momento del análisis, la diferencia de temperaturas no debe exceder de 18 grados centígrados, es muy importante anotar la temperatura al momento de tomar las muestras ya que para el reporte en general se corrige a una temperatura de 20 grados centígrados más o menos 5 grados centígrados.

Figura 92. **Muestreo con cilindro de acero inoxidable**



Fuente: operación y mantenimiento de transformadores de potencia, Centro de Capacitación Celaya.

Para hacer el muestreo se realizan los siguientes pasos.

- El tramo de manguera de 6 milímetros de diámetro interior, se conecta a la válvula de muestreo y se desecha una cantidad de aceite para eliminar posibles contaminantes en la tubería o en las válvulas.
- Se conecta el cilindro como en la figura 92, con la manguera más delgada conectada el extremo superior.
- Con el cilindro en posición vertical se abre la válvula del OLTC y en seguida las válvulas inferior y superior del cilindro, es necesario que se cumpla con ese orden.

- Con las tres válvulas abiertas, se deja fluir aproximadamente 1 litro de aceite para eliminar contaminantes.
- Se cierra la válvula superior o de salida del cilindro y en seguida la válvula inferior. Finalmente se cierra la válvula del OLTC y se desconecta el cilindro.
- Se agita el cilindro para comprobar que no existen burbujas de gas en su interior.
- El cilindro se guarda en un recipiente adecuado para su traslado al laboratorio.

### **8.5.1.3 Pruebas al aceite**

Como se sabe, en la operación del cambiador de derivaciones bajo carga con conmutación al aceite, ocurren arcos eléctricos al momento de conmutar, por lo cual el aceite tiende a degradarse progresivamente, con lo que no todas las pruebas conocidas pueden aplicarse para diagnosticar el estado del aceite de estos equipos, las pruebas que pueden proporcionar alguna información son las siguientes:

Densidad: la densidad varía con la temperatura de manera que se debe corregir cuando se mida a una temperatura que no sea la de referencia. Con los resultados puede saberse el tipo de aceite ya que el naftenico tiene valores de alrededor de 0,88 y el tipo parafínico entre 0,84 y 0,86.

Viscosidad: al efectuar esta prueba se mide la fluidez del aceite, generalmente se mide con un aparato llamado viscosímetro *Saybolt*. Esta medición es muy importante ya que la viscosidad es una característica necesaria para conducir el calor generado en el equipo, además, un cambio en la viscosidad puede afectar el movimiento de las partes móviles del OLTC y causar que se fuerce el mecanismo de accionamiento o que se quiebren piezas internas. Es importante que la viscosidad del aceite no varíe de acuerdo a lo especificado por el fabricante.

Aspecto visual: esta es una prueba sencilla, pero es de gran utilidad ya que fácilmente se puede determinar el estado de un aceite. Cuando el aceite está muy oscuro (negro), es decir que ha perdido su transparencia, significa que está deteriorado y que este debe sustituirse por un aceite nuevo.

Contenido de agua: el método comúnmente más usado para la detección de agua o humedad es el de Karl-Fischer, usando un reactivo compuesto de bióxido de Azufre, piridina, metanol y Yodo. Esta prueba es muy importante realizarla, ya que la humedad es el peor enemigo del aceite dieléctrico y puede disminuir la rigidez dieléctrica del mismo, pudiendo causar una falla eléctrica en el OLTC.

Un aceite mineral con contenido bajo de humedad es necesario para alcanzar la rigidez dieléctrica adecuada, maximizar la vida del sistema de aislamiento y minimizar la corrosión de los metales.

Para interpretar los resultados de la prueba de contenido de humedad, deben compararse los resultados de las pruebas con datos proporcionados por el fabricante, los valores deben estar estrictamente en el rango que describe el

fabricante. Los valores tolerables de humedad dependen de la conexión del transformador y de la ubicación del OLTC en el devanado.

Según MR, para los cambiadores de derivación trifásicos ubicados en el principio o en el centro del devanado de una conexión en estrella, el grado de contaminación de humedad debe ser menor de 40 PPM. Si el cambiador se ubica en el punto neutro de una conexión en estrella, la máxima cantidad de humedad soportada puede ser 40 partes por millón.

Para los OLCT trifásicos ubicados en una conexión en delta como también para cambiadores monofásicos, la cantidad de contaminación de humedad debe ser menor de 30 partes por millón.

Tanto para una guía como para un registro de los resultados de las pruebas de contenido de humedad, puede utilizarse una hoja como el que se ve en la tabla X, del apéndice.

Rigidez dieléctrica: la rigidez dieléctrica de un aceite es una medida de la habilidad que tiene el aceite a resistir esfuerzos eléctricos sin que se produzca el rompimiento dieléctrico.

Para realizar esta prueba se utiliza un equipo llamado medidor de Rigidez Dieléctrica, en el cual se aplica un voltaje AC con una tasa de crecimiento controlada a dos electrodos que pueden tener dos formas diferentes según la norma que se aplique y que deben estar inmersos en el líquido aislante a ser probado. El entrehierro o separación entre los electrodos es calibrada a una distancia específica (de acuerdo a la norma a aplicarse). Cuando aparece un arco entre los electrodos, el voltaje registrado en ese instante es la Rigidez Dieléctrica de la muestra sometida a prueba.

Figura 93. **Prueba de rigidez dieléctrica del aceite aislante**



Fuente: Pruebas de rigidez dieléctrica para aceite de transformadores de potencia de Subestación Guatemala-Norte.

Los métodos más conocidos para medición de rigidez dieléctrica de los aceites aislantes de origen mineral son:

- Norma ASTM D-877  
Este método utiliza una cuba con electrodos con caras planas, separados una distancia de 0,1 pulgada, con una tasa de crecimiento de tensión de 3 kilo voltios por segundo. La norma ASTM D-877 es recomendada para probar aceites en servicio o aceites nuevos sin tratamiento previo a la energización del equipo.
- Norma ASTM D-1816  
En este método se utiliza una cuba con electrodos de caras semiesféricas. La separación de dichos electrodos puede ser de 0,04 pulgada o 0,08 y la tasa de crecimiento de tensión en un valor de 0,5 kilo

voltios por segundo. La norma ASTM D-1816 es recomendada para probar aceites contenidos en equipos nuevos o para aceite que está siendo procesado previo a la energización del equipo. La aceptación de este método en la evaluación de aceites en servicio está siendo estudiada actualmente.

- Norma VDE-370

En este método se utiliza una cuba con electrodos de caras semiesféricas espaciados entre sí 0,1 pulgada y con una tasa de crecimiento de 2 kilo voltios por segundo.

Durante años se ha considerado a la prueba de rigidez dieléctrica como la más importante a la hora de emitir un diagnóstico del estado del aceite de un equipo como transformadores, interruptores y cambiadores de derivaciones bajo carga. Sin embargo, cabe señalar que se han encontrado casos de transformadores en los que la rigidez dieléctrica de su aceite estaba por encima de los 30 kilo voltios (buena rigidez dieléctrica), pero dichos aceites presentan un considerable contenido de humedad y un elevado grado de acidez, mientras que el interior del transformador la presencia de lodo era apreciable. Por lo anteriormente expuesto, pruebas de contenido de humedad o factor de potencia del aceite son necesarias para complementar la prueba de rigidez dieléctrica a la hora de emitir un diagnóstico más confiable del estado de aceite del OLTC.

Por otro lado, la prueba de rigidez dieléctrica no dice nada respecto al estado del aislamiento sólido, el grado de acidez del aceite, la presencia de lodos en el OLTC y la presencia de agua disuelta en el aceite, sino a partir del 80 por ciento de saturación.

Procedimiento: para realizar la prueba de rigidez dieléctrica se realiza una serie de pasos que se describen a continuación:

Paso 1: primeramente se llena el recipiente que contiene a los electrodos con aceite extraído de la tubería de muestreo y se cierra para posteriormente agitarlo bien, con la intención de limpiar el recipiente de cualquier contaminante y luego se desecha este aceite. Este proceso se lleva por lo menos unas dos veces.

Paso 2: se llena el recipiente que contiene los electrodos, con el aceite del OLTC, se tapa y se coloca en el equipo de medición y se procede a realizar la prueba. Para mayor confiabilidad de la prueba, se realizará siete veces la prueba a la misma muestra de aceite, se desecha la primera prueba y el resultado final de la prueba será el promedio de las últimas seis pruebas.

Paso 3: para referencia de las pruebas de rigidez dieléctrica puede utilizarse una hoja de registro como la tabla XI, del apéndice.

Las pruebas más importantes para diagnosticar el estado del aceite de un transformador son; la prueba de rigidez dieléctrica y prueba de contenido de humedad, los valores mínimos aceptados para la operación del cambiador de derivaciones son especificados en la guía técnica del OLTC que generalmente esta entre 30 y 40 kilo voltios/2,5 milímetros, (evaluado según la norma IEC 60156, los valores permisibles de rigidez dieléctrica y contenido de humedad dependen del lugar de ubicación del OLTC en el devanado y del tipo de conexión del devanado del transformador, ver tabla IX).

Tabla IV. **Rigidez dieléctrica y contenido de agua para un cambiador de derivaciones bajo carga marca MR tipo V**

Cambiador	Contenido de agua*)	Rigidez dieléctrica**)
V III 200 Y, V III 350 Y, V III 500 Y	< 40 ppm	> 30 kV/2,5 mm
V III 200 D, V III 350 D, V III 500 D	< 30 ppm	> 40 kV/2,5 mm
V I 200, V I 350, V I 700	< 30 ppm	> 40 kV/2,5 mm

\*) medido según el método de Karl-Fischer de acuerdo a la publicación IEC 814  
 \*\*) medida según la norma DIN VDE 0370 Teil 1

Fuente: guía mantenimiento de un cambiador de derivaciones bajo carga tipo V, marca MR.

Tabla V. **Condiciones de mantenimiento para un cambiador de derivaciones bajo carga marca MR tipo V**

Cambiador	Intensidad nominal del transformador de MR	Número de conmutaciones	
		sin equipo de filtrado de MR	con equipo de filtrado
V III 200 Y, V III 200 D, V I 200 V III 250 Y, V III 250 D	hasta 100 A	100 000	150 000
	hasta 250 A	70 000	140 000
V III 350 Y, V III 350 D, V I 350 V III 400 Y, V III 400 D	hasta 200 A	100 000	150 000
	hasta 400 A	70 000	140 000
V III 500 Y, V III 500 D	hasta 350 A	100 000	150 000
	hasta 500 A	70 000	140 000
V I 700	hasta 350 A	100 000	150 000
	hasta 700 A	70 000	140 000

**Tabla II Intervalos de inspección**

Si no se alcanza el número de conmutaciones indicado en la **tabla II**, se debe efectuar una inspección después de los siguientes años de servicio:

**Cambiador tipo: V III 200 Y, V III 350 Y, V III 500 Y**  
 Primera inspección: 6 - 7 años  
 Inspecciones subsiguientes: 6 - 7 años sin o con equipo de filtrado de aceite de MR

**Cambiador tipo: V III 200 D, V III 250 D, V III 350 D, V III 400 D, V III 500 D, V I 200, V I 350, V I 700**  
 Disposición del cambiador a la entrada del arrollamiento trifásico o aplicación en autotransformadores  
 Primera inspección: 2 años  
 Inspecciones subsiguientes: 4 años sin equipo de filtrado de aceite de MR / 6 - 7 años con equipo de filtrado de aceite de MR

Disposición del cambiador en la mitad del arrollamiento trifásico  
 Primera inspección: 2 años  
 Inspecciones subsiguientes: 6 - 7 años sin o con equipo de filtrado de aceite de MR

Fuente: guía mantenimiento de un cambiador de derivaciones bajo carga tipo V, marca MR.

Interpretación de resultados: para los cambiadores trifásicos ubicados en el principio o en el centro del devanado de una conexión en estrella, la rigidez dieléctrica debe ser mayor de 30 kilo voltios por 2,5 milímetros. Si el cambiador se ubica en el punto neutro de una conexión en estrella, una rigidez dieléctrica de 30 kilovoltios por 2,5 milímetros es permitida. Para los OLCT trifásicos ubicados en una conexión en delta como también para cambiadores monofásicos, la rigidez dieléctrica debe ser mayor de 40 kilo voltios/2,5 milímetros.

#### **8.5.1.4 Termografía infrarroja**

La termografía se basa en que todos los cuerpos radian energía, cuya longitud de onda está ubicada en el espectro infrarrojo y el equipo de termovisión es capaz de transformar las radiaciones emitidas por los cuerpos, en imágenes. Además es posible cuantificar su contenido con precisión hasta decimas de grados en la escala de temperatura.

En el equipo de termografía, se ajustan las radiaciones que se reflejan en otros objetos que están alrededor del objeto bajo estudio, también la radiación que pudiera ser absorbida por la atmósfera o medio ambiente; considerando que entre más cerca del visor infrarrojo este el objeto, la radiación emitida será aproximadamente igual al valor real.

El equipo de termografía está integrado por una cámara o *scanner*, el cual puede conectarse a una computadora para analizar los resultados de una termografía y realizar el reporte respectivo.

En general, el objetivo del equipo de termografía es inspeccionar y hallar puntos que estén sobrecalentados por algún motivo y que puedan ser corregidos a tiempo, antes de que causen una falla severa en el equipo.

Esta técnica permite detectar, sin contacto físico con el elemento bajo análisis, cualquier falla que se manifieste en un cambio de temperatura sobre la base de medir los niveles de radiación del campo infrarrojo. En general, una falla electromecánica antes de producirse se manifiesta generando e intercambiando calor. Este calor se traduce habitualmente en una elevación de temperatura que puede ser súbita, pero por lo general la temperatura comienza a manifestarse pequeñas variaciones progresivamente.

Si es posible detectar, comparar y determinar dicha variación, entonces se podría detectar fallas que comienzan a generarse y que pueden producir en el futuro cercano o a mediano plazo una desconexión del equipo o siniestro afectando a personas e instalaciones. El uso de la tecnología de termografía infrarroja permite la reducción de los tiempos de parada al minimizar la probabilidad de salidas de servicio imprevistas y no programadas, gracias a su aporte en cuanto a la planificación de las reparaciones y el mantenimiento.

La termografía infrarroja en sistemas eléctricos tiene como objetivo detectar componentes defectuosos, basándose en la elevación de la temperatura como consecuencia de un aumento anormal de su resistencia óhmica. Las causas que pueden originar estos defectos entre otros son:

- Conexiones flojas
- Conexiones afectadas por corrosión

- Suciedad en contactos
- Degradación de los materiales aislantes.

Cuando por termografía infrarroja se encuentre un sobrecalentamiento en el cambiador de derivaciones, debe planificarse un mantenimiento para extraer el conmutador y realizar una revisión minuciosa para hallar el defecto y reparar la falla.

Figura 94. **Cámara termográfica**



Fuente: Guía para Mantenimiento de Transformadores de Potencia, Escuela Politécnica del Litoral.

### **8.5.2 Mantenimiento preventivo**

Las normas IEC 60214-2 2004, en su capítulo 9, recomiendan inspecciones rutinarias de por lo menos una vez al año, esta inspección debe consistir en:

- Pruebas realizadas al aceite dieléctrico, como las descritas anteriormente.
- Revisión y pruebas de los elementos de transmisión, tanto a las barras de transmisión como en las cajas con engranajes para verificar que todo se encuentre funcionando en buen estado, especialmente los pines o seguros que unen todos los elementos de dicha transmisión.
- Pruebas de operación mecánica cubriendo todo el rango de derivaciones. La norma IEC 60214-1 establece que una buena prueba es medir la corriente que consume el motor durante el período de cambio de derivación ya que si este es diferente a lo normal, significa que existe un problema en el accionamiento, en la transmisión o en el mecanismo de cambio de derivación.
- Revisión minuciosa de todos los elementos de accionamiento a motor (AM) apretando todos los tornillos presentes y realizando una limpieza en el mismo.
- Pruebas eléctricas al transformador para verificar el estado general del devanado del transformador, incluyendo el OLTC.
- Estas pruebas pueden ser: prueba de resistencia del devanado, prueba de relación de transformación y prueba de corriente de excitación. Cabe mencionar que es recomendable realizar las pruebas eléctricas sobre todo el rango de derivaciones. Si se realizarán estas pruebas eléctricas, implícitamente también quedarán realizadas las pruebas mecánicas.

### **8.5.2.2 Pruebas de relación de transformación (*Transformer Turns Ratio TTR*)**

El objeto de esta prueba es verificar la relación del número de vueltas entre los devanados primario y secundario de un transformador, comparando los resultados con los datos de placa o con resultados obtenidos en pruebas anteriores (los valores obtenidos en la prueba de relación de transformación, para considerarse satisfactorio deberán estar dentro del 0,5 por ciento de los valores de placa).

El análisis de los resultados obtenidos en esta prueba, pueden servir para detectar defectos en el transformador como vueltas cortocircuitadas en sus devanados, errores en el número de espiras por fallo en el mecanismo de cambio de derivación, espiras abiertas, fallo de contacto en las derivaciones, entre otros.

Para la realización de esta prueba se utiliza un equipo llamado Medidor de Relación de Transformación, comúnmente llamado TTR por sus siglas en inglés (*Transformer Turns Ratio*).

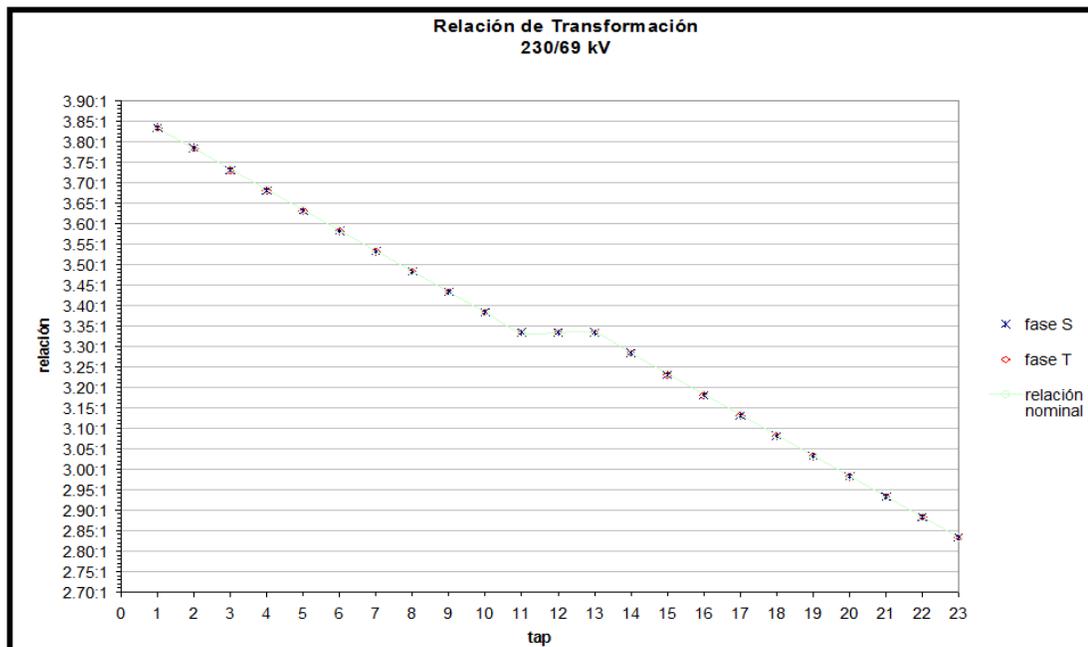
Procedimiento:

Paso 1: desconectar los cables de entrada de los bushing, de manera que se puedan conectar los cables del equipo de prueba al devanado primario.

Paso 2: se aplica un voltaje de prueba en el primario (generalmente 10kV) y se mide el voltaje del devanado secundario para cada una de las diferentes derivaciones.

Paso 3: realizar un reporte de la prueba, llenando un formulario como el de la tabla XII, del apéndice.

Figura 95. **Gráfica de pruebas de relación de transformación sobre todos los tap**



Fuente: reporte de mantenimiento de OLTC en transformador fase S del banco de Transformación I en Subestación Los Brillantes, Retalhuleu.

Análisis de resultados: IEEE Std 62-1995 indica que la tolerancia entre los resultados de la prueba de TTR y los datos de relaciones de transformación de la placa de características no deben de exceder del 0,5 por ciento. En caso de no existir la placa de características, la comparación se hará con datos de pruebas anteriores.

En la figura anterior, se muestra una gráfica de las pruebas de relación de transformación realizado al transformador fase S del banco de transformación I, de La subestación Los Brillantes luego de haberle realizado mantenimiento mayor al cambiador de derivaciones bajo carga de dicho transformador. Los resultados son comparados con pruebas realizadas al transformador fase T de dicho banco de transformación.

La gráfica de los resultados de la prueba de relación de transformación sobre toda la gama de derivaciones generalmente presenta una curva típica prácticamente lineal con pendiente negativa excepto en las posiciones intermedias si estas existen como en la gráfica anterior.

- Prueba de resistencia de devanados (resistividad óhmica)

También es llamada prueba de resistividad óhmica, esta prueba indica un cambio en la resistencia de los devanados en el caso de que existiesen vueltas cortocircuitadas, empalmes sueltos o falsos contactos en algún lugar, especialmente en el cambiador de derivaciones.

Los resultados obtenidos al realizar esta prueba deberán ser comparados con los proporcionados por el fabricante del equipo o con resultados obtenidos de pruebas anteriores.

Para la medición de la resistencia de los devanados se utiliza un equipo llamado MicroOhmetro, el cual puede funcionar de forma manual o por medio de baterías, pudiendo ser también análogo o digital.

Procedimiento:

Paso 1: desconectar los cables de entrada de los *bushing*, de manera de poder conectar los cables del equipo de prueba.

Paso 2: conectar las terminales del equipo de prueba al devanado primario (en el que se encuentra el cambiador de derivaciones).

Paso 3: el equipo de prueba inyecta un voltaje DC determinado y a la vez mide la corriente y el voltaje de prueba para después calcular la resistencia del devanado.

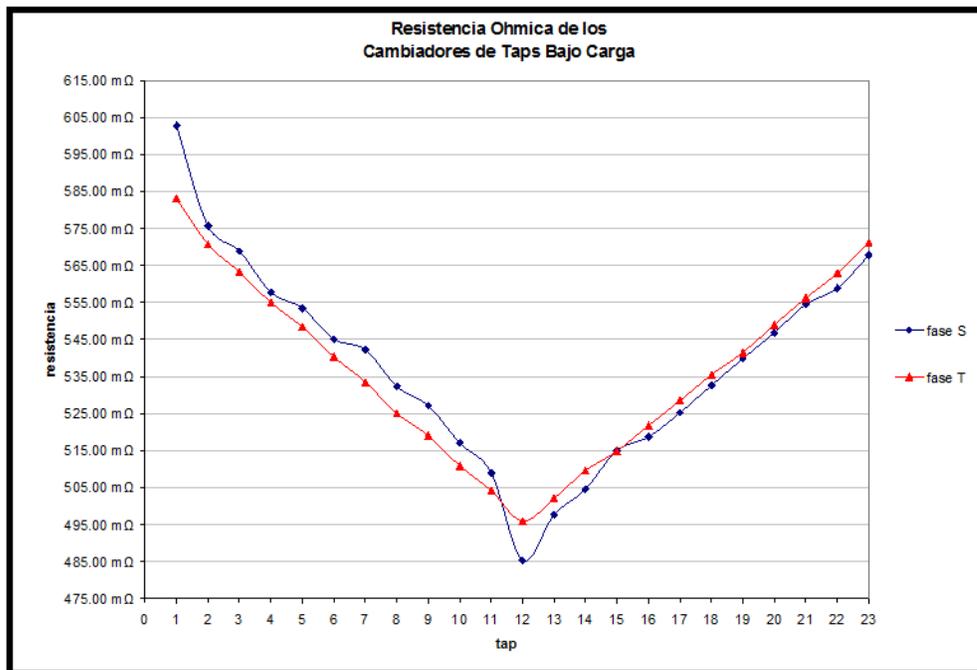
Interpretación de resultados: los resultados de las pruebas de resistividad deben ser similares a los datos proporcionados por el fabricante del transformador o similar a datos de pruebas anteriores, es decir que la fluctuación entre los valores deben ser mínimos, en especial la pendiente de la gráfica de los valores debe ser similar a datos anteriores puesto que un cambio significativo en la pendiente indica falla.

Nota: para registro de los resultados de las pruebas de resistencia de devanados puede utilizarse un documento como la tabla XI, del apéndice.

En la figura 96 se muestra una gráfica de un reporte de pruebas de resistividad óhmica luego de haber realizado un trabajo de mantenimiento mayor del OLTC del transformador de fase S del banco de transformación I de Subestación Los Brillantes Retalhuleu.

La gráfica en forma de V es típica en la prueba de resistencia óhmica de transformadores con cambiador de derivaciones inversor, ya que tanto para la derivación máxima como para la derivación mínima se tendrá el total del devanado de regulación conectado al devanado principal y la menor cantidad total de arrollamientos, por lo tanto, la menor cantidad de espiras existe cuando el cambiador de derivaciones está colocado en la derivación neutral (en este caso la derivación 12 ya que se tienen 23 derivaciones de regulación con preselector inversor).

Figura 96. **Gráfica de pruebas de resistividad óhmica sobre todos los tap**



Fuente: Reporte de mantenimiento de OLTC en transformador fase S del banco de Transformación I en Subestación Los Brillantes, Retalhuleu.

### **8.5.2.3 Prueba de corriente de excitación**

La prueba de corriente de excitación de un transformador de potencia, determina la existencia de vueltas en cortocircuito, conexiones defectuosas o poca área de contacto tanto de las conexiones como del cambiador de derivaciones, también determina desplazamiento de devanados y núcleo.

Los valores normales de corriente de excitación generalmente se encuentran entre el 4 y 8 por ciento de la corriente nominal del transformador. Valores de corriente de excitación mayores de 10 por ciento de la corriente nominal del transformador son sospechosos de la existencia de un problema interno (posiblemente en el circuito magnético).

La prueba de corriente de excitación permite detectar fallas en el circuito magnético y devanados, pero especialmente se usa para detectar mal contacto en el cambiador de derivaciones. Se recomienda que las pruebas se comparen entre unidades similares o preferiblemente con datos de pruebas anteriores de dicho equipo.

Procedimiento de la prueba: la prueba de corriente de excitación se realiza en el devanado de alta tensión del transformador, se aplica una tensión generalmente de 10kV y se mide la corriente de excitación del transformador. Es recomendable realizar la prueba con todas las derivaciones del transformador.

Paso 1: retirar los conductores que conectan los bushing.

Paso 2: conectar las terminales del equipo de prueba a las terminales del devanado de alta tensión.

Paso 3: cada devanado debe medirse en dos direcciones, es decir, primero se energiza una terminal, se registran sus lecturas y enseguida se energiza la otra terminal registrando también sus lecturas; esto con la finalidad de verificar el devanado en sus extremos y corroborar la consistencia de la prueba.

Paso 4: asegurar que los devanados no energizados en la prueba, están libres de toda proximidad de personal, cables, en virtud de que al energizar el devanado bajo prueba, se induce un potencial en el resto de los devanados.

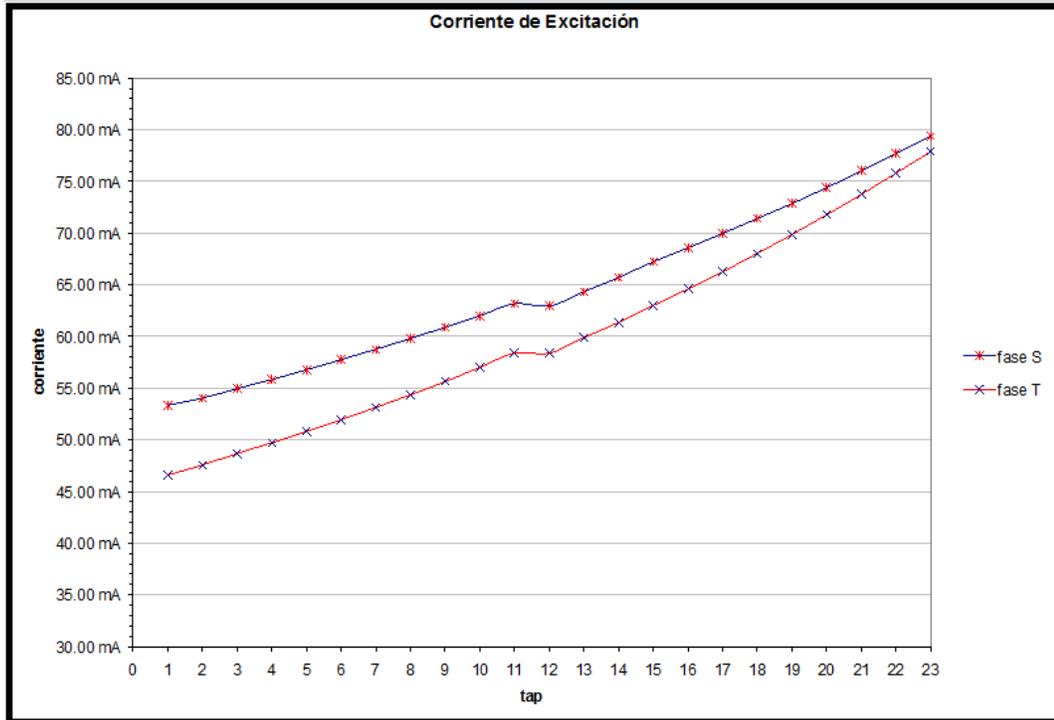
Paso 5: la tensión de prueba en los devanados conectados en estrella no debe exceder la tensión nominal de línea a neutro del transformador.

Paso 6: la tensión de prueba en los devanados conectados en delta no debe exceder la tensión nominal de línea a línea del transformador.

Análisis de resultados: para el reporte y el archivo de los resultados de la prueba de corriente de excitación, puede utilizarse una hoja de reporte como el que se ve en el la tabla VIII, del apéndice; en el cual únicamente se agrega la tabla de resultados de la prueba. La tabla antes mencionada es proporcionada por el equipo de prueba y además proporcionan gráficas para mejor interpretación de los resultados.

La gráfica de los resultados de esta prueba generalmente da una curva típica aproximadamente recta con pendiente positiva, excepto en las derivaciones centrales cuando existen posiciones intermedias.

Figura 97. **Gráfica de pruebas de corriente de excitación sobre todos los tap**



Fuente: Reporte de mantenimiento de OLTC en transformador fase S del banco de Transformación I en Subestación Los Brillantes Retalhuleu.

Para la emisión del diagnóstico del estado del cambiador de derivaciones, es necesario comparar los resultados de la prueba con los datos técnicos del transformador proporcionados por el fabricante y en caso de no existir, hacer la comparación con datos de pruebas anteriores. Para ambos casos es necesario que los resultados sean similares de lo contrario indicara que puede existir una falla.

En la figura 97, se muestra la gráfica de las pruebas de corriente de excitación del transformador fase S comparados con pruebas realizados al transformador de la fase T, ambos transformadores del banco de transformación I en subestación Los Brillantes comprados, estas pruebas fueron realizadas después de haber realizado mantenimiento al cambiador de derivaciones en la fase S.

### **8.5.3 Mantenimiento correctivo**

El mantenimiento correctivo en el OLTC consiste en el cambio de aceite y limpieza general del conmutador, del tanque conservador y de la cuba el OLTC, así como cambio de piezas defectuosas o que han finalizado su período de vida.

El cambio de aceite dieléctrico y limpieza del conmutador, debe realizarse según diagnóstico necesario en pruebas (especialmente si se pierde la rigidez dieléctrica o el contenido de humedad está fuera de los límites tolerables), o debido a cumplir con su período de vida como lo especifica el fabricante en la guía técnica de cada equipo o por hallarlo defectuoso en las inspecciones regulares. Este mantenimiento debe de llevarse a cabo en períodos no mayores de 7 años según distintos fabricantes de OLTC.

La norma IEC 60214-2 recomienda que el aceite mineral no deba cambiarse por un aceite de una clase diferente, o por un líquido diferente sin consultar al fabricante del cambiador de derivaciones. Esto ya que distintos aceites o líquidos pueden tener diferentes viscosidades o características dieléctricas que pueden afectar la velocidad de funcionamiento y la integridad dieléctrica del OLTC.

### **8.5.3.2 Condiciones para un mantenimiento correctivo**

El proceso de este tipo de mantenimiento es recomendable realizarlo en un solo día, cuando el clima sea de preferencia soleado y sin presencia de neblina para reducir la contaminación con humedad. Además, este mantenimiento debe completarse en un solo período de trabajo ya que un trabajo incompleto o inapropiado podría conducir a daños graves del OLTC y por lo tanto al transformador.

Primeramente se tiene que programar el trabajo y pedir permiso a las autoridades correspondientes como el AMM, ya que el transformador o autotransformador según sea el caso, deberá quedar desenergizado por completo durante el tiempo que dure el trabajo. Luego de haber programado el trabajo se debe realizar un aviso de trabajo al centro de operaciones. Acompañado de una solicitud de desenergización en la que se especifica las áreas a desenergizar, la fecha, hora y duración de los trabajos, para este propósito pueden utilizarse un documento como el que se ve en la tabla VIII del apéndice VII. Acompañando al aviso de trabajo también se incluirá un documento que describa la secuencia de las maniobras a realizar durante el trabajo de mantenimiento como el que se ve en la tabla IX, del apéndice.

El centro de operaciones es el encargado de hacer las solicitudes al Administrador de Mercado Mayorista, quien es el ente facultado para autorizar las desenergizaciones. Cuando se tenga finalmente la autorización de la desenergización, se hace un comunicado de prensa para notificar a los usuarios, de la suspensión del servicio eléctrico, el documento de notificación puede ser como el que se presenta al final del apéndice B.

Seguidamente se tiene que planificar el trabajo, buscando al personal adecuado para realizar este tipo de trabajo, de manera que sea personal responsable y consiente de realizar trabajo de la mejor forma para restablecer el servicio lo más pronto posible. Además de buscar al personal adecuado, debe también prepararse la maquinaria, herramienta y material necesario para realizar el trabajo. El puesto de trabajo que en un caso ideal puede ser un taller con suficiente iluminación y mejor aún si fuera un lugar donde pudiera controlarse la temperatura del ambiente.

Equipos necesarios:

- Grúa o equipo de elevación para izar el conmutador insertable del OLTC, teniendo en cuenta la altura de extracción y el peso de la unidad.
- Bomba con mangueras y conexiones para el cambio de aceite.
- Equipo adecuado para el transporte de la unidad al taller.

Herramienta:

- Juego de llaves
- Vernier para medición de piezas
- Destornilladores
- Taquímetro para apriete
- Mesa de trabajo en donde se llevara a cabo el mantenimiento

Material:

- Aceite nuevo con una cantidad y tipo según se especifique el fabricante.
- Barriles vacíos para el aceite extraído del OLTC.
- Tela que no se deshilache, para limpieza de las partes del OLTC.
- Lámina plástica para recoger el aceite que gotee.
- Una cuba o recipiente para colocar el OLTC.
- Empaques y piezas de repuesto como contactos móviles fijos del OLTC, trenzas flexibles de cobre para el conmutador, por si fuere necesario cambiar los existentes.

### **8.5.3.3 Proceso de un mantenimiento correctivo**

- Desconectar el transformador y aterrizar las terminales de alta y baja y delimitar la zona de trabajo.
- Para la realización del trabajo, lo primero que debe hacerse es cerrar la válvula que comunica la cuba del OLTC con el tanque conservador si este existiese, tomar las lecturas del número de operaciones y verificar la posición en la que este se.
- Extraer la cabeza del cambiador de derivaciones.

Figura 98. **Extracción de la cabeza del cambiador de derivaciones**



Fuente: Transformador fase S, banco de Transformación II, Subestación Guate-Norte.

- Conexión de la bomba y mangueras hacia la tubería de succión del tanque del cambiador para extraer el aceite.

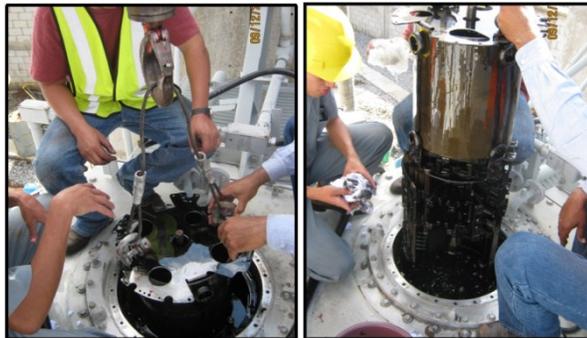
Figura 99. **Bomba para extracción y llenado de aceite**



Fuente: Transformador fase S, banco de Transformación II, Subestación Guate-Norte.

- Extracción del cuerpo insertable del conmutador, sujetándolo con un cable de acero a través de la grúa o dispositivo para izar.

Figura 100. **Extracción del conmutador de la cuba**



Fuente: Transformador fase S, banco de Transformación I, Subestación Guate-Este.

- Es necesario envolver la unidad con plástico para evitar que se derrame aceite y también evitar que penetre basura presente en el ambiente.

Figura 101. **Envoltura del conmutador**



Fuente: Conmutador de OLTC marca MR tipo M en la subestación Guate-Este (izquierda), conmutador de OLTC marca ABB en banco II de la Subestación Los Brillantes (derecha).

- Debe colocarse la unidad en el recipiente para su limpieza, la cual debe realizarse con aceite mineral nuevo, del mismo tipo que el contenido dentro de la cuba del OLTC y nunca con solventes. La limpieza puede realizarse con tela y brochas para tratar de eliminar la mayor parte de los lodos y el carbón presente en la cuba del conmutador, también puede lavarse con el aceite a presión para llegar a lugares inaccesibles.

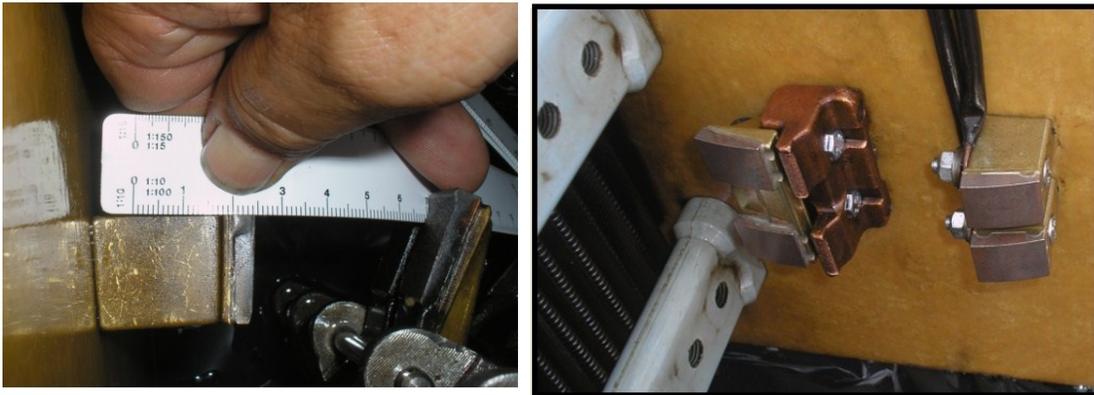
Figura 102. **Lavado a presión del conmutador**



Fuente: Subestación Guate-Norte (izquierda), Subestación Los Brillantes (derecha).

- Posteriormente a la limpieza del conmutador, debe verificarse el estado de todas las partes y piezas del conmutador insertable. Las partes a revisar especialmente son las resistencias de transición, los contactos fijos y móviles y las trenzas flexibles.

Figura 103. **Medición de los contactos del conmutador (izquierda),  
contactos sustituidos por nuevos (derecha)**



Fuente: conmutador de OLTC marca ABB de Transformador fase S del banco de Transformación I, en la Subestación Los Brillantes.

El valor de la resistencia debe ser como lo especifique el fabricante en la guía técnica del equipo.

Figura 104. **Medición de la resistencia de transición**



Fuente: transformación fase T del banco de transformación I, en la Subestación Guate-Este.

Por otro lado si se presentan porosidades en los contactos del conmutador deben ser cambiados, o en caso de que no se contara con el repuesto, podrán ser lijados para mejorar el área de contacto.

Figura 105. **Comparación entre contactos viejos y nuevos**



Fuente: Conmutador de OLTC marca ABB de Transformador fase S del banco de Transformación I, en la Subestación Los Brillantes.

- La limpieza de la cuba del conmutador consiste en, primeramente extraer el aceite contenido en su interior con la bomba y depositado en barriles, seguidamente se debe abrir la válvula que comunica con el tanque conservador, de manera que el aceite que contiene este, caiga hacia la cuba para su posterior aspiración hacia los barriles.

Figura 106. **Cuba del conmutador de un OLTC**



Fuente: Transformación fase T del banco de transformación I, en la Subestación Guate-Este.

Para limpiar el tanque conservador del OLTC debe vaciarse aceite limpio a través de él hasta que el aceite salga limpio, esto en caso de que el tanque conservador sea sellado, sin embargo si pudiera abrirse se puede limpiar con brochas y tela.

Luego de haber limpiado el tanque conservador se procede a limpiar la cuba del OLTC con aceite limpio utilizando telas que no se deshilache.

- Cuando se ha finalizado con la limpieza y verificación de las piezas, en caso de haber una pieza en mal estado debe cambiarse por uno nuevo o en buen estado, de manera que el equipo quede trabajando con el menor riesgo de fallo. Las piezas comúnmente más cambiadas en estos mantenimientos son:
  - Empaques defectuosos
  - Contactos móviles y fijos muy gastados
  - Trenzas de cobre flexibles

- Luego de haber hecho toda la limpieza y revisión de piezas, se procede a trasladar el conmutador para su inserción en la cuba, con el cuidado que todas las piezas estén bien apretadas y que no quede ningún objeto quede o caiga dentro de la cuba.
- Finalmente cuando se ha insertado el conmutador, se procede a colocar la cabeza del cambiador y atornillarlo con los tornillos de sujeción con un torque según se especifique en la guía técnica.
- Ahora se procede al llenado con aceite del OLTC, el llenado se lleva a cabo con la bomba vaciando el aceite en la parte alta del tanque conservador para que este caiga hacia el tanque del conmutador. En ocasiones también puede realizarse el llenado de aceite en vacío para reducir los contaminantes durante el llenado, pero necesita más tiempo.
- Cuando finalmente se ha concluido con el llenado debe verificarse que el indicador de nivel indique un nivel correcto de aceite y también debe de purgarse el tanque del OLTC.
- Luego de esto, en caso de existir indicador de posición en la cabeza del cambiador debe de verificarse de que coincida con lo indicado en accionamiento a motor como también en una sala de mando si esta existiera.
- Además, también debe verificarse la transmisión, ya que por ser un equipo que tiene función de movimiento en ocasiones, puede tener un desgaste que podría provocar que la transmisión se salga de su lugar, especialmente en los pines o seguros que acoplan las distintas partes de la transmisión como se ve en la figura 107.

Figura 107. **Seguros desgastados de la transmisión del OLTC**



Fuente: Fuente: conmutador de OLTC marca ABB de Transformador fase S del banco de Transformación I, en la Subestación Los Brillantes.

- Posteriormente y antes de conectar el transformador, deben realizársele pruebas eléctricas y mecánicas en todo el rango de derivaciones, esto para verificar que el trabajo ha sido bien realizado, las pruebas a realizar pueden ser:
  - Relación de transformación
  - Resistividad del devanado (resistividad óhmica) y
  - Corriente de excitación

#### **8.6 Medidas a tomar en las distintas fallas en los cambiadores de derivación bajo carga tipo MR**

El fabricante de cambiadores de derivaciones bajo carga MR generalmente provee de una tabla como la que se muestra a continuación,

para que el cliente pueda interpretar mejor las fallas y realizar la acción correcta.

**Tabla VI. Soluciones a las diferentes fallas en un OLTC tipo VR**

<b>Cuadro de error</b>	<b>Medida</b>
Se ha activado el relé de protección (p. ej. RS 2001).	Desmontar el cuerpo insertable del ruptor conforme a las instrucciones de mantenimiento para el VACUTAP® VR. Dependiendo de la causa por la que se ha disparado, realizar mediciones y comprobaciones en el transformador.
Se ha activado la válvula de alivio de presión (p. ej. MPreC®).	Desmontar el cuerpo insertable del ruptor conforme a las instrucciones de mantenimiento para el VACUTAP® VR. Dependiendo de la causa por la que se ha disparado, realizar mediciones y comprobaciones en el transformador.
Se ha activado el dispositivo supervisor de presión (p. ej. DW 2000).	Desmontar el cuerpo insertable del ruptor conforme a las instrucciones de mantenimiento para el VACUTAP® VR. Dependiendo de la causa por la que se ha disparado, realizar mediciones y comprobaciones en el transformador.
El dispositivo para supervisión de conmutación ha saltado.	Desmontar el cuerpo insertable del ruptor conforme a las instrucciones de mantenimiento para el VACUTAP® VR. Comprobar el funcionamiento del cuerpo insertable del ruptor y de los árboles de accionamiento.
El disco de reventamiento en la tapa de la cabeza del cambiador de tomas bajo carga ha saltado.	Desmontar el cuerpo insertable del ruptor conforme a las instrucciones de mantenimiento para el VACUTAP® VR. Dependiendo de la causa por la que se ha disparado, realizar mediciones y comprobaciones en el transformador.
Disparo del guardamotor en el accionamiento a motor.	Solicitar a MR la Hoja informativa para la activación de un guardamotor, rellenarla y enviarla de vuelta a MR.
Disparo del contacto de aviso de caída por debajo del nivel mínimo de aceite en el conservador de aceite del cambiador de tomas bajo carga.	Comprobar la estanqueidad del sistema de conducción (tuberías, unidad de filtrado de aceite, etcétera) y de la cabeza del cambiador de tomas bajo carga. Comprobar el nivel y la calidad del aceite del ruptor conforme a las instrucciones de servicio del cambiador de tomas bajo carga. Si los valores caen por debajo del límite, ponerse en contacto con MR.

Continuación de la tabla VI.

Desviación del valor consigna en el análisis de gas en aceite (aceite del transformador).	Ponerse en contacto con el fabricante del transformador, en caso necesario también con MR, y comunicar los valores de medición.
Desviación del valor consigna en la medición de la relación de transformación.	Ponerse en contacto con el fabricante del transformador, en caso necesario también con MR, y comunicar los valores de medición.
Desviación del valor límite en los valores del aceite del ruptor.	Cambiar el aceite, comprobar la carga de silicagel (gel de sílice) del conservador de aceite del cambiador de tomas bajo carga.
El cambiador de tomas bajo carga no cambia la posición de toma (resistencia al cambio, las teclas subir/bajar no funcionan, no se percibe audiblemente ningún salto del ruptor).	Ponerse en contacto con MR.
No se ha modificado la tensión en el transformador a pesar de haber cambiado la posición en el accionamiento a motor.	Ponerse en contacto con MR.
Indicación de posición distinta en el accionamiento a motor y el cambiador de tomas bajo carga.	Ponerse en contacto con MR.
Ruidos en el árbol de accionamiento o accionamiento a motor durante el cambio de la posición de toma.	Comprobar que las abrazaderas de manguera estén bien situadas. Si los ruidos provienen del accionamiento a motor, ponerse en contacto con MR.
Aviso en rojo en el control de funcionamiento (TM 100 TAPGUARD 260).	Si es posible leer la base de datos y enviar con código de fallo a MR.
Advertencia o activación del relé <i>Buchholz</i> en el transformador.	Informar al fabricante del transformador.
Desviación del valor consigna en la medición de la resistencia de devanado del transformador.	Ponerse en contacto con el fabricante del transformador, en caso necesario también con MR, y comunicar los valores de medición.

Fuente: Guía de servicio para OLTC tipo VR, marca MR.



## **9 PROTECCIÓN DEL CAMBIADOR DE DERIVACIONES BAJO CARGA**

### **9.2 Elementos de protección de los cambiadores de tomas bajo carga**

Cuando ocurre una falla eléctrica dentro de un transformador o en el OLTC, se generaran arcos eléctricos, los que causaran un deterioro del material aislante y liberaran grandes cantidades de energía que se manifiestan en generación de gases y aumento de la temperatura del aceite y por consiguiente se traduce a incremento en la presión dentro del tanque principal o dentro del tanque del cambiador de derivaciones, según sea el caso.

Con el propósito de reducir el riesgo de incendio o explosión del transformador las normas IEC 60214-1 en su capítulo 5.1.4 e IEC 60214-2, capítulo 5.7, indican que en los cambiadores de derivaciones bajo carga, debe de instalarse como mínimo uno de los siguientes elementos de protección, los cuales se activaran cuando existe una falla y envían órdenes de disparo a los interruptores de potencia del transformador para dejarlo des energizado.

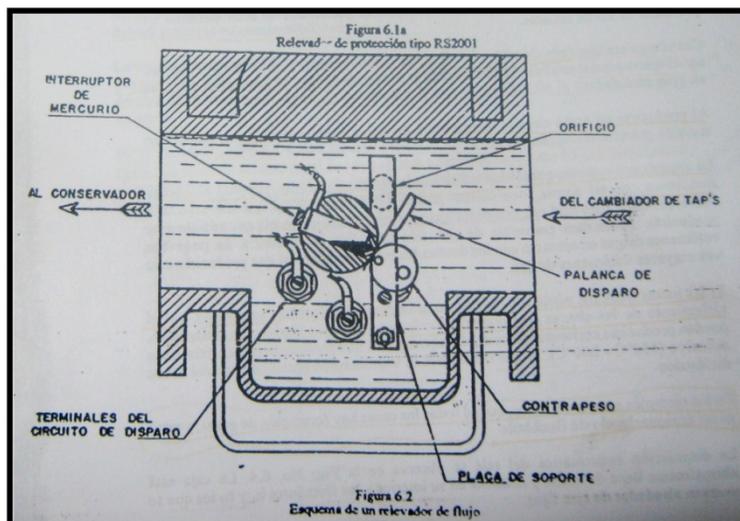
#### **9.2.1 Relevador de flujo (RS1000 O RS2001)**

Es un relé de protección, también llamado relé de control de flujo de líquido, que sirve para realizar un disparo de los interruptores de potencia del transformador cuando existe un flujo repentino del aceite entre el OLTC y el tanque conservador y de este modo evita o limita el daño a las derivaciones del transformador. Por tal motivo se instala entre el tanque conservador y el

recipiente del OLTC, por medio de una tubería que por lo menos deberá tener una inclinación de 3 grados para asegurar que no se produzcan bolsas de gas en esta tubería o en el relevador.

En muchas ocasiones este relevador es confundido con el relevador *buchholz* por su apariencia física y lugar donde van instalados; sin embargo, a pesar de que ambos funcionan por flujo, la diferencia es que el *Buchholz* opera por flujo de gases o acumulación de estos en su interior, por otro lado el relevador de flujo opera por movimiento repentino del líquido (aceite dieléctrico), entre el OLTC y su tanque conservador. El relevador de flujo es un dispositivo de protección del OLTC utilizado ya por varios años y según las normas IEC 60214-2, no hay evidencia de operaciones falsas, la desventaja es el tiempo de respuesta puesto que es un dispositivo netamente hidráulico, la operación es relativamente lento.

Figura 108. Esquema de un relevador de flujo RS 2001



Fuente: Operación y Mantenimiento de Transformadores de Potencia, Centro de Capacitación Celaya.

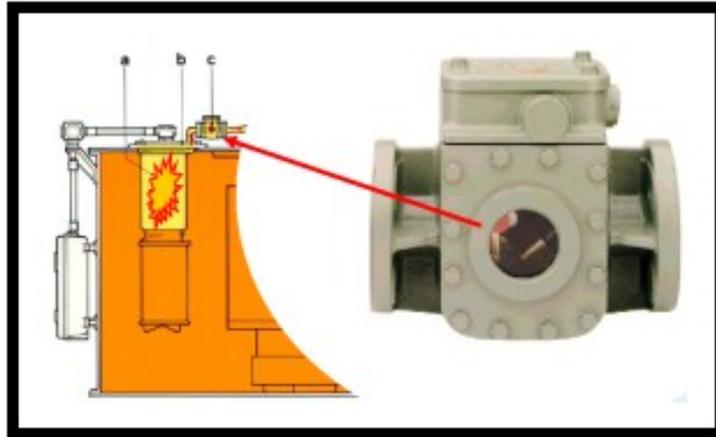
El motivo de no instalar un relevador *Buchholz* entre el cambiador de derivaciones y su tanque conservador es que, en los OLTC con tecnología de conmutación en aceite, al realizar conmutaciones por medio de los interruptores se producen pequeños arcos y consecuentemente se generan gases, lo que ocasionaría que el relé *Buchholz* operaría en forma errónea.

El relevador de flujo está formado por una cámara donde se encuentra un interruptor de mercurio instalado en una placa, misma que tiene un orificio al centro, los pasamuros y los botones de prueba y reposición.

Los gases generados en el tanque que se producen en el conmutador, circulan por el orificio de la placa y a través del relevador sin causar ningún problema; cuando por una falla en el conmutador se origina repentinamente un flujo de aceite, la placa es impulsada hacia adelante activando de inmediato el interruptor de mercurio y con ello provocando la apertura de los interruptores de potencia de alta y baja del transformador quedando des energizado de inmediato.

El relevador de flujo es un sistema de protección y se debe instalar lo más cerca posible de la cabeza del cambiador y en posición horizontal. La flecha de sentido del relevador de protección instalado debe indicar hacia el conservador de aceite.

Figura 109. **Relevador de flujo 1**



Fuente: Equipos de protección MR, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com). Consulta: 02/03/12.

La caja que aloja las borneras que conectan con los contactos del relevador, es moldeada en material ligero resistente a la corrosión. Se puede controlar la posición de la palanca de disparo gracias a la mirilla situada sobre la cara delantera de la caja. El aceite contenido en el relevador de protección no debe penetrar hacia la caja de bornes.

Igualmente, en la caja se encuentran situados dos botones pulsadores, uno destinado a controlar el buen funcionamiento del aparato (botón para prueba de operación del relevador) y otro para restablecer.

La operación del relevador de protección o de cualquier elemento de protección, puede ser el indicio de una avería grave. Sin las comprobaciones indicadas, el cambiador no debe volver a ponerse en servicio bajo ninguna circunstancia. Cuando el funcionamiento del relé provoque la desconexión de los disyuntores, debe procederse como sigue:

- Anotar la hora y la fecha de la desconexión.
- Anotar la posición de servicio del cambiador.
- Bloquear el mando a motor desconectando el guarda motor, de modo que se evite una maniobra del cambiador causada por un control remoto.
- Controlar la hermeticidad de la tapa. Si hay una fuga de aceite cerrar inmediatamente la válvula que conecta al tanque conservador de aceite.
- Verificar si la palanca del relé de protección se encuentra en la posición Operó o en posición Restablecido. Si se encuentra en ésta última es posible que se haya producido un desenganche defectuoso. Verificar en éste caso el circuito de Restablecer.

De no ser posible restablecer, habrá que sacar el cuerpo insertable del cambiador para control visual. Si la palanca se encuentra en posición de restablecido hay que, de todas formas, sacar el cuerpo extraíble del cambiador. Volver a poner en servicio el cambiador sin haberlo revisado visualmente, podría conducir a daños muy graves en el transformador y en el cambiador.

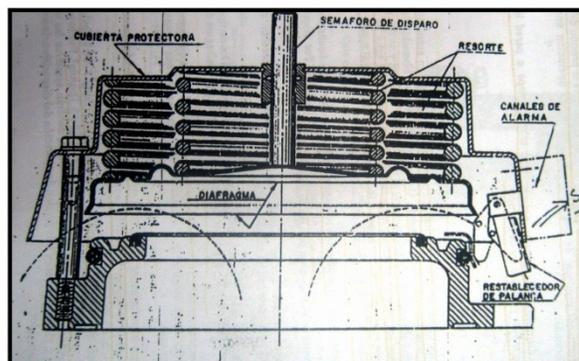
Después de una comprobación minuciosa del cuerpo insertable, el servicio solo se debe reanudar si se está seguro de que no hay ningún daño ni en el cambiador de tomas ni en el transformador.

## 9.2.2 Válvula de sobrepresión

También llamado relevador de sobrepresión o dispositivo de descompresión, este dispositivo protege al resto de los elementos del cambiador de derivaciones bajo carga contra los esfuerzos mecánicos, que se producen al elevarse la presión del aceite en el recipiente del cambiador de derivaciones producto de una falla interna o de operación anormal de los elementos ubicados dentro del tanque del cambiador de derivaciones. Las válvulas de sobrepresión, además, son muy usadas también para protección del transformador, para este caso se instalan en la parte alta de la cuba principal del transformador.

En la figura 110 se muestra una válvula de sobrepresión tipo resorte para instalarse en la cabeza del cambiador de derivaciones bajo carga. Para este caso existe un agujero en la parte baja de la válvula, que es tapado por el diafragma, que a su vez es presionado por el resorte para evitar derrames del aceite, en condiciones normales.

Figura 110. **Relevador de flujo 2**



Fuente: Operación y Mantenimiento de Transformadores de Potencia, Centro de Capacitación Celaya.

Si ocurre una falla en el conmutador del cambiador de derivaciones bajo carga, se incrementará la presión dentro de la cuba del cambiador de derivaciones; cuando la presión dentro de la cuba sea mayor que la presión a la que ha sido calibrado el resorte de la válvula, el diafragma se desplazará hacia afuera, permitiendo que la presión se libere por medio de expulsión de aceite.

Después de haber liberado la sobrepresión, el resorte nuevamente devolverá el diafragma a su posición normal, evitando que se siga derramando aceite. Cuando el diafragma se desplaza hacia afuera, a su vez expulsa un émbolo de señalización denominado semáforo de disparo; además, también accionará un pequeño interruptor auxiliar, ubicado a un costado de la válvula el cual quedará activo hasta su reposición manual, en la palanca de restablecimiento.

Los contactos del interruptor auxiliar, pueden ser alambrados para alarma o para disparar todos los interruptores de potencia del transformador.

Los relevadores y válvulas de sobrepresión se instalan normalmente sobre la cabeza del cambiador de derivaciones y pueden ser de los tipos:

- De resorte
- De diafragma

Los de resorte, son de reposición automática, es decir cierran nuevamente una vez que la sobrepresión ha sido liberada. En el tipo de diafragma al producirse la sobrepresión el diafragma se romperá y se derramará aceite hasta que los niveles de aceite entre tanque conservador y el

tubo de montaje del diafragma se estabilicen. Por lo tanto, los dispositivos de resorte al operar, derramarán menor cantidad de aceite que los de diafragma.

Generalmente los dispositivos de sobrepresión son calibrados en fábrica y son ajustados para que operen a un rango de 7-10 libras por pulgada cuadrada. Es recomendable que los dispositivos de sobre presión sean probados antes de ser instalados en el OLTC; esto es factible únicamente en los de tipo resorte, en los de diafragma no siempre es posible ya que el diafragma se destruye cuando el relevador opera con lo que se podrá probar, únicamente si se tiene un diafragma de repuesto.

Cuando el transformador y el recipiente del conmutador del OLTC va ser sometido a vacío total, deberá desmontarse los dispositivos de sobrepresión. Los dispositivos de sobrepresión operan entre 7- 10 libras por pulgada cuadrada y se reponen nuevamente cuando la presión ha disminuido entre 3,5 y 5 libras por pulgada cuadrada.

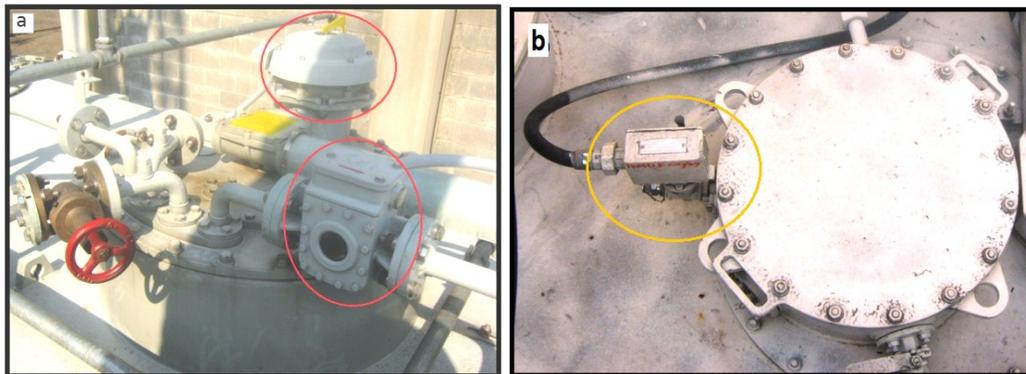
### **9.2.3 Relevador de sobrepresión**

El relevador de sobrepresión es un dispositivo de protección que deberá operar en el caso que la presión del líquido en el compartimiento del conmutador sea superior a un valor predeterminado, y de esta manera permitir que se disparen los interruptores de potencia del transformador, este dispositivo de protección tiene la ventaja de ser más rápido que el relé de flujo.

La mayoría de los cambiadores de derivaciones de marca ABB generalmente cuentan con este relevador de sobrepresión como el de la figura 111b, pero no cuentan con válvula de sobrepresión ni relevador de flujo como en los equipos de marca MR que siempre cuentan con el relevador de flujo de

líquido, en ocasiones, con la válvula de sobrepresión más no con relevador de sobrepresión.

Figura 111. **a) Relevador de flujo y válvula de sobrepresión b) Relevador de sobrepresión**



Fuente: a) Banco de autotransformadores 400/230kV con OLTC marca MR; b) banco de transformación 230/69kV marca ABB, Subestación Los Brillantes, Retalhuleu.

La presión de funcionamiento (presión de disparo) de los relevadores de presión es de 50 kilo Pascales (7 libras por pulgada cuadrada) si el nivel de aceite del conservador está menos de 4 metros por encima del nivel del relé de presión.

Los dispositivos de protección del conmutador están diseñados para contrarrestar las siguientes tensiones mecánicas.

- Aumento inadmisibles de presión dentro del compartimiento del conmutador o interruptor selector.
- Operación del cambiador de derivaciones bajo carga con excesiva sobrecorriente del transformador.
- En operación del cambiador de derivaciones a temperaturas por debajo del límite de -25 grados centígrados, como se describe en la norma IEC 60214-1 o en algunos casos por temperaturas por arriba del límite máximo acordado.

La cantidad de energía liberada durante una falla, depende de varios factores tales como; la capacidad nominal del transformador, el voltaje de operación, capacidad de corriente del OLTC, la potencia de cortocircuito de la red, la conexión del punto estrella, la longitud del arco de falla, etcétera.

Cada uno de los OLTC debe tener un dispositivo de protección. En caso de ser un banco de transformación, cada polo debe estar equipado con un dispositivo de protección independiente.

### **9.3 Sistemas adicionales de protección**

Los cambiadores de derivaciones bajo carga, además pueden contar con otros elementos o sistemas adicionales de protección para asegurar el correcto funcionamiento del equipo, los cuales son:

### **9.3.1 Protección de conmutación en una sobrecarga excesiva o en condiciones de cortocircuito**

Con el fin de minimizar o evitar conmutar bajo condiciones de sobrecarga excesiva o en condiciones de corto-circuito, se recomienda que en caso de control a motor, deberá estar equipado con un dispositivo de protección para evitar o para interrumpir si se inicia la operación del mecanismo de accionamiento a motor, cuando la carga del transformador supere un valor predeterminado. Debe notarse que cuando inicie el período de conmutación por medio del acumulador de energía, este proceso no puede detenerse o interrumpirse.

Muchas empresas acostumbran utilizar un dispositivo de bloqueo de sobre-corriente para detener el mecanismo de accionamiento motorizado del OLTC, que funciona cuando la corriente de carga del transformador excede un límite de carga preestablecido.

Cuando se usa un control manual, estos dispositivos de protección no se consideran necesarios, ya que no es una práctica normal operar el cambiador de derivaciones durante los períodos de sobrecarga excesiva.

### **9.3.2 Protección contra operación a temperaturas excesivas del líquido**

Durante temperaturas ambiente externas y temperaturas bajas del líquido (por debajo de -25 grados centígrados para aceite mineral de acuerdo con IEC602 96), puede ser necesario proporcionar dispositivos especiales para obtener el comportamiento de un servicio fiable. Tal dispositivo puede utilizar un termo-sensor para medir la temperatura del líquido en el cambiador de

derivaciones bajo carga y un relevador amplificador instalado en el mecanismo de accionamiento motorizado para bloquear el funcionamiento eléctrico.

En algunos casos también se incluyen o son necesarios dispositivos para protección de operación a temperaturas extremadamente altas del líquido (mayor de 90 grados centígrados). Tales dispositivos generalmente se utilizan para generar una alarma o disparo del transformador.

### **9.3.3 Sistema de supervisión de interruptores de vacío**

Se utiliza un singular sistema de supervisión para proteger el cambiador de derivaciones en el caso improbable de que un interruptor al vacío del conmutador no llegue a desconectar y transfiera la corriente durante una operación de cambio de derivación como el que se ve en la figura 112.

Si el transformador se halla bajo carga no operar el cambiador sin que dicho sistema de supervisión esté correctamente conectado y en estado operativo.

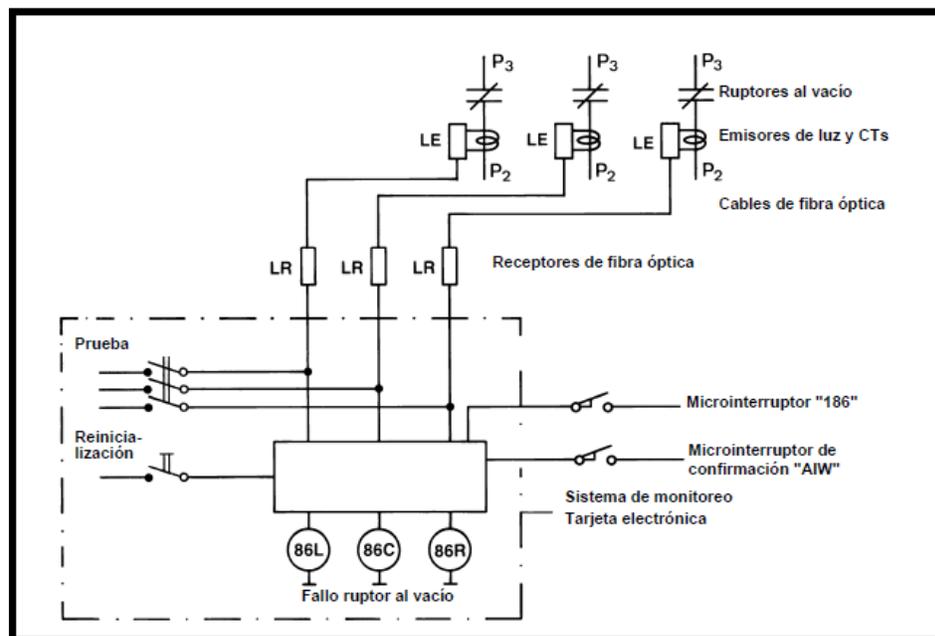
Durante el funcionamiento, siempre que el sistema de supervisión se dispare, abstenerse de re inicializar hasta que el cambiador haya sido examinado y se haya subsanado la causa que originó el problema. Si se hace caso omiso a lo expuesto se pueden ocasionar daños materiales y/o sufrir lesiones.

Este sistema contiene tres transformadores de corriente de saturación en los cables conductores de contacto fijo de los interruptores al vacío. La señal eléctrica procedente del transformador de corriente es transmitida mediante

cable de fibra óptica a la tarjeta electrónica de supervisión por su inmunidad al ruido. Estos cables han de ser manipulados con el debido cuidado

El sistema monitorea la corriente en las tres fases, después de que los interruptores estén abiertos pero antes de que se muevan los contactos del selector. El circuito lógico evalúa estas señales y protege el cambiador en caso de fallo de los interruptores al vacío, accionando un relevador de salida biestable. La acción de este relevador devuelve el cambiador a la posición original antes de que el selector abra el circuito, evitando la ejecución de otras operaciones.

Figura 112. **Supervisión de los interruptores en vacío**



Fuente: instrucciones de servicio de OLTC tipo RMV.

Los componentes indicadores y de control del sistema de supervisión de conmutación serán ubicados en el interior de la puerta del armario del mecanismo de accionamiento y contiene: el conjunto de circuitos electrónicos, suministro de energía, relevadores de disparo 86 L, 86 C y 86 R, el relevadores de potencia de control SP, 3 LED rojos, 3 amarillos y uno verde, un pulsador test (verde) y un pulsador reset (rojo).

Los LED rojos indican que los relevadores de disparo correspondientes se hallan bajo tensión. Los LED amarillos señalan la aplicación de corriente al relevador SP, indicando una pérdida de señal del contacto central para la fase asociada. El LED verde muestra la operatividad del sistema. El pulsador test de color verde se utiliza para comprobar el conjunto de circuitos internos del sistema de supervisión.

Al presionar el pulsador test se simula un fallo de las tres fases, al mismo tiempo que se aplica corriente a los relés de disparo y se iluminan los tres LED rojos. Tras efectuar la prueba, el sistema de supervisión debe ser reactivado presionando el pulsador rojo reset.

El circuito lógico de C.C. especial incluido en el equipo electrónico del sistema de supervisión interpreta las señales ópticas de detección de corriente conforme se recibe la entrada activadora de un micro interruptor accionado por leva de sincronización precisa (186). Si fluyera corriente a través del circuito del interruptor al vacío cuando normalmente estuviera abierto, el cambiador se detendrá inmediatamente siendo devuelto a la posición de procedencia. Los relevadores de alarma de enclavamiento impiden que continúe funcionando hasta que no se haya reinicializado el sistema. Efectuar siempre una verificación del sistema antes de reinicializar el cambiador y de volver a ponerlo en servicio.

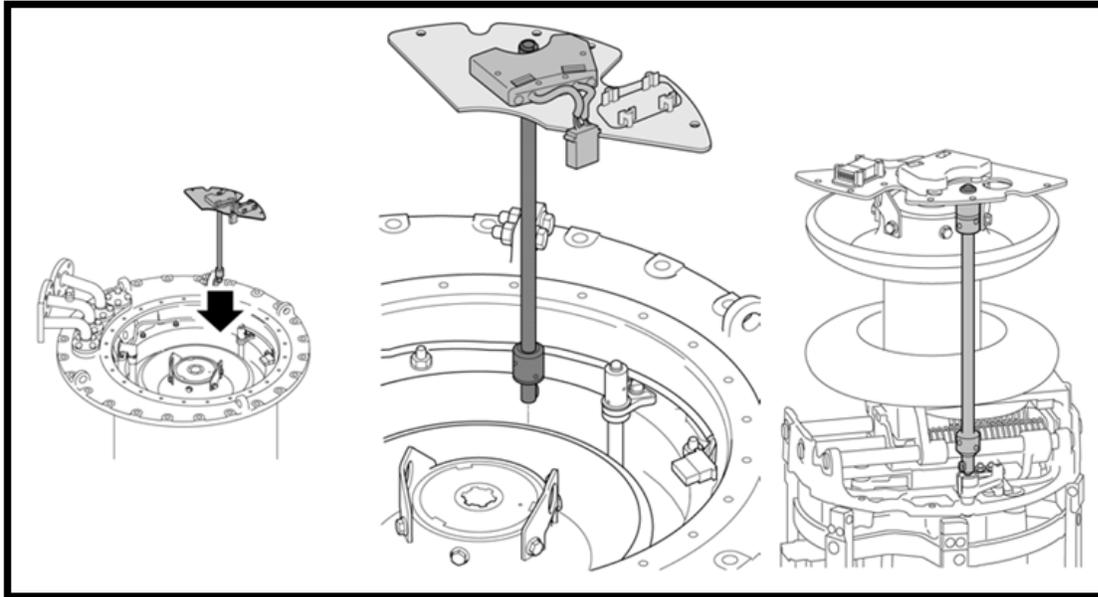
#### **9.3.4 Circuito de control y protección de desequilibrio de fases**

Este sistema está diseñado para protección de los OLTC de un banco de transformación, en caso de que falle el mecanismo de accionamiento en uno o dos polos.

Si hay una falla en la operación simultánea entre cambiadores de derivaciones bajo carga de diferentes polos, (por ejemplo la rotura de un eje de transmisión en uno de los polos), los OLTC independientes de diferente fase llegan a diferentes posiciones de derivación. En estas condiciones cualquier operación incrementara aún más la diferencia entre las fases y el exceso de corriente que circula por el transformador. En tales casos, el circuito de supervisión (si existe) puede responder y asegurar que la operación eléctrica del accionamiento a motor sea bloqueado (no puede haber más operaciones de cambio de derivación, bien sea eléctricamente o manualmente, mientras el transformador este con carga).

Las discrepancias entre las posiciones de derivación de las diferentes fases crearán tensiones desequilibradas, con lo que este tipo de fallas también pueden ser detectadas por la protección de voltaje del transformador de la fase respectiva.

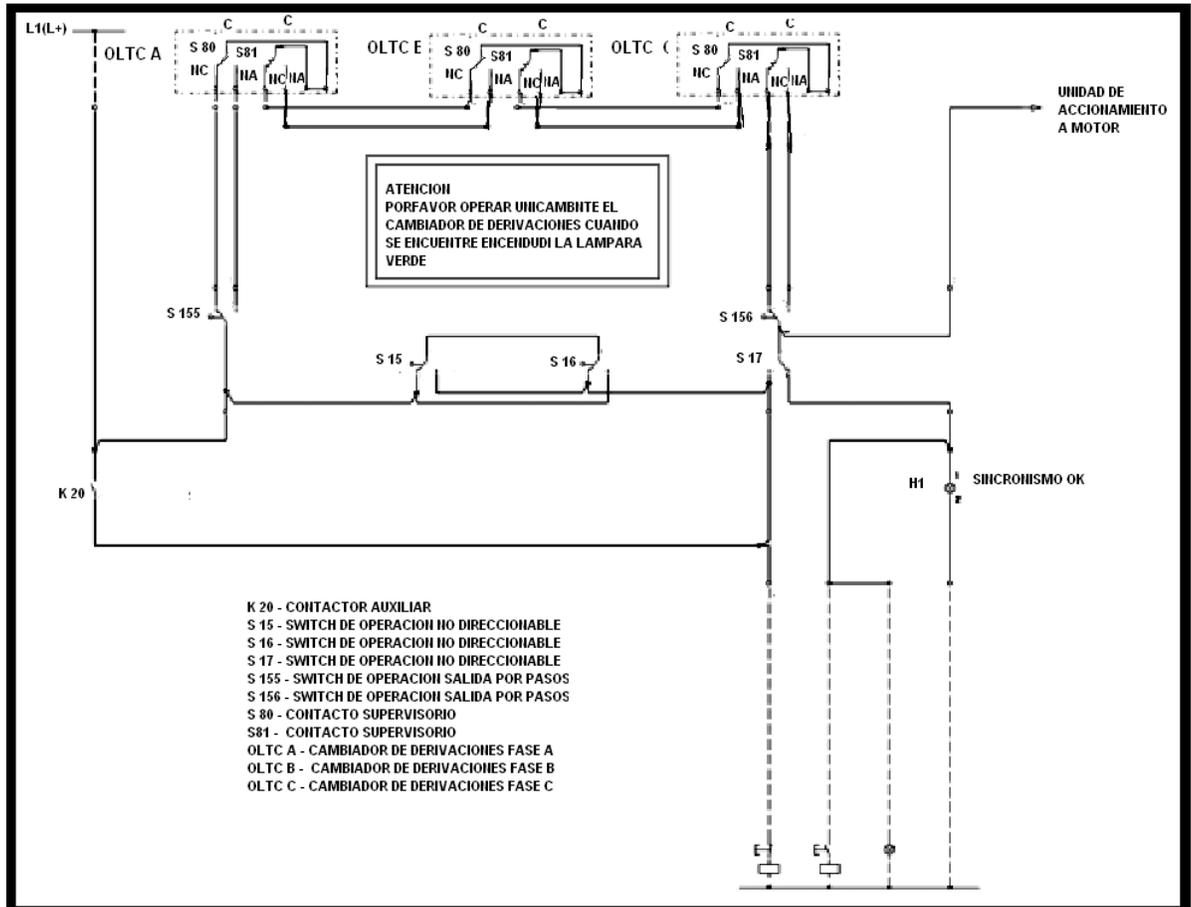
Figura 113. **Supervisor de conmutación**



Fuente: Guía técnica OLTC marca MR tipo MI, [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com). Consulta: 02/03/12.

Generalmente el sistema de protección de supervisión de conmutación, es de tipo mecánico en el cual se conecta un relé biestable como el de la figura 113. Los relevadores biestables de los tres polos se arreglan para bloquear la operación de los cambiadores de derivaciones como se ve en la figura 114.

Figura 114. Sistema de supervisión de conmutación



Fuente: Guía técnica OLTC marca MR tipo MI, www. reinhausen.com. consulta: 02/03/12.



## CONCLUSIONES

- 1 En una red de alta tensión, el método de regulación de tensión más efectivo es la regulación de tensión de flujo constante utilizando cambiadores de derivaciones bajo carga o reguladores por pasos, porque suministra una regulación escalonada y no tiene efecto sobre el flujo de potencia.
- 2 La secuencia de bandera, de un cambiador de derivaciones bajo carga, es la más efectiva para la tecnología de conmutación en aceite, porque la corriente de corte de los contactos del conmutador es menor y por consiguiente el arqueado y la degradación es menor.
- 3 El mantenimiento óptimo del cambiador de derivación, se obtiene de la combinación entre los datos de mantenimiento indicados por el fabricante, inspecciones periódicas y la experiencia del personal, los períodos de mantenimiento no deben ser mayores de 7 años o del período de vida útil del equipo.
- 4 Para protección del cambiador de derivaciones bajo carga, es más utilizado el relevador de flujo ya que posee una alta velocidad de reacción ante fallas en el conmutador.
- 5 Un cambiador de derivaciones bajo carga, puede operar únicamente a una temperatura del cambiador comprendida entre - 25 y 100 grados centígrados; en casos especiales de sobrecarga puede operarse hasta

115 grados centígrados, de manera que este equipo no limite la capacidad del transformador.

- 6 Para un buen diagnóstico, el estado del aceite de un cambiador de derivaciones bajo carga, las pruebas más importantes son rigidez dieléctrica y contenido de humedad verificando que cumplan con lo establecido en la guía técnica del equipo.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar inspecciones rutinarias al cambiador de derivaciones bajo carga y todos sus accesorios, dejando constancia de la inspección para referencia.
2. Que se realicen los programas de mantenimiento a los cambiadores de derivaciones tomando en cuenta varios datos para realizar el diagnóstico, para que este sea confiable y no realizar reparaciones innecesarias.
3. Un trabajo de mantenimiento correctivo debe realizarse en el período de un solo día cuando el clima sea soleado y con la menor humedad posible.
4. Cuando existan mantenimientos del cambiador de derivaciones debe aprovecharse para hacer una inspección minuciosa del cambiador de derivaciones y realizar las pruebas que sean posibles.
5. Las normas IEC 60214 establecen que los dispositivos para protección del cambiador de derivaciones bajo carga son: el relevador de sobrepresión, válvula de sobrepresión y relevador de flujo.

6. Luego de realizar un mantenimiento a un cambiador de derivaciones bajo carga debe realizársele pruebas de relación de transformación, corriente de excitación y resistencia de devanados con la finalidad de identificar algún problema presente; para emitir el diagnóstico del estado del equipo es importante comparar los resultados de las pruebas con datos del fabricante o de no existir, comparar con resultados de pruebas anteriores.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ARRECIO ÁLAMOS, Juan. *Regulación de tensión*. [en línea] [juan\\_alamos\\_h@yahoo.es](mailto:juan_alamos_h@yahoo.es), [www.elprisma.com/apuntes/ingenieria\\_electrica\\_y\\_electronica/regulaciondetension](http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_electrica_y_electronica/regulaciondetension). [Consulta: 10 de marzo de 2012].
2. BARTA PÉREZ, Eduardo. *Simulación del selector y preselector de un cambiador de tomas en carga*. Madrid: Universidad Carlos III, 2006, 118 p.
3. BEDOYA BARRIOS, José Guillermo. *Mantenimiento de transformadores de potencia sumergidos en aceite*. 08 T(431) EA, Guatemala: USAC 1998, 207 p.
4. *Cambiador de tomas bajo carga para transformadores reguladores, VACUTAP®VV*. [en línea] [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com). [Consulta: 15 de marzo de 2012].
5. *Cambiadores de derivaciones bajo carga Uacj*. [en línea] [slideshare.net/teoriaelectro/cambiadores-de-derivaciones-bajo-carga-uacj-1555671](http://slideshare.net/teoriaelectro/cambiadores-de-derivaciones-bajo-carga-uacj-1555671). [Consulta: 20 de marzo de 2012].
6. CHAPMAN, Stephen; DE ROBINA CORDERA, Carla. *Máquinas eléctricas*, México: McGraw-Hill, 2005. 746 p.

7. *Experiencias en el desarrollo de sistemas de monitoreo y diagnóstico para transformadores de potencia*. Temixco, Morelos, México: Instituto de Investigaciones Eléctricas Reforma 113. 1996. 131 p.
8. GONZÁLEZ LONGATT, Francisco. *Transformadores con cambiadores de tomas*. [en línea] [fglongatt@ieee.org](mailto:fglongatt@ieee.org), [www.giaelec.org/fglongatt/sp2](http://www.giaelec.org/fglongatt/sp2), 1994. [Consulta: 15 de marzo de 2012].
9. Guía técnica: *Cambiadores de tomas en carga tipo UZ*, 1ZSE 5492-104 es, Rev. 7, 2005-02-15. Lodvica Suecia, Asea Brown Boveri, 2003. 32 p.
10. Guía técnica: *Cambiadores de tomas en carga, tipos UC y VUC*. Lodvica Suecia, Asea Brown Boveri, 2010. 40 p.
11. Instrucciones de servicio BA 081/05: *Cambiador de tomas bajo carga tipo V*. [en línea] [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com). [Consulta 13 de febrero de 2012].
12. Instrucciones de servicio BA 65/04: *Cambiador de tomas en carga OILTAP® MS*. [en línea] [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com). [Consulta: 10 de marzo de 2012].
13. Instrucciones de servicio: *Cambiador de tomas bajo carga VACUTAP® VR I II III*. [en línea] [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com). [Consulta: 12 de marzo de 2012].

14. Instrucciones de servicio: *Cambiador de tomas bajo carga RMV-II 1500 A / 2000 A / 2500 A*. [en línea] [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com). [Consulta: 16 de marzo de 2012].
15. International Standard. *IEC 60214-1*, 2003-02. New York: 2003. 128 p.
16. ----- . *IEC 60214-2*, 2004-10, New York, 2004. 44 p.
17. MARTÍN, José Raúl. *Diseño de subestaciones eléctricas*. México: McGraw-Hill, 1987. 556 p.
18. NÚÑEZ FORESTIERI, Juan. *Guía para el mantenimiento de transformadores de potencia*. Guayaquil Ecuador: Universidad Superior Politécnica del Litoral, 2004. 358 p.
19. *Operación y mantenimiento de transformadores de potencia*. CCC-A012, Mexico: Subdirección de Generación, Centro de Capacitación Celaya, 1994. 647 p.
20. Operating Instructions BA 242/04: *On-Load Tap-Changer VACUTAP®AVT*. [en línea] [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com), [mascheringfabric reinhausen](http://mascheringfabric.reinhausen.com). [Consulta: 25 de marzo de 2012].
21. RIVAS TRUJILLO, Edwin. *Detección de averías en cambiadores de tomas en carga de transformadores basado en el patrón de vibraciones*. Madrid: Tesis doctoral, Universidad Carlos III, 2009. 202 p.

22. ----- . *Análisis tiempo-frecuencia de la señal de vibración de un cambiador de tomas en carga*. Madrid: Universidad Carlos III, 2009.149 p.
23. STEVENSON, William; OSUNA SUÁREZ, Jairo. *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. Segunda edición, México: McGraw-Hill, 1988. 735 p.
24. TAMMAM, Hyder; ULRICH, Scharli; KURT, Faser. *Dynamic Model of Transformer with Tap Changer Using BCTRAN-Routine and 94-Type*. University of Stuttgart. [en línea] tammam.hayder@ieh.uni-stuttgart.de. [Consulta: 10 de abril de 2012].
25. Technical Data TD 050/03: *On-load tap-changer OILTAP® M*. [en línea] www.reinhausen.com. [Consulta: 15 de febrero de 2012].
26. Technical Data TD 61: *Technical Data – Section General*. [en línea] www.reinhausen.com. [Consulta: 17 de febrero de 2012].
27. Technical Data TD 82/02: *On-Load Tap-Changer OILTAP V*. [en línea] www.reinhausen.com. [Consulta: 21 de febrero de 2012].
28. VACUTAP®VR I HD: *El cambiador de tomas bajo carga para la mayor frecuencia de conmutaciones*. [en línea] www.reinhausen.com. [Consulta: 27 de marzo de 2012].

29. Technical Digest: *On-Load Tap-Changers for Power Transformers*. [en línea] [www.reinhausen.com](http://www.reinhausen.com), Mascheringfabric Reinhausen. [Consulta: 21 de febrero de 2012].
  
30. VASUDEVAN, Krishna; RAO. *Transformer voltage control and Tap changing, Electrical Machines I*. India: Institute of Technology Madras, 1997. 71 p.



## APÉNDICE A

### Grados de IP (Protección de Interiores)

El grado IP (Protección contra Ingreso) respecto a los agentes ambientales y humanos externos a los dispositivos eléctricos se designa mediante la siguiente codificación:

IPXX

Donde XX está dado por dos números

Primera Cifra del Grado IP

1. Significa no protegido (no tiene una protección especial)
2. Protegido contra cuerpos sólidos de 50 mm de diámetro o mayores.
3. Protegido contra cuerpos sólidos de 12 mm de diámetro o mayores.
4. Protegido contra cuerpos sólidos de 2,5 mm de diámetro o mayores.
5. Protegido contra cuerpos sólidos de 1 mm de diámetro o mayores.
6. Protegido contra polvo, solo pasará el tamaño y cantidad de polvo que no daña al dispositivo.

7. Protegido en forma total respecto del polvo.

#### Segunda Cifra del Grado IP

1. Significa no protegido (no tiene una protección especial)
2. Protegido contra caída de gotas de agua “goteo” sobre el dispositivo en forma vertical
3. Protegido contra goteo en direcciones verticales e inclinadas hasta 15° de la vertical (entre 75° y 105°)
4. Protegido contra spray de agua o bien lluvia en direcciones que formen ángulo menor de 60° con la vertical (desde 30° hasta 150°)
5. Protegido contra inyecciones de agua proyectada en todas direcciones. (*Splashing Water*)
6. Protegido contra chorro de agua lanzado contra la envoltura en toda dirección no deberá tener efecto nocivo sobre el dispositivo.
7. Protegido contra golpes de mar, el agua proyectada con fuerza contra la envoltura no deberá penetrar en cantidades nocivas.
8. Protegido contra los efectos de la inmersión, sumergida en agua bajo presión ésta no deberá penetrar en cantidades nocivas.

9. Protegido contra los efectos de la inmersión prolongada, sumergida en agua durante uso prolongado, ésta no deberá penetrar en cantidades nocivas.

En ocasiones se forman cuenta con una tercera cifra

No especialmente Protegido contra impactos (definida una energía de los impactos en Joules).

Los restantes números indican la energía de los impactos en forma creciente 1, 2, 3, 4. 5, 6, 7, 8, 9.

## APÉNDICE B

### Formularios para registro de los trabajos en un OLTC

Tabla VII. **Aviso de trabajo en un transformador**

<u>Departamento Occidental, ETCEE-INDE</u>	
<b>PARA:</b> CENTRO DE OPERACIONES	
<b>1. - AVISO DE TRABAJO</b>	
1 - 1. TRABAJO A EFECTUAR:	
1 - 2. OBJETIVO:	Comprobar el estado de funcionamiento del transformador y prevenir con el mantenimiento fallas en el equipo de potencia y evitar falsos contactos.
Ej:	
1 - 3. LUGAR (ES) DE TRABAJO:	
1 - 4. DIA Y FECHA DE TRABAJO:	
1 - 5. DURACION:	
No. De Horas: _____	Horario: _____
1 - 6. RESPONSABLE DEL TRABAJO:	Nombre _____ Cargo _____
1 - 7. PERSONAL QUE REALIZARA EL TRABAJO:	
1 - 8. OBSERVACIONES:	Quien realizara las maniobras necesarias:
1 - 9. LUGAR Y FECHA:	
1 - 10. FIRMAS: De los encargados de la empresa que notifica	
_____	_____
Nombre: Cargo	Nombre   Cargo

Tabla VIII. **Solicitud de desenergización**

<b>II - SOLICITUD DE DESENERGIZACION</b>	
II - 1	AREA A DESENERGIZAR: Departamentos, Ciudades o Municipios
II - 2	DIA (S) Y FECHA (S) DESENERGIZACION:
II - 3	DURACION:
II - 4	OBSERVACIONES:
II - 5	LUGAR Y FECHA:
II - 6	FIRMAS: De los encargados de la empresa que solicita  <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>_____</p> <p>Nombre:</p> <p>Cargo:</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>_____</p> <p>Nombre:</p> <p>Cargo:</p> </div> </div>
<b>III AUTORIZACION</b>	
III - 1	AUTORIZADA PARA QUE SE DESENERGISE: <span style="float: right;">Y/O TRABAJO</span>
III - 2	AREA DE TRABAJO:
III - 3	DIA Y FECHA DE TRABAJO:
III - 4	DURACION:                    HRS.                    DE                    HRS.                    A                    HRS.
III - 5	OBSERVACIONES:
III - 6	LUGAR Y FECHA AUTORIZANTE:

Tabla IX. **Secuencia de maniobras para un mantenimiento**

**PROGRAMA DE MANIOBRAS, ETCEE-OCCIDENTE**

Subestación: _____			
Responsable: Nombre _____		Fecha: 00/00/2012	
No.	Actividad En Subestación:	Ejecutor	Hora
1	Apertura de ramales	Maniobras a distancia, ejecutadas por Cenado y Deocsa	07:00
2	Apertura de seccionadores de barra y línea ramales		07:02
3	Apertura interruptor barra general LV		07:04
4	Apertura seccionadores de barra y línea de interruptor general de la barra de LV		07:06
5	Apertura de interruptor HV entrada transformador		07:08
6	Apertura seccionadores de barra y línea interruptor general HV entrada transformador.		07:10
7	Instalación de puestas a tierra		07:12
8	Inicio de Trabajos		07:15
9	Retiro de Puestas a Tierra		15:48
10	Cierre seccionadores de barra y línea interruptor general HV entrada transformador.		15:50
11	Cierre de interruptor 69kv entrada transformador HV		15:52
12	Cierre de seccionadores de barra y línea interruptor barra general LV		15:54
13	Cierre interruptor barra general LV		15:56
14	Cierre de seccionadores de barra y línea ramales		15:58
15	Cierre de ramales		16:00

Responsable

F \_\_\_\_\_  
**Nombre**  
**Cargo**

Tabla X. **Contenido de humedad en el aceite**

**Pruebas de contenido de humedad al aceite del OLTC**

Día y fecha: \_\_\_\_\_

Subestación: \_\_\_\_\_

Transformador: \_\_\_\_\_

Tipo de Cambiador de derivaciones: \_\_\_\_\_

Temperatura a la que se realiza el muestreo: \_\_\_\_\_

Equipo utilizado para realizar la prueba: \_\_\_\_\_

Valor del contenido de humedad: \_\_\_\_\_

**Conclusiones**

**Estado del aceite (bueno o malo):** \_\_\_\_\_

**Responsable** \_\_\_\_\_  
Nombre  
Cargo

Nota: Para decir decidir si la condición del aceite es buena o mala, debe consultarse las especificaciones del fabricante

**Tabla XI. Pruebas de rigidez dieléctrica del aceite**

<b>Pruebas de rigidez dieléctrica al aceite del OLTC</b>	
Día y fecha: _____	
Subestación: _____	Transformador: _____
Tipo de Cambiador de derivaciones: _____	
Temperatura a la que se realiza el muestreo: _____	
Equipo utilizado para realizar la prueba: _____	
Rigidez de la prueba 1	_____
Rigidez de la prueba 2	_____
Rigidez de la prueba 3	_____
Rigidez de la prueba 4	_____
Rigidez de la prueba 5	_____
Rigidez de la prueba 6	_____
Rigidez de la prueba 7	_____
Promedio: _____	
<b>Estado del aceite (bueno o malo):</b> _____	
<b>Responsable</b>	_____
	Nombre
	Cargo
Nota:	El resultado final de la prueba de rigidez dieléctrica es el promedio de seis pruebas realizadas a una misma muestra de aceite, descartando la primera prueba. Para decidir si la condición del aceite es buena o mala, debe consultarse las especificaciones del fabricante.

Tabla XII. Lista de chequeo para mantenimientos de un OLTC

RELACIÓN DE ACTIVIDADES REALIZADAS EN LOS TRANSFORMADORES Y CAMBIADORES DE DERIVACIONES BAJO CARGA INSTALADOS EN LA S.E. LOS BRILLANTES				
Transformador	T1 01		Marca	ABB
Número de serie	59020		Capacidad	50 MVA
Cambiador tipo	UCGRE 360/600		Frecuencia	60 HZ
No. de serie de cambiador	7884495			
<b>MANDO A MOTOR TIPO BUE 1</b>				
Comprobación funcionamiento resistencia calefactora.			OK	
Comprobación de bloqueos eléctricos y mecánicos en ambos extremos.			OK	
Comprobación por paro de emergencia			OK	
Comprobación de número de vueltas por cambio (25 por cambio)			OK	
Sincronismo entre Mando-Ruptor-Selector			OK	
Apriete de borneras (regletas) y condiciones de las mismas			OK	
Contador de operaciones				
sirve			SI	
operaciones antes			186599	
operaciones después			186739	
Cambio de empaquetaduras			SI	
Limpieza del gabinete			SI	
Funcionamiento manual			OK	
Funcionamiento eléctrico			OK	
<b>RUPTOR O CONMUTADOR</b>				
Cambio de aceite aislante			SI	
Limpieza de la cuba			SI	
Limpieza del ruptor			SI	
Inspección de contactos fijos			SI	
requiere cambio			SI	Se hizo.
Inspección de contactos móviles			SI	
requiere cambio			SI	Se hizo.
Verificación de las resistencias de paso			SI	
valores obtenidos			8.4 ohms	
Cambio de la Silica Gel			SI	
Operación manual del ruptor			SI	
Operación eléctrica del ruptor (mando)			SI	
Corrección de fugas			SI	
Observaciones: Se sugiere relocalizar el térmico protector del motor. Se realizó pintura general y se hicieron pruebas dieléctricas, de acuerdo a lo establecido en las bases de la Licitación				
ENTREGA RELACIÓN DE ACTIVIDADES				

Tabla XIII. **Pruebas de corriente de excitación**

<b>Pruebas de corriente de excitación del transformador de potencia con OLTC</b>						
Día y fecha: _____		Campo: _____				
Subestación: _____						
Tipo de Cambiador de derivaciones: _____						
Equipo utilizado para realizar la prueba: _____						
<b>Resultados:</b>						
	<b>No.</b>	<b>TAP (OLTC)</b>	<b>V prueba</b>	<b>V salida</b>	<b>I exc</b>	<b>P prueba</b>
	1	1				
	2	2				
	3	3				
	4	4				
	5	5				
	6	6				
	7	7				
	8	8				
	9	9				
	10	10				
	11	11A				
	12	11				
	13	11B				
	14	12				
	15	13				
	16	14				
	17	15				
	18	16				
	19	17				
	20	18				
	21	19				
	22	20				
	23	21				
<b>Conclusiones</b>						
<b>Estado del Transformador (bueno o malo):</b>						
_____						
<b>Responsable</b>						
_____						
Nombre						
Cargo						
<p>Los resultados de la prueba de corriente de excitación deben compararse con los datos técnicos del transformador proporcionados por el fabricante o en caso de no existir deben compararse con datos de pruebas anteriores, los resultados de la prueba deben ser similares a estos datos</p>						
Nota:						

Tabla XIV. Pruebas de TTR

<b>Pruebas de TTR del transformador de potencia con OLTC</b>							
Día y fecha: _____		Campo: _____					
Subestación: _____							
Tipo y serie del OLTC: _____							
Equipo utilizado para realizar la prueba: _____							
Voltaje de Prueba: _____				Frecuencia: _____			
Resultados:							
TAP	V Prim. Nom.	V sec. Nom.	Relac. Nom.	V prim. Aplicado	V sec. Medido	Relación	Error
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11A							
11							
11B							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
Conclusiones							
<b>Estado del Transformador (bueno o malo):</b> _____							
<b>Responsable</b>							
_____							
Nombre							
Cargo							
<b>Nota:</b>							
IEEE Std 62-1995 indica que la tolerancia entre los resultados de la prueba de TTR y los datos de relaciones de transformación de la placa de características no deben de exceder del 0.5por ciento. En caso de no existir la placa de características la comparación se hará con datos de pruebas anteriores.							

Tabla XV. **Pruebas de resistencia de devanados**

<b>Pruebas de resistividad óhmica del transformador de potencia con OLTC</b>							
Día y fecha: _____		Campo: _____					
Subestación: _____							
Tipo y serie del OLTC: _____							
Equipo utilizado para realizar la prueba: _____							
Resultados:	No.	TAP (OLTC)	Resistencia a 20o C	Fluctuacon	Pendiente	Idc	Vdc
	1	1					
	2	2					
	3	3					
	4	4					
	5	5					
	6	6					
	7	7					
	8	8					
	9	9					
	10	10					
	11	11A					
	12	11					
	13	11B					
	14	12					
	15	13					
	16	14					
	17	15					
	18	16					
	19	17					
	20	18					
	21	19					
	22	20					
	23	21					
<b>Conclusiones</b>							
<b>Estado del Transformador (bueno o malo):</b>							
_____							
<b>Responsable</b>							
_____							
Nombre							
Cargo							
<b>Nota:</b>							
<p>Estas pruebas miden la resistencia del devanado de cada una de las derivaciones y para verificar si el OLTC conmuta sin interrupciones. Los resultados de las pruebas deben compararse con datos proporcionados por el fabricante o con resultados de pruebas anteriores y para que la prueba sea positiva, los datos deben ser similares especialmente en la pendiente de la gráfica. La fluctuación y la pendiente son muy grandes en caso de existir interrupciones durante la conmutación.</p>							

## Anuncio de prensa, por desenergización

### SUSPENSIÓN DEL SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Se informa a las Empresas Distribuidoras de Electricidad de Oriente y Occidente, que el servicio eléctrico será IRREGULAR debido a trabajos de mantenimiento en la Subestación XX del INDE afectando los siguientes lugares:

DEPARTAMENTO	LUGARES AFECTADOS	DÍA	HORA	SUBESTACIÓN Y/O LÍNEA
SAN MARCOS	PLANTA EL PORVENIR, SAN PABLO Y LUGARES CIRCUNVECINOS.	MIÉRCOLES 9 MAYO DEL 2012	DE 07:00 A 17:00 Horas	LINEA DE TRANSMISION MALACATAN-EL PORVENIR 69KV

**Estas suspensiones NO AUTORIZAN a Instituciones y/o personas ajenas a realizar trabajos en las Líneas de Transmisión del INDE Trabajamos para proporcionarle un mejor servicio por lo que agradecemos su comprensión**

### EMPRESA DE TRANSPORTE Y CONTROL DE ENERGÍA ELÉCTRICA DIVISIÓN DE RELACIONES PÚBLICAS

Cualquier información que necesite al respecto, comunicarse a División de Comunicación Corporativa del INDE a los teléfonos 2422-2099 y 2422-2095