



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

**MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE TRANSFORMADORES POR ANÁLISIS
TENDENCIAL DE RESULTADOS DE PRUEBAS DIELECTRICAS Y ACEITES EN
TRANSFORMADORES DE POTENCIA DEL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL INDE**

Oscar Humberto Aguilar Herrera

Asesorado por el Ing. Rodolfo Ernesto Rodríguez Rodríguez

Guatemala, marzo de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE TRANSFORMADORES POR ANÁLISIS
TENDENCIAL DE RESULTADOS DE PRUEBAS DIELECTRICAS Y ACEITES EN
TRANSFORMADORES DE POTENCIA DEL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL INDE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

OSCAR HUMBERTO AGUILAR HERRERA

ASESORADO POR EL ING. RODOLFO ERNESTO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MARZO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos |
| VOCAL I | Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno |
| VOCAL II | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL III | Ing. Miguel Ángel Dávila |
| 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 Olympto Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Saúl Cabezas Duran |
| EXAMINADOR | Ing. Julio Rolando Barrios Archila |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Fernando Rodas |
| 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:

**MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE TRANSFORMADORES POR ANÁLISIS
TENDENCIAL DE RESULTADOS DE PRUEBAS DIELECTRICAS Y ACEITES EN
TRANSFORMADORES DE POTENCIA DEL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL INDE**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha octubre de 2008.



Oscar Humberto Aguilar Herrera



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

FACULTAD DE INGENIERIA

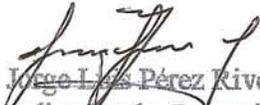
Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
"MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE TRANSFORMADORES
POR ANÁLISIS TENDENCIAL DE RESULTADOS DE PRUEBAS
DIELÉCTRICAS Y ACEITES EN TRANSFORMADORES DE
POTENCIA DEL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL INDE", del
estudiante Oscar Humberto Aguilar Herrera, que cumple con los
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
D Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
Coordinador de Potencia

JLPR/sto



Guatemala, 16 de Marzo de 2011

Ing. Jorge Pérez
Coordinador Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería

Señor Coordinador

Por este medio le informo que he asesorado el trabajo de graduación titulado: **"MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE TRANSFORMADORES POR ANALISIS TENDENCIAL DE RESULTADOS DE PRUEBAS DIELECTRICAS Y ACEITES EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA DEL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL INDE"**, desarrollado por el estudiante **Oscar Humberto Aguilar Herrera**, quien se identifica con el carne No. 2004-13128, previo a optar el título de Ingeniero Electricista.

En base a la revisión y corrección de dicho trabajo, considero que ha alcanzado los objetivos propuestos, por lo que el estudiante y el asesor, nos hacemos responsables del contenido de este trabajo.


Ing. Rodolfo Ernesto Rodríguez Rodríguez

Colegiado No. 7,016

Asesor





REF. EIME 04. 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; OSCAR HUMBERTO AGUILAR HERRERA titulado: "MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE TRANSFORMADORES POR ANÁLISIS TENDENCIAL DE RESULTADOS DE PRUEBAS DIELECTRICAS Y ACEITES EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA DEL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL INDE", procede a la autorización del mismo.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'G. Puente Romero'.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 02 DE FEBRERO 2012.



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 135.2012

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: **MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE TRANSFORMADORES POR ANÁLISIS TENDENCIAL DE RESULTADOS DE PRUEBAS DIELECTRICAS Y ACEITES EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA DEL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL INDE**, presentado por el estudiante universitario **Oscar Humberto Aguilar Herrera**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 20 de marzo de 2012.

/gdech

AGRADECIMIENTOS A

- Dios** Por darme sabiduría y fortaleza. Por dejarme alcanzar una meta más en mi vida.
- Mis padres** Oscar Santiago Aguilar Gil y Nidia Janet Herrera Alonzo, por su apoyo incondicional en los momentos más difíciles, paciencia, educación brindada.
- Mis hermanos** Miguel, Susana, Mariana y Emilio por su aprecio y su cariño.
- Familiares** Mis abuelos, tíos, primos, por su ejemplo de fuerza y dedicación, por sus invaluable consejos.
- Universidad de San Carlos de Guatemala** Por momentos inolvidables, por el conocimiento adquirido y permitirme alcanzar esta meta en mi vida.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | IX |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XIX |
| GLOSARIO | XXI |
| RESUMEN | XXIII |
| OBJETIVOS..... | XXV |
| INTRODUCCIÓN | XXVII |
| | |
| 1. TRANSFORMADOR DE POTENCIA | 1 |
| 1.1. Definición de transformador | 1 |
| 1.2. Fallas en transformadores | 1 |
| 1.2.1. Falla térmica | 1 |
| 1.2.2. Descargas parciales..... | 2 |
| 1.2.3. Arco eléctrico | 3 |
| 1.2.4. Falla externa. | 3 |
| 1.2.4.1. Esfuerzo eléctrico..... | 3 |
| 1.2.4.2. Esfuerzo mecánico..... | 3 |
| | |
| 2. PRUEBAS DIELECTRICAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA | 5 |
| 2.1. Prueba de <i>Overall</i> | 5 |
| 2.1.1. Factor de potencia | 6 |
| 2.1.2. Capacitancia | 8 |
| 2.1.3. Pruebas de <i>Overall</i> a transformadores monofásicos | 11 |
| 2.1.4. Prueba de <i>Overall</i> a transformadores trifásicos | 11 |
| 2.1.5. Prueba de <i>Overall</i> a autotransformadores | 12 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.1.6. | Análisis de resultados a prueba de <i>Overall</i> | 13 |
| 2.2. | Prueba a boquillas..... | 14 |
| 2.2.1. | Medición de C1..... | 18 |
| 2.2.2. | Medición de C2..... | 19 |
| 2.2.3. | Análisis de resultados a prueba de boquillas..... | 20 |
| 2.3. | Prueba de collar caliente | 21 |
| 2.3.1. | Análisis de resultados a prueba de collar caliente | 23 |
| 2.4. | Prueba al aceite dieléctrico | 24 |
| 2.4.1. | Análisis de resultados prueba al aceite dieléctrico | 25 |
| 2.5. | Prueba de relación de transformación..... | 26 |
| 2.5.1. | Prueba de relación de transformación a transformadores monofásicos..... | 27 |
| 2.5.2. | Prueba de relación de transformación a transformadores trifásicos. | 28 |
| 2.5.3. | Prueba de relación de transformación a autotransformadores..... | 30 |
| 2.5.4. | Análisis de resultados a prueba de relación de transformación | 30 |
| 2.6. | Prueba de corriente de excitación. | 31 |
| 2.6.1. | Prueba de corriente de excitación a transformadores monofásicos..... | 33 |
| 2.6.2. | Prueba de corriente de excitación a transformadores trifásicos | 34 |
| 2.6.3. | Prueba de corriente de excitación a autotransformadores..... | 35 |
| 2.6.4. | Análisis de resultados a prueba de corriente de excitación..... | 36 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3. | PRUEBAS AL ACEITE EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA | 39 |
| 3.1. | Cromatografía de gases | 39 |
| 3.1.1. | Origen de los gases en aceite dieléctrico..... | 39 |
| 3.1.2. | Método de <i>Dönrnenburg</i> | 41 |
| 3.1.3. | Método de <i>Rogers</i> | 42 |
| 3.1.4. | Método de <i>Duval</i> | 43 |
| 3.1.5. | Método de la IEC 60599 | 45 |
| 3.1.6. | Método de gas clave | 46 |
| 3.1.7. | Relación CO ₂ /CO | 46 |
| 3.1.8. | Relación O ₂ /N ₂ | 47 |
| 3.2. | Pruebas físicas, químicas y eléctricas al aceite | 47 |
| 3.2.1. | Pruebas físicas al aceite | 48 |
| 3.2.1.1. | Viscosidad del aceite..... | 48 |
| 3.2.1.2. | Aspecto visual | 48 |
| 3.2.1.3. | Color ASTM..... | 49 |
| 3.2.1.4. | Tensión interfacial | 50 |
| 3.2.2. | Pruebas químicas al aceite | 51 |
| 3.2.2.1. | Número de neutralización | 51 |
| 3.2.2.2. | Contenido de agua | 52 |
| 3.2.3. | Pruebas eléctricas al aceite | 53 |
| 3.2.3.1. | Rigidez dieléctrica | 53 |
| 3.2.3.2. | Factor de potencia..... | 55 |
| 4. | PRUEBAS DIELECTRICAS A LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA DEL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL INDE | 57 |
| 4.1. | Pruebas dieléctricas a transformadores de potencia de la subestación Escuintla 1 | 57 |
| 4.1.1. | Transformador fase R, ID-A01002 | 57 |
| 4.1.2. | Transformador fase S, ID-A01003 | 61 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.1.3. | Transformador fase T, ID-A01001 | 63 |
| 4.2. | Pruebas dieléctricas a transformadores de potencia de la subestación Guatemala Este..... | 65 |
| 4.2.1. | Transformador fase R, ID-1111881 | 65 |
| 4.2.2. | Transformador fase S, ID-1111882 | 66 |
| 4.2.3. | Transformador fase T, ID-1111883..... | 68 |
| 4.3. | Pruebas dieléctricas a transformadores de potencia de la subestación Guatemala Norte | 69 |
| 4.3.1. | Transformador banco 2, fase R, ID-217210-6 | 69 |
| 4.3.2. | Transformador banco 2, fase S, ID-217210-4 | 75 |
| 4.3.3. | Transformador banco 2, fase T, ID-217210-2..... | 78 |
| 4.3.4. | Transformador banco 3, fase R, ID-217210-7 | 82 |
| 4.3.5. | Transformador banco 3, fase S, ID-217210-1 | 85 |
| 4.3.6. | Transformador banco 3, fase T, ID-217210-3..... | 89 |
| 4.4. | Pruebas dieléctricas a transformadores de potencia de la subestación Guatemala Sur | 90 |
| 4.4.1. | Transformador banco 1, fase R, ID-61699 | 90 |
| 4.4.2. | Transformador banco 1, fase S, ID-61701..... | 92 |
| 4.4.3. | Transformador banco 1, fase T, ID-61702..... | 95 |
| 4.4.4. | Transformador banco 2, fase R, ID-61698 | 98 |
| 4.4.5. | Transformador banco 2, fase S, ID-61696..... | 100 |
| 4.4.6. | Transformador banco 2, fase T, ID-61697..... | 103 |
| 4.4.7. | Transformador banco 3, fase R, ID-217412-02..... | 105 |
| 4.4.8. | Transformador banco 3, fase S, ID-217412-01 | 109 |
| 4.4.9. | Transformador banco 3, fase T, ID-217412-03..... | 112 |
| 4.4.10. | Transformador trifásico banco 4, ID-C13929..... | 116 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 5. | PRUEBAS AL ACEITE A LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA DEL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL INDE | 121 |
| 5.1. | Prueba al aceite de los transformadores de potencia de la subestación Escuintla 1 | 121 |
| 5.1.1. | Transformador fase R, ID-A01002 | 121 |
| 5.1.2. | Transformador fase S, ID-A01003 | 123 |
| 5.1.3. | Transformador fase T, ID-A01001..... | 124 |
| 5.2. | Prueba al aceite de los transformadores de potencia de la subestación Guatemala Este | 125 |
| 5.2.1. | Transformador fase R, ID-1111881..... | 125 |
| 5.2.2. | Transformador fase S, ID-1111882..... | 127 |
| 5.2.3. | Transformador fase T, ID-1111883..... | 128 |
| 5.3. | Prueba al aceite de los transformadores de potencia de la subestación Guatemala Norte | 129 |
| 5.3.1. | Transformador banco 2, fase R, ID-217210-6..... | 130 |
| 5.3.2. | Transformador banco 2, fase S, ID-217210-4..... | 131 |
| 5.3.3. | Transformador banco 2, fase T, ID-217210-2..... | 132 |
| 5.3.4. | Transformador banco 3, fase R, ID-217210-7..... | 134 |
| 5.3.5. | Transformador banco 3, fase S, ID-217210-1..... | 135 |
| 5.3.6. | Transformador banco 3, fase T, ID-217210-3..... | 136 |
| 5.4. | Prueba al aceite de los transformadores de potencia de la subestación Guatemala Sur..... | 138 |
| 5.4.1. | Transformador banco 1, fase R, ID-61699..... | 138 |
| 5.4.2. | Transformador banco 1, fase S, ID-61701 | 139 |
| 5.4.3. | Transformador banco 1, fase T, ID-61702 | 141 |
| 5.4.4. | Transformador banco 2, fase R, ID-61698..... | 142 |
| 5.4.5. | Transformador banco 2, fase S, ID-61696 | 143 |
| 5.4.6. | Transformador banco 2, fase T, ID-61697 | 145 |
| 5.4.7. | Transformador banco 3, fase R, ID-217412-02..... | 146 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 5.4.8. | Transformador banco 3, fase S, ID-217412-01 | 147 |
| 5.4.9. | Transformador banco 3, fase T, ID-217412-03..... | 149 |
| 5.4.10. | Transformador trifásico banco 4, ID-C13929..... | 150 |
| 6. | ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PRUEBAS A TRANSFORMADORES DE POTENCIA DEL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL INDE..... | 153 |
| 6.1. | Análisis de pruebas a transformadores de potencia en subestación Escuintla 1 | 153 |
| 6.1.1. | Transformador fase R, ID-A01002..... | 154 |
| 6.1.2. | Transformador fase S, ID-A01003..... | 155 |
| 6.1.3. | Transformador fase T, ID-A01001 | 157 |
| 6.2. | Análisis de pruebas a transformadores de potencia en subestación Guatemala Este..... | 158 |
| 6.2.1. | Transformador fase R, ID-1111881 | 158 |
| 6.2.2. | Transformador fase S, ID-1111882 | 160 |
| 6.2.3. | Transformador fase T, ID-1111883..... | 161 |
| 6.3. | Análisis de pruebas a transformadores de potencia en subestación Guatemala Norte. | 162 |
| 6.3.1. | Transformador banco 2, fase R, ID-217210-6 | 163 |
| 6.3.2. | Transformador banco 2, fase S, ID-217210-4 | 164 |
| 6.3.3. | Transformador banco 2, fase T, ID-217210-2..... | 166 |
| 6.3.4. | Transformador banco 3, fase R, ID-217210-7 | 167 |
| 6.3.5. | Transformador banco 3, fase S, ID-217210-1 | 169 |
| 6.3.6. | Transformador banco 3, fase T, ID-217210-3..... | 170 |
| 6.4. | Análisis de pruebas a transformadores de potencia en subestación Guatemala Sur | 172 |
| 6.4.1. | Transformador banco 1, fase R, ID-61699 | 172 |
| 6.4.2. | Transformador banco 1, fase S, ID-61701..... | 174 |
| 6.4.3. | Transformador banco 1, fase T, ID-61702..... | 175 |

| | | |
|----------------------|--|-----|
| 6.4.4. | Transformador banco 2, fase R, ID-61698..... | 176 |
| 6.4.5. | Transformador banco 2, fase S, ID-61696..... | 178 |
| 6.4.6. | Transformador banco 2, fase T, ID-61697..... | 179 |
| 6.4.7. | Transformador banco 3, fase R, ID-217412-02..... | 181 |
| 6.4.8. | Transformador banco 3, fase S, ID-217412-01..... | 182 |
| 6.4.9. | Transformador banco 3, fase T, ID-217412-03..... | 184 |
| 6.4.10. | Transformador trifásico banco 4, ID-C13929..... | 185 |
| CONCLUSIONES..... | | 187 |
| RECOMENDACIONES..... | | 189 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 191 |
| ANEXO..... | | 193 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Diagrama fasorial, prueba de <i>Overall</i> | 6 |
| 2. | Conexión prueba de <i>Overall</i> , transformador monofásico | 11 |
| 3. | Conexión prueba de <i>Overall</i> , transformador trifásico | 12 |
| 4. | Conexión prueba de <i>Overall</i> , autotransformador | 13 |
| 5. | Diagrama esquemático, boquilla capacitiva | 16 |
| 6. | Diagrama equivalente, boquilla capacitiva | 17 |
| 7. | Conexión, medición de C_1 | 19 |
| 8. | Conexión, medición de C_2 | 20 |
| 9. | Conexión prueba de collar caliente | 23 |
| 10. | Celda de aceite, medición de factor de potencia | 24 |
| 11. | Conexión, prueba relación de transformación, transformador monofásico | 28 |
| 12. | Conexión, prueba relación de transformación, transformador trifásico D/y | 29 |
| 13. | Conexión, prueba relación de transformación, transformador trifásico Y/yd | 29 |
| 14. | Conexión, prueba relación de transformación, autotransformador | 30 |
| 15. | Circuito equivalente de transformador | 31 |
| 16. | Conexión, prueba corriente de excitación, transformador monofásico ... | 34 |
| 17. | Conexión, prueba corriente de excitación, transformador trifásico D/d ... | 35 |
| 18. | Conexión, prueba corriente de excitación, transformador trifásico Y/y/d | 35 |
| 19. | Conexión, prueba corriente de excitación, autotransformador | 36 |

TABLAS

| | | |
|--------|---|----|
| I. | Límite de concentración de gases, método de Dörrnenburg | 41 |
| II. | Diagnóstico de falla, método Dörrnenburg | 42 |
| III. | Diagnóstico de falla, método de <i>Rogers</i> | 43 |
| IV. | Diagnóstico de falla, método de <i>Duval</i> | 44 |
| V. | Diagnóstico de falla, método IEC 605999..... | 45 |
| VI. | Color ASTM máximo en transformadores..... | 49 |
| VII. | Tensión interfacial mínima en transformadores..... | 50 |
| VIII. | Número de neutralización máxima en transformadores..... | 52 |
| IX. | Humedad máxima en transformadores | 53 |
| X. | Rigidez dieléctrica..... | 54 |
| XI. | Factor de potencia | 55 |
| XII. | Prueba de <i>Overall</i> , fase R, Escuintla 1 | 57 |
| XIII. | Prueba a las boquillas, fase R, Escuintla 1 | 58 |
| XIV. | Prueba de collar caliente, fase R, Escuintla 1..... | 58 |
| XV. | Prueba al aceite, fase R, Escuintla 1..... | 59 |
| XVI. | Prueba de relación de transformación, fase R, Escuintla 1 | 59 |
| XVII. | Prueba de corriente de excitación, fase R, Escuintla 1 | 60 |
| XVIII. | Prueba de <i>Overall</i> , fase S, Escuintla 1..... | 61 |
| XIX. | Prueba a las boquillas, fase S, Escuintla 1..... | 61 |
| XX. | Prueba al aceite, fase S, Escuintla 1 | 62 |
| XXI. | Prueba de relación de transformación, fase S, Escuintla 1 | 63 |
| XXII. | Prueba de <i>Overall</i> , fase T, Escuintla 1 | 63 |
| XXIII. | Prueba al aceite, fase T, Escuintla 1 | 64 |
| XXIV. | Prueba de relación de transformación, fase T, Escuintla 1 | 64 |
| XXV. | Prueba de <i>Overall</i> , fase R, Guatemala Este | 65 |
| XXVI. | Prueba de <i>Overall</i> , fase S, Guatemala Este..... | 66 |
| XXVII. | Prueba a las boquillas, fase S, Guatemala Este | 67 |

| | | |
|----------|---|----|
| XXVIII. | Prueba de relación de transformación, fase S, Guatemala Este | 67 |
| XXIX. | Prueba de corriente de excitación, fase S, Guatemala Este | 68 |
| XXX. | Prueba de <i>Overall</i> , fase T, Guatemala Este..... | 68 |
| XXXI. | Prueba de <i>Overall</i> , fase 2/R, Guatemala Norte | 70 |
| XXXII. | Prueba a las boquillas, fase 2/R, Guatemala Norte | 71 |
| XXXIII. | Pruebas de collar caliente, fase 2/R, Guatemala Norte | 72 |
| XXXIV. | Prueba al aceite, fase 2/R, Guatemala Norte | 73 |
| XXXV. | Prueba de relación de transformación, fase 2/R, Guatemala Norte | 74 |
| XXXVI. | Pruebas de corriente de excitación, fase 2/R, Guatemala Norte | 74 |
| XXXVII. | Prueba de <i>Overall</i> , fase 2/S, Guatemala Norte | 75 |
| XXXVIII. | Prueba a las boquillas, fase 2/S, Guatemala Norte | 76 |
| XXXIX. | Prueba de collar caliente, fase 2/S, Guatemala Norte | 76 |
| XL. | Prueba de relación de transformación, fase 2/S, Guatemala Norte | 77 |
| XLI. | Prueba de corriente de excitación, fase 2/S, Guatemala Norte | 78 |
| XLII. | Prueba de <i>Overall</i> , fase 2/T, Guatemala Norte | 78 |
| XLIII. | Prueba a las boquillas, fase 2/T, Guatemala Norte | 79 |
| XLIV. | Prueba de collar caliente, fase 2/T, Guatemala Norte..... | 80 |
| XLV. | Prueba al aceite, fase 2/T, Guatemala Norte..... | 80 |
| XLVI. | Prueba de relación de transformación, Fase 2/T, Guatemala Norte | 81 |
| XLVII. | Prueba de corriente de excitación, fase 2/T, Guatemala Norte | 81 |
| XLVIII. | Prueba de <i>Overall</i> , fase 3/R, Guatemala Norte | 82 |
| XLIX. | Prueba a las boquillas, fase 3/R, Guatemala Norte | 83 |
| L. | Prueba de collar caliente, fase 3/R, Guatemala Norte | 83 |
| LI. | Prueba de aceite, fase 3/R, Guatemala Norte | 84 |

| | | |
|---------|---|----|
| LII. | Prueba de relación de transformación, fase 3/R, Guatemala Norte | 84 |
| LIII. | Prueba de corriente de excitación, fase 3/R, Guatemala Norte | 85 |
| LIV. | Prueba de <i>Overall</i> , fase 3/S, Guatemala Norte | 86 |
| LV. | Prueba a las boquillas, fase 3/S, Guatemala Norte | 86 |
| LVI. | Prueba al aceite, fase 3/S, Guatemala Norte | 87 |
| LVII. | Prueba de relación de transformación, fase 3/S, Guatemala Norte | 88 |
| LVIII. | Prueba de corriente de excitación, fase 3/S, Guatemala Norte | 88 |
| LIX. | Prueba de <i>Overall</i> , fase 3/T, Guatemala Norte..... | 89 |
| LX. | Prueba de relación de transformación, fase 3/T, Guatemala Norte | 89 |
| LXI. | Prueba de <i>Overall</i> , fase 1/R, Guatemala Sur..... | 90 |
| LXII. | Prueba de collar caliente, fase 1/R, Guatemala Sur | 91 |
| LXIII. | Prueba de relación de transformación, fase 1/R, Guatemala Sur | 91 |
| LXIV. | Prueba de corriente de excitación, fase 1/R, Guatemala Sur | 92 |
| LXV. | Prueba de <i>Overall</i> , fase 1/R, Guatemala Sur..... | 93 |
| LXVI. | Prueba de collar caliente, fase 1/R, Guatemala Sur | 93 |
| LXVII. | Pruebas de relación de transformación, fase 1/R, Guatemala Sur..... | 94 |
| LXVIII. | Prueba de corriente de excitación, fase 1/R, Guatemala Sur | 95 |
| LXIX. | Prueba de <i>Overall</i> , fase 1/T, Guatemala Sur | 95 |
| LXX. | Prueba de collar caliente, fase 1/T, Guatemala Sur | 96 |
| LXXI. | Prueba de relación de transformación, fase 1/T, Guatemala Sur | 97 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| LXXII. | Prueba de corriente de excitación, fase 1/T, Guatemala Sur..... | 97 |
| LXXIII. | Prueba de <i>Overall</i> , fase 2/R, Guatemala Sur..... | 98 |
| LXXIV. | Prueba de collar caliente, fase 2/R, Guatemala Sur..... | 99 |
| LXXV. | Prueba de relación de transformación, fase 2/R, Guatemala Sur | 99 |
| LXXVI. | Prueba de corriente de excitación, fase 2/R, Guatemala Sur | 100 |
| LXXVII. | Prueba de <i>Overall</i> , fase 2/S, Guatemala Sur..... | 101 |
| LXXVIII. | Pruebas de collar caliente, fase 2/S, Guatemala Sur..... | 102 |
| LXXIX. | Prueba de relación de transformación, fase 2/S, Guatemala Sur..... | 102 |
| LXXX. | Prueba de corriente de excitación, fase 2/S, Guatemala Sur | 103 |
| LXXXI. | Prueba de <i>Overall</i> , fase 2/T, Guatemala Sur..... | 104 |
| LXXXII. | Prueba de relación de transformación, fase 2/T, Guatemala Sur..... | 104 |
| LXXXIII. | Prueba de corriente de excitación, fase 2/T, Guatemala Sur..... | 105 |
| LXXXIV. | Prueba de <i>Overall</i> , fase 3/R, Guatemala Sur..... | 106 |
| LXXXV. | Prueba de boquillas, fase 3/R, Guatemala Sur | 107 |
| LXXXVI. | Pruebas de relación de transformación, fase 3/R, Guatemala Sur | 108 |
| LXXXVII. | Prueba de corriente de excitación, fase 3/R, Guatemala Sur | 108 |
| LXXXVIII. | Pruebas de <i>Overall</i> , fase 3/S, Guatemala Sur..... | 109 |
| LXXXIX. | Prueba de boquillas, fase 3/S, Guatemala Sur..... | 110 |
| XC. | Prueba de collar caliente, fase 3/S, Guatemala Sur..... | 111 |
| XCI. | Prueba de relación de transformación, fase 3/S, Guatemala Sur..... | 111 |
| XCII. | Prueba de corriente de excitación, fase 3/S, Guatemala Sur | 112 |
| XCIII. | Prueba de <i>Overall</i> , fase 3/T, Guatemala Sur..... | 113 |
| XCIV. | Prueba a las boquillas, fase 3/T, Guatemala Sur..... | 114 |
| XCV. | Prueba de collar caliente, fase 3/T, Guatemala Sur | 115 |

| | | |
|---------|--|-----|
| XCVI. | Prueba de relación de transformación fase 3/T, Guatemala Sur..... | 115 |
| XCVII. | Prueba de corriente de excitación, fase 3/T, Guatemala Sur..... | 116 |
| XCVIII. | Prueba de <i>Overall</i> , banco 4, Guatemala Sur | 116 |
| XCIX. | Prueba a las boquillas, banco 4, Guatemala Sur | 117 |
| C. | Prueba de relación de transformación, banco 4, Guatemala Sur..... | 118 |
| CI. | Prueba de corriente de excitación, banco 4, Guatemala Sur | 119 |
| CII. | Gases disueltos, fase R, Escuintla 1 | 122 |
| CIII. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase R, Escuintla 1 | 122 |
| CIV. | Gases disueltos, fase S, Escuintla 1 | 123 |
| CV. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase S, Escuintla 1 | 124 |
| CVI. | Gases disueltos, fase T, Escuintla 1..... | 124 |
| CVII. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase T, Escuintla 1 | 125 |
| CVIII. | Gases disueltos, fase R, Guatemala Este..... | 126 |
| CIX. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase R, Guatemala Este | 126 |
| CX. | Gases disueltos, fase S, Guatemala Este | 127 |
| CXI. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase S, Guatemala Este | 128 |
| CXII. | Gases disueltos, fase T, Guatemala Este..... | 128 |
| CXIII. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase T, Guatemala Este | 129 |
| CXIV. | Gases disueltos, fase 2/R, Guatemala Norte..... | 130 |
| CXV. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 2/R, Guatemala Norte | 131 |
| CXVI. | Gases disueltos, fase 2/S, Guatemala Norte | 131 |
| CXVII. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 2/S, Guatemala Norte | 132 |

| | | |
|----------|---|-----|
| CXVIII. | Gases disueltos, fase 2/T, Guatemala Norte | 133 |
| CXIX. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 2/T, Guatemala Norte | 133 |
| CXX. | Gases disueltos, fase 3/R, Guatemala Norte..... | 134 |
| CXXI. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 3/R, Guatemala Norte | 135 |
| CXXII. | Gases disueltos, fase 3/S, Guatemala Norte | 135 |
| CXXIII. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 3/S, Guatemala Norte | 136 |
| CXXIV. | Gases disueltos, fase 3/T, Guatemala Norte | 137 |
| CXXV. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 3/T, Guatemala, Norte | 137 |
| CXXVI. | Gases disueltos, fase 1/R, Guatemala Sur | 138 |
| CXXVII. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 1/R, Guatemala Sur..... | 139 |
| CXXVIII. | Gases disueltos, fase 1/S, Guatemala Sur..... | 140 |
| CXXIX. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 1/S, Guatemala Sur..... | 140 |
| CXXX. | Gases disueltos, fase 1/T, Guatemala Sur..... | 141 |
| CXXXI. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 1/T, Guatemala Sur..... | 142 |
| CXXXII. | Gases disueltos, fase 2/R, Guatemala Sur | 142 |
| CXXXIII. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 2/R, Guatemala Sur..... | 143 |
| CXXXIV. | Gases disueltos, fase 2/S, Guatemala Sur..... | 144 |
| CXXXV. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 2/S, Guatemala Sur..... | 144 |
| CXXXVI. | Gases disueltos, fase 2/T, Guatemala Sur..... | 145 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| CXXXVII. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 2/T, Guatemala Sur..... | 146 |
| CXXXVIII. | Gases disueltos, fase 3/R, Guatemala Sur..... | 146 |
| CXXXIX. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 3/R, Guatemala Sur..... | 147 |
| CXL. | Gases disueltos, fase 3/S, Guatemala Sur..... | 148 |
| CXLI. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 3/S, Guatemala Sur..... | 148 |
| CXLII. | Gases disueltos, fase 3/T, Guatemala Sur..... | 149 |
| CXLIII. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 3/T, Guatemala Sur..... | 150 |
| CXLIV. | Gases disueltos, banco 4, Guatemala Sur..... | 150 |
| CXLV. | Pruebas físicas, químicas, eléctricas, banco 4, Guatemala Sur..... | 151 |
| CXLVI. | Análisis gases disueltos, fase R, Escuintla 1..... | 154 |
| CXLVII. | Análisis gases disueltos, fase S, Escuintla 1..... | 156 |
| CXLVIII. | Análisis gases disueltos, fase T, Escuintla 1..... | 157 |
| CXLIX. | Análisis gases disueltos, fase R, Guatemala Este..... | 159 |
| CL. | Análisis gases disueltos, fase S, Guatemala Este..... | 160 |
| CLI. | Análisis gases disueltos, fase T, Guatemala Este..... | 161 |
| CLII. | Análisis gases disueltos, fase 2/R, Guatemala Norte..... | 163 |
| CLIII. | Análisis gases disueltos, fase 2/S, Guatemala Norte..... | 165 |
| CLIV. | Análisis gases disueltos, fase 2/T, Guatemala Norte..... | 166 |
| CLV. | Análisis gases disueltos, fase 3/R, Guatemala Norte..... | 168 |
| CLVI. | Análisis gases disueltos, fase 3/S, Guatemala Norte..... | 169 |
| CLVII. | Análisis gases disueltos, fase 3/T, Guatemala Norte..... | 171 |
| CLVIII. | Análisis gases disueltos, fase 1/R, Guatemala Sur..... | 173 |
| CLIX. | Análisis gases disueltos, fase 1/S, Guatemala Sur..... | 174 |
| CLX. | Análisis gases disueltos, fase 1/T, Guatemala Sur..... | 175 |

| | | |
|---------|---|-----|
| CLXI. | Análisis gases disueltos, fase 2/R, Guatemala Sur | 177 |
| CLXII. | Análisis gases disueltos, fase 2/S, Guatemala Sur..... | 178 |
| CLXIII. | Análisis gases disueltos, fase 2/T, Guatemala Sur..... | 180 |
| CLXIV. | Análisis gases disueltos, fase 3/R, Guatemala Sur | 181 |
| CLXV. | Análisis gases disueltos, fase 3/S, Guatemala Sur..... | 183 |
| CLXVI. | Análisis gases disueltos, fase 3/T, Guatemala Sur..... | 184 |
| CLXVII. | Análisis gases disueltos, banco 4, Guatemala Sur | 185 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|-----------------------------------|---|
| C₂H₂ | Acetileno |
| A | Amperio |
| α | Ángulo entre voltaje aplicado y corriente eléctrica |
| Ar | Área de placas de un capacitor |
| H_n | Boquilla de conexión del transformador, primario |
| X_n | Boquilla de conexión del transformador, secundario |
| Y_n | Boquilla de conexión del transformador, terciario |
| LH | Cable de conexión de alto voltaje de equipo M4000 |
| LV | Cable de conexión de bajo voltaje de equipo M4000 |
| C | Capacitancia |
| C₁ | Capacitancia equivalente entre conductor central y tierra |
| I_c | Corriente de fuga de aislamiento |
| I_R | Corriente de pérdida en aislamiento |
| Tol | Diferencia relativa entre valor teórico y medido |
| CO₂ | Dióxido de carbono |
| d | Distancia entre placas de un capacitor |
| C₂H₆ | Etano |
| C₂H₄ | Etileno |
| Fp | Factor de potencia |
| Hz | Hertz |
| H₂ | Hidrógeno |
| KOH | Hidróxido de potasio |
| C_{HL} | Medición efectiva entre devanado de alta y baja |

| | |
|-----------------------|--|
| C_{HT} | Medición efectiva entre devanado de alta y terciario |
| C_H | Medición efectiva entre devanado de alta y tierra |
| C_{LT} | Medición efectiva entre devanado de baja y terciario |
| C_L | Medición efectiva entre devanado de baja y tierra |
| CH₄ | Metano |
| CO | Monóxido de carbono |
| N₁ | Número de vueltas en devanado primario |
| N₂ | Número de vueltas en devanado secundario |
| ε_r | Permitividad del medio |
| % | Porcentaje |
| jX | Reactancia |
| RTT | Relación de transformación |
| R | Resistencia |
| VA | Volt-Amperio |
| V | Voltio |

GLOSARIO

| | |
|-----------------------------|--|
| Aceite Dieléctrico | Aceite utilizado como aislante y refrigerante en transformadores de potencia, de potencial y transformadores de corriente, además posee una alta resistencia a la oxidación. |
| ASTM | Sociedad Americana para Pruebas y Materiales. (ASTM, por sus siglas en idioma inglés, <i>American Society for Testing and Materials</i>). |
| Boquilla | Punto de conexión externo del transformador. |
| Dieléctrico | Se denominan dieléctricos a los materiales que no conducen la electricidad, por lo que son utilizados como aislantes eléctricos. |
| <i>Doble Company</i> | Empresa fabricante de equipo de prueba M4000. |
| IEC | La comisión Electrotécnica Internacional. (IEC, por sus siglas en idioma inglés, <i>International Electrotechnical Commission</i>). |
| INDE | Instituto Nacional de Electrificación. |

| | |
|----------------------------|--|
| ETCEE | Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica. |
| Monofásico | Sistema eléctrico constituido por una de las fases de un sistema trifásico. |
| M4000 | Equipo utilizado para la realización de pruebas dieléctricas a transformadores de potencia. |
| <i>Overall</i> | Prueba dieléctrica en el cual se analiza la totalidad del aislamiento de un transformador. |
| Rigidez Dieléctrica | Valor límite de la intensidad de campo eléctrico en el cual un material pierde su propiedad aisladora. |
| Trifásico | Sistema eléctrico formado por tres fases eléctricas separadas por 120 grados eléctricos. |

RESUMEN

Los transformadores son componentes de suma importancia en los sistemas de potencia actuales, sin los cambios en el nivel de voltaje sería imposible el transporte de grandes bloques de energía eléctrica desde los generadores hasta los grandes centros de consumo, separados por lo general a kilómetros de distancia unos de otros.

En el capítulo uno, muestra los tipos más comunes de falla en un transformador, desde la elevación de temperatura provocada por sobrecarga en el transformador hasta arcos de alta intensidad en el interior del transformador y los posibles daños en el sistema de aislamiento en el transformador.

En el capítulo dos, se describen las pruebas dieléctricas realizadas a los transformadores, estas pruebas son realizadas con el equipo M4000 de *Doble Company*, pruebas efectuadas por el personal capacitado del Departamento de Pruebas del INDE. Las pruebas que se presentan fueron realizadas en su totalidad por personal del INDE, entre 1998 hasta el 2008.

Las pruebas dieléctricas efectuadas son: prueba de relación de transformación, con esta se examina el estado del cambiador de taps del transformador; corriente de excitación, se determina el estado del núcleo del transformador; factor de potencia al aceite dieléctrico, el estado del aceite; medición de C1, C2 y collar caliente, determinan el estado del aislamiento interno de las boquillas del transformador; y finalmente la prueba de *Overall*, prueba que determina el estado general del sistema de aislamiento del transformador.

La limitante en las pruebas dieléctricas radica en que para la realización de las mismas, el equipo a prueba debe ser completamente desconectado del sistema.

En el capítulo tres, se presentan las pruebas al aceite dieléctrico, la cromatografía de gases, en este apartado se presenta la generación de gases en el interior de un transformador, y los diferentes métodos de análisis de gases disueltos en el transformador; finalmente se presentan las pruebas físicas, químicas y eléctricas en el aceite.

Las pruebas al aceite tienen la ventaja que es posible realizarlas con el transformador energizado, ya que únicamente es necesaria tomar una muestra significativa del aceite del transformador, estas pruebas son efectuadas por empresas contratadas por el INDE, mismas que presentan los resultados de estas pruebas para su respectivo análisis.

En el capítulo cuatro y cinco, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas y al aceite respectivamente, los resultados son ordenados en tablas. Es importante mencionar que los resultados que aquí se presentan son de pruebas realizadas entre los años 1998 hasta el año 2008.

En el capítulo seis, se realiza un análisis del estado del transformador en función de los resultados obtenidos tanto en las pruebas dieléctricas, como en las pruebas al aceite del transformador. Es importante mencionar que el análisis realizado no depende únicamente del último resultado, depende también del historial de resultados obtenidos a lo largo de la vida del transformador, ahí radica la importancia de las pruebas periódicas a los equipos.

OBJETIVOS

General

Dar un diagnóstico del estado de los transformadores de potencia del departamento central del INDE, mediante el análisis tendencial de resultados de pruebas dieléctricas y aceite.

Específicos

1. Ordenar los resultados obtenidos en las diferentes pruebas al transformador, tanto las pruebas dieléctricas y al aceite para su fácil análisis y facilitar la detección de posibles fallas en los transformadores de potencia.
2. Conocer los diferentes tipos de pruebas dieléctricas y al aceite realizados a los transformadores de potencia.
3. Realizar un análisis tendencial con los resultados de las pruebas dieléctricas.
4. Analizar los resultados obtenidos en las pruebas al aceite por medio de los diferentes métodos que serán presentados.

5. Por medio de los análisis realizar planes de mantenimiento, con el fin de evitar salidas de línea no necesarias, tanto programadas como no programadas y dar un factor de servicio mayor del transformador.

INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia son los equipos eléctricos más eficientes y con menos desgaste en un sistema de potencia, ya que para su funcionamiento no necesitan partes móviles como en el caso de los generadores, interruptores, etc. Sin embargo, en el momento en que el aislamiento sólido de un transformador se empieza a degradar no hay forma de regenerar dicho aislamiento, solo se puede detener la degradación.

Las pruebas dieléctricas y al aceite sirven para determinar el estado del transformador y poder determinar con anticipación si su sistema de aislamiento está propenso a sufrir degradación, y en el caso de los transformadores que ya presentan una degradación o daño en su aislamiento poder determinar las causas y corregirlas para que no siga empeorando el estado del aislamiento del transformador.

Las pruebas a los transformadores deben formar parte de un plan de mantenimiento continuo para lograr que la vida útil de los transformadores sea más larga, para recuperar el dinero invertido, y para mantener una continuidad en el servicio.

1. TRANSFORMADORES DE POTENCIA

1.1. Definición de transformador de potencia

El transformador es un equipo eléctrico que funciona por inducción electromagnética, su función es elevar el nivel de voltaje en un sistema de potencia para su transmisión a las subestaciones, en las subestaciones disminuir el voltaje a niveles de distribución hacia los usuarios.

1.2. Fallas en transformadores

El transformador es uno de los equipos con mayor eficiencia y con menos desgaste físico en un sistema de potencia, esto debido a que en operación normal no cuenta con partes en movimiento que creen fricción. Sin embargo, no están libres de fallas, tanto internas como fallas externas al transformador. Se describen las fallas más comunes en transformadores de potencia, falla térmica, descarga parcial, arco eléctrico, fallas externas.

1.2.1. Falla térmica

La falla térmica consiste en la elevación de temperatura interna en el transformador, puede ser como resultado de:

- Sobrecargas prolongadas al transformador, esto es relativo ya que el transformador puede trabajar arriba de su capacidad nominal siempre y cuando su capacidad térmica no sea sobrepasada, de no cumplir con esto se estará deteriorando la vida útil del transformador.

- Deficiencia en el los sistemas de enfriamiento del transformador, falla de los moto ventiladores, bombas auxiliares, o deficiencia en los radiadores del transformador. Las fallas en estos equipos provocarían que el calor generado en los devanados no sea correctamente irradiado por el aceite hacia el exterior.
- Fallas exteriores al transformador: alto voltaje en las boquillas del transformador, con valores arriba de la saturación del núcleo; alimentación a voltaje menor, pero con una frecuencia menor, estas fallas se caracterizan por elevación de temperatura en el núcleo del transformador.

Las condiciones anteriores se caracterizan por una elevación de temperatura que resulta en una degradación irreversible del aislamiento sólido del transformador.

Un aislamiento degradado es más propenso a fallas más serias como es el caso de descargas parciales y arcos eléctricos.

1.2.2. Descarga parcial

La descarga parcial es una falla eléctrica producida cuando el voltaje es lo suficientemente alto para que el espacio alrededor de las espiras del transformador se cargue eléctricamente ionizante el medio en el que se encuentre, al ocurrir esto se dan pequeñas descargas eléctricas.

Generalmente las descargas parciales son de pequeña magnitud. Sin embargo, causan un deterioro progresivo del aislamiento sólido, provocando que el transformador sea propenso a una falla severa en el futuro.

1.2.3. Arco eléctrico

Estas son descargas de mayor intensidad que las descargas parciales, se dan entre espiras de un mismo devanado, o entre devanados en los casos más críticos, se dan cuando el aislamiento sólido entre espiras fue deteriorado.

1.2.4. Falla externa

Estas afectan al transformador debido a los esfuerzos mecánicos y eléctricos al que son sometidos los transformadores.

1.2.4.1. Esfuerzos eléctricos

Estos se dan por operación de equipos de protección del sistema, como en el caso de apertura o recierres de interruptores, operación de apartarrayos, disparo de unidades generadoras, en todos estos casos por operación dentro del sistema de potencia en el cual están conectados los transformadores.

Se da también el caso de operaciones externas al sistema principalmente por descargas electro atmosféricas, y en menor caso por tormentas solares.

1.2.4.2. Esfuerzos mecánicos

Producidas por cortocircuitos entre las fases del sistema de potencia, la gravedad de la falla sobre el transformador dependerá de la distancia a la cual se encuentre el transformador y la fuente de alimentación de la falla.

Los esfuerzos a los que el transformador son del tipo radial y axial, dando el caso que los esfuerzos sean de compresión o tensión sobre los devanados del transformador, la magnitud del esfuerzo está directamente relacionada con la magnitud de la corriente eléctrica que circule por el transformador durante la falla.

Las fallas térmicas, descargas parciales y arcos eléctricos, se caracterizan por el deterioro que provocan al aislamiento del transformador, tanto sólido como líquido. En el caso del aislamiento sólido provoca que el papel se cristalice con el paso del tiempo volviéndolo más rígido y más propenso a posibles rajaduras por esfuerzos mecánicos a consecuencia de fallas externas.

2. PRUEBAS DIELECTRICAS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Las siguientes pruebas al sistema de aislamiento de un transformado son las pruebas estándar. Las pruebas realizadas son:

- Prueba *Overall* (total o global): prueba con la que se determina el estado de aislamiento de todo el transformador.
- Prueba a Boquilla: prueba que determina el estado de las boquillas de los transformadores.
- Prueba de collar caliente: prueba a boquillas de transformadores.
- Prueba al aceite dieléctrico.
- Prueba de relación de transformación.
- Prueba de corriente de excitación.

2.1. Prueba de *Overall*

Esta prueba consiste en determinar el valor del factor de potencia y el valor de la capacitancia en el sistema de aislamiento en un transformador de potencia.

2.1.1. Factor de potencia

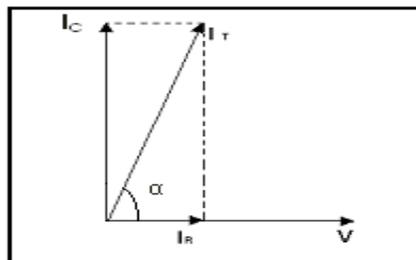
El factor de potencia es determinado por la relación entre la potencia disipada a través del sistema de aislamiento del transformador en forma de calor (vatios), esta potencia disipada es considerada como pérdida, y el producto del voltaje aplicado y la corriente (Volt-Amperes). Según la ecuación 2.1.

$$\% Fp = \frac{100 \text{ Pérdidas}}{V_{\text{aplicado}} \times I_{\text{total}}} \quad (2.1)$$

Otra forma de determinar el factor de potencia es con el coseno del ángulo entre el voltaje y la corriente.

Al aplicar un voltaje alterno al sistema de aislamiento se genera una corriente que no está en fase con el voltaje aplicado. Esta corriente se puede dividir en dos componentes, una en fase con el voltaje que representa las pérdidas en el dieléctrico, y otra adelantada noventa grados eléctricos al voltaje que representa la corriente de fuga, como se observa en la figura 1.

Figura 1. Diagrama fasorial, prueba de *Overall*



Fuente: elaboración propia.

Donde:

V: es el voltaje aplicado al devanado del transformador, es el voltaje de prueba y por lo general es de 10 000 voltios.

I_R : es la corriente eléctrica en fase con el voltaje, representa las pérdidas en el aislamiento, es mayor cuanto mas degradado se encuentre el aislamiento del transformador.

I_C : es la corriente eléctrica en adelanto al voltaje, representa la corriente de fuga en el aislamiento.

α : el ángulo existente entre el voltaje aplicado a la prueba y la corriente eléctrica que circula por el devanado de prueba, si el aislamiento se encuentra en buen estado el valor del ángulo es cercano a 90° .

Al medir el factor de potencia se detectan los cambios en las características del aislamiento, cambios que son debidos al incremento de la humedad, operación con sobrecarga, fallas internas como efecto corona, descargas parciales. Lo anterior provoca que el aislamiento se deteriore, lo cual se verá reflejado en un factor de potencia más grande.

El factor de potencia es independiente del área del aislante, el voltaje aplicado al sistema de aislamiento. Por el contrario, depende de factores externos al transformador como lo son la humedad, la ionización y la temperatura ambiente, estos factores deben de ser tomados en cuenta al momento de realizar la prueba.

Por tanto, el factor de potencia indica el estado del sistema de aislamiento en un transformador de potencia. Un factor de potencia grande es señal de que el aislamiento se encuentra en mal estado. Un factor de potencia bajo es señal de que el aislamiento se encuentra en buen estado.

2.1.2. Capacitancia

Un transformador puede ser equivalente a un capacitor, ya que está formado por conductores (electrodos) separados por un material aislante (dieléctrico). De la ecuación básica para el cálculo de la capacitancia.

$$C = \epsilon_r \frac{Ar}{d} \quad (2.2)$$

Donde:

C : la capacitancia, medida en faradios.

ϵ_r : permitividad relativa del material, que es una constante que depende del material dieléctrico que separa las placas del capacitor.

Ar : área de las placas del capacitor, medida en metros cuadrados.

d : distancia que separa las placas del capacitor, medida en metros.

Para el caso de un transformador la capacitancia depende de las características del material aislante que hace las funciones de dieléctrico, de la configuración geométrica de los devanados y la distancia que los separa.

La medición de capacitancia en los transformadores nos indica la posición física, forma y geometría de los devanados internos, el aislamiento y boquillas.

Si en el transformador se modifican las características dieléctricas de los materiales aislantes o cambia la configuración geométrica de los devanados del transformador se producirá un cambio en el valor de la capacitancia. Cambios que pueden estar indicando deterioro en el sistema de aislamiento o bien ser consecuencia de movimientos mecánicos en las bobinas por efecto de corrientes de cortocircuitos.

Los cambios en la capacitancia se pueden deber a fuerzas electromagnéticas debidas a corrientes de cortocircuito, sobrecargas prolongadas que causan presión mecánica en devanados provocando que estos se muevan, reubicación o traslado de transformadores, especialmente cuando se hace de una manera incorrecta.

Al realizar la prueba de *Overall* obtenemos varias mediciones las cuales indican el estado de una parte del sistema de aislamiento en específico. Estas mediciones están representadas de la siguiente manera.

C_H : indica que los resultados de la prueba son tomados entre los devanados de alto voltaje y las partes del transformador conectados a tierra física (tanque y núcleo). Para esta medición se obtiene un valor de factor de potencia y capacitancia, estos representan el estado del aislamiento entre el devanado de alto voltaje y tierra.

C_L : indica que los resultados de la prueba son tomados entre los devanados de bajo voltaje y las partes del transformador conectadas a tierra física (tanque y núcleo). Para esta medición se obtiene un valor de factor de potencia y capacitancia, estos representan el estado del aislamiento entre el devanado de bajo voltaje y tierra.

C_{HL} : indica que los resultados de la prueba son tomados entre los devanados de alto voltaje y los conductores de bajo voltaje. Para esta medición se obtiene un valor de factor de potencia y capacitancia, estos representan el estado del aislamiento entre los devanados de alto voltaje y el devanado de bajo voltaje.

C_T : indica que los resultados de la prueba son tomados entre los devanados del bobinado terciario y las partes del transformador conectadas a tierra física (tanque y núcleo). Para esta medición se obtiene un valor de factor de potencia y capacitancia, estos representan el estado del aislamiento entre el devanado terciario y tierra.

C_{HT} : indica que los resultados de la prueba son tomados entre los devanados de alto voltaje y el devanado terciario. Para esta medición se obtiene un valor de factor de potencia y capacitancia, estos representan el estado del aislamiento entre el devanado de alto voltaje y el devanado terciario.

C_{LT} : indica que los resultados de la prueba son tomados entre los devanados de bajo voltaje y los devanados del terciario. Para esta medición se obtiene un valor de factor de potencia y capacitancia, estos representan el estado del aislamiento entre el devanado de bajo voltaje y el devanado terciario.

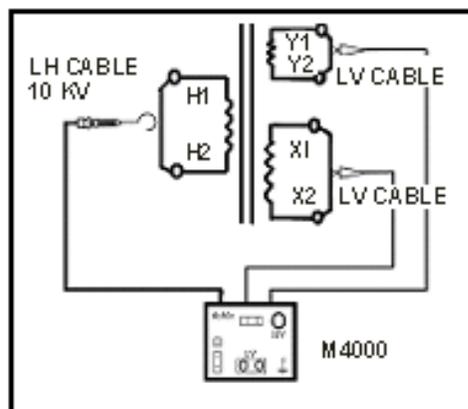
La prueba de *Overall* se puede realizar a cualquier tipo de transformador, monofásico, trifásico o autotransformador.

2.1.3. Pruebas de *Overall* a transformadores monofásicos

La prueba de *Overall* es aplicable a transformadores de dos o más devanados. Las mediciones importantes para estos transformadores son C_H , C_L , C_T , C_{HL} , C_{HT} y C_{LT} .

En la figura 2 se observa el esquema de conexión de la prueba de *Overall*.

Figura 2. **Conexión prueba de *Overall*, transformador monofásico**



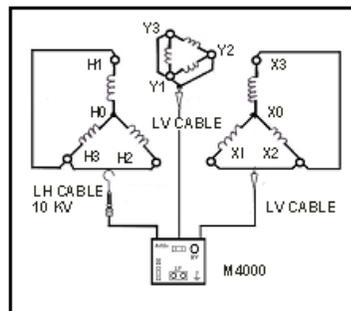
Fuente: elaboración propia.

2.1.4. Prueba de *Overall* a transformadores trifásicos

La prueba de *Overall* es aplicable a transformadores de seis o más devanados. Las mediciones importantes para estos transformadores son C_H , C_L , C_T , C_{HL} , C_{HT} y C_{LT} .

En la figura 3 se observa el esquema de conexión de la prueba de *Overall*.

Figura 3. **Conexión prueba de *Overall*, transformador trifásico**



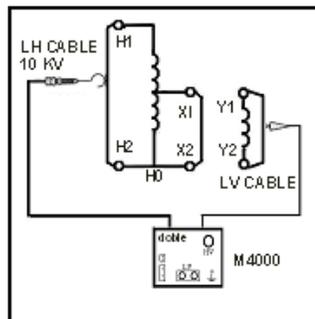
Fuente: elaboración propia.

2.1.5. Prueba de *Overall* a autotransformadores

La prueba de *Overall* es aplicable a transformadores de uno o más devanados. Las mediciones importantes para estos transformadores son C_H , C_T y C_{HT} .

En la figura 4 se observa el esquema de conexión de la prueba de *Overall*.

Figura 4. **Conexión prueba de Overall, autotransformador**



Fuente: elaboración propia.

2.1.6. **Análisis de resultados a prueba de Overall**

Para determinar que los valores de capacitancia o factor de potencia son altos o bajos, es necesario establecer una referencia a fin de tomar una correcta decisión. La referencia se puede obtener de las siguientes maneras:

- Comparando los valores obtenidos con resultados de pruebas anteriores al mismo transformador. Es necesario que se realice la prueba en condiciones similares de temperatura y humedad, a fin de que la comparación sea representativa el factor de potencia se corrige a 20⁰C.
- Si no se cuenta con información de los resultados de pruebas anteriores, la referencia será establecida con los resultados de las pruebas de un transformador similar, el cual se ha determinado en buenas condiciones.
- Si el transformador es nuevo, se compara con los resultados de pruebas de fábrica. En el caso del factor de potencia el valor debe ser menor de 0.5% para transformadores nuevos.

Para dar un diagnóstico del estado de aislamiento en el transformador es necesario establecer un patrón de comportamiento en los resultados de las pruebas, es decir realizar un análisis tendencial en los resultados. Esto se logra realizando una gráfica de los valores tanto de factor de potencia y capacitancia en función del tiempo.

Un transformador en el cual la gráfica de resultados en la prueba de factor de potencia tiene una pendiente positiva es una indicación clara de que el aislamiento en el transformador se está deteriorando. Y, por lo tanto, el aislamiento del transformador necesita de nuestra atención a fin de parar el deterioro.

Un transformador en el cual la gráfica de resultados en la prueba de factor de potencia se mantiene estable o su pendiente es negativa es señal de que el aislamiento del transformador se encuentra en buen estado.

La prueba de *Overall* (total) como su nombre lo indica da una indicación del estado del transformador en general, tomando en cuenta el estado de boquillas, aceite dieléctrico y los aislamientos sólidos del transformador. Es necesario realizar pruebas adicionales para determinar el estado de las boquillas y el aceite dieléctrico.

2.2. Prueba a boquillas

Para boquillas de alto voltaje en transformadores existen diversos tipos de construcción, entre las que están:

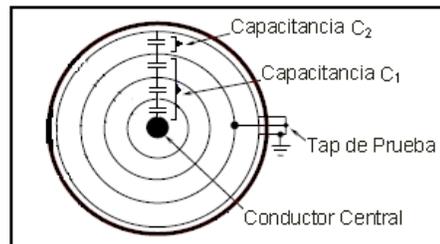
- Boquilla *Oil-Filled*, en este diseño de boquilla el aislamiento entre el conductor y la superficie exterior está lleno de aceite.

- Boquilla *Oil Immersed*, en este diseño de boquilla el aislamiento principal está totalmente inmerso en aceite dieléctrico.
- Boquilla *Oil Impregnated Paper insulated*, el diseño de la boquilla consiste en que el aislamiento principal está hecho de material celuloso impregnado con aceite dieléctrico.
- Boquilla Sólida, la boquilla esta fábrica en su totalidad de cerámica o de un material similar.
- Boquilla Capacitiva, el diseño más utilizado para altas tensiones, esta boquilla consiste en capas cilíndricas concéntricas de material conductor, estando en el centro el conductor principal.

En las boquillas capacitivas cada una de estas capas de material conductor está cubierta de un material aislante. Las capas conductoras intermedias se encuentran aisladas a un potencial variable, únicamente la última capa de material conductor está a un potencial constante, ya que esta capa está conectada a tierra física a través de tap de potencial o tap de prueba.

El diámetro y la separación entre las distintas capas están diseñados controlar la distribución del campo eléctrico producido por la corriente que circula por la boquilla del transformador. En la figura 5, se muestra el diagrama de una boquilla capacitiva.

Figura 5. Diagrama esquemático, boquilla capacitiva



Fuente: elaboración propia.

En la figura se observa que las capas intermedias de material conductor y el material aislante que los separa se representan por los electrodos y dieléctricos de capacitores conectados en serie. Por tanto, el conjunto de capas conductoras y aislantes actúan formando un divisor de tensión, de manera que el voltaje aplicado al conductor principal es dividido entre las diversas capas de capacitores.

El circuito de capacitores conectados en serie se puede sustituir en uno solo equivalente, al cual se le llama C_1 , se puede determinar por la ecuación 2.3.

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_{1N}} + \frac{1}{C_{2N}} + \dots + \frac{1}{C_{N+N}} \quad (2.3)$$

C_1 : es la capacitancia equivalente, representa el aislamiento total entre el conductor central y tierra.

C_{1N} : es la capacitancia en la primera capa de material conductor y el dieléctrico que lo separa.

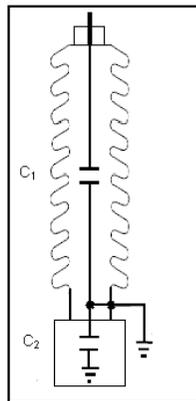
C_{2N} : es la capacitancia en la segunda capa de material conductor y el dieléctrico que lo separa.

C_{N+N} : es la capacitancia en la enésima capa de material conductor y el dieléctrico que lo separa.

La última capa de material conductor y su respectiva capa de material dieléctrico se pueden representar como un solo capacitor y es denominado como C_2 .

En la figura 6 se muestra el circuito equivalente del aislamiento de una boquilla representada de línea a tierra.

Figura 6. **Diagrama equivalente, boquilla capacitiva**



Fuente: elaboración propia.

De la figura anterior, la capacitancia equivalente C_1 representa el aislamiento principal del conductor central de la boquilla hacia tierra, y la capacitancia C_2 representa el aislamiento del Tap de prueba, el aislamiento de la boquilla está en función del valor de estas capacitancias, por lo que es

posible determinar el estado del aislamiento de la boquilla determinando el valor de las capacitancias C_1 y C_2 .

En base a estas afirmaciones se presentan las dos pruebas estándar para determinar el estado de la boquilla capacitiva.

- Aislamiento principal, medición de C_1
- Aislamiento del tap, medición de C_2

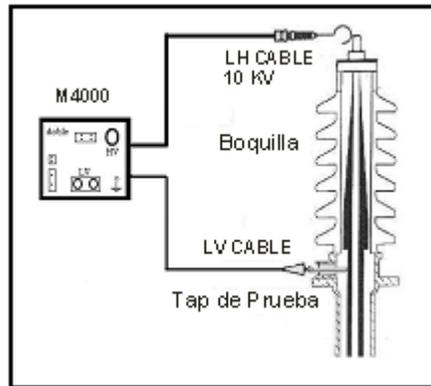
2.2.1. Medición de C_1

En la medición de C_1 obtenemos la condición del aislamiento entre el conductor central de la boquilla y el tap de prueba.

La ventaja de esta prueba radica en el hecho de que se puede realizar en boquillas instaladas en los transformadores.

La capacitancia C_1 es medida junto con el valor del factor de potencia. Al igual que en el caso de la prueba de *Overall*, los resultados obtenidos en esta prueba dan una indicación del estado del aislamiento interno de la boquilla, valores altos indican que el aislamiento en la boquilla está deteriorado, valores bajos indican que el aislamiento en la boquilla está en buen estado. El diagrama de medición de C_1 , es representado en la figura 7.

Figura 7. **Conexión, medición de C_1**



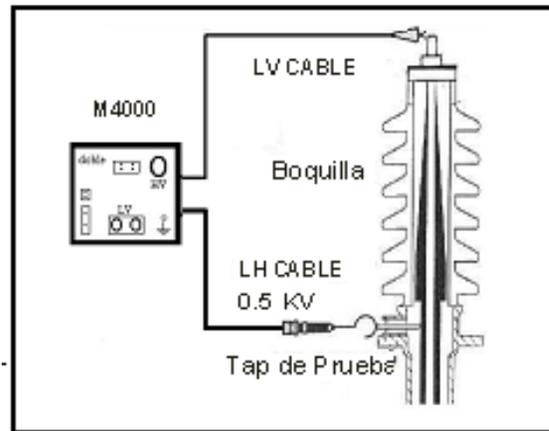
Fuente: elaboración propia.

2.2.2. **Medición de C_2**

En la medición de C_2 se obtiene el estado del aislamiento en el área del tap de prueba. La prueba es usada para examinar la condición de la conexión del tap con la capa capacitiva externa de la boquilla.

La capacitancia C_2 es medida junto con el valor del factor de potencia. Al igual que en el caso de la prueba de *Overall*, los resultados obtenidos en esta prueba da una indicación del estado del aislamiento del tap de prueba, valores altos indican que el aislamiento está deteriorado, valores bajos indican que el aislamiento está en buen estado. El diagrama de medición de C_2 , es representado en la figura 8.

Figura 8. **Conexión, medición de C₂**



Fuente: elaboración propia.

2.2.3. **Análisis de resultados a prueba a boquillas**

Un aumento en el valor de la capacitancia de 10% o más con relación al valor de placa en la medición de C₁ es una indicación de que el aislamiento se encuentra en mal estado y es necesario cambiar la boquilla del transformador en la que se realizó la medición.

Sin embargo, realizar únicamente esa comparación no es suficiente, el valor podría no diferir en un 10% del valor de placa y aun así el aislamiento de la boquilla podría estar deteriorándose seriamente. Por lo tanto, es necesario establecer cuál es la evolución en el estado del aislamiento de la boquilla. Lo cual se logra así:

- Construyendo una base de datos con los resultados de pruebas anteriores a la misma boquilla. Como punto inicial estarán los datos de placa.

- Si no se cuenta con información de los resultados de pruebas anteriores, la referencia será establecida con los resultados de las pruebas a una boquilla similar, la cual se ha determinado en buenas condiciones.

Con los resultados de las pruebas efectuadas se realiza un análisis tendencial de los resultados, para lo cual se gráfica el factor de potencia y la capacitancia tanto en las pruebas de Medición C_1 y Medición C_2 en función del tiempo.

Una boquilla en la cual la gráfica de resultados muestra una pendiente negativa es señal de que el aislamiento de la boquilla se encuentra en buen estado.

Una boquilla en la cual la gráfica de resultados muestra una pendiente positiva requiere de nuestra atención, ya que el aislamiento está dando indicios de deterioró y que en el funcionamiento futuro de la boquilla se puede presentar una falla, un aumento en la capacitancia podría ser una indicación de que una o varias capas de elemento conductor están en contacto entre si y la capacitancia en ese punto es nula.

Por tanto, para dar un diagnóstico del estado del aislamiento en el transformador es necesario tomar en cuenta las pruebas anteriores y realizar con estas un análisis tendencial en los resultados.

2.3. Prueba de collar caliente

La prueba de collar caliente consiste energizar uno o varios electrodos alrededor de la boquilla entre las campanas, se utiliza para determinar la condición del aislamiento en una zona específica de la boquilla.

La prueba de collar caliente deberá ser realizada como una prueba de rutina en los siguientes casos:

- Boquillas sin tap capacitivo, en las cuales la pruebas estándar de medición de C_1 y medición C_2 no se pueden realizar.
- Boquillas llenas de aceite dieléctrico, en el cual no se pueda determinar el nivel del aceite, o en boquillas en las cuales el nivel del aceite sea dudoso.
- Boquillas llenas de gas.
- Boquillas de porcelana sólida.

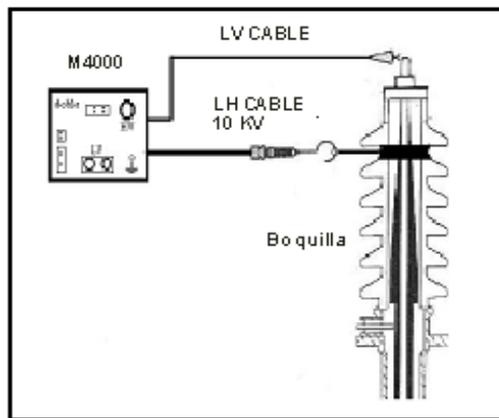
La prueba de collar caliente debe ser utilizada como un complemento de las pruebas estándar de medición C_1 y C_2 cuando los resultados obtenidos no sean satisfactorios y se necesite localizar el lugar exacto del problema.

La prueba de collar caliente realiza la medición del aislamiento de la boquilla arriba del collar de prueba y el conductor central de la boquilla, para lo cual mide los siguientes componentes:

- El aislamiento entre el collar de prueba y el centro del conductor, medición que incluye el medio aislante, dentro de la boquilla y los materiales del núcleo de la boquilla.
- La corriente de fuga del collar de prueba hacia el conductor. Esta corriente es afectada por condiciones del ambiente en la cual se encuentre la boquilla, como la contaminación y la humedad.

El diagrama de conexión de la prueba de collar caliente es representado en la figura 9.

Figura 9. **Conexión prueba de collar caliente**



Fuente: elaboración propia.

Como resultado de la prueba de collar caliente se obtiene la potencia disipada durante la prueba y la corriente que circula del collar de prueba hacia el conductor central de la boquilla.

2.3.1. Análisis de resultados a prueba de collar caliente

Para realizar el análisis de los resultados en la prueba de collar caliente es necesario comparar el resultado con el valor de referencia, el cual se obtiene de la siguiente forma:

- Comparando los valores obtenidos con resultados de pruebas anteriores a la misma boquilla y a la misma campana de la boquilla.

- Si no se cuenta con información de los resultados de pruebas anteriores, la referencia será establecida con los resultados de las pruebas a una boquilla similar, pudiendo ser una de las restantes boquillas del transformador.

Por lo tanto, si la gráfica de tendencia muestra una pendiente positiva es señal de que el aislamiento en la boquilla se está deteriorando.

2.4. Prueba al aceite dieléctrico

La prueba de factor de potencia al aceite forma parte de las pruebas físicas al aceite dieléctrico. Sin embargo, la prueba al aceite dieléctrico forma parte del protocolo de pruebas a realizar, la prueba consiste en coleccionar una muestra en un recipiente especial, denominado celda de aceite.

En la figura 10, se muestra una fotografía de una celda de aceite para prueba de factor de potencia al aceite dieléctrico.

Figura 10. Celda de aceite, medición de factor de potencia



Fuente: http://www.doble.com/products/m4000_features.html. Noviembre 2010.

Al tomar la muestra, ésta debe de permanecer en reposo por un tiempo prudencial para que las burbujas de aire desaparezcan y las partículas de material extraño se depositen en el fondo del recipiente donde se realizará la prueba.

En esta prueba se debe de tener cuidado de que la muestra sea efectivamente representativa, es decir, que el aceite debe purgarse de la válvula de muestreo del transformador, evitando de esta manera cualquier suciedad o agua que se encuentre en la válvula, de no tomar estas precauciones la prueba será afectada y los resultados obtenidos serán erróneos.

Al medir el factor de potencia, como resultado se obtiene el estado de contaminación, el deterioro del aceite dieléctrico, idealmente el aceite dieléctrico tiene un factor de potencia cercano a cero, 0.05 % para un aceite dieléctrico nuevo.

Al medir el porcentaje del factor de potencia del aceite dieléctrico, se mide cual es la degradación del aceite, el grado de envejecimiento y la contaminación que pueda existir en el aceite, en general si el aceite está perdiendo sus propiedades aislantes.

2.4.1. Análisis de resultados prueba al aceite dieléctrico

Al realizar un análisis tendencial de los resultados obtenidos en la prueba de factor de potencia no solo se determina el grado de envejecimiento, adicionalmente se tiene la tasa de degradación del aceite en el tiempo.

Si la tasa de degradación es elevada es una indicación de que el aceite está perdiendo sus propiedades dieléctricas, y se debe de tomar una de dos decisiones, regenerar el aceite o bien cambiarlo por aceite nuevo, lo cual dependerá del grado de degradación del aceite.

2.5. Prueba de relación de transformación

La relación de transformación está dada por la división entre el número de espiras en el devanado primario y el número de espiras en el devanado secundario, dada por la ecuación 2.4.

$$RTT = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.4)$$

R_{TT} : es la relación de transformación del transformador.

N_1 : es el número de espiras en el devanado de alta.

N_2 : es el número de espiras en el devanado de baja.

Con la prueba de relación de transformación se determinan las siguientes condiciones en un transformador:

- La relación de transformación real en el transformador, debe de cumplir con que la tolerancia en la relación de transformación medida, con respecto a la relación de transformación de placa debe de ser menor a 0.5, la tolerancia viene dada con la ecuación 2.5.

$$Tol = \frac{|RTT_{Medido} - RTT_{Teórico}|}{RTT_{Teórico}} \quad (2.5)$$

Donde:

Tol: representa la tolerancia o diferencia relativa entre el valor medido y el valor teórico.

RTT_{Medido} : es el valor de la relación de transformación obtenido en la prueba.

$RTT_{Teórico}$: es el valor de la relación de transformación tomado de placa.

- Detectar corto circuitos en el aislamiento entre espiras.
- Detectar circuitos abiertos en las conexiones entre devanados.
- Detectar falsos contactos.
- Determinar el estado en que se encuentra el cambiador de tap.

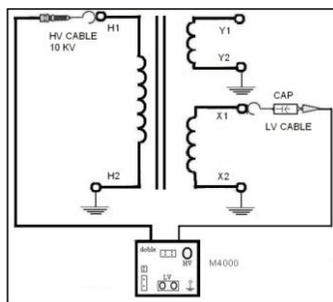
La prueba de relación de transformación se debe de aplicar en todas las posiciones del cambiador de tap.

2.5.1. Prueba de relación de transformación a transformadores monofásicos

La prueba de relación de transformación es aplicable a transformadores con dos o más devanados.

La prueba debe de ser realizada con cada uno de los taps. En el caso de los transformadores con devanado terciario, la prueba debe ser realizada en todos los taps. El diagrama de conexión se muestra en la figura 11.

Figura 11. **Conexión, Prueba Relación de Transformación
Transformador Monofásico**



Fuente: elaboración propia.

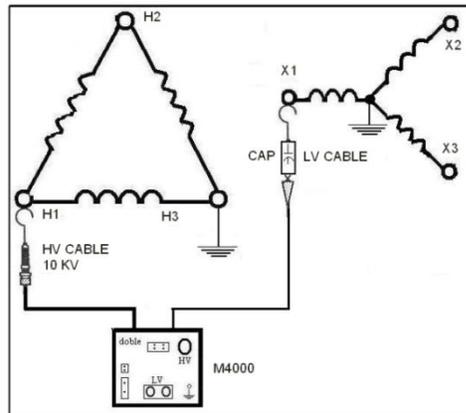
2.5.2. Prueba de relación de transformación a transformadores trifásicos

La prueba de relación de transformación es aplicable a transformadores de seis o más devanados.

En los transformadores trifásicos, la prueba debe de ser realizada en cada una de las fases, en cada posición del tap, y en el caso de los transformadores trifásicos con devanados terciarios la prueba debe de ser realizada para las tres fases del devanado terciario y en cada posición del tap.

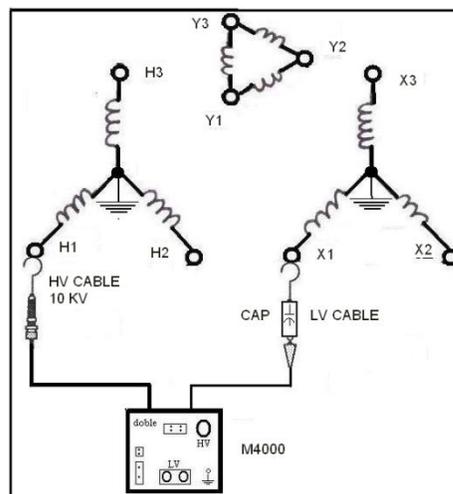
En la figura 12 y figura 13 se muestra el diagrama de conexión para la prueba de relación de transformación para transformadores trifásicos en conexión Delta-Estrella y Estrella-Estrella-Delta.

Figura 12. **Conexión, prueba relación de transformación, transformador trifásico D/y**



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Conexión prueba relación de transformación, transformador trifásico Y/yd**



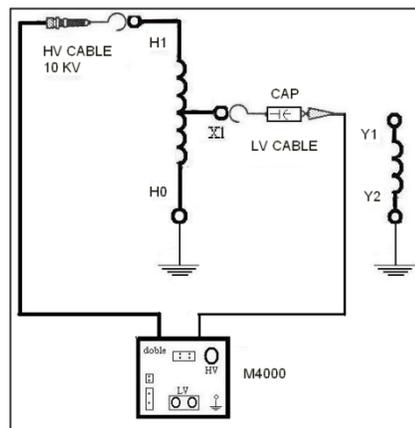
Fuente: elaboración propia.

2.5.3. Prueba de relación de transformación a autotransformadores

La prueba de relación de transformación es aplicada a autotransformadores con uno o dos devanados.

En la figura 14, se muestra el diagrama de conexiones para la prueba de relación de transformación para un autotransformador con devanado terciario.

Figura 14. **Conexión prueba relación de transformación, autotransformador**



Fuente: elaboración propia..

2.5.4. Análisis de resultado a prueba de relación de transformación

Al realizar el análisis tendencial de resultados debemos de comparar el valor obtenido en la prueba actual con los resultados de pruebas anteriores realizadas al mismo tap.

Una curva que muestre una tendencia positiva podría estar indicando un corto circuito entre espiras en el devanado de bajo voltaje.

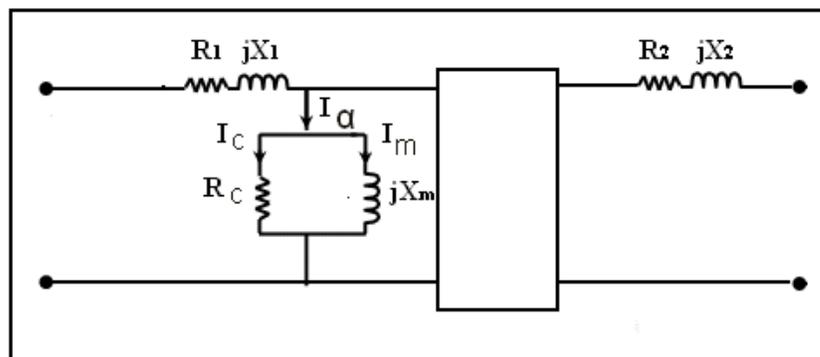
Por el contrario una curva que muestre una tendencia negativa podría estar indicando un corto circuito entre espiras en el devanado de alto voltaje, falso contacto en el intercambiador de taps.

Idealmente la curva para la prueba de relación de transformación debe ser estable, y esto debe de cumplirse para todas las posiciones del cambiador de taps.

2.6. Prueba de corriente de excitación

La corriente de excitación, es la corriente necesaria para crear el campo magnético en un transformador. En la figura 15 se muestra el circuito equivalente de un transformador.

Figura 15. Circuito equivalente de transformador



Fuente: STEPHEN J., Chapman. Máquinas Eléctricas. p. 88.

Donde:

R_1 : representa la resistencia del devanado primario, medida en ohmios.

X_1 : representa el flujo que sale del devanado primario pero que no se enlace con el devanado secundario, medida en ohmios.

I_c : representa las pérdidas en el núcleo por corrientes parasitas, medida en amperios.

I_m : representa la corriente de magnetización en el núcleo, medida en amperios.

I_a : representa la corriente de excitación, medida en amperios.

Matemáticamente la corriente de excitación está formada por la suma vectorial de la corriente magnetizante y la corriente debido a las pérdidas en el núcleo, por la ecuación 2.6.

$$I_a = I_c + I_m \quad (2.6)$$

El valor de la corriente de excitación está en función de los componentes del circuito magnético del transformador, siendo estos la forma de la bobina (el enlace de flujo en la bobina), el número de espiras en la bobina y el núcleo del transformador.

La prueba de corriente de excitación no se realiza para determinar el valor de la corriente de excitación, la prueba de corriente de excitación se utiliza para determinar ciertos cambios que se pudieron dar en el núcleo, las bobinas o bien los contactos del cambiador de taps. Con la prueba se determina:

- Cortocircuitos en las laminas del núcleo del transformador, un contacto entre las laminas, crearía corrientes parasitas más elevadas, por consiguiente la corriente de pérdida I_c aumentaría, provocando a su vez que la corriente de excitación aumente. Un aumento en las corrientes parasitas en el núcleo del transformador provocaría que la temperatura en el núcleo se eleve considerablemente.
- Cortocircuito entre espiras, de existir un cortocircuito la temperatura en el área afectada aumentaría considerablemente.
- Falso contacto en las terminales del cambiador de tap.

2.6.1. Prueba de corriente de excitación a transformadores monofásicos

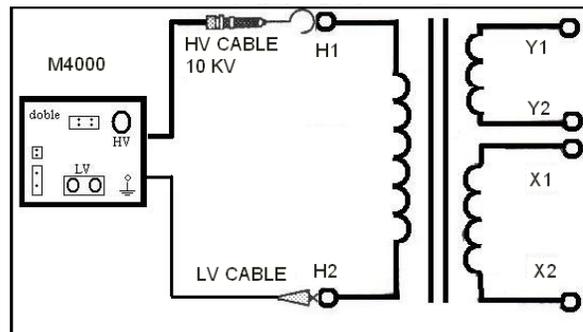
La prueba de corriente de excitación es aplicada a transformadores monofásicos con dos o más devanados.

La prueba es indiferente al número de devanados debido a que únicamente se realiza en las terminales de alto voltaje, estando las terminales de baja en circuito abierto.

La prueba de corriente de excitación debe de ser realizada en todas las posiciones del cambiador de taps.

La figura 16, muestra las conexiones para la prueba de corriente de excitación a transformadores monofásicos con devanado terciario.

Figura 16. **Conexión, prueba corriente de excitación, transformador monofásico**



Fuente: elaboración propia.

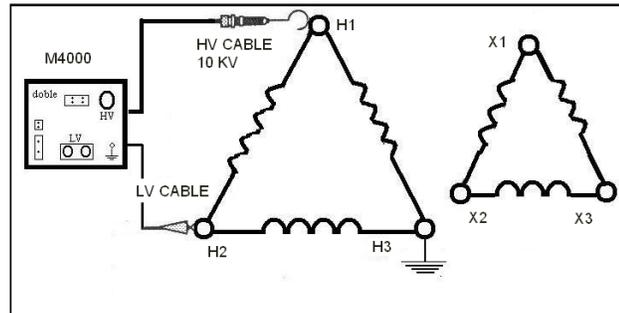
2.6.2. Prueba de corriente de excitación a transformadores trifásicos

La prueba de corriente de excitación es aplicada a transformadores trifásicos con seis o más devanados.

La prueba de corriente de excitación debe de ser realizada en todas las posiciones del cambiador de taps.

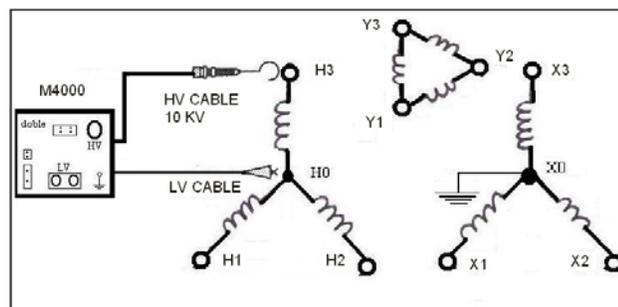
La figura 17 y la figura 18, muestran las conexiones para la prueba de corriente de excitación a transformadores trifásicos con conexión Delta-delta y Estrella-estrella-delta.

Figura 17. **Conexión, prueba corriente de excitación transformador trifásico D/d**



Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Conexión, prueba corriente de excitación, transformador trifásico Y/y/d**



Fuente: elaboración propia.

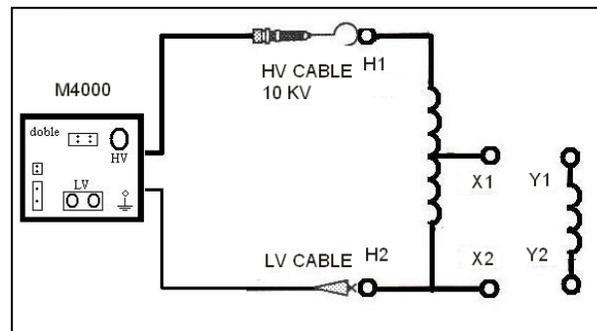
2.6.3. Prueba de corriente de excitación a autotransformadores

La prueba de corriente de excitación es aplicada a autotransformadores con un devanado, o dos devanados en el caso de autotransformadores con devanado terciario.

La prueba de corriente de excitación debe de ser realizada en todas las posiciones del cambiador de taps.

La figura 19, muestra el diagrama de conexiones para un autotransformador con devanado terciario.

Figura 19. **Conexión, prueba corriente de excitación, autotransformador**



Fuente: elaboración propia.

2.6.4. Análisis de resultados a prueba de corriente de excitación

Al realizar el análisis tendencial de resultados debemos de comparar el valor obtenido en la prueba actual con los resultados de pruebas anteriores realizadas al mismo tap.

Una curva que muestre una tendencia positiva podría estar indicando un corto circuito entre espiras en el devanado de alto voltaje, un cortocircuito en las láminas del núcleo.

Una curva que muestre una tendencia negativa podría ser señal de un falso contacto en las terminales del tap.

Idealmente la curva para la prueba de corriente de excitación debe ser estable, y esto debe de cumplirse para todas las posiciones del cambiador de tap.

3. PRUEBAS AL ACEITE EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

3.1. Cromatografía de gases

Las pruebas a transformadores que se describen en el capítulo uno muestran el estado del sistema de aislamiento. Sin embargo, con estas pruebas de presentarse un resultado negativo, no es posible determinar cuál fue la causa en el deterioro del aislamiento. Para determinar la razón en el cambio de estado en el sistema de aislamiento y tomar las acciones correctivas necesarias es necesario realizar un análisis al aceite dieléctrico conocido como cromatografía de gases. La cromatografía de gases es una técnica utilizada para el análisis del sistema de aislamiento del transformador a través de la detección de gases disueltos en el aceite dieléctrico.

3.1.1. Origen de los gases en aceite dieléctrico

Los materiales que constituyen el sistema de aislamiento en los transformadores de potencia son aceite, papel y cartón, estos tienen como función aislar las partes energizadas del transformador a tierra física, aislar los devanados de alto voltaje con los devanados de bajo voltaje y aislar las espiras entre los mismos devanados.

Cuando se producen calentamiento por sobrecarga o algún tipo de falla interna en el transformador los componentes del aislamiento reaccionan químicamente originando gases, los cuales permanecen disueltos en el aceite dieléctrico.

La composición de la celulosa, la cual constituye el cartón está formada por elementos carbono, hidrógeno y oxígeno, la composición del aceite dieléctrico está constituida por carbono e hidrógeno, por lo tanto todos los gases generados durante una falla estarán constituidos por tres elementos que son carbono, oxígeno e hidrógeno, estos tres elementos formarán distintos compuestos en función del tipo de falla y de la gravedad de la misma.

Para analizar los resultados obtenidos en las pruebas de cromatografía de gases se han desarrollado métodos de análisis, entre los que se tienen:

- Método de *Dörnenburg*
- Método de *Rogers*
- Método de *Duval*
- Método de la IEC 60599
- Método de Gas Clave
- Relación CO₂/CO
- Relación O₂/N₂

Los métodos de diagnóstico antes mencionados se basan en relaciones entre las concentraciones de gases presentes en el aceite dieléctrico, dados por las ecuaciones 3.1 a 3.5.

$$R_1 = \frac{CH_4}{H_2} \quad (3.1)$$

$$R_2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4} \quad (3.2)$$

$$R_3 = \frac{C_2H_2}{CH_4} \quad (3.3)$$

$$R_4 = \frac{C_2H_6}{C_2H_2} \quad (3.4)$$

$$R_5 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6} \quad (3.5)$$

Siendo (H₂) hidrógeno, (CH₄) metano, (C₂H₂) acetileno, (C₂H₄) etileno, (C₂H₆) etano, (CO) monóxido de carbono y (CO₂) dióxido de carbono.

3.1.2. Método de *Dörrnenburg*

Este método utiliza las relaciones R_1 , R_2 , R_3 y R_4 , debe de cumplir que al menos una de las concentraciones de H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 supera el doble los límites L_1 indicados y al menos uno de los gases restantes supere dicho límite, de cumplirse con esto, el transformador se considera con falla y se procede a validar el método.

La tabla I, muestra los límites mínimos para las concentraciones de gases para proceder a validar el método. Si el método es válido, el diagnóstico de la falla se basa en la tabla II.

Tabla I. Límite de concentración de gases, método de *Dörrnenburg*

| Gas clave | H ₂ | CH ₄ | CO | C ₂ H ₂ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₆ |
|----------------------|----------------|-----------------|-----|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| L ₁ (ppm) | 100 | 120 | 350 | 35 | 50 | 65 |

Fuente: PORTILLO, Álvaro. Mantenimiento de Transformadores, Análisis Cromatográfico p. 7.

Tabla II. Diagnóstico de falla, método *Dörrnenburg*

| Tipo de falla | $R_1 = \frac{CH_4}{H_2}$ | $R_2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ | $R_3 = \frac{C_2H_2}{CH_4}$ | $R_4 = \frac{C_2H_6}{C_2H_2}$ |
|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Descomposición Térmica | $R_1 > 1.0$ | $R_2 < 0.75$ | $R_3 < 0.3$ | $R_4 > 0.4$ |
| Corona (Baja intensidad) | $R_1 < 0.1$ | $R_2 < 0.01$ | $R_3 < 0.3$ | $R_4 > 0.4$ |
| Arco (Alta intensidad) | $R_1 0.1 - 1.0$ | $R_2 > 0.75$ | $R_3 > 0.3$ | $R_4 < 0.4$ |

Fuente: Portillo, Álvaro. Mantenimiento de Transformadores, Análisis Cromatográfico. p. 7.

El método de *Dörrnenburg* es únicamente considerado válido cuando las concentraciones de hidrógeno, metano, acetileno y etileno superen los límites antes establecidos, de no cumplirse esto, las relaciones no son consideradas significativas y los resultados deben ser analizados por otro método.

3.1.3. Método de *Rogers*

Este método utiliza las relaciones R_1 , R_2 y R_5 . El método fue el utilizado por la norma IEC 60599 en su primera edición. El diagnóstico de la falla se basa en la tabla III.

Tabla III. Diagnóstico de falla, método de *Rogers*

| Características de la falla | $R_1 = \frac{CH_4}{H_2}$ | $R_2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ | $R_5 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ |
|------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Unidad normal | R_1 0.1 – 1.0 | R_2 <0.1 | R_5 <1.0 |
| Descarga Parcial | R_1 <0.1 | R_2 <0.1 | R_5 <1.0 |
| Arco de alta energía | R_1 0.1 – 1.0 | R_2 0.1 – 3.0 | R_5 >3.0 |
| Falla térmica de Baja temperatura | R_1 0.1 – 1.0 | R_2 <0.1 | R_5 1.0 – 3.0 |
| Falla térmica $T < 700^\circ C$ | R_1 >1.0 | R_2 <0.1 | R_5 1.0 – 3.0 |
| Falla térmica $T > 700^\circ C$ | R_1 >1.0 | R_2 <0.1 | R_5 >3.0 |

Fuente: Portillo, Álvaro. Mantenimiento de Transformadores, Análisis Cromatográfico. p. 8.

El método de *Rogers* no depende del hecho de que las concentraciones de gas superen un límite establecido. Sin embargo, es recomendable que se aplique cuando la concentración de uno de los gases exceda el límite dado en la tabla I.

3.1.4. Método de *Duval*

El método de *Duval* analiza la el porcentaje de acetileno, etileno y metano presente en la muestra del aceite dieléctrico, dado por las ecuaciones 3.6 a 3.8.

$$\% C_2H_2 = \frac{100C_2H_2}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4} \quad (3.6)$$

$$\% C_2H_4 = \frac{100C_2H_4}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4} \quad (3.7)$$

$$\% CH_4 = \frac{100CH_4}{C_2H_2 + C_2H_4 + CH_4} \quad (3.8)$$

Donde:

$\% C_2H_2$: es el porcentaje de acetileno presente en el aceite dieléctrico.

$\% C_2H_4$: es el porcentaje de etileno presente en el aceite dieléctrico.

$\% CH_4$: es el porcentaje de metano presente en el aceite dieléctrico.

El diagnóstico se obtiene en base a la tabla IV.

Tabla IV. **Diagnóstico de falla, método de Duval**

| Tipo de Falla | Porcentaje 1 | Porcentaje 2 |
|---------------------------------------|------------------|-----------------------|
| Descargas Parciales | $\% CH_4 > 98$ | |
| Descargas de baja energía | $\% C_2H_2 > 13$ | $\% C_2H_4 < 23$ |
| Descargas de alta energía | $\% C_2H_2 > 13$ | $23 < \% C_2H_4 < 38$ |
| Falla térmica $T < 300^0 C$ | $\% C_2H_2 < 4$ | $\% C_2H_4 < 10$ |
| Falla Térmica $300^0 C < T < 700^0 C$ | $\% C_2H_2 < 4$ | $10 < \% C_2H_4 < 50$ |
| Falla térmica $T > 700^0 C$ | $\% C_2H_2 < 15$ | $\% C_2H_4 > 50$ |

Fuente: Portillo, Álvaro. Mantenimiento de Transformadores, Análisis Cromatográfico. p. 8.

En caso de que las relaciones no se cumplan en ninguno de los casos de la tabla, el diagnóstico se dice que es indefinido, la falla puede ser entre una descarga y falla térmica. De presentarse que no se cumplen las condiciones, es necesario analizar las concentraciones de gas con un método diferente.

3.1.5. Método de la IEC 60599

Este método recomendado por la norma IEC 60599 utiliza las relaciones R_1 , R_2 y R_5 .

Basándose en los resultados obtenidos en estas relaciones se realiza un diagnóstico de acuerdo a la tabla V.

Tabla V. Diagnóstico de falla, método IEC 605999

| Características de la falla | $R_1 = \frac{CH_4}{H_2}$ | $R_2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ | $R_5 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ |
|--|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Descarga Parcial | <0.1 | <0.01 | <0.2 |
| Descarga de baja energía | 0.1 – 0.5 | >1.0 | >1.0 |
| Descarga de alta energía | 0.1 – 1.0 | 0.6 – 2.5 | >2.0 |
| Falla térmica T < 300 ⁰ C | >1.0 | <0.01 | <1.0 |
| Falla Térmica 300 ⁰ C < T < 700 ⁰ C | >1.0 | <0.1 | 1.0 – 4.0 |
| Falla térmica T > 700 ⁰ C | >1.0 | <0.2 | >4.0 |

Fuente: Portillo, Álvaro. Mantenimiento de Transformadores, Análisis Cromatográfico. p. 6.

3.1.6. Método de gas clave

Con este método se busca en el análisis la aparición en cantidades anormales de un gas en específico, la presencia de este gas es un indicativo de un tipo de falla en particular.

Descargas parciales: cuando son de baja energía se produce hidrógeno y metano. Si las descargas ocurren en la celulosa, pueden resultar cantidades comparables de monóxido y dióxido de carbono. Gas clave es el hidrógeno.

Aceite sobrecalentado: esta falla incluye etileno y metano, con cantidades menores de hidrógeno y etano. Si las fallas son graves pueden formarse indicios de acetileno. Gas clave es el etileno.

Celulosa sobrecalentada: hay producción en grandes cantidades de dióxido y monóxido de carbono. Si la falla es en una estructura impregnada en aceite se forman concentraciones de metano y etileno. Gas clave monóxido de carbono.

Arco eléctrico: formación de grandes cantidades hidrógeno y acetileno, se producen pequeñas cantidades de metano y etileno. Es posible encontrar dióxido y monóxido de carbono si la falla afecta la celulosa. El aceite se puede presentar carbonizado. Gas clave acetileno.

3.1.7. Relación CO_2/CO

La relación CO_2/CO se utiliza como un indicador de la descomposición de la celulosa (sistema de aislamiento sólido, papel) por acción térmica. En condiciones normales el valor de esta relación debe ser mayor a 7.

En caso de que el valor sea de tres o menos, y las concentraciones de CO_2 sean mayores a 5000 ppm y el de CO mayor a 500 ppm, la relación CO_2/CO estaría indicando un caso de envejecimiento excesivo de la celulosa.

Sin embargo, para confirmar el diagnóstico de envejecimiento de la celulosa es necesaria una prueba adicional.

3.1.8. Relación O_2/N_2

Estos compuestos se encuentran en el aceite a consecuencia del contacto del aceite con el aire, el contacto es posible en el tanque de expansión o bien por fallas de hermeticidad en transformadores sellados.

En equilibrio, la cantidad de O_2 y N_2 en el aceite refleja la composición del aire, la relación es cercana a 0.5.

Para un transformador en servicio la relación puede disminuir debido a la oxidación del aceite o envejecimiento del papel, por lo que valores en la relación menores a 0.3 son considerados como un consumo excesivo de oxígeno.

3.2. Pruebas físicas, químicas y eléctricas al aceite

El aceite dieléctrico de los transformadores tiene una doble función, una es la de servir como refrigerante cuando la temperatura del equipo se eleva al estar en servicio para esto se necesita tener una buena fluidez, la segunda función es la de dar aislamiento eléctrico evitando la fuga de electrones desde los conductores hacia las partes aterrizadas del transformador.

3.2.1. Pruebas físicas al aceite

Las pruebas físicas dan una indicación rápida del estado del aceite dieléctrico, la capacidad de desplazamiento, su aspecto y color.

3.2.1.1. Viscosidad del aceite

Con esta prueba se mide la fluidez del aceite. La viscosidad es una característica necesaria para conducir el calor de manera efectiva en el equipo eléctrico y así actuar como un refrigerante.

Un factor importante a tener en cuenta es la variación de la viscosidad con los cambios bruscos de temperatura, factor llamado índice de viscosidad, un valor bajo de índice de viscosidad es una indicación de que existen grandes cambios de fluidez con la temperatura, indicación de que el aceite no fluye de manera correcta en el interior del transformador cuando hay alta temperatura.

3.2.1.2. Aspecto visual

Esta prueba es de utilidad debido al hecho de que se determina el estado del aceite de manera sencilla. El aceite debe de estar limpio, transparente y libre de sedimentos, si el aceite contiene agua o contaminantes en suspensión el aceite tiene un aspecto turbio.

En esta prueba se busca la presencia de sólidos, agua y otras partículas contaminantes que sean visibles a simple vista.

3.2.1.3. Color ASTM

Esta prueba se realiza de manera sencilla, únicamente por observación y comparación con una tabla de colores estandarizados según el método ASTM D-1500.

Para aceite nuevo la especificación de color es de 0,5 máximo, para aceite en equipo este número va aumentando ya que el número de color incrementa con el uso, el límite superior es de 8,0 para un aceite totalmente deteriorado.

La tabla VI muestra los valores límites en el número de color para aceite dieléctrico de transformadores de potencia.

Tabla VI. **Color ASTM máximo en transformadores**

| Tipo de aceite | Color | Claridad |
|------------------------------|---------|------------------------|
| Aceite Nuevo de Fabrica | 0.5 Max | Transparencia y brillo |
| Voltaje operación < 69 KV | 1.0 Max | Claridad |
| Voltaje operación 69 - 288KV | 1.0 Max | Claridad |
| Voltaje operación > 345 KV | 0.5 Max | |
| Aceite en uso | Color | Claridad |
| Voltaje operación < 345 KV | 2.0 | Claridad |

Fuente: Portillo, Álvaro. Mantenimiento de Transformadores, ensayos en el Aceite. p. 5.

El número de color asignado a la muestra únicamente indica que un aceite es nuevo o no, lo importante en la medición de color es que cambios repentinos en el color del aceite indican que ocurrió un evento crítico y debe de investigarse cuál fue la causa.

3.2.1.4. Tensión interfacial

Esta prueba da una medida de la fuerza de acción existente entre las moléculas de agua y del aceite en la interface entre estos dos líquidos, la cual se utiliza para encontrar contaminantes solubles y productos de oxidación del aceite.

La tensión interfacial disminuye conforme aumenta la contaminación en el aceite, debido a que la oxidación y contaminantes polares tienden concentrarse en la interface agua-aceite.

La tabla VII muestra los valores tipos en la prueba de tensión interfacial para diferentes voltajes de operación.

La tabla VII. **Tensión interfacial mínima en transformadores**

| Tipo de Aceite | Tensión Interfacial |
|---------------------------------|---------------------|
| Aceite nuevo de refinería | Mínimo 40 dinas/cm |
| Aceite nuevo en unidades nuevas | Mínimo 35 dinas/cm |
| Límites para uso continuo. | |
| Voltaje operación < 69 KV | Mínimo 24 dinas/cm |
| Voltaje operación 69KV a 288 KV | Mínimo 26 dinas/cm |
| Voltaje operación > 345 KV | Mínimo 30 dinas/cm |

Fuente: PORTILLO, Álvaro. Mantenimiento de Transformadores, Ensayos de aceite. p. 5.

De la tabla anterior, el valor de tensión interfacial para un aceite en buenas condiciones varía entre 35 y 40 dinas/cm, una disminución en el valor de la tensión interfacial es una indicación de la acumulación de contaminantes y productos de oxidación, para aceites en malas condiciones este valor disminuye a 18 dinas/cm.

3.2.2. Pruebas químicas al aceite

Las pruebas químicas dan una indicación de los cambios moleculares en el aceite, la acidez muestra la oxidación del aceite y el contenido de agua que es un parámetro que debe de ser controlado en el aceite.

3.2.2.1. Número de neutralización

Esta prueba también llamada como acidez, consiste en encontrar la cantidad de material alcalino necesario para neutralizar los ácidos en el aceite, son los miligramos de hidróxido de potasio (*KOH*) necesarios para neutralizar un gramo de aceite.

La oxidación en el aceite es perjudicial en el sistema de aislamiento del transformador ya que incrementan la solubilidad del agua en el papel.

La humedad provoca la corrosión de las partes metálicas en el interior del transformador, en aceites altamente deteriorados tienen como consecuencia final la aparición de barro.

La tabla VIII muestra los valores tipos en la prueba de número de Neutralización.

Tabla VIII. **Número de neutralización máxima en transformadores**

| Tipo de Aceite | Neutralización |
|----------------------------------|------------------------|
| Aceite Nuevo | 0.03 mgKOH/g aceite |
| Límites para uso continuo | |
| Voltaje operación <69 KV | Max 0.2 mgKOH/g aceite |
| Voltaje operación 69 KV a 288 KV | Max 0.2 mgKOH/g aceite |
| Voltaje operación > 345 KV | Max 0.1 mgKOH/g aceite |

Fuente: PORTILLO, Álvaro. Mantenimiento de Transformadores, Ensayos de Aceite. p. 6

La medida de la acidez nos indica el nivel de deterioro por oxidación en un aceite, muestra el deterioro químico del aceite y es indicativo de la vida esperada del mismo, en base a esta información establecer si es necesario cambiar o regenerar el aceite.

3.2.2.2. Contenido de agua

La prueba de contenido de agua tiene por finalidad determinar las condiciones del aceite en relación a la contaminación por presencia de humedad en el aceite, se mide en partes de agua por millón de partes de aceite, el agua puede estar presente en el aceite del transformador por dos medios:

- Por deterioro del aceite y de la celulosa
- Provenir del exterior del transformador

La tabla IX muestra los valores límites en el contenido de agua en el aceite dieléctrico de transformadores de potencia.

Tabla IX. **Humedad máxima en transformadores**

| Tipo de Aceite | Contenido de Agua |
|---------------------------------|--------------------------|
| Aceite nuevo de refinería | Max 35 ppm |
| Aceite nuevo en unidades nuevas | Max 10 ppm |

Fuente: PORTILLO, Álvaro. Mantenimiento de Transformadores, Ensayos de aceite. p. 6.

Con altos niveles de humedad en el aceite, se pierde la resistencia dieléctrica del mismo, tanto en condiciones normales de operación como en impulsos por cierre de interruptores o descargas atmosféricas, por lo que la probabilidad de fallas se incrementa.

Si el aceite tiene un alto contenido de humedad implica que el aislamiento sólido (celulosa, madera, etc.) también tiene un alto contenido de humedad por lo que el sistema de aislamiento completo queda disminuido.

3.2.3. Pruebas eléctricas al aceite

Las pruebas eléctricas junto a las químicas son las más importantes debido a la información obtenida. La rigidez dieléctrica y el factor de potencia determinan la capacidad de aislamiento que tiene el aceite.

3.2.3.1. Rigidez dieléctrica

La prueba de rigidez dieléctrica es una medida de la capacidad del aceite a soportar un esfuerzo eléctrico, es decir la resistencia momentánea del aceite al paso de la corriente, la capacidad aislante del aceite.

La rigidez dieléctrica será el voltaje al cual el aceite dieléctrico se convierte en conductor. Con la prueba de rigidez dieléctrica se obtienen dos cosas:

- El agua libre que se encuentra en la muestra de aceite
- La suciedad o partículas presentes en la muestra de aceite

El valor de la rigidez dieléctrica depende de la forma de los electrodos utilizadas y la distancia que separa los mismos, en la tabla X se muestran los valores mínimos que debería de tener un aceite en buenas condiciones.

Tabla X. **Rigidez dieléctrica**

| Norma | Forma del electrodo | Distancia (mm) | Aumento (KV/s) | Rigidez (KV) |
|--------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| IEC 60156 | Esféricos | 2,50 | 2,0 | ≥ 50 |
| ASTM D-877 | Planos | 2,54 | 3,0 | ≥ 35 |
| ASTM D-1816 | Esféricos | 1,02 | 0,5 | ≥ 30 |
| ASTM D-1816 | Esféricos | 2,05 | 0,5 | ≥ 40 |

Fuente: PORTILLO, Álvaro. Mantenimiento de Transformadores, Ensayos en el Aceite. p. 7.

Si en la prueba se tiene una rigidez dieléctrica baja, debido a humedad, polvo o particular disueltas, entonces el aislamiento sólido impregnado y sumergido en aceite presentar también humedad por lo que el sistema de aislamiento completo (aceite y papel) se ve afectado. Por lo que la prueba de rigidez dieléctrica mide la presencia de humedad y partículas en el sistema de aislamiento completo.

3.2.3.2. Factor de potencia

La prueba de factor de potencia al aceite es utilizada para evaluar la condición del aceite desde un punto de vista dieléctrico. El factor de potencia mide las pérdidas dieléctricas a través del aceite, debido a los contaminantes presentes en el aceite. El factor de potencia viene dado por la ecuación 2.1.

$$\% Fp = \frac{100 \text{ Perdidas}}{V_{\text{aplicado}} \times I_{\text{total}}} \quad (2.1)$$

El factor de potencia depende de la acción dipolar de los contaminantes presentes en la muestra del aceite, por lo que un aceite en buen estado tendrá un factor de potencia bajo pues la naturaleza del aceite dieléctrico es no polar. La tabla XI muestra los valores típicos del factor de potencia a 25°C.

Tabla XI. **Factor de potencia**

| Condición | Factor de potencia (25°C) |
|-----------------|---------------------------|
| Satisfactorio | Fp < 0,5 % |
| Dudoso | Fp 0.5% a 2,0 % |
| Insatisfactorio | Fp > 2,0% |

Fuente: PORTILLO, Álvaro. Mantenimiento de Transformadores, Ensayos en el Aceite. p. 7.

Un factor de potencia mayor de 2,0% es una indicación de que el aceite se encuentra deteriorado y es necesario reemplazarlo o bien regenerarlo.

4. PRUEBAS DIELECTRICAS A LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA DEL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL INDE

4.1. Pruebas dieléctricas a transformadores de potencia de la Subestación Escuintla 1

Los transformadores analizados forman parte de un banco de transformación trifásico, conformado por tres autotransformadores de 50 MVA cada uno, con voltajes de transformación de 230 kV / 138 kV.

4.1.1. Transformador fase R, ID-A01002

La tabla XII muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizadas al transformador.

Tabla XII. Prueba de *Overall*, fase R, Escuintla 1

| Fecha | %FP | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HT} | C _T | C _H | C _{HT} | C _T |
| 20/07/2002 | 0,22 | 0,12 | 0,14 | 2848 | 1885 | 4217 |
| 21/05/2006 | 0,15 | 0,08 | 0,09 | 2848 | 1887 | 4233 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas de *Overall* muestran una disminución en el valor del factor de potencia. Los valores en la capacitancia se mantienen estables en las distintas mediciones.

La tabla XIII muestra los resultados de las pruebas a las boquillas realizadas al transformador.

Tabla XIII. Prueba a las boquillas, fase R, Escuintla 1

| Fecha | Capacitancia (pF) | | | | | |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | C ₁ -H ₁ | C ₁ -X ₁ | C ₂ -H ₁ | C ₁ -H ₁ | C ₁ -X ₁ | C ₂ -H ₁ |
| 20/07/2002 | 0,33 | 0,33 | 0,21 | 341,7 | 338,4 | 1750 |
| 21/05/2006 | 0,34 | 0,33 | 0,16 | 340,18 | 337,59 | 1749,1 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas a las boquillas muestran que el factor de potencia se ha mantenido estable en las mediciones C₁ y C₂.

Los valores de capacitancia para boquilla de alta para las dos mediciones tienen valores constantes, se puede concluir que no existe corto circuito entre las láminas conductoras de la boquilla y el aislamiento interno de la boquilla se encuentra en buenas condiciones.

La tabla XIV muestra los resultados de la prueba de collar caliente realizadas al transformador.

Tabla XIV. Prueba de collar caliente, fase R, Escuintla 1

| Fecha | Boquilla - Campana (Watts) | | | Boquilla-Campana (Watts) | | |
|------------|----------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|
| | H ₁₋₆ | H ₁₋₁₈ | H ₁₋₃₆ | X ₁₋₄ | X ₁₋₁₆ | X ₁₋₂₈ |
| 21/05/2006 | 0,016 | 0,024 | 0,079 | 0,017 | 0,02 | 0,037 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de collar caliente fue realizada en una sola ocasión por lo que estos valores quedan como referencia para pruebas futuras. De las mediciones de C_1 y C_2 podemos concluir que el aislamiento de la boquilla se encuentra en buenas condiciones.

La tabla XV muestra los resultados de las pruebas al aceite realizadas al transformador.

Tabla XV. **Prueba al aceite, fase R, Escuintla 1**

| Fecha | %Fp |
|------------|-----|
| 18/07/2002 | 0 |
| 18/07/2002 | 0 |
| 20/07/2002 | 0 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas al aceite muestran un factor de potencia cero. Sin embargo, las pruebas fueron realizadas con aceite nuevo, y estas pruebas son del 2002.

La tabla XVI muestra los resultados de la prueba de relación de transformación realizada al transformador.

Tabla XVI. **Prueba de relación de transformación, fase R, Escuintla 1**

| Fecha | Relación de transformación | | | | | |
|------------|----------------------------|------|------|------|------|------|
| 20/07/2002 | 1,92 | 1,82 | 1,72 | 1,62 | 1,52 | 1,42 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba al aceite del transformador fue realizada en una sola ocasión por lo que estos valores quedan como referencia para pruebas futuras.

Para realizar un análisis, es necesario comparar los resultados en las pruebas de *Overall* realizadas a otro transformador en el banco, en la tabla XXI aparecen los resultados de las pruebas de relación de transformación al transformador de la fase T, los resultados entre los distintos transformadores muestran consistencia.

La tabla XVII muestra los resultados de la prueba de corriente de excitación realizada al transformador.

Tabla XVII. Prueba de corriente de excitación, fase R, Escuintla 1

| Fecha | Corriente de Excitación (mA) | | | | | |
|--------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 21/05/2006 | 15,95 | 17,67 | 19,69 | 22,33 | 25,05 | 28,37 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de corriente de excitación al transformador fue realizada en una sola ocasión por lo que estos valores quedan como referencia para pruebas futuras.

No se ha realizado prueba de corriente de excitación en otra unidad del banco por lo que los valores obtenidos quedan como referencia para futuras pruebas.

4.1.2. Transformador fase S, ID-A01003

La tabla XVIII muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizada al transformador.

Tabla XVIII. Prueba de *Overall*, fase S, Escuintla 1

| Fecha | %Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HT} | C _T | C _H | C _{HT} | C _T |
| 16/07/2002 | 0,22 | 0,14 | 0,18 | 2873 | 1880 | 4450 |
| 26/06/2005 | 0,21 | 0,11 | 0,14 | 2872 | 1880 | 4457 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran una disminución en el valor del factor de potencia. Los valores en la capacitancia se mantienen estables en las distintas mediciones.

La tabla XIX muestra los resultados de las pruebas a las boquillas realizadas al transformador.

Tabla XIX. Prueba a las boquillas, fase S, Escuintla 1

| Datos | %Fp | | | | Capacitancia (pF) | | | |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | C ₁ -H ₁ | C ₁ -X ₁ | C ₂ -H ₁ | C ₂ -X ₁ | C ₁ -H ₁ | C ₁ -X ₁ | C ₂ -H ₁ | C ₂ -X ₁ |
| 16/07/2002 | 0,41 | 0,38 | 0,22 | 0,32 | 339,8 | 348,1 | 1736 | 986,4 |
| 26/06/2005 | 0,36 | 0,38 | 0,15 | 0,32 | 339,4 | 348 | 1721 | 1012 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que el factor de potencia se ha mantenido estable en la boquilla de alta tensión, tanto en la medición de C_1 y C_2 . El factor de potencia en la boquilla de baja se ha mantenido estable tanto en medición de C_1 y C_2 .

Los valores de capacitancia tanto en la boquilla de alta y baja para las dos mediciones tienen valores constantes, se puede concluir que no existe ningún corto circuito entre las láminas conductoras de la boquilla y el aislamiento interno de la boquilla se encuentra en buenas condiciones.

La tabla XX muestra los resultados de las pruebas al aceite realizadas al transformador.

Tabla XX. **Prueba al aceite, fase S, Escuintla 1**

| Fecha | % Fp |
|------------|------|
| 13/07/2002 | 0,01 |
| 16/07/2002 | 0,01 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que el aceite se encuentra en condiciones excelentes, las muestras fueron tomadas de aceite durante el filtrado y la última muestra del aceite ya en la cuba del transformador.

La tabla XXI muestra los resultados de las pruebas de relación de transformación realizadas al transformador.

Tabla XXI. **Prueba de relación de transformación, fase S, Escuintla 1**

| Datos | Relación de Transformación | | | | | |
|------------|----------------------------|------|------|------|------|------|
| 16/07/2002 | 1,92 | 1,82 | 1,72 | 1,62 | 1,52 | 1,42 |
| 26/06/2005 | 1,92 | 1,82 | 1,72 | 1,62 | 1,52 | 1,42 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores en las pruebas de relación de transformación se han mantenido invariables, no hay problemas en el cambiador de taps.

4.1.3. Transformador fase T, ID-A01001

La tabla XXII muestra los resultados de la prueba de *Overall* realizada al transformador.

Tabla XXII. **Prueba de Overall, fase T, Escuintla 1**

| Fecha | %Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HT} | C _T | C _H | C _{HT} | C _T |
| 11/07/2002 | 0.18 | 0.14 | 0.15 | 2858 | 1878 | 4232 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de *Overall* al transformador fue realizada en una sola ocasión por lo que estos valores quedan como referencia para pruebas futuras.

Para realizar un análisis, es necesario comparar los resultados de las pruebas de *Overall* realizadas a otro transformador con las mismas características.

En la tabla XVIII aparecen los resultados a las pruebas de *Overall* del transformador de la fase S. Los resultados de las pruebas son constantes con los resultados del transformador de la fase T.

La tabla XXIII muestra los resultados de las pruebas al aceite realizadas al transformador.

Tabla XXIII. Prueba al aceite, fase T, Escuintla 1

| Fecha | %Fp |
|------------|------|
| 04/07/2002 | 0,01 |
| 09/07/2002 | 0,01 |
| 10/07/2002 | 0,01 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que el aceite se encuentra en condiciones excelentes, las muestras fueron tomadas de aceite durante el filtrado y la última muestra del aceite ya en la cuba del transformador.

La tabla XXIV muestra los resultados de las pruebas de relación de transformación realizada al transformador.

Tabla XXIV. Prueba de relación de transformación, fase T, Escuintla 1

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|------------|----------------------------|------|------|------|------|------|
| 11/07/2002 | 1,92 | 1,82 | 1,72 | 1,62 | 1,52 | 1,42 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de relación de transformación fue realizada en una sola ocasión por lo que estos valores quedan como referencia para pruebas futuras.

Para realizar un análisis, es necesario comparar los resultados en las pruebas de *Overall* realizada a otro transformador en el banco, en la tabla XXI aparecen los resultados a las pruebas de relación de transformación al transformador de la fase T.

4.2. Pruebas dieléctricas a transformadores de potencia de la Subestación Guatemala Este

Los transformadores analizados forman parte de un banco de transformación trifásico, conformado por tres autotransformadores de 65 MVA cada uno, con voltajes de transformación de 230 kV / 69 kV.

4.2.1. Transformador fase R, ID-1111881

La tabla XXV muestra los resultados de la prueba de *Overall* realizada al transformador.

Tabla XXV. Prueba de *Overall*, fase R, Guatemala Este

| Fecha | %Fp | | | | Capacitancia (pF) | | | |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | C _H | C _{HL} | C _L | C _{HT} | C _H | C _{HL} | C _L | C _{HT} |
| 12/04/1998 | 0,14 | 0,14 | 0,19 | 0,1 | 3282 | 3402 | 1775 | 53 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de *Overall* al transformador fue realizada en una sola ocasión por lo que estos valores quedan como referencia para pruebas futuras.

Para realizar un análisis, es necesario comparar los resultados de las pruebas de *Overall* realizada a otro transformador en el banco, en la tabla XXVI aparecen los resultados a la prueba de *Overall* al transformador de la fase S. Los resultados de la prueba son similares con los resultados de la prueba del transformador de la fase R.

4.2.2. Transformador fase S, ID-1111882

La tabla XXVI muestra los resultados de la prueba de *Overall* realizada al transformador.

Tabla XXVI. Prueba de *Overall*, fase S, Guatemala Este

| Fecha | %Fp | | | | Capacitancia (pF) | | | |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | C _H | C _{HL} | C _L | C _{HT} | C _H | C _{HL} | C _L | C _{HT} |
| 12/04/1998 | 0,14 | 0,15 | 0,19 | 0,16 | 3205 | 3423 | 1743 | 52 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de *Overall* al transformador fue realizada en una sola ocasión por lo que estos valores quedan como referencia para pruebas futuras.

Para realizar un análisis, es necesario comparar los resultados de la prueba de *Overall* realizada a otro transformador en el banco, en la tabla XXV aparecen los resultados de la prueba de *Overall* al transformador de la fase R. Los resultados de la prueba son similares con los resultados del transformador de la fase S.

La tabla XXVII muestra los resultados de la prueba a las boquillas realizada al transformador.

Tabla XXVII. **Prueba a las boquillas, fase S, Guatemala Este**

| Fecha | %Fp | | | | Capacitancia (pF) | | | |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | H ₁ -C ₁ | H ₁ -C ₂ | X ₁ -C ₁ | X ₁ -C ₂ | H ₁ -C ₁ | H ₁ -C ₂ | X ₁ -C ₁ | X ₁ -C ₂ |
| 12/04/1998 | 0,31 | 0,32 | 0,23 | 0,24 | 372,9 | 7315 | 308,4 | 501,1 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba a las boquillas fue realizada en una sola ocasión por lo que estos valores quedan como referencia para pruebas futuras.

La tabla XXVIII muestra los resultados de la prueba de relación de transformación realizada al transformador.

Tabla XXVIII. **Prueba de relación de transformación, fase S, Guatemala Este**

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|------------|----------------------------|------|------|------|------|------|
| 12/04/1998 | 3,83 | 3,63 | 3,43 | 3,23 | 3,03 | 2,83 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de relación de transformación al transformador fue realizada en una sola ocasión por lo que estos valores quedan como referencia para pruebas futuras.

La tabla XXIX muestra los resultados de la prueba de corriente de excitación realizada al transformador.

Tabla XXIX. **Prueba de corriente de excitación, fase S, Guatemala Este**

| Fecha | Corriente de Excitación (mA) | | | | | |
|------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 12/04/1998 | 40,68 | 44,03 | 48,01 | 54,28 | 59,95 | 66,57 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de corriente de excitación al transformador fue realizada en una sola ocasión por lo que estos valores quedan como referencia para pruebas futuras.

4.2.3. Transformador Fase T, ID-1111883

La tabla XXX muestra los resultados de la prueba de *Overall* realizada al transformador.

Tabla XXX. **Prueba de *Overall*, fase T, Guatemala Este**

| Fecha | % Fp | | | | Capacitancia (pF) | | | |
|------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HL} | C _{HT} | C _L | C _H | C _{HL} | C _{HT} | C _L |
| 07/09/2003 | 0,14 | 0,15 | 0,16 | 0,19 | 3199 | 3477 | 52 | 1750 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de *Overall* al transformador fue realizada en una sola ocasión por lo que estos valores quedan como referencia para pruebas futuras.

Para realizar un análisis, es necesario comparar los resultados en la prueba de *Overall* realizada a otro transformador en el banco, en la tabla XXV aparecen los resultados a las prueba de *Overall* al transformador de la fase R. Los resultados de las pruebas son constantes con los resultados del transformador de la fase T.

4.3. Pruebas dieléctricas a transformadores de potencia de la Subestación Guatemala-Norte

Los transformadores analizados forman parte de dos bancos de transformación trifásico, cada banco formado por tres transformadores. El primer banco, denominado Banco 2, donde cada transformador es de 50 MVA, con voltajes de transformación de 230kV/69kV. El segundo banco, denominado Banco 3, donde cada transformador es de 50 MVA, con voltajes de transformación de 230kV/69kV.

4.3.1. Transformador banco 2, fase R, ID-217210-6

La tabla XXXI muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizadas al transformador.

Tabla XXXI. Prueba de Overall, fase 2/R, Guatemala Norte

| Fecha | % Fp | | | | Capacitancia (pF) | | | |
|------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HL} | C _{HT} | C _L | C _H | C _{HL} | C _{HT} | C _L |
| 15/03/1999 | 0,32 | 0,8 | -0,17 | 0,41 | 2800 | 3044 | 16 | 944,1 |
| 15/03/1999 | 0,32 | 0,81 | 0 | 0,37 | 2797 | 3043 | 17 | 943,1 |
| 15/03/1999 | 0,32 | 0,81 | 0 | 0,37 | 2797 | 3043 | 17 | 943,1 |
| 18/05/1999 | 0,36 | 0,86 | 0 | 0,41 | 2731 | 2968 | 16 | 927,1 |
| 24/05/1999 | 0,35 | 0,5 | -0,36 | 0,67 | 2751 | 2963 | 16 | 875,3 |
| 13/05/2001 | 0,3 | 0,44 | -0,1 | 0,46 | 2733 | 2963 | 16 | 885,3 |
| 18/05/2003 | 0,3 | 0,44 | -0,1 | 0,46 | 2733 | 2963 | 16 | 885,3 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran un valor constante del factor de potencia para las mediciones de C_H, C_{HT} y C_L, para la medición de C_{HL} el factor de potencia disminuyó gradualmente de 0,8 a 0,44 en un lapso de cuatro años. Los valores en la capacitancia se mantienen estables, y para la medición de C_{HL} ha disminuido el valor de la capacitancia.

La tabla XXXII muestra los resultados de las pruebas a las boquillas realizadas al transformador.

Tabla XXXII. Prueba a las boquillas, fase 2/R, Guatemala Norte

| Fecha | %Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | H ₁ - C ₁ | H ₁ - C ₂ | X ₁ - C ₁ | H ₁ - C ₁ | H ₁ - C ₂ | X ₁ - C ₁ |
| 15/03/1999 | 0,64 | 0,55 | 0,62 | 288,4 | 2329 | 220,8 |
| 15/03/1999 | 0,64 | 0,55 | 0,62 | 288,4 | 2329 | 220,8 |
| 24/05/1999 | | | 0,56 | | | 155,3 |
| 13/05/2001 | 0,48 | 0,53 | 0,51 | 296 | 2320 | 166,8 |
| 18/05/2003 | 0,48 | 0,53 | 0,51 | 296 | 2320 | 166,8 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que el factor de potencia se ha mantenido estable en la boquilla de alta tensión, tanto en la medición de C₁ y C₂, con tendencia a disminuir. El factor de potencia en la boquilla de baja se ha mantenido estable en la medición de C₁

El valor de capacitancia tanto en la boquilla de alta tiene un valor constante, se puede concluir que no existe ningún corto circuito entre las láminas conductoras de la boquilla y el aislamiento interno de la boquilla se encuentra en buenas condiciones.

La tabla XXXIII muestra los resultados de las pruebas de collar caliente realizadas al transformador.

Tabla XXXIII. **Pruebas de collar caliente, fase 2/R, Guatemala Norte**

| Fecha | Boquilla-Campana (Watts) | | | Boquilla-Campana (Watts) | |
|------------|--------------------------|------------------|-------------------|--------------------------|------------------|
| | H ₁₋₄ | H ₁₋₉ | H ₁₋₁₈ | X ₁₋₃ | X ₁₋₇ |
| 15/03/1999 | 0,022 | 0,019 | 0,08 | 0,027 | 0,037 |
| 15/03/1999 | 0,022 | 0,019 | 0,08 | 0,027 | 0,037 |
| 24/05/1999 | 0,022 | 0,02 | 0,093 | 0,026 | |

Fuente: elaboración propia.

La potencia en las pruebas de collar caliente tanto en la boquilla de alta como en la boquilla de baja se han mantenido constante, por lo que se puede concluir junto con las mediciones de C₁ y C₂ que el aislamiento en las boquillas se encuentra en buenas condiciones.

La tabla XXXIV muestra los resultados de las pruebas de aceite realizadas al transformador.

Tabla XXXIV. **Prueba al aceite, fase 2/R, Guatemala Norte**

| Fecha | %Fp |
|------------|------|
| 15/03/1999 | 0,11 |
| 15/03/1999 | 0,11 |
| 14/05/1999 | 0,11 |
| 04/05/1999 | |
| 14/05/1999 | 0,16 |
| 16/05/1999 | 0,13 |
| 16/05/1999 | 0,01 |
| 17/05/1999 | 0,07 |
| 18/05/1999 | 0,08 |
| 24/05/1999 | 0,05 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que el aceite se encuentra en buenas condiciones, las muestras fueron tomadas de aceite en diferentes fases del filtrado y la última muestra del aceite ya en la cuba del transformador. Sin embargo, los resultados proceden del año 1999, por lo que los resultados de dichas pruebas no son significativos para el análisis.

La tabla XXXV muestra los resultados de las pruebas de relación de transformación realizadas al transformador.

**Tabla XXXV. Prueba de relación de transformación, fase 2/R,
Guatemala Norte**

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 15/03/1999 | 3,8411 | 3,641 | 3,4401 | 3,2386 | 3,0366 | 2,8352 |
| 15/03/1999 | 3,8411 | 3,641 | 3,4401 | 3,2386 | 3,0366 | 2,8352 |
| 24/05/1999 | 3,8408 | 3,6391 | 3,4381 | 3,2376 | 3,0364 | 2,8338 |
| 18/05/2003 | 3,8389 | 3,6379 | 3,4373 | 3,2359 | 3,035 | 2,8342 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores en las pruebas de relación de transformación se han mantenido constantes en los diferentes taps del transformador.

La tabla XXXVI muestra los resultados de las pruebas de corriente de excitación realizadas al transformador.

**Tabla XXXVI. Pruebas de corriente de excitación, fase 2/R,
Guatemala Norte**

| Fecha | Corriente de Excitación (mA) | | | | | |
|--------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 15/03/1999 | 46,18 | 49,63 | 53,68 | 59,7 | 64,98 | 71,29 |
| 15/03/1999 | 46,18 | 49,63 | 53,68 | 59,7 | 64,98 | 71,29 |
| 24/05/1999 | 43,55 | 47,28 | 51,57 | 57,89 | 63,68 | 70,71 |
| 18/05/2003 | 37,82 | 40,81 | | 49,77 | 54,64 | 60,73 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

El valor de la corriente de excitación se mantiene constante en los diferentes taps del transformador con tenencia a disminuir.

4.3.2. Transformador banco 2, fase S, ID 217210-4

La tabla XXXVII muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizadas al transformador.

Tabla XXXVII. Prueba de *Overall*, fase 2/S, Guatemala Norte

| Fecha | %Fp | | | | Capacitancia (pF) | | | |
|------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HL} | C _{HT} | C _L | C _H | C _{HL} | C _{HT} | C _L |
| 30/11/1999 | 0,28 | 0,29 | 0 | 0,44 | 2798 | 3032 | 17 | 938,8 |
| 27/01/2000 | 0,26 | 0,27 | -0,17 | 0,48 | 2735 | 2961 | 17 | 925,2 |
| 28/01/2000 | 0,27 | 0,28 | -0,17 | 0,52 | 2733 | 2962 | 17 | 923,9 |
| 28/01/2000 | 0,27 | 0,28 | -0,17 | 0,5 | 2732 | 2961 | 17 | 923,8 |
| 06/05/2001 | 0,26 | 0,21 | -0,13 | 0,75 | 2730 | 2956 | 15 | 870,7 |
| 13/05/2001 | 0,27 | 0,21 | 0 | 0,76 | 2735 | 2954 | 17 | 877 |
| 05/03/2006 | 0,35 | 0,22 | -0,3 | 0,53 | 2731 | 2961 | 16 | 893 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran valores constantes del factor de potencia entre las distintas mediciones con tendencias a disminuir. Sin embargo, la medición C_H muestra un aumento de 0,27 a 0,35, dar seguimiento. Los valores en la capacitancia se mantienen estables.

La tabla XXXVIII muestra los resultados de las pruebas a las boquillas realizadas al transformador.

Tabla XXXVIII. **Prueba a las boquillas, fase 2/S, Guatemala Norte**

| Fecha | % Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | H ₁ -C ₁ | H ₁ -C ₂ | X ₁ -C ₁ | H ₁ -C ₁ | H ₁ -C ₂ | X ₁ -C ₁ |
| 02/02/2000 | 0,55 | 0,57 | 0,53 | 279 | 2419 | 224,3 |
| 13/05/2001 | | | 0,58 | | | 160,5 |
| 05/03/2006 | 0,5 | 0,54 | 0,57 | 284 | 2411 | 177,6 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que el factor de potencia se ha mantenido estable en la boquilla de alta tensión en la medición de C₁ y C₂. El factor de potencia en la boquilla de baja en la medición C₁ se mantuvo estable.

Los valores de capacitancia tanto en la boquilla de alta tienen un valor constante, se puede concluir que no existe corto circuito entre las láminas conductoras de las boquillas.

La tabla XXXIX muestra los resultados de las pruebas de collar caliente realizadas al transformador.

Tabla XXXIX. **Prueba de collar caliente, fase 2/S, Guatemala Norte**

| Fecha | Potencia (Watts) | | | | | |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | H ₁₋₀₂ | H ₁₋₀₆ | H ₁₋₁₂ | X ₁₋₀₂ | X ₁₋₀₆ | X ₁₋₁₀ |
| 02/02/2000 | 0,013 | 0,026 | 0,025 | | | |
| 06/05/2001 | | | | 0,036 | 0,032 | 0,086 |
| 05/03/2006 | 0,023 | 0,03 | 0,022 | | 0,028 | |

Fuente: elaboración propia.

La potencia en las pruebas de collar caliente tanto en la boquilla de alta como en la boquilla de baja se han mantenido constante, por lo que se puede concluir junto con las mediciones de C_1 y C_2 que el aislamiento en las boquillas se encuentra en buenas condiciones.

La tabla XL muestra los resultados a las pruebas de relación de transformación realizadas al transformador.

Tabla XL. Prueba de relación de transformación, fase 2/S, Guatemala Norte

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 28/01/2000 | 3,8432 | 3,6415 | 3,4404 | 3,2387 | 3,0366 | 2,8351 |
| 18/05/2003 | 3,8397 | 3,6385 | 3,4378 | 3,2364 | 3,0353 | 2,8344 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores en las pruebas de relación de transformación se han mantenido constantes en los distintos taps del transformador.

La tabla XLI muestra los resultados de las pruebas de corriente de excitación realizadas al transformador.

Tabla XLI. **Prueba de corriente de excitación, fase 2/S, Guatemala Norte**

| Fecha | Corriente de Excitación (mA) | | | | | |
|------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 30/11/1999 | 36,08 | 39,06 | 42,51 | 48,04 | 52,85 |
| 27/01/2000 | 36,12 | 39,05 | 42,51 | 48,08 | 52,94 | 58,84 |
| 18/05/2003 | 39,08 | 42,24 | 46,03 | 51,88 | 57,14 | 63,57 |
| 05/03/2006 | 35,49 | 38,34 | 41,75 | 47,09 | 51,84 | 57,62 |
| Tap | 1 | 9 | 5 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

El valor de la corriente de excitación se mantiene constante en los diferentes taps del transformador.

4.3.3. Transformador banco 2, fase T, ID-217210-2

La tabla XLII muestra los resultados a las pruebas de *Overall* realizadas al transformador.

Tabla XLII. **Prueba de Overall, fase 2/T, Guatemala Norte**

| Fecha | %Fp | | | | Capacitancia (pF) | | | |
|------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HL} | C _{HT} | C _L | C _H | C _{HL} | C _{HT} | C _L |
| 29/11/1998 | 0,27 | 0,27 | 0 | 0,4 | 5823 | | 17,56 | 3945 |
| 22/06/1999 | 0,26 | | -5,9 | 0,3 | 5823 | | 17,56 | 3945 |
| 22/06/1999 | 0,27 | 0,27 | 0 | 0,4 | 5801 | 2992 | 17,59 | 3949 |
| 04/09/1999 | 0,29 | 0,26 | 0 | 0,37 | 5673 | 2923 | 17,16 | 3865 |
| 26/08/2001 | 0,26 | 0,21 | 0 | 0,36 | 5666 | 2917 | 17,06 | 3796 |
| 22/02/2004 | 0,21 | 0,17 | -0,1 | 0,32 | 5668 | 2919 | 17,14 | 3816 |
| 14/05/2006 | 0,23 | 0,2 | -0,1 | 0,73 | 5680 | 2923 | 17,15 | 3823 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran un valor constante del factor de potencia entre las distintas mediciones. Los valores en la capacitancia se mantienen estables en las diferentes mediciones.

La tabla XLIII muestra los resultados de las pruebas a las boquillas realizadas al transformador.

Tabla XLIII. Prueba a las boquillas, fase 2/T, Guatemala Norte

| Fecha | % Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | H ₁ -C ₁ | H ₁ -C ₂ | X ₁ -C ₁ | H ₁ -C ₁ | H ₁ -C ₂ | X ₁ -C ₁ |
| 22/06/1999 | 0,6 | 0,55 | 0,57 | 287,4 | 2358 | 229,7 |
| 26/08/2001 | | | 0,72 | | | 158,6 |
| 22/02/2004 | 0,49 | 0,53 | 0,48 | 295,1 | 2358 | 175,3 |
| 14/05/2006 | 0,53 | 0,78 | 0,51 | 296 | 2335 | 177,6 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que el factor de potencia se ha mantenido estable en la boquilla de alta tensión en la medición de C₁ y C₂. El factor de potencia en la boquilla de baja en la medición C₁ se mantuvo estable.

Los valores de capacitancia tanto en la boquilla de alta tienen un valor constante, se puede concluir que no existe ningún corto circuito entre las láminas conductoras de la boquilla y el aislamiento interno de la boquilla se encuentra en buenas condiciones.

La tabla XLIV muestra los resultados a las prueba de collar caliente realizada al transformador.

Tabla XLIV. **Prueba de collar caliente, fase 2/T, Guatemala Norte**

| Fecha | Potencia (Watts) | | | | |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | H ₁₋₀₃ | H ₁₋₀₉ | H ₁₋₁₈ | X ₁₋₀₄ | X ₁₋₁₀ |
| 22/02/2004 | 0,123 | 0,156 | 0,308 | 0,138 | 0,181 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de collar caliente fue realizada en una sola ocasión por lo que estos valores quedan como referencia para pruebas futuras. De las mediciones de C_1 y C_2 podemos concluir que el aislamiento de la boquilla se encuentra en buenas condiciones.

La tabla XLV muestra los resultados de las pruebas al aceite realizadas al transformador.

Tabla XLV. **Prueba al aceite, fase 2/T, Guatemala Norte**

| Fecha | % Fp |
|------------|-------|
| 07/12/1998 | 0,916 |
| 25/08/1999 | 0,887 |
| 30/08/1999 | 0,882 |
| 04/09/1999 | 0,887 |
| 30/09/1999 | 0,887 |

Fuente: elaboración propia.

El factor de potencia se ha mantenido estable, disminuyendo desde la primera pruebas, se puede concluir que el aceite se encuentra en buenas condiciones. Sin embargo, las pruebas fueron realizadas en el transcurso de los años 1998 y 1999 por lo que los resultados de dichas pruebas no son significativos para el análisis.

La tabla XLVI muestra los resultados de las pruebas de relación de transformación realizada al transformador.

Tabla XLVI. Prueba de relación de transformación, Fase 2/T, Guatemala Norte

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 29/11/1998 | 3,8414 | 3,6412 | 3,4402 | 3,2387 | 3,0376 | 2,8359 |
| 22/06/1999 | 3,8394 | 3,6394 | 3,4385 | 3,237 | 3,036 | 2,8345 |
| 22/02/2004 | 3,8407 | 3,6407 | 3,4384 | 3,2379 | 3,0366 | 2,8346 |
| 14/05/2006 | 3,8412 | 3,6394 | 3,4381 | 3,2373 | 3,0357 | 2,8335 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores en las pruebas de relación de transformación se han mantenido constantes.

La tabla XLVII muestra los resultados de las pruebas de corriente de excitación realizadas al transformador.

Tabla XLVII. Prueba de corriente de excitación, fase 2/T, Guatemala Norte

| Fecha | Corriente de Excitación (mA) | | | | | |
|--------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 29/11/1998 | 39,95 | 43,15 | 46,91 | 52,55 | 57,62 | 63,92 |
| 22/06/1999 | 33,93 | 36,81 | 40,08 | 45,32 | 49,84 | 55,39 |
| 04/09/1999 | 33,89 | 36,58 | 39,93 | 45,29 | 49,99 | 55,5 |
| 22/02/2004 | 36,44 | 39,37 | 42,91 | 48,44 | 53,43 | 59,46 |
| 14/05/2006 | 38,57 | 41,68 | 45,38 | 51,13 | 56,21 | 62,36 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores de la corriente de excitación se mantienen constantes en los diferentes taps del transformador, no se observan problemas en el núcleo del transformador.

4.3.4. Transformador banco 3, fase R, ID-217210-7

La tabla XLVIII muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizada al transformador.

Tabla XLVIII. Prueba de *Overall*, fase 3/R, Guatemala Norte

| Fecha | % Fp | | | | Capacitancia (pF) | | | |
|------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HL} | C _{HT} | C _L | C _H | C _{HL} | C _{HT} | C _L |
| 23/11/2000 | 0,49 | 0,35 | -0,14 | 0,5 | 2722 | 2938 | 18 | 871,4 |
| 23/11/2000 | 0,46 | 0,37 | -2,7 | 0,5 | 2717 | 2936 | 15 | 874,6 |
| 07/04/2006 | 0,4 | 0,26 | -0,3 | 0,57 | 2726 | 2935 | 17 | 901,8 |
| 23/09/2006 | 0,31 | 0,28 | -0,3 | 0,76 | 2727,7 | 2940 | 17,6 | 895,71 |
| 27/09/2006 | 0,26 | 0,28 | -0,15 | 0,71 | 2729,6 | 2939 | 17,6 | 895,05 |
| 27/09/2006 | 0,25 | 0,28 | -0,3 | 0,68 | 2729,4 | 2938 | 17,5 | 895,21 |
| 19/01/2007 | 0,27 | 0,24 | -0,41 | 0,35 | 2727,5 | 2938,7 | 17,6 | 899,77 |
| 18/05/2008 | 0,19 | 0,17 | -0,1 | 0,44 | 2727,4 | 2938,2 | 17,4 | 897,74 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran un valor constante del factor de potencia entre las distintas mediciones. Los valores en la capacitancia se mantienen estables en las distintas mediciones.

La tabla XLIX muestra los resultados de las pruebas a las boquillas realizadas al transformador.

Tabla XLIX. **Prueba a las boquillas, fase 3/R, Guatemala Norte**

| Fecha | % Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | H ₁ -C ₁ | H ₁ -C ₂ | X ₁ -C ₁ | H ₁ -C ₁ | H ₁ -C ₂ | X ₁ -C ₁ |
| 07/04/2006 | 0,52 | 0,58 | 0,5 | 284,4 | 2326 | 181,5 |
| 23/09/2006 | 0,58 | 0,58 | 0,55 | 283,16 | 2319,6 | 179,62 |
| 27/09/2006 | 0,56 | 0,56 | 0,59 | 283,37 | 2320,5 | 179,98 |
| 19/01/2007 | 0,56 | 0,56 | 0,52 | 283,54 | 2318 | 182,45 |
| 18/05/2008 | 0,49 | 0,61 | 0,51 | 286,23 | 2329 | 181,6 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que el factor de potencia se ha mantenido estable en la boquilla de alta tensión en la medición de C₁ y C₂. El factor de potencia en la boquilla de baja en la medición C₁ se mantuvo estable.

Los valores de capacitancia en la boquilla de alta tienen un valor constante, se puede concluir que no existe ningún corto circuito entre las láminas conductoras de la boquilla y el aislamiento interno de la boquilla se encuentra en buenas condiciones.

La tabla L muestra los resultados de las pruebas de collar caliente realizadas al transformador.

Tabla L. **Prueba de collar caliente, fase 3/R, Guatemala Norte**

| Fecha | Potencia (Watts) | | | | |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | H ₁₋₀₂ | H ₁₋₀₉ | H ₁₋₁₅ | X ₁₋₀₄ | X ₁₋₀₉ |
| 19/01/2007 | 0,013 | 0,024 | 0,026 | 0,022 | 0,028 |
| 18/05/2008 | 0,013 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,029 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que la potencia disipada para las distintas campanas es constante, el aislamiento de la boquilla está en buen estado, cosa que podemos corroborar con las mediciones de C_1 y C_2 .

La tabla LI muestra los resultados de las pruebas al aceite realizadas al transformador.

Tabla LI. Prueba de aceite, fase 3/R, Guatemala Norte

| Fecha | % Fp |
|------------|------|
| 23/11/2000 | 0,05 |
| 27/09/2006 | 0,08 |
| 19/01/2007 | 0,07 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que el aceite se encuentra en buenas condiciones.

La tabla LII muestra los resultados de las pruebas de relación de transformación realizadas al transformador.

Tabla LII. Prueba de relación de transformación, fase 3/R, Guatemala Norte

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 23/11/2000 | 3,8361 | 3,636 | 3,4338 | 3,2336 | 3,0326 | 2,832 |
| 23/09/2006 | 3,8387 | 3,6375 | 3,4359 | 3,2372 | 3,0362 | 2,8349 |
| 19/01/2007 | 3,8385 | 3,638 | 3,4364 | 3,2351 | 3,0338 | 2,8326 |
| 18/05/2008 | 3,8407 | 3,6394 | 3,4382 | 3,237 | 3,0356 | 2,8336 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores en las pruebas de relación de transformación se han mantenido constantes en los distintos taps del transformador.

La tabla LIII muestra los resultados de las pruebas de corriente de excitación realizadas al transformador.

Tabla LIII. **Prueba de corriente de excitación, fase 3/R, Guatemala Norte**

| Fecha | Corriente de Excitación (mA) | | | | | |
|------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 23/11/2000 | 39,88 | 43,11 | 47 | 52,89 | 58,27 | 64,54 |
| 23/09/2006 | 36,675 | 39,568 | 42,939 | 48,298 | 52,946 | 58,608 |
| 19/01/2007 | 36,11 | 38,941 | 42,262 | 47,51 | 52,116 | 57,773 |
| 18/05/2008 | 39,5 | 42,68 | 46,48 | 52,2 | 57,44 | 63,78 |
| Datos | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

El valor de la corriente de excitación se mantiene constante en los diferentes taps del transformador.

4.3.5. Transformador banco 3, fase S, ID-217210-1

La tabla LIV muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizadas al transformador.

Tabla LIV. Prueba de Overall, fase 3/S, Guatemala Norte

| Fecha | % Fp | | | | Capacitancia (pF) | | | |
|------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HL} | C _{HT} | C _L | C _H | C _{HL} | C _{HT} | C _L |
| 09/05/2000 | 0,3 | 0,29 | -0,38 | 0,78 | 2791 | 3011 | 18 | 951,4 |
| 10/06/2000 | 0,47 | 0,35 | -0,13 | 0,73 | 2734 | 2945 | 17 | 923,6 |
| 11/06/2000 | 0,34 | 0,35 | 1,33 | 0,72 | 2720 | 2947 | 18 | 923,6 |
| 11/06/2000 | 0,34 | 0,36 | -0,13 | 0,72 | 2723 | 2942 | 17 | 924,3 |
| 25/10/2000 | 0,43 | 0,28 | | 0,41 | 2730 | 2938 | 0 | 861,9 |
| 27/10/2000 | 0,29 | 0,3 | -0,28 | 0,47 | 2721 | 2941 | 18 | 863,1 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran un valor constante del factor de potencia entre las distintas mediciones. Los valores en la capacitancia se mantienen estables en las distintas mediciones.

La tabla LV muestra los resultados de las pruebas a las boquillas realizadas al transformador.

Tabla LV. Prueba a las boquillas, fase 3/S, Guatemala Norte

| Fecha | % Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | H ₁ -C ₁ | H ₁ -C ₂ | X ₁ -C ₁ | H ₁ -C ₁ | H ₁ -C ₂ | X ₁ -C ₁ |
| 09/05/2000 | 0,56 | 0,59 | 0,51 | 278,4 | 2409 | 225,6 |
| 27/10/2000 | 0,57 | 0,59 | 0,56 | 278,6 | 2383 | 156 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que el factor de potencia se ha mantenido estable en la boquilla de alta tensión en la medición de C₁ y C₂. El factor de potencia en la boquilla de baja en la medición C₁ se mantuvo estable.

Los valores de capacitancia en la boquilla de alta tienen un valor constante, se puede concluir que no existe ningún corto circuito entre las láminas conductoras de la boquilla y el aislamiento interno de la boquilla se encuentra en buenas condiciones.

La tabla LVI muestra los resultados de las pruebas al aceite realizadas al transformador.

Tabla LVI. **Prueba al aceite, fase 3/S, Guatemala Norte**

| Fecha | % Fp |
|------------|------|
| 07/06/2000 | 0,04 |
| 08/06/2000 | 0,28 |
| 09/06/2000 | 0,3 |
| 09/06/2000 | 0,12 |
| 10/06/2000 | 0,1 |
| 10/06/2000 | 0,26 |
| 10/06/2000 | 0,1 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que el aceite se encuentra en buenas condiciones, las muestras fueron tomadas de aceite en diferentes fases del filtrado y la última muestra del aceite ya en la cuba del transformador.

La tabla LVII muestra los resultados de las pruebas de relación de transformación realizadas al transformador.

Tabla LVII. Prueba de relación de transformación, fase 3/S, Guatemala Norte

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 09/05/2000 | 3,841 | 3,641 | 3,439 | 3,238 | 3,036 | 2,835 |
| 27/10/2000 | 3,839 | 3,637 | 3,438 | 3,235 | 3,035 | 2,832 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores en las pruebas de relación de transformación se han mantenido constantes.

La tabla LVIII muestra los resultados de las pruebas de corriente de excitación realizada al transformador.

Tabla LVIII. Prueba de corriente de excitación, fase 3/S, Guatemala Norte

| Fecha | Corriente de excitación (mA) | | | | | |
|--------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 09/05/2000 | 34,61 | 37,48 | 40,79 | 46,07 | 50,64 | 56,26 |
| 27/10/2000 | 34,68 | 37,46 | 40,89 | 46,34 | 50,96 | 56,7 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

El valor de la corriente de excitación se mantiene constante en los diferentes taps del transformador.

4.3.6. Transformador banco 3, fase T, ID-217210-3

La tabla LIX muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizadas al transformador.

Tabla LIX. Prueba de *Overall*, fase 3/T, Guatemala Norte

| Fecha | % Fp | | | | Capacitancia (pF) | | | |
|------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HL} | C _{HT} | C _L | C _H | C _{HL} | C _{HT} | C _L |
| 18/07/1999 | 0,45 | 0,45 | 0,34 | 0,47 | 2785 | 2914 | 960,4 | 18 |
| 29/04/2000 | 0,35 | 0,29 | -0,28 | 0,48 | 2750 | 2849 | 939,9 | 19 |
| 10/06/2001 | 0,26 | 0,22 | -0,21 | 0,7 | 2732 | 2847 | 884,9 | 16 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran un valor constante del factor de potencia entre las distintas mediciones. Los valores en la capacitancia se mantienen estables en las distintas mediciones.

La tabla LX muestra los resultados de las pruebas de relación de transformación realizada al transformador.

Tabla LX. Prueba de relación de transformación, fase 3/T.
Guatemala Norte

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 18/07/1999 | 3,840 | 3,638 | 3,439 | 3,237 | 3,036 | 2,835 |
| 29/04/2000 | 3,839 | 3,638 | 3,437 | 3,235 | 3,035 | 2,933 |
| 19/11/2000 | 3,844 | | 3,441 | | | 2,835 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores en las pruebas de relación de transformación se han mantenido constantes en los diferentes taps del transformador.

4.4. Pruebas dieléctricas a transformadores de potencia de la Subestación Guatemala-Sur

Los transformadores analizados forman parte de cuatro bancos de transformación trifásico. El Banco 1, formado por tres autotransformadores de 25 MVA, con voltajes de transformación de 138 kV / 69 kV. El Banco 2, formado por tres autotransformadores de 25 MVA, con voltajes de transformación de 138kV / 69kV. El Banco 3, formado por tres autotransformadores de 50 MVA, con voltajes de transformación de 230kV/69kV. El Banco 4, un transformador trifásico de 100 MVA, con voltajes de transformación de 230kV/69kV.

4.4.1. Transformador banco 1, fase R, ID-61699

La tabla LXI muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizadas al transformador.

Tabla LXI. Prueba de *Overall*, fase 1/R, Guatemala Sur

| Fecha | % Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HT} | C _T | C _H | C _{HT} | C _T |
| 12/02/2006 | 0,28 | 0,25 | 0,29 | 3079 | 3236 | 4549 |
| 07/12/2006 | 0,49 | 0,37 | 0,41 | 3079,7 | 3222,4 | 4450,2 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran un valor constante del factor de potencia entre las distintas mediciones. Los valores en la capacitancia se mantienen estables en las distintas mediciones.

La tabla LXII muestra los resultados de las pruebas de collar caliente realizadas al transformador.

Tabla LXII. Prueba de collar caliente, fase 1/R, Guatemala Sur

| Fecha | Potencia (Watts) | | | | |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | H ₁₋₀₂ | H ₁₋₀₆ | H ₁₋₁₀ | X ₁₋₀₂ | X ₁₋₀₄ |
| 12/02/2006 | 0,121 | 0,134 | 0,18 | 0,112 | 0,167 |
| 07/12/2006 | 0,12 | 0,139 | 0,193 | 0,109 | 0,161 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que la potencia disipada para las distintas campanas es constante, el aislamiento de la boquilla está en buen estado.

La tabla LXIII muestra los resultados de las pruebas de relación de transformación realizadas al transformador.

Tabla LXIII. Prueba de relación de transformación, fase 1/R, Guatemala Sur

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 12/02/2006 | 1,6993 | 1,8201 | 1,941 | 2,0614 | 2,1819 | 2,3026 |
| 07/12/2006 | 1,6999 | 1,8206 | 1,9411 | 2,0617 | 2,1821 | 2,3023 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores en las pruebas de relación de transformación se han mantenido constantes en los distintos taps del transformador.

La tabla LXIV muestra los resultados de las pruebas de corriente de excitación realizadas al transformador.

Tabla LXIV. **Prueba de corriente de excitación, fase 1/R, Guatemala Sur**

| Fecha | Corriente de Excitación (mA) | | | | | |
|------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 12/02/2006 | 86,02 | 76,59 | 68,76 | 61,01 | 55,32 | 50,35 |
| 07/12/2006 | 76,12 | 68,01 | 61,21 | 55,38 | 50,39 | 45,93 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

El valor de la corriente de excitación disminuyó para la segunda prueba en todos los taps del transformador.

4.4.2. Transformador banco 1, fase S, ID-61701

La tabla LXV muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizadas al transformador.

Tabla LXV. **Prueba de Overall, fase 1/R, Guatemala Sur**

| Fecha | % Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HT} | C _T | C _H | C _{HT} | C _T |
| 17/07/2000 | 0,43 | 0,29 | 0,43 | 3053 | 3202 | 4354 |
| 08/06/2003 | 0,34 | 0,27 | 0,35 | 3061 | 3214 | 4391 |
| 25/04/2004 | 0,32 | 0,23 | 0,34 | 3058 | 3212 | 4279 |
| 12/02/2006 | 0,31 | 0,23 | 0,32 | 3065 | 3224 | 4449 |
| 24/11/2006 | 0,54 | 0,4 | 0,45 | 3053,7 | 3216,1 | 4380,8 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran un valor constante del factor de potencia entre las distintas mediciones. Los valores en la capacitancia se mantienen estables en las distintas mediciones.

La tabla LXVI muestra los resultados de las pruebas de collar caliente realizadas al transformador.

Tabla LXVI. **Prueba de collar caliente, fase 1/R, Guatemala Sur**

| Fecha | Potencia (Watts) | | | | |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | H ₁₋₀₂ | H ₁₋₀₆ | H ₁₋₁₀ | X ₁₋₀₂ | X ₁₋₀₄ |
| 08/06/2003 | | 0,142 | | 0,105 | 0,165 |
| 25/04/2004 | 0,109 | 0,141 | 0,192 | 0,102 | 0,163 |
| 12/02/2006 | 0,106 | 0,14 | 0,173 | 0,105 | 0,157 |
| 24/11/2006 | | 0,137 | 0,177 | 0,104 | 0,155 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que la potencia disipada para las distintas campanas es constante, el aislamiento de la boquilla está en buen estado.

La tabla LXVII muestra los resultados de las pruebas de relación de transformación realizadas al transformador.

Tabla LXVII. Pruebas de relación de transformación, fase 1/R, Guatemala Sur

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 17/07/2000 | 1,6989 | 1,8204 | 1,9407 | 2,0626 | 2,1818 | 2,3042 |
| 18/07/2000 | 1,6991 | 1,8196 | 1,9403 | 2,0609 | 2,1809 | 2,3016 |
| 08/06/2003 | 1,6988 | 1,8203 | 1,9413 | 2,0624 | 2,1832 | 2,3038 |
| 25/04/2004 | 1,6987 | 1,8194 | 1,9402 | 2,061 | 2,1814 | 2,3026 |
| 12/02/2006 | 1,6989 | 1,8204 | 1,941 | 2,0618 | 2,1825 | 2,3026 |
| 24/11/2006 | 1,6989 | 1,8198 | 1,9406 | 2,0612 | 2,182 | 2,3027 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores en las pruebas de relación de transformación se han mantenido constantes en los diferentes taps del transformador.

La tabla LXVIII muestra los resultados de las pruebas de corriente de excitación realizadas al transformador.

Tabla LXVIII. **Prueba de corriente de excitación, fase 1/R, Guatemala Sur**

| Fecha | Corriente de Excitación (mA) | | | | |
|------------|------------------------------|--------|--------|--------|-------|
| | | | | | |
| 08/06/2003 | 69,68 | 62,67 | 56,6 | 51,42 | 46,89 |
| 25/04/2004 | 72,3 | 64,83 | 58,5 | 53,12 | 48,45 |
| 12/02/2006 | 74,08 | 66,4 | 59,04 | 53,44 | 48,66 |
| 24/11/2006 | 76,693 | 68,748 | 62,048 | 56,365 | 51,44 |
| Tap | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 |

Fuente: elaboración propia.

El valor de la corriente de excitación se mantiene constante en los diferentes taps del transformador.

4.4.3. Transformador banco 1, fase T, ID-61702

La tabla LXIX muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizadas al transformador.

Tabla LXIX. **Prueba de Overall, fase 1/T, Guatemala Sur**

| Fecha | % Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HT} | C _T | C _H | C _{HT} | C _T |
| 16/07/2000 | 0,43 | 0,36 | 0,58 | 3065 | 3149 | 4502 |
| 20/03/2001 | 0,23 | 0,23 | 0,37 | 3055 | 3153 | 4368 |
| 29/04/2001 | 0,31 | | | 3065 | | |
| 29/04/2001 | 0,37 | 0,23 | 0,35 | 3089 | 3154 | 4428 |
| 29/06/2003 | 0,28 | 0,24 | 0,36 | 3069 | 3161 | 4553 |
| 23/05/2004 | 0,26 | 0,24 | 0,36 | 3078 | 3168 | 4510 |
| 12/02/2006 | 0,31 | 0,23 | 0,33 | 3069 | 3172 | 4534 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran un valor constante del factor de potencia entre las distintas mediciones. Los valores en la capacitancia se mantienen estables en las distintas mediciones.

La tabla LXX muestra los resultados de las pruebas de collar caliente realizadas al transformador.

Tabla LXX. Prueba de collar caliente, fase 1/T, Guatemala Sur

| Fecha | Potencia (Watts) | | | | |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | H ₁₋₀₂ | H ₁₋₀₆ | H ₁₋₁₁ | X ₁₋₀₂ | X ₁₋₀₄ |
| 29/06/2003 | | 0,142 | 0,207 | 0,105 | 0,158 |
| 23/05/2004 | 0,128 | 0,141 | 0,204 | 0,12 | 0,173 |
| 12/02/2006 | 0,119 | 0,137 | | 0,104 | 0,15 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que la potencia disipada para las distintas campanas es constante, el aislamiento está en buen estado.

La tabla LXXI muestra los resultados de las pruebas de relación de transformación realizadas al transformador.

Tabla LXXI. Prueba de relación de transformación, fase 1/T, Guatemala Sur

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 16/07/2000 | 1,6984 | 1,8194 | 1,9402 | 2,0006 | 2,1206 | 2,3027 |
| 20/03/2001 | | | 1,9408 | 2,0008 | | |
| 29/04/2001 | | | 1,9408 | | | |
| 29/06/2003 | 1,6983 | 1,819 | 1,9394 | 1,9998 | 2,12 | 2,3005 |
| 23/05/2004 | 1,6987 | 1,8196 | 1,9407 | 2,001 | 2,1216 | 2,3027 |
| 12/02/2006 | 1,6989 | 1,8197 | 1,9406 | 2,001 | 2,1219 | 2,3027 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 11B | 15 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores en las pruebas de relación de transformación se han mantenido constantes, por lo que se puede concluir que no existe problema alguno con el cambiador de taps y no hay cortocircuitos en los devanados.

La tabla LXXII muestra los resultados de las pruebas de corriente de excitación realizadas al transformador.

Tabla LXXII. Prueba de corriente de excitación, fase 1/T, Guatemala Sur

| Fecha | Corriente de Excitación (mA) | | | | |
|--------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 16/07/2000 | 83,26 | 74,59 | 67,14 | 60,9 | 55,41 |
| 29/06/2003 | 84,51 | 75,36 | 67,82 | 61,43 | 55,92 |
| 12/02/2006 | 89,74 | 80,5 | 73,51 | 65,54 | 59,43 |
| Tap | 2 | 6 | 10 | 14 | 18 |

Fuente: elaboración propia.

El valor de la corriente de excitación ha aumentado en relación con la primera prueba de la cual se tiene registro, teniendo un aumento del ocho por ciento, es necesario dar seguimiento a la evolución en el valor de las pruebas de corriente de excitación futuras, para lo cual es necesario repetir las pruebas.

4.4.4. Transformador banco 2, fase R, ID-61698

La tabla LXXIII muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizadas al transformador.

Tabla LXXIII. Prueba de *Overall*, fase 2/R, Guatemala Sur

| Fecha | % Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HT} | C _T | C _H | C _{HT} | C _T |
| 12/12/1998 | 0,39 | 0,37 | 0,58 | 3092 | 3127 | 4373 |
| 14/06/2000 | 0.29 | | 0.29 | 3078 | 3145 | 4482 |
| 25/03/2001 | 0,39 | 0,41 | 0,58 | 3087 | 3156 | 4463 |
| 10/05/2003 | 0,25 | 0,25 | 0,37 | 3087 | 3155 | 4447 |
| 16/05/2004 | 0,25 | 0,25 | 0,37 | 3092 | 3168 | 4464 |
| 21/10/2006 | 0,48 | 0,36 | 0,5 | 3080 | 3138 | 4427 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran un valor constante del factor de potencia entre las distintas mediciones. Los valores en la capacitancia se mantienen estables en las distintas mediciones.

La tabla LXXIV muestra los resultados de las pruebas collar caliente realizadas al transformador.

Tabla LXXIV. **Prueba de collar caliente, fase 2/R, Guatemala Sur**

| Fecha | Potencia (Watts) | | | | |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| | H ₁₋₀₃ | H ₁₋₀₆ | H ₁₋₁₀ | X ₁₋₀₄ | X ₁₋₂ |
| 10/05/2003 | 0,016 | 0,022 | 0,027 | 0,063 | 0,019 |
| 16/05/2004 | 0,018 | 0,021 | 0,036 | 0,064 | 0,021 |
| 21/10/2006 | 0,014 | 0,017 | 0,025 | 0,05 | 0,017 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que la potencia disipada para las distintas campanas es constante, el aislamiento de la boquilla está en buen estado.

La tabla LXXV muestra los resultados de las pruebas de relación de transformación realizadas al transformador.

Tabla LXXV. **Prueba de relación de transformación, fase 2/R, Guatemala Sur**

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 12/12/1998 | 1,6989 | 1,9394 | 2,0297 | 2,1201 | 2,1807 | 2,3004 |
| 14/06/2000 | 1,6983 | 1,9398 | 2,031 | 2,1206 | 2,1197 | 2,3012 |
| 14/07/2000 | 1,6986 | 1,9401 | 2,0303 | 2,122 | 2,1812 | 2,3025 |
| 14/07/2000 | 1,6985 | 1,9402 | 2,031 | 2,1213 | 2,1815 | 2,3028 |
| 25/03/2001 | 1,7001 | 1,9417 | 2,0314 | 2,1223 | 2,1821 | 2,303 |
| 10/05/2003 | 1,6998 | 1,9407 | 2,032 | 2,1225 | 2,1825 | 2,3019 |
| 21/10/2006 | 1,6988 | 1,9406 | 2,0312 | 2,1219 | 2,1826 | 2,3034 |
| Tap | 1 | 9 | 12 | 15 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores en las pruebas de relación de transformación se han mantenido constantes en los distintos taps del transformador.

La tabla LXXVI muestra los resultados de la prueba de corriente de excitación realizadas al transformador.

Tabla LXXVI. **Prueba de corriente de excitación, fase 2/R, Guatemala Sur**

| Valores | Corriente de Excitación (mA) | | | | | |
|------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 12/12/1998 | 79,13 | 71,05 | 63,9 | 57,84 | 52,66 | 48,17 |
| 14/06/2000 | 88,5 | 68,09 | | | | |
| 25/03/2001 | 92,47 | 72,32 | 59,76 | | | |
| 10/05/2003 | 86,48 | 77,29 | 69,59 | 63,04 | 57,44 | 52,56 |
| 21/10/2006 | 86,13 | 77,15 | 69,39 | 62,79 | 57,17 | 52,27 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

El valor de la corriente de excitación se mantiene constante en los diferentes taps del transformador.

4.4.5. Transformador banco 2, fase S, ID-61696

La tabla LXXVII muestra los resultados de la prueba de *Overall* realizada al transformador.

Tabla LXXVII. Prueba de Overall, fase 2/S, Guatemala Sur

| Fecha | % Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HT} | C _T | C _H | C _{HT} | C _T |
| 12/12/1998 | 0,62 | 0,39 | 0,57 | 3108 | 2842 | 4622 |
| 23/04/1999 | 0,45 | 0,41 | 0,6 | 3088 | 2855 | 4671 |
| 14/06/2000 | 0,33 | | 0,34 | 5990 | | 7689 |
| 04/07/2000 | 0,39 | 0,29 | 0,37 | 3094 | 2876 | 4787 |
| 27/07/2000 | 0,43 | 0,35 | 0,45 | 3103 | 2864 | 4673 |
| 02/10/2000 | 0,48 | 0,34 | 0,41 | 3088 | 2858 | 4655 |
| 10/05/2003 | 0,32 | 0,25 | 0,4 | 3101 | 2894 | 4656 |
| 14/05/2003 | 0,32 | 0,26 | 0,34 | 3113 | 2913 | 4657 |
| 16/05/2004 | 0,29 | 0,25 | 0,33 | 3113 | 2913 | 4657 |
| 06/10/2006 | 0,52 | 0,35 | 0,45 | 3107 | 2880 | 4661 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran un valor constante del factor de potencia entre las distintas mediciones. Los valores en la capacitancia se mantienen estables en las distintas mediciones.

La tabla LXXVIII muestra los resultados de las pruebas de collar caliente realizadas al transformador.

Tabla LXXVIII. **Pruebas de collar caliente, fase 2/S, Guatemala Sur**

| Fecha | Potencia (Watts) | | | | |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | H ₁₋₀₃ | H ₁₋₀₆ | H ₁₋₁₀ | X ₁₋₀₂ | X ₁₋₀₄ |
| 04/07/2000 | | 0,021 | 0,045 | 0,015 | 0,03 |
| 27/07/2000 | | | | 0,016 | 0,047 |
| 02/10/2000 | | 0,023 | 0,051 | 0,019 | 0,048 |
| 10/05/2003 | 0,023 | 0,021 | 0,061 | | 0,07 |
| 16/05/2004 | 0,023 | 0,026 | | 0,02 | 0,074 |
| 06/10/2006 | 0,024 | 0,02 | 0,034 | 0,023 | 0,069 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que la potencia disipada para las distintas campanas es constante, el aislamiento de la boquilla está en buen estado.

La tabla LXXIX muestra los resultados de la prueba de relación de transformación realizada al transformador.

Tabla LXXIX. **Prueba de relación de transformación, fase 2/S, Guatemala Sur**

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 23/04/1999 | 1,6996 | 1,8208 | 1,9416 | 2,0629 | 2,1841 | 2,3051 |
| 14/06/2000 | 1,6981 | 1,8182 | 1,9383 | 2,0601 | 2,181 | 2,3018 |
| 04/07/2000 | 1,6999 | 1,8215 | 1,9428 | 2,0638 | 2,1846 | 2,3051 |
| 10/05/2003 | 1,699 | 1,8196 | 1,9414 | 2,0622 | 2,1836 | 2,3038 |
| 06/10/2006 | 1,6996 | 1,8203 | 1,9409 | 2,0615 | 2,1821 | 2,3024 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores en las pruebas de relación de transformación se han mantenido constantes en los distintos taps del transformador.

La tabla LXXX muestra los resultados de las pruebas de corriente de excitación realizadas al transformador.

Tabla LXXX. **Prueba de corriente de excitación, fase 2/S, Guatemala Sur**

| Fecha | Corriente de Excitación (mA) | | | | | |
|------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 23/04/1999 | 88,59 | 78,88 | 70,86 | 64,19 | 58,45 | 53,49 |
| 14/06/2000 | 94,32 | 84,11 | 75,66 | 68,45 | 62,34 | 56,93 |
| 04/07/2000 | 94,02 | 84,17 | 75,69 | 68,47 | 62,33 | 56,99 |
| 02/10/2000 | 80,92 | 72,3 | 64,99 | 58,86 | 53,54 | 48,85 |
| 10/05/2003 | 83,97 | 75,16 | 67,57 | 61,19 | 55,68 | 50,91 |
| 06/10/2006 | 89,19 | 80,2 | 72,56 | 65,99 | 60,3 | 55,36 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

El valor de la corriente de excitación se mantiene constante en los diferentes taps del transformador.

4.4.6. Transformador banco 2, fase T, ID-61697

La tabla LXXXI muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizadas al transformador.

Tabla LXXXI. **Prueba de Overall, fase 2/T, Guatemala Sur**

| Fecha | % Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HT} | C _T | C _H | C _{HT} | C _T |
| 22/09/2006 | 0,45 | 0,34 | 0,47 | 3142 | 2913 | 4906 |
| 22/09/2006 | 0,42 | 0,34 | 0,47 | 3137 | 2912 | 4905 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran un valor constante del factor de potencia entre las distintas mediciones. Sin embargo, las dos pruebas fueron realizadas el mismo día, por lo que la comparación entre estos dos valores no es un indicativo del estado del transformador.

Para realizar un comparativo podemos utilizar los resultados de las pruebas a los otros transformadores del banco, de la tabla LXXVII, los resultados son similares en ambos transformadores.

La tabla LXXXII muestra los resultados de la prueba de relación de transformación realizada al transformador.

Tabla LXXXII. **Prueba de relación de transformación, fase 2/T, Guatemala Sur**

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|------------|----------------------------|------|-------|--------|--------|--------|
| 22/09/2006 | 1,6991 | 1,82 | 1,941 | 2,0619 | 2,1825 | 2,3033 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de relación de transformación al transformador fue realizada en una sola ocasión por lo que estos valores quedan como referencia para pruebas futuras. Para realizar un análisis de los resultados obtenidos se deben de comparar los resultados de una prueba realizada a un transformador del mismo banco, de la tabla LXXIX, los resultados en las pruebas son similares.

La tabla LXXXIII muestra los resultados de las pruebas de corriente de excitación realizadas al transformador.

Tabla LXXXIII. Prueba de corriente de excitación, fase 2/T, Guatemala Sur

| Fecha | Corriente de Excitación (mA) | | | | | |
|--------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 22/09/2006 | 97,29 | 86,43 | 77,67 | 70,29 | 64,02 | 58,49 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de corriente de excitación al transformador fue realizada en una sola ocasión por lo que estos valores quedan como referencia para pruebas futuras. Para realizar un análisis de los resultados obtenidos se debe de comparar los resultados de una prueba a un transformador del mismo banco, de la tabla LXXX, los resultados en las pruebas son similares.

4.4.7. Transformador banco 3, fase R, ID-247412-02

La tabla LXXXIV muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizadas al transformador.

Tabla LXXXIV. Prueba de Overall, fase 3/R, Guatemala Sur

| Fecha | % Fp | | | | | Capacitancia (pF) | | | | |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HL} | C _L | C _{HT} | C _T | C _H | C _{HL} | C _L | C _{HT} | C _T |
| 30/09/2001 | 0,23 | 0,33 | 1,5 | -0,14 | 0,39 | 3490 | 8157 | 931,5 | 6340 | 18 |
| 30/09/2001 | 0,23 | 0,32 | 1,46 | 0 | 0,38 | 3493 | 8153 | 930,2 | 6342 | 17 |
| 07/10/2001 | 0,22 | 0,28 | 1,26 | 0 | 0,35 | 3488 | 8157 | 928 | 6327 | 18 |
| 06/01/2002 | 0,21 | 0,29 | 0,53 | -0,14 | 0,38 | 3487 | 8161 | 807,1 | 6329 | 18 |
| 01/04/2003 | 0,2 | 0,37 | 0,62 | 0,14 | 0,36 | 3510 | 8182 | 813,4 | 6380 | 18 |
| 07/12/2003 | 0,19 | 0,3 | 0,51 | 0,15 | 0,34 | 3499 | 8185 | 814,7 | 6355 | 18 |
| 20/05/2005 | 0,21 | 0,32 | 0,88 | 0 | 0,34 | 3510 | 8198 | 820,1 | 6381 | 17 |
| 14/01/2007 | 0,18 | 0,34 | 0,45 | -0,15 | 0,3 | 3511 | 8212 | 821,3 | 6386 | 18,1 |
| 10/02/2008 | 0,18 | 0,27 | 0,41 | 0,12 | 0,29 | 3514 | 8223 | 819,2 | 6395 | 18,1 |
| 23/07/2008 | 0,14 | 0,32 | 0,43 | -0,15 | 0,27 | 3499 | 8196 | 819 | 6375 | 18,1 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran un valor constante del factor de potencia entre las distintas mediciones. Los valores en la capacitancia se mantienen estables en las distintas mediciones.

La tabla LXXXV muestra los resultados de las pruebas a las boquillas realizadas al transformador.

Tabla LXXXV. Prueba de boquillas, fase 3/R, Guatemala Sur

| Fecha | % Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | H ₁ - C ₁ | H ₁ - C ₂ | X ₁ - C ₁ | H ₁ - C ₁ | H ₁ - C ₂ | X ₁ - C ₁ |
| 07/10/2001 | 0,25 | 0,56 | 0,61 | 307,22 | 738,11 | 176,98 |
| 06/01/2002 | | | 0,57 | | | 168,9 |
| 01/04/2003 | 0,26 | 0,54 | 0,61 | 307,2 | 740,5 | 176 |
| 07/12/2003 | 0,24 | 0,55 | 0,53 | 306,9 | 741,5 | 173,6 |
| 14/01/2007 | 0,25 | 0,56 | 0,61 | 307,22 | 738,11 | 176,98 |
| 10/02/2008 | 0,25 | 0,55 | 0,55 | 307,45 | 739,12 | 176,82 |
| 23/07/2008 | 0,24 | 0,59 | 0,55 | 308,84 | 737,05 | 179,71 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que el factor de potencia se ha mantenido estable en la boquilla de alta tensión en la medición de C₁ y C₂. El factor de potencia en la boquilla de baja en la medición C₁ se mantuvo estable.

Los valores de capacitancia en la boquilla de alta tienen un valor constante, se puede concluir que no existe ningún corto circuito entre las láminas conductoras de la boquilla y el aislamiento interno de la boquilla se encuentra en buenas condiciones.

La tabla LXXXVI muestra los resultados de las pruebas de relación de transformación realizadas al transformador.

Tabla LXXXVI. Pruebas de relación de transformación, fase 3/R, Guatemala Sur

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 30/09/2001 | 3,8365 | 3,6379 | 3,438 | 3,2374 | 3,038 | 2,8375 |
| 01/04/2003 | 3,8343 | 3,634 | 3,4341 | 3,2334 | 3,033 | 2,8328 |
| 20/05/2005 | 3,8338 | 3,6344 | 3,4339 | 3,2338 | 3,0337 | 2,8328 |
| 03/03/2008 | 3,8339 | 3,6348 | 3,4348 | 3,2344 | 3,0343 | 2,8341 |
| 23/07/2008 | 3,8336 | 3,6348 | 3,4352 | 3,2351 | 3,0348 | 2,835 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores en las pruebas de relación de transformación se han mantenido constantes en los diferentes taps del transformador.

La tabla LXXXVII muestra los resultados de las pruebas de corriente de excitación realizadas al transformador.

Tabla LXXXVII. Prueba de corriente de excitación, fase 3/R, Guatemala Sur

| Fecha | Corriente de Excitación (mA) | | | | | |
|--------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 30/09/2001 | 25,93 | 28,54 | 31,48 | 35,42 | 39,65 | 44,28 |
| 01/04/2003 | 31,41 | 34,64 | 38,21 | 43,06 | 48,07 | 53,65 |
| 10/02/2008 | | | | 36,468 | 40,727 | 45,509 |
| 03/03/2008 | 28,247 | 30,983 | 34,011 | 38,143 | 42,383 | 47,169 |
| 23/07/2008 | 26,58 | 29,278 | 32,27 | 36,356 | 40,575 | 45,389 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

4.4.8. Transformador banco 3, fase S, ID-217412-01

La tabla LXXXVIII muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizadas al transformador.

Tabla LXXXVIII. Pruebas de *Overall*, fase 3/S, Guatemala Sur

| Fecha | % Fp | | | | | Capacitancia (pF) | | | | |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HL} | C _L | C _{HT} | C _T | C _H | C _{HL} | C _L | C _{HT} | C _T |
| 30/09/2001 | | | 0,49 | | | | | 908,9 | | |
| 07/10/2001 | 0,22 | 0,28 | 0,42 | 0,35 | | 3329 | 7487 | 908,3 | 6571 | 14 |
| 06/01/2002 | 0,2 | 0,28 | 1,4 | 0,33 | -0,17 | 3331 | 7496 | 915,5 | 6594 | 14 |
| 04/02/2002 | 0,21 | 0,32 | 0,52 | 0,34 | -0,2 | 3331 | 7411 | 875,6 | 6544 | 14 |
| 31/03/2003 | 0,2 | 0,36 | 0,79 | 0,37 | -0,2 | 3349 | 7512 | 881,9 | 6629 | 14 |
| 06/04/2003 | 0,2 | 0,26 | 0,5 | 0,3 | 0,14 | 3330 | 7506 | 885,7 | 6611 | 13 |
| 07/12/2003 | 0,24 | 0,29 | 0,71 | 0,32 | | 3339 | 7515 | 882,5 | 6605 | 16 |
| 07/12/2003 | | | 0,75 | | | | | 882,7 | | |
| 09/05/2004 | 0,2 | 0,27 | 0,39 | 0,31 | -0,1 | 3337 | 7516 | 888,1 | 6609 | 15 |
| 21/05/2005 | 0,21 | 0,32 | 0,58 | 0,34 | -0,2 | 3345 | 7525 | 887 | 6635 | 14 |
| 02/04/2006 | 0,28 | 0,28 | 0,71 | 0,32 | 0 | 3341 | 7531 | 885,4 | 6614 | 15 |
| 02/04/2006 | | | 0,43 | | | | | 886,1 | | |
| 30/01/2007 | 0,2 | 0,36 | 0,51 | 0,36 | -0,18 | 3355 | 7535 | 885,9 | 6646 | 14,9 |
| 19/04/2007 | 0,14 | 0,31 | 0,45 | 0,26 | -0,36 | 3308 | 7449 | 831,1 | 6561 | 14,7 |
| 06/07/2007 | 0,15 | 0,32 | 0,47 | 0,29 | -0,18 | 3309 | 7458 | 881,8 | 6563 | 14,6 |
| 27/08/2007 | 0,08 | 0,14 | 0,23 | 0,16 | 0,13 | 3301 | 7458 | 889,1 | 6554 | 100 |
| 27/08/2007 | 0,09 | 0,27 | | | | 3302 | 7458 | | | |
| 30/08/2007 | 0,16 | 0,29 | 0,45 | 0,3 | -0,17 | 3307 | 7458 | 887,8 | 6578 | 14,5 |
| 07/12/2007 | 0,16 | 0,31 | 0,45 | 0,31 | 0 | 3294 | 7449 | 885,9 | 6542 | 14,5 |
| 07/12/2007 | 0,32 | 0,27 | 0,85 | 0,28 | 0,15 | 3294 | 7449 | 889,4 | 6542 | 14,6 |
| 07/12/2007 | 0,14 | 0,32 | 0,39 | 0,28 | 0 | 3294 | 7450 | 887,2 | 6542 | 14,6 |
| 08/02/2008 | 0,16 | 0,33 | 0,88 | 0,31 | -0,18 | 3302 | 7445 | 887,4 | 6545 | 14,5 |
| 08/02/2008 | 0,16 | 0,33 | 0,44 | 0,31 | 0 | 3300 | 7444 | 887,8 | 6546 | 14,4 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran un valor constante del factor de potencia entre las distintas mediciones. Los valores en la capacitancia se mantienen estables en las distintas mediciones.

La tabla LXXXIX muestra los resultados de las pruebas a las boquillas realizadas al transformador.

Tabla LXXXIX. **Prueba de boquillas, fase 3/S, Guatemala Sur**

| Fecha | % Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | H ₁ - C ₁ | H ₁ - C ₂ | X ₁ - C ₁ | H ₁ - C ₁ | H ₁ - C ₂ | X ₁ - C ₁ |
| 13/07/2001 | | | 0,55 | | | 250,1 |
| 07/10/2001 | | | 0,55 | | | 250,2 |
| 07/10/2001 | | | 0,55 | | | 250 |
| 06/01/2002 | | | 3,3 | | | 255,8 |
| 04/02/2002 | | | 0,58 | | | 230,3 |
| 31/03/2003 | 0,25 | 0,45 | 0,58 | 303,8 | 730,8 | 232,5 |
| 07/12/2003 | 0,24 | 0,45 | 0,51 | 303,9 | 731,5 | 234,5 |
| 07/12/2003 | 0,25 | | 0,51 | 304,2 | | 234,5 |
| 09/05/2004 | 0,25 | 0,49 | 0,46 | 304,2 | 730,7 | 235,5 |
| 02/04/2006 | 0,26 | 0,46 | 0,49 | 304,4 | 728,1 | 236,3 |
| 30/01/2007 | 0,25 | 0,46 | 0,61 | 303,74 | 730,54 | 234,59 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que el factor de potencia se ha mantenido estable en la boquilla de alta tensión en la medición de C₁ y C₂. El factor de potencia en la boquilla de baja en la medición C₁ se mantuvo estable.

Los valores de capacitancia en la boquilla de alta tienen un valor constante, se puede concluir que no existe ningún corto circuito entre las láminas conductoras de la boquilla y el aislamiento interno de la boquilla se encuentra en buenas condiciones.

La tabla XC muestra los resultados de las pruebas de collar caliente realizadas al transformador.

Tabla XC. Prueba de collar caliente, fase 3/S, Guatemala Sur

| Fecha | Potencia (Watts) | | | | |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | H ₁₋₀₂ | H ₁₋₀₉ | H ₁₋₁₅ | X ₁₋₀₂ | X ₁₋₀₆ |
| 02/04/2006 | 0,011 | 0,013 | 0,029 | 0,024 | 0,058 |
| 30/01/2007 | 0,014 | 0,017 | 0,027 | 0,022 | 0,058 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que la potencia disipada para las distintas campanas es constante, el aislamiento de la boquilla está en buen estado, cosa que podemos corroborar con las mediciones de C₁ y C₂.

La tabla XCI muestra los resultados de las pruebas de relación de transformación realizadas al transformador.

Tabla XCI. Prueba de relación de transformación, fase 3/S, Guatemala Sur

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 04/02/2002 | 3,8343 | 3,6359 | 3,4363 | 3,2359 | 3,0367 | 2,8365 |
| 31/03/2003 | 3,8335 | 3,6332 | 3,4334 | 3,2327 | 3,0333 | 2,833 |
| 21/05/2005 | 3,8342 | 3,6334 | 3,4333 | 3,2332 | 3,0331 | 2,833 |
| 02/04/2006 | 3,8342 | 3,6343 | 3,4334 | 3,234 | 3,0335 | 2,833 |
| 30/01/2007 | 3,8348 | 3,6346 | 3,4344 | 3,2341 | 3,034 | 2,8327 |
| 27/08/2007 | 3,8355 | 3,6352 | 3,4349 | 3,2349 | 3,0344 | 2,8336 |
| 07/12/2007 | 3,8335 | 3,6344 | 3,4347 | 3,2347 | 3,0347 | 2,8346 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores en las pruebas de relación de transformación se han mantenido constantes en los distintos taps del transformador.

La tabla XCII muestra los resultados de las pruebas de corriente de excitación realizadas al transformador.

Tabla XCII. **Prueba de corriente de excitación, fase 3/S, Guatemala Sur**

| Fecha | Corriente de Excitación (mA) | | | | | |
|------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 02/04/2006 | 26,21 | 28,9 | 31,89 | 35,92 | 40,15 | 44,96 |
| 30/01/2007 | 25,748 | 28,4 | 31,36 | 35,356 | 39,541 | 44,302 |
| 27/08/2007 | 25,793 | 28,512 | 31,46 | 35,851 | 39,723 | 44,484 |
| 07/12/2007 | 25,988 | 28,687 | 31,663 | 35,69 | 39,943 | 44,721 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

El valor de la corriente de excitación se mantiene constante en los diferentes taps del transformador.

4.4.9. Transformador banco 3, fase T, ID-217410-3

La tabla XCIII muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizadas al transformador.

Tabla XCIII. Prueba de Overall, fase 3/T, Guatemala Sur

| Fecha | % Fp | | | | | Capacitancia (pF) | | | | |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HL} | C _L | C _{HT} | C _T | C _H | C _{HL} | C _L | C _{HT} | C _T |
| 07/10/2001 | 0,19 | 0,25 | - 0,14 | 0,49 | 0,33 | 3318 | 8652 | 894,6 | 6482 | 16 |
| 06/01/2002 | 0,19 | 0,26 | 0 | 0,56 | 0,33 | 3321 | 8660 | 898,5 | 6490 | 15 |
| 30/03/2003 | 0,2 | 0,31 | 1,19 | 2,94 | 0,38 | 3309 | 8672 | 742,1 | 6588 | 18 |
| 03/09/2003 | 0,18 | 0,31 | -0,2 | 0,5 | 0,35 | 3414 | 8815 | 807,5 | 6596 | 16 |
| 07/12/2003 | 0,17 | 0,27 | 0 | 0,49 | 0,31 | 3404 | 8823 | 815,8 | 6589 | 15 |
| 09/05/2004 | 0,22 | 0,26 | -0,3 | 0,79 | 0,33 | 3400 | 8824 | 828,4 | 6568 | 15 |
| 09/05/2004 | | | | 0,69 | | | | 827,5 | | |
| 09/05/2004 | | | | 0,78 | | | | 827,5 | | |
| 03/10/2004 | 0,24 | 0,24 | -0,1 | 0,63 | 0,3 | 3399 | 8828 | 824,9 | 6569 | 15 |
| 03/10/2004 | | | | 0,63 | | | | 825 | | |
| 27/05/2005 | 0,18 | 0,3 | -0,2 | 0,8 | 0,33 | 3411 | 8833 | 828,7 | 6620 | 16 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran un valor constante del factor de potencia entre las distintas mediciones. Los valores en la capacitancia se mantienen estables en las distintas mediciones.

La tabla XCIV muestra los resultados de las pruebas a las boquillas realizada al transformador.

Tabla XCIV. Prueba a las boquillas, fase 3/T, Guatemala Sur

| Fecha | % Fp | | | Capacitancia (pF) | | |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | H ₁ - C ₁ | H ₁ - C ₂ | X ₁ - C ₁ | H ₁ - C ₁ | H ₁ - C ₂ | X ₁ - C ₁ |
| 07/10/2001 | | | 0,7 | | | 251,7 |
| 06/01/2002 | | | 0,73 | | | 252 |
| 03/02/2002 | 0,25 | 0,44 | | 309,2 | 733,2 | |
| 01/07/2003 | 0,3 | 0,26 | | 363,2 | 1422 | |
| 03/09/2003 | 0,21 | 0,29 | 1,98 | 360 | 1434 | 173,9 |
| 07/12/2003 | 0,27 | 0,23 | 0,56 | 360,2 | 1429 | 183,2 |
| 09/05/2004 | 0,26 | 0,2 | 0,52 | 360,7 | 1421 | 189 |
| 03/10/2004 | | | 0,5 | 2 | 2 | 189,3 |
| 27/05/2005 | 0,27 | 0,19 | 0,57 | 359,6 | 1429 | 189,4 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran que el factor de potencia se ha mantenido estable en la boquilla de alta tensión en la medición de C₁ y C₂. El factor de potencia en la boquilla de baja en la medición C₁ se mantuvo estable.

Los valores de capacitancia en la boquilla de alta tienen un valor constante, se puede concluir que no existe ningún corto circuito entre las láminas conductoras de la boquilla y el aislamiento interno de la boquilla se encuentra en buenas condiciones.

La tabla XCV muestra los resultados de la prueba de collar caliente realizada al transformador.

Tabla XCV. **Prueba de collar caliente, fase 3/T, Guatemala Sur**

| Fecha | Potencia (Watts) | | | | |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | H ₁₋₀₈ | H ₁₋₁₆ | H ₁₋₂₄ | H ₁₋₄₀ | H ₁₋₄₈ |
| 01/07/2003 | 0,027 | 0,034 | 0,06 | 0,179 | 0,317 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba de collar caliente fue realizada en una sola ocasión por lo que estos valores quedan como referencia para pruebas futuras. De las mediciones de C₁ y C₂ podemos concluir que el aislamiento de la boquilla se encuentra en buenas condiciones.

La tabla XCVI muestra los resultados de las pruebas de relación de transformación realizadas al transformador.

Tabla XCVI. **Prueba de relación de transformación, fase 3/T, Guatemala Sur**

| Fecha | Relación de Transformación | | | | | |
|------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 03/02/2002 | 3,8345 | 3,6345 | 3,4349 | 3,2333 | 3,0342 | 2,8333 |
| 30/03/2003 | 3,8289 | 3,6287 | 3,4289 | 3,2294 | 3,0309 | 2,8304 |
| 03/09/2003 | | | | | | 2,8339 |
| 27/05/2005 | 3,8352 | 3,6354 | 3,4359 | 3,2354 | 3,035 | 2,8346 |
| Tap | 1 | 5 | 9 | 13 | 17 | 21 |

Fuente: elaboración propia.

Los valores en las pruebas de relación de transformación se han mantenido constantes en los diferentes taps del transformador.

La tabla XCVII muestra los resultados de las pruebas de corriente de excitación realizadas al transformador.

Tabla XCVII. Prueba de corriente de excitación, fase 3/T, Guatemala Sur

| Fecha | Corriente de Excitación (mA) | | | | | |
|------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 03/09/2003 | 26,01 | 28,53 | 31,58 | 35,6 | 39,83 | 44,6 |
| 27/05/2005 | 30,18 | 33,28 | 36,73 | 41,38 | 46,29 | 51,87 |

Fuente: elaboración propia.

El valor de la corriente de excitación se mantiene constante en los diferentes taps del transformador.

4.4.10. Transformador trifásico banco 4, ID-C13929

La tabla XCVIII muestra los resultados de las pruebas de *Overall* realizadas al transformador.

Tabla XCVIII. Prueba de Overall, banco 4, Guatemala Sur

| Fecha | % Fp | | | | | Capacitancia (pF) | | | | |
|------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | C _H | C _{HL} | C _L | C _{HT} | C _T | C _H | C _{HL} | C _L | C _{HT} | C _T |
| 22/01/2003 | 0,23 | 0,2 | 0,3 | 0,24 | -0,1 | 4266 | 4170 | 2852 | 14512 | 39 |
| 23/01/2003 | 0,23 | 0,23 | 0,29 | 0,25 | 0,21 | 4275 | 4175 | 2854 | 14530 | 39 |
| 15/01/2006 | 0,19 | 0,19 | | | | 4284 | 4183 | | | |
| 15/01/2006 | 0,19 | 0,19 | 0,24 | 0,19 | 0,07 | 4284 | 4183 | 2847 | 14645 | 38,7 |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas muestran un valor constante del factor de potencia entre las distintas mediciones. Los valores en la capacitancia se mantienen estables en las distintas mediciones.

La tabla XCIX muestra los resultados de las prueba a las boquillas realizadas al transformador.

Tabla XCIX. **Prueba a las boquillas, banco 4, Guatemala Sur**

| Conexión | 22/01/2003 | | 23/01/2003 | | 15/01/2006 | |
|--------------------------------|------------|-------|------------|-------|------------|--------|
| | % Fp | pF | % Fp | pF | % Fp | pF |
| C ₁ -H ₁ | 0,54 | 335,4 | 0,53 | 334,9 | 0,52 | 336,59 |
| C ₁ -H ₂ | 0,55 | 329,9 | | | 0,69 | 330,9 |
| C ₁ -H ₃ | 0,61 | 336,6 | | | 0,54 | 337,63 |
| C ₁ -X ₁ | 0,22 | 317,6 | | | 0,21 | 318,14 |
| C ₁ -X ₂ | 0,23 | 316,4 | | | 0,21 | 316,55 |
| C ₁ -X ₃ | 0,22 | 317,6 | | | 0,2 | 318,04 |
| C ₂ -H ₁ | 0,31 | 618,8 | 0,22 | 620,7 | 0,23 | 614,93 |
| C ₂ -H ₂ | 0,23 | 700,7 | | | 0,22 | 689,99 |
| C ₂ -H ₃ | 0,23 | 641,6 | | | 0,21 | 627,34 |
| C ₂ -X ₁ | 0,26 | 334,7 | | | 0,21 | 329,62 |
| C ₂ -X ₂ | 0,25 | 341 | | | 0,2 | 338,31 |
| C ₂ -X ₃ | 0,32 | 335,9 | | | 0,19 | 332,88 |

Fuente: elaboración propia.

El factor de potencia es similar en las mediciones de C₁ y C₂, para las tres fases, tanto en alto y bajo voltaje.

El valor de capacitancia tanto en las boquillas de alta y baja para las dos mediciones tiene un valor constante, se puede concluir que no existe ningún corto circuito entre las láminas conductoras de las boquillas y el aislamiento interno de las boquillas se encuentra en buenas condiciones.

La tabla C muestra los resultados de la prueba de relación de transformación realizadas al transformador.

Tabla C. Prueba de relación de transformación, banco 4, Guatemala Sur

| Tap | Relación de Transformación | | |
|-----|----------------------------|---------------------|---------------------|
| | 22/01/2003 | | |
| 1 | 3,836 | 3,838 | 3,838 |
| 3 | 3,737 | 3,737 | 3,737 |
| 5 | 3,637 | 3,638 | 3,638 |
| 7 | 3,538 | 3,536 | 3,538 |
| 9 | 3,439 | 3,436 | 3,438 |
| 11 | 3,338 | 3,337 | 3,338 |
| 13 | 3,237 | 3,238 | 3,238 |
| 15 | 3,138 | 3,138 | 3,138 |
| 17 | 3,038 | 3,037 | 3,036 |
| 19 | 2,937 | 2,937 | 2,937 |
| 21 | 2,837 | 2,837 | 2,838 |
| RTT | H_1-H_0 / X_1-X_0 | H_2-H_0 / X_2-X_0 | H_3-H_0 / X_3-X_0 |

Fuente: elaboración propia.

La prueba fue realizada en una sola ocasión, por lo que los resultados quedan como referencia para pruebas futuras. Sin embargo, al ser este un transformador trifásico, podemos comparar los resultados de una fase contra los resultados de las restantes dos fases para realizar el análisis.

La relación de transformación es similar en las tres fases para cada uno de los taps del transformador.

La tabla CI muestra los resultados de las pruebas de corriente de excitación realizada al transformador.

Tabla CI. **Prueba de corriente de excitación, banco 4, Guatemala Sur**

| Tap | Corriente de Excitación (mA) | | | | | |
|----------|--------------------------------|------------|--------------------------------|------------|--------------------------------|------------|
| | 22/01/2003 | 23/01/2003 | 22/01/2003 | 23/01/2003 | 22/01/2003 | 23/01/2003 |
| 1 | 25,18 | 25,22 | 17,51 | 17,47 | 25,15 | 25,20 |
| 3 | 26,46 | 26,51 | 18,42 | 18,38 | 26,40 | 26,44 |
| 5 | 27,90 | 27,94 | 19,42 | 19,40 | 27,79 | 27,81 |
| 7 | 29,45 | 29,50 | 20,55 | 20,52 | 29,32 | 29,34 |
| 9 | 31,21 | 31,25 | 21,78 | 21,76 | 31,00 | 31,02 |
| 11 | 33,85 | 33,16 | 23,15 | 23,78 | 33,77 | 32,89 |
| 13 | 35,81 | 35,82 | 25,20 | 25,15 | 35,66 | 35,66 |
| 15 | 37,96 | 37,98 | 26,75 | 26,71 | 37,77 | 37,76 |
| 17 | 40,38 | 40,36 | 28,47 | 28,44 | 40,11 | 40,10 |
| 19 | 43,05 | 43,03 | 30,37 | 30,34 | 42,72 | 42,72 |
| 21 | 46,05 | 46,00 | 32,51 | 32,46 | 45,64 | 45,58 |
| Conexión | H ₁ -H ₀ | | H ₂ -H ₀ | | H ₃ -H ₀ | |

Fuente: elaboración propia.

La prueba fue realizada en dos ocasiones. Sin embargo, con un día de diferencia, por lo que es significativo un análisis de los dos resultados. Pero al ser un transformador trifásico es posible analizar los resultados de las tres fases.

El valor de corriente en las tres fases es similar, variando el valor en la fase central, esto debido a que el circuito magnético es distinto comparado con las fases exteriores.

5. PRUEBAS AL ACEITE A LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA DEL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL INDE

Las pruebas presentadas en el capítulo consisten en los resultados de gases disueltos en el aceite dieléctrico por medio de cromatografía de gases y las pruebas físico – química – eléctricas al aceite.

En las pruebas eléctricas al aceite, factor de potencia y rigidez dieléctrica; pruebas químicas, número de neutralización y contenido de agua; pruebas físicas, tensión interfacial, color, aspecto visual y viscosidad.

5.1. Pruebas al aceite de los transformadores de potencia de la Subestación Escuintla 1

Los transformadores analizados forman parte de un banco de transformación trifásico, conformado por tres autotransformadores de 50 MVA cada uno, con voltajes de transformación de 230kV / 138 kV.

5.1.1. Transformador fase R, ID-A01002

La tabla CII muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CII. Gases disueltos, fase R, Escuintla 1

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | |
|---|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 12/11/2002 | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 01/09/2006 | 21/05/2007 |
| Hidrógeno H ₂ | 11 | 8 | 153 | 14 | 23 |
| Metano CH ₄ | 1 | 0 | 15 | 6 | 15 |
| Etano C ₂ H ₆ | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 1 | 1 | 5 | 7 | 8 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Monóxido CO | 18 | 204 | 317 | 365 | 304 |
| Dióxido CO ₂ | 178 | 734 | 1368 | 1518 | 1938 |
| Nitrógeno N ₂ | 51615 | 49315 | 67975 | 49110 | 57714 |
| Oxígeno O ₂ | 9597 | 3196 | 5080 | 980 | 2413 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CIII muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CIII. Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase R, Escuintla 1

| Prueba | Análisis Físico – Químico – Eléctrico | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 12/11/2002 | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 01/09/2006 | 21/05/2007 |
| Humedad (ppm) | 7 | 13 | 9 | 9 | 9 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 33 | 42.1 | 34.6 | 33.4 | 36.1 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.007 | 0.01 | 0.0092 | 0.0152 | 0.0051 |
| Color ASTM | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.5 |
| Examen visual | Claro | NA | Claro | Claro | Claro |
| % Factor de potencia | 0.0157 | NA | 0.0179 | 0.0209 | 0.0094 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 59 | 75 | 53 | 40 | 50 |
| Viscosidad (cSt) | | 9 | 17.5 | 17.41 | 17.43 |

Fuente: elaboración propia.

5.1.2. Transformador fase S, ID-A01003

La tabla CIV muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CIV. Gases disueltos, fase S, Escuintla 1

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | |
|---|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 12/11/2002 | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 01/09/2006 | 21/05/2007 |
| Hidrógeno H ₂ | 6 | 9 | 14 | 10 | 18 |
| Metano CH ₄ | 0 | 7 | 24 | 14 | 28 |
| Etano C ₂ H ₆ | 0 | 5 | 5 | 7 | 10 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 0 | 9 | 9 | 11 | 14 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Monóxido CO | 36 | 178 | 237 | 267 | 241 |
| Dióxido CO ₂ | 174 | 586 | 1011 | 1144 | 1608 |
| Nitrógeno N ₂ | 13238 | 26908 | 66767 | 38541 | 50131 |
| Oxígeno O ₂ | 892 | 3284 | 5984 | 1196 | 3330 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CV muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CV. **Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase S, Escuintla 1**

| Prueba | Análisis Físico – Químico – Eléctrico | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 12/11/2002 | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 01/09/2006 | 21/05/2007 |
| Humedad (ppm) | 8 | 12 | 9 | 8 | 6 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 40.6 | 42.1 | 34.5 | 31.4 | 33.7 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.0179 | 0.01 | 0.0094 | 0.0035 | 0.0057 |
| Color ASTM | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 |
| Examen visual | Claro | NA | Claro | Claro | Claro |
| % Factor de potencia | 0.0156 | NA | 0.0158 | 0.0173 | 0.0062 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 56 | 87 | 40 | 42 | 46 |
| Viscosidad (cSt) | | 9.89 | 17.5 | 17.47 | |

Fuente: elaboración propia.

5.1.3. Transformador fase T, ID-A01001

La tabla CVI muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CVI. **Gases disueltos, fase T, Escuintla 1**

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | |
|---|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 12/11/2002 | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 01/09/2006 | 21/05/2007 |
| Hidrógeno H ₂ | 2 | 5 | 10 | 9 | 19 |
| Metano CH ₄ | 1 | 0 | 15 | 7 | 12 |
| Etano C ₂ H ₆ | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 0 | 0 | 2 | 3 | 3 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Monóxido CO | 15 | 97 | 197 | 252 | 172 |
| Dióxido CO ₂ | 151 | 388 | 893 | 1135 | 1133 |
| Nitrógeno N ₂ | 45230 | 16334 | 50790 | 47949 | 26023 |
| Oxígeno O ₂ | 9820 | 3784 | 6392 | 2859 | 1794 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CVII muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CVII. Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase T, Escuintla 1

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 12/11/2002 | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 01/09/2006 | 21/05/2007 |
| Humedad (ppm) | 4 | 12 | 9 | 8 | 6 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 41.3 | 40.6 | 29.6 | 30.2 | 27.2 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.0018 | 0.01 | 0.0127 | 0.0018 | 0.0055 |
| Color ASTM | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 |
| Examen visual | Claro | NA | Claro | Claro | Claro |
| % Factor de potencia | 0.0155 | NA | 0.0164 | 0.0104 | 0.0063 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 55 | 78 | 54 | 40 | 44 |
| Viscosidad (cSt) | | 9.37 | 17.51 | 17.43 | 17.47 |

Fuente: elaboración propia.

5.2. Pruebas al aceite de los transformadores de potencia de la Subestación Guatemala Este

Los transformadores analizados forman parte de un banco de transformación trifásico, conformado por tres autotransformadores de 65 MVA cada uno, con voltajes de transformación de 230KV / 69 KV.

5.2.1. Transformador fase R, ID-1111881

La tabla CVIII muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CVIII. Gases disueltos, fase R, Guatemala Este

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | | |
|---|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 11-05-00 | 13-09-01 | 12-11-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 16-05-07 |
| Hidrógeno H ₂ | 26 | 29 | 16 | 11 | 9 | 12 | 10 |
| Metano CH ₄ | 6 | 4 | 0 | 0 | 18 | 2 | 11 |
| Etano C ₂ H ₆ | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 13 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 1 | 2 | 1 | 0 | 2 | 2 | 4 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| Monóxido CO | 825 | 531 | 517 | 522 | 599 | 626 | 2522 |
| Dióxido CO ₂ | 3500 | 1336 | 1021 | 1432 | 2267 | 2248 | 11503 |
| Nitrógeno N ₂ | 53300 | 36337 | 59038 | 27127 | 43698 | 47728 | 48785 |
| Oxígeno O ₂ | 5400 | 1475 | 6538 | 1974 | 1543 | 1356 | 2779 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CIX muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CIX. Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase R, Guatemala Este

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 11-05-00 | 13-09-01 | 12-11-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 16-05-07 |
| Humedad (ppm) | 9 | 7 | 4 | 29 | 6 | 6 | 7 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 41 | 41.1 | 33.3 | 43.81 | 37 | 34.9 | 33.5 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.01 | 0.0112 | 0.0041 | 0.01 | 0.0046 | 0.0004 | 0.0048 |
| Color ASTM | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Examen visual | SV | Claro | Claro | NA | Claro | Claro | Claro |
| % Factor de potencia | 0.004 | 0.0272 | 0.0073 | NA | 0.0196 | 0.0189 | 0.0105 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 56 | 51 | 51 | 44 | 53 | 51 | 47 |
| Viscosidad (cSt) | NA | 19.7 | NA | 10.39 | 19.64 | 19.52 | 19.51 |

Fuente: elaboración propia.

5.2.2. Transformador fase S, ID-1111882

La tabla CX muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CX. Gases disueltos, fase S, Guatemala Este

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | |
|---|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 13-09-01 | 12-11-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 16-05-07 |
| Hidrógeno H ₂ | 22 | 12 | 9 | 9 | 11 | 13 |
| Metano CH ₄ | 3 | 0 | 0 | 22 | 4 | 15 |
| Etano C ₂ H ₆ | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 20 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 2 | 1 | 1 | 3 | 5 | 19 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 |
| Monóxido CO | 545 | 476 | 629 | 676 | 868 | 3433 |
| Dióxido CO ₂ | 1853 | 948 | 1927 | 2824 | 3410 | 14321 |
| Nitrógeno N ₂ | 70349 | 35184 | 39826 | 64994 | 70913 | 67104 |
| Oxígeno O ₂ | 5424 | 905 | 2392 | 2948 | 1178 | 2155 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXI muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXI. **Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase S, Guatemala Este**

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 13-09-01 | 12-11-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 16-05-07 |
| Humedad (ppm) | 8 | 5 | 11 | 8 | 9 | 5 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 39.9 | 41.6 | 29.56 | 37.2 | 37 | 34.5 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.0032 | 0.0056 | 0.01 | 0.0074 | 0.0188 | 0.0044 |
| Color ASTM | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1 |
| Examen visual | Claro | Claro | NA | Claro | Claro | Claro |
| % Factor de potencia | 0.0275 | 0.0104 | NA | 0.0214 | 0.03 | 0.0074 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 43 | 53 | 70 | 53 | 49 | 44 |
| Viscosidad (cSt) | 20.11 | | 11.16 | 19.98 | 19.92 | 19.96 |

Fuente: elaboración propia.

5.2.3. Transformador fase T, ID- 1111883

La tabla CXII muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXII. **Gases disueltos, fase T, Guatemala Este**

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | |
|---|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 13-09-01 | 12-11-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 16-05-07 |
| Hidrógeno H ₂ | 35 | 23 | 11 | 8 | 13 | 10 |
| Metano CH ₄ | 3 | 0 | 0 | 18 | 6 | 12 |
| Etano C ₂ H ₆ | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 9 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 6 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Monóxido CO | 503 | 550 | 566 | 646 | 769 | 3028 |
| Dióxido CO ₂ | 1582 | 1096 | 1625 | 2531 | 2861 | 13731 |
| Nitrógeno N ₂ | 52397 | 50661 | 28953 | 50181 | 73614 | 51989 |
| Oxígeno O ₂ | 1981 | 5002 | 2326 | 3655 | 5065 | 3407 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXIII muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXIII. Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase T, Guatemala Este

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 13-09-01 | 12-11-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 16-05-07 |
| Humedad (ppm) | 8 | 5 | 11 | 8 | 9 | 5 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 39.9 | 41.6 | 29.56 | 37.2 | 37 | 34.5 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.0032 | 0.0056 | 0.01 | 0.0074 | 0.0188 | 0.0044 |
| Color ASTM | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1 |
| Examen visual | CL&SPK | CL&SPK | NA | CL&SPK | CL&SPK | CL&SPK |
| % Factor de potencia | 0.0275 | 0.0104 | NA | 0.0214 | 0.03 | 0.0074 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 43 | 53 | 70 | 53 | 49 | 44 |
| Viscosidad (cSt) | 20.11 | | 11.16 | 19.98 | 19.92 | 19.96 |

Fuente: elaboración propia.

5.3. Pruebas al aceite de los transformadores de potencia de la Subestación Guatemala Norte

Los transformadores analizados forman parte de dos bancos de transformación trifásico, cada banco formado por tres transformadores. El primer banco, denominado Banco 2, donde cada transformador es de 50 MVA, con voltajes de transformación de 230kV/69kV. El segundo banco, denominado Banco 3, donde cada transformador es de 50 MVA, con voltajes de transformación de 230kV/69kV.

5.3.1. Transformador banco 2, fase R, ID-217210-6

La tabla CXIV muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXIV. Gases disueltos, fase 2/R, Guatemala Norte

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | |
|---|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 13/09/2001 | 31/10/2002 | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 30/08/2006 | 15/05/2007 |
| Hidrógeno H ₂ | 14 | 14 | 10 | 12 | 13 | 17 |
| Metano CH ₄ | 6 | 7 | 0 | 39 | 17 | 120 |
| Etano C ₂ H ₆ | 2 | 7 | 2 | 7 | 11 | 66 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 4 | 6 | 5 | 31 | 52 | 314 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Monóxido CO | 417 | 539 | 343 | 743 | 811 | 3739 |
| Dióxido CO ₂ | 1372 | 1524 | 1185 | 2121 | 2147 | 10886 |
| Nitrógeno N ₂ | 59631 | 41185 | 35284 | 51857 | 56317 | 46443 |
| Oxígeno O ₂ | 6082 | 871 | 4250 | 1581 | 1991 | 1146 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXV muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXV. **Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 2/R, Guatemala Norte**

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 13/09/2001 | 31/10/2002 | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 30/08/2006 | 15/05/2007 |
| Humedad (ppm) | 8 | 11 | 11 | 8 | 9 | 3 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 36.3 | 38 | 29 | 31.1 | 34.5 | 28.4 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.0087 | 0.016 | 0.01 | 0.0088 | 0.0043 | 0.0068 |
| Color ASTM | 0.5 | 0.5 | 1 | 1 | 1.5 | 1.5 |
| Examen visual | Claro | Claro | NA | Claro | Claro | Claro |
| % Factor de potencia | 0.1563 | 0.0949 | NA | 0.1286 | 0.1387 | 0.1071 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 43 | 49 | 93 | 54 | 36 | 36 |
| Viscosidad (cSt) | | | 9.05 | 16.28 | 16.19 | 16.18 |

Fuente: elaboración propia.

5.3.2. Transformador banco 2, fase S, ID 217210-4

La tabla CXVI muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXVI. **Gases disueltos, fase 2/S, Guatemala Norte**

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | | |
|---|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 18-04-00 | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 15-05-07 |
| Hidrógeno H ₂ | 2 | 14 | 10 | 8 | 7 | 9 | 13 |
| Metano CH ₄ | 2 | 7 | 5 | 3 | 10 | 15 | 61 |
| Etano C ₂ H ₆ | 1 | 7 | 5 | 2 | 1 | 8 | 37 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 1 | 2 | 3 | 5 | 5 | 28 | 144 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | Trace | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Monóxido CO | 55 | 188 | 287 | 410 | 194 | 760 | 2888 |
| Dióxido CO ₂ | 497 | 951 | 908 | 1177 | 574 | 1962 | 10372 |
| Nitrógeno N ₂ | 20100 | 32827 | 32028 | 2590 | 26718 | 37301 | 42525 |
| Oxígeno O ₂ | 2940 | 1089 | 2026 | 4593 | 2267 | 853 | 1879 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXVII muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXVII. Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 2/S, Guatemala Norte

| Prueba | Análisis Físico - Químico – Eléctrico | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 18-04-00 | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 15-05-07 |
| Humedad (ppm) | 9 | 10 | 12 | 11 | 11 | 5 | 29 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 37 | 37 | 37.8 | 37 | 34.2 | 34 | 30.8 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.02 | 0.0073 | 0.0172 | 0.01 | 0.0123 | 0.0034 | 0.0106 |
| Color ASTM | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 1.5 |
| Examen visual | SV | C&B | C&B | LIMPIO | CL&SPK | CL&SPK | CL&SPK |
| % Factor de potencia | 0.005 | 0.1579 | 0.0972 | NA | 0.1327 | 0.1049 | 0.1052 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 58 | 42 | 47 | 90 | 56 | 42 | 48 |
| Viscosidad (cSt) | | 14.99 | | 8.23 | 14.89 | 14.8 | 14.77 |

Fuente: elaboración propia.

5.3.3. Transformador banco 2, fase T, ID-217210-2

La tabla CXVIII muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXVIII. Gases disueltos, fase 2/T, Guatemala Norte

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | |
|---|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 13/09/2001 | 31/10/2002 | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 30/08/2006 | 15/05/2007 |
| Hidrógeno H ₂ | 10 | 12 | 12 | 5 | 5 | 9 |
| Metano CH ₄ | 6 | 5 | 0 | 16 | 0 | 4 |
| Etano C ₂ H ₆ | 7 | 7 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 1 | 3 | 7 | 8 | 9 | 11 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Monóxido CO | 209 | 343 | 416 | 528 | 670 | 603 |
| Dióxido CO ₂ | 925 | 1191 | 1177 | 1733 | 1943 | 2155 |
| Nitrógeno N ₂ | 43475 | 35176 | 30333 | 50370 | 50029 | 46133 |
| Oxígeno O ₂ | 4282 | 941 | 3242 | 2070 | 1771 | 1795 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXIX muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXIX. Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 2/T, Guatemala Norte

| Prueba | Análisis Físico - Químico – Eléctrico | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 13/09/2001 | 31/10/2002 | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 30/08/2006 | 15/05/2007 |
| Humedad (ppm) | 11 | 9 | 11 | 9 | 6 | 1 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 37.5 | 37.7 | 29.7 | 31.8 | 29.1 | 28.8 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.0107 | 0.0139 | 0.01 | 0.0103 | 0.0038 | 0.0078 |
| Color ASTM | 0.5 | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 1.5 |
| Examen visual | C&B | C&B | NA | C&B | Cl&Spk | Cl&Spk |
| % Factor de potencia | 0.1241 | 0.0828 | NA | 0.0603 | 0.0571 | 0.0454 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 51 | 37 | 90 | 47 | 43 | 49 |
| Viscosidad (cSt) | | | 9.2 | 16.07 | 15.97 | 15.98 |

Fuente: elaboración propia.

5.3.4. Transformador banco 3, fase R, ID-217210-7

La tabla CXX muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXX. Gases disueltos, fase 3/R, Guatemala Norte

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | |
|---|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 13/09/2001 | 31/10/2002 | 20/08/2005 | 13/12/2006 | 15/05/2007 |
| Hidrógeno H ₂ | 20 | 20 | 26 | 2 | 11 |
| Metano CH ₄ | 32 | 72 | 187 | 5 | 21 |
| Etano C ₂ H ₆ | 9 | 16 | 35 | 0 | 7 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 47 | 75 | 257 | 3 | 47 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Monóxido CO | 158 | 284 | 546 | 30 | 94 |
| Dióxido CO ₂ | 888 | 1324 | 2103 | 742 | 1691 |
| Nitrógeno N ₂ | 24351 | 27666 | 70106 | 91277 | 45606 |
| Oxígeno O ₂ | 1314 | 854 | 5826 | 30796 | 11485 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXXI muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXXI. **Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 3/R, Guatemala Norte**

| Prueba | Análisis Físico - Químico – Eléctrico | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 13/09/2001 | 31/10/2002 | 20/08/2005 | 13/12/2006 | 15/05/2007 |
| Humedad (ppm) | 8 | 7 | 13 | 18 | 13 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 37.7 | 36.6 | 33.3 | 34.5 | 33.1 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.0062 | 0.0133 | 0.0114 | 0.0135 | 0.0084 |
| Color ASTM | 0.5 | 0.5 | 1 | 1 | 1.5 |
| Examen visual | CL&SPK | CL&SPK | CL&SPK | CL&SPK | CL&SPK |
| % Factor de potencia | 0.1401 | 0.1218 | 0.1646 | 0.1001 | 0.097 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 48 | 43 | 56 | 51 | 52 |
| Viscosidad (cSt) | 16.37 | | 16.31 | 16.8 | 15.9 |

Fuente: elaboración propia.

5.3.5. Transformador banco 3, fase S, ID-217210-1

La tabla CXXII muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXXII. **Gases disueltos, fase 3/S, Guatemala Norte**

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | | |
|---|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 18-04-00 | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 15-05-07 |
| Hidrógeno H ₂ | 17 | 6 | 4 | 10 | 6 | 7 | 10 |
| Metano CH ₄ | 42 | 2 | 4 | 0 | 19 | 5 | 7 |
| Etano C ₂ H ₆ | 24 | 4 | 5 | 1 | 5 | 5 | 5 |
| Étileno C ₂ H ₄ | 10 | 1 | 2 | 3 | 6 | 18 | 16 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | Trace | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Monóxido CO | 283 | 139 | 263 | 350 | 469 | 550 | 459 |
| Dióxido CO ₂ | 1350 | 799 | 917 | 1152 | 1855 | 1875 | 1903 |
| Nitrógeno N ₂ | 41300 | 61054 | 40978 | 41890 | 68775 | 66786 | 50401 |
| Oxígeno O ₂ | 593 | 5483 | 1238 | 2392 | 3658 | 3264 | 1255 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXXIII muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXXIII. Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 3/S, Guatemala Norte

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 18-04-00 | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 15-05-07 |
| Humedad (ppm) | | 10 | 7 | 10 | 10 | 7 | 3 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 31 | 36 | 37.3 | 24.2 | 31.4 | 28.7 | 29.7 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.01 | 0.0121 | 0.12 | 0.01 | 0.0113 | 0.0047 | 0.0079 |
| Color ASTM | 4.5 | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1.5 |
| Examen visual | SV | C&B | C&B | NA | C&B | Cl&Spk | Cl&Spk |
| % Factor de potencia | 0.196 | 0.1434 | 0.1057 | NA | 0.1496 | 0.1254 | 0.115 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 50 | 51 | 42 | 84 | 44 | 32 | 40 |
| Viscosidad (cSt) | | | | 8.78 | 16.04 | 15.96 | 15.99 |

Fuente: elaboración propia.

5.3.6. Transformador banco 3, fase T, ID-217210-3

La tabla CXXIV muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXXIV. Gases disueltos, fase 3/T, Guatemala Norte

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | |
|---|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 13/09/2001 | 31/10/2002 | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 30/08/2006 | 15/05/2007 |
| Hidrógeno H ₂ | 11 | 12 | 12 | 8 | 8 | 6 |
| Metano CH ₄ | 6 | 5 | 0 | 19 | 7 | 5 |
| Etano C ₂ H ₆ | 5 | 6 | 2 | 4 | 6 | 4 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 2 | 2 | 5 | 7 | 11 | 12 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Monóxido CO | 146 | 322 | 287 | 431 | 563 | 264 |
| Dióxido CO ₂ | 875 | 1215 | 1710 | 1692 | 2025 | 6301 |
| Nitrógeno N ₂ | 32932 | 35657 | 53410 | 40891 | 34645 | 62821 |
| Oxígeno O ₂ | 3099 | 838 | 11098 | 1240 | 1075 | 14634 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXXV muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXXV. Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 3/T, Guatemala Norte

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 13/09/2001 | 31/10/2002 | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 30/08/2006 | 15/05/2007 |
| Humedad (ppm) | 6 | 7 | 12 | 13 | 10 | 22 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 37.5 | 37.3 | 22.8 | 34.5 | 29.3 | 33.4 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.0066 | 0.0147 | 0.01 | 0.0115 | 0.0042 | 0.0094 |
| Color ASTM | 0.5 | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 1.5 |
| Examen visual | C&B | C&B | NA | C&B | Cl&Spk | Cl&Spk |
| % Factor de potencia | 0.1114 | 0.1115 | NA | 0.1425 | 0.1175 | 0.1008 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 37 | 59 | 91 | 51 | 50 | 53 |
| Viscosidad (cSt) | | | 9.3 | 16.21 | 16.18 | 16.12 |

Fuente: elaboración propia.

5.4. Pruebas al aceite de los transformadores de potencia de la Subestación Guatemala Sur

Los transformadores analizados forman parte de cuatro bancos de transformación trifásico. El Banco 1, formado por tres autotransformadores de 25 MVA, con voltajes transformación de 138kV/69kV. El Banco 2, formado por tres autotransformadores de 25 MVA, con voltajes de transformación de 138kV/69kV. El Banco 3, formado por tres autotransformadores de 50 MVA, con voltajes de transformación de 230kV/69kV. El Banco 4, un transformador trifásico de 100 MVA, con voltajes de transformación de 230kV/69kV.

5.4.1. Transformador banco 1, fase R, ID-61699

La tabla CXXVI muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXXVI. Gases disueltos, fase 1/R, Guatemala Sur

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | | |
|---|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 25-04-00 | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 17-05-07 |
| Hidrógeno H ₂ | 0 | 64 | 15 | 21 | 22 | 7 | 8 |
| Metano CH ₄ | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 |
| Etano C ₂ H ₆ | 2 | 2 | 2 | 0 | 1 | 2 | 2 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 50 | 41 | 34 | 28 | 34 | 42 | 43 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 3 | 1 | 7 | 19 | 10 | 12 | 9 |
| Monóxido CO | 303 | 368 | 375 | 198 | 430 | 364 | 367 |
| Dióxido CO ₂ | 3940 | 4600 | 3738 | 1965 | 3542 | 3901 | 4122 |
| Nitrógeno N ₂ | 62100 | 83236 | 53686 | 47269 | 77444 | 77740 | 50909 |
| Oxígeno O ₂ | 21800 | 21681 | 15348 | 17667 | 18582 | 14120 | 17022 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXXVII muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXXVII. Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 1/R, Guatemala Sur

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 25-04-00 | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 17-05-07 |
| Humedad (ppm) | | 23 | 21 | 15 | 22 | 14 | 51 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 32 | 27.9 | 27.1 | 24.8 | 24.9 | 22.8 | 22.3 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.04 | 0.0535 | 0.0763 | 0.1 | 0.0503 | 0.0359 | 0.0764 |
| Color ASTM | 3 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 3 | 3 |
| Examen visual | | CL&SPK | CL&SPK | NA | CL&SPK | CL&SPK | CL&SPK |
| % Factor de potencia | 0.044 | 0.527 | 0.622 | NA | 0.0518 | 0.0621 | 0.0503 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 49 | 45 | 47 | 92 | 54 | 46 | 40 |
| Viscosidad (cSt) | | 15.97 | | 8.78 | 15.94 | 15.81 | 15.91 |

Fuente: elaboración propia.

5.4.2. Transformador banco 1, fase S, ID-61701

La tabla CXXVIII muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXXVIII. **Gases disueltos, fase 1/S, Guatemala Sur**

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | | |
|---|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 30-06-00 | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 18-05-07 |
| Hidrógeno H ₂ | 0 | 17 | 27 | 20 | 7 | 9 | 11 |
| Metano CH ₄ | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 100 |
| Etano C ₂ H ₆ | 2 | 1 | 2 | 0 | 1 | 4 | 2 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 75 | 58 | 68 | 52 | 52 | 61 | 63 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 17 | 7 | 15 | 29 | 14 | 23 | 15 |
| Monóxido CO | 364 | 429 | 456 | 204 | 381 | 504 | 490 |
| Dióxido CO ₂ | 3920 | 3880 | 4174 | 2917 | 3352 | 3789 | 4189 |
| Nitrógeno N ₂ | 57400 | 49410 | 60103 | 56330 | 62388 | 69994 | 70931 |
| Oxígeno O ₂ | 20800 | 5796 | 14432 | 14603 | 15421 | 9904 | 18543 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXXIX muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXXIX. **Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 1/S, Guatemala Sur**

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 25-04-00 | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 17-05-07 |
| Humedad (ppm) | 15 | 23 | 19 | 13 | 18 | 19 | 20 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 31 | 25.5 | 25 | 24.3 | 21.4 | 19.8 | 16.9 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.07 | 0.0692 | 0.0989 | 0.12 | 0.0694 | 0.0545 | 0.0966 |
| Color ASTM | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3.5 |
| Examen visual | sv | C&B | C&B | NA | C&B | Cl&Spk | Cl&Spk |
| % Factor de potencia | 0.044 | 0.0509 | 0.0323 | NA | 0.0507 | 0.0678 | 0.0682 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 48 | 38 | 41 | 90 | 46 | 42 | 34 |
| Viscosidad (cSt) | | | | 9.32 | 16.46 | 16.38 | 13.39 |

Fuente: elaboración propia.

5.4.3. Transformador banco 1, fase T, ID-61702

La tabla CXXX muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXXX. Gases disueltos, fase 1/T, Guatemala Sur

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | | |
|---|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 25-04-00 | 28-11-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 18-05-07 |
| Hidrógeno H ₂ | 0 | 67 | 31 | 10 | 12 | 7 | 53 |
| Metano CH ₄ | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Etano C ₂ H ₆ | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 50 | 30 | 46 | 25 | 30 | 41 | 48 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 23 | 7 | 14 | 16 | 8 | 10 | 11 |
| Monóxido CO | 345 | 179 | 417 | 106 | 400 | 447 | 518 |
| Dióxido CO ₂ | 3130 | 2020 | 3082 | 2171 | 2438 | 3071 | 3935 |
| Nitrógeno N ₂ | 53900 | 53516 | 56168 | 42457 | 66146 | 62130 | 60638 |
| Oxígeno O ₂ | 19400 | 9943 | 12639 | 17255 | 15812 | 9185 | 12218 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXXXI muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXXXI. **Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 1/T, Guatemala Sur**

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 25-04-00 | 28-11-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 18-05-07 |
| Humedad (ppm) | | 10 | 14 | 13 | 19 | 17 | 31 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 29 | 30.7 | 23.9 | 23.8 | 20 | 17.3 | 16 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.06 | 0.04 | 0.0904 | 0.14 | 0.0766 | 0.0715 | 0.1172 |
| Color ASTM | 3.5 | 3.75 | 3 | 3.5 | 3 | 3.5 | 3.5 |
| Examen visual | sv | OBSCURO | C&B | NA | C&B | Cl&spk | Cl&spk |
| % Factor de potencia | 0.05 | 0.035 | 0.0411 | NA | 0.0712 | 0.0953 | 0.0815 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 54 | 46 | 42 | 74 | 51 | 36 | 32 |
| Viscosidad (cSt) | | | | 9.56 | 16.42 | 16.45 | 16.37 |

Fuente: elaboración propia.

5.4.4. Transformador banco 2, fase R, ID-61698

La tabla CXXXII muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXXXII. **Gases disueltos, fase 2/R, Guatemala Sur**

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | | |
|---|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 06-12-05 | 30-08-06 | 18-05-07 |
| Hidrógeno H ₂ | 52 | 13 | 20 | 8 | 17 | 7 | 26 |
| Metano CH ₄ | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Etano C ₂ H ₆ | 3 | 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 4 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 68 | 66 | 49 | 77 | 84 | 67 | 83 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 11 | 19 | 29 | 23 | 25 | 20 | 27 |
| Monóxido CO | 394 | 462 | 193 | 482 | 414 | 471 | 347 |
| Dióxido CO ₂ | 4232 | 4712 | 3470 | 5160 | 4805 | 4619 | 4858 |
| Nitrógeno N ₂ | 52404 | 59530 | 51036 | 74150 | 70159 | 70111 | 40632 |
| Oxígeno O ₂ | 5887 | 13998 | 15424 | 19400 | 18762 | 11465 | 9646 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXXXIII muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXXXIII. Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 2/R, Guatemala Sur

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 06-12-05 | 30-08-06 | 18-05-07 |
| Humedad (ppm) | 17 | 17 | 14 | 20 | 16 | 19 | 19 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 24.5 | 24.2 | 25.2 | 20.8 | 23.2 | 21.6 | 20.5 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.0777 | 0.1039 | 0.14 | 0.0821 | 0.0803 | 0.0765 | 0.0045 |
| Color ASTM | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3.5 | 3.5 |
| Examen visual | C&B | C&B | NA | C&B | CL&SPK | CL&SPK | CL&SPK |
| % Factor de potencia | 0.0552 | 0.033 | NA | 0.066 | 0.362 | 0.1091 | 0.0715 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 44 | 52 | 83 | 52 | 42 | 40 | 38 |
| Viscosidad (cSt) | 16.13 | | 9.37 | 16.07 | 15.96 | 15.96 | 15.97 |

Fuente: elaboración propia.

5.4.5. Transformador banco 2, fase S, ID-61696

La tabla CXXVIII muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXXXIV. **Gases disueltos, fase 2/S, Guatemala Sur**

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | |
|---|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 21/06/2000 | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 30/08/2006 | 18/05/2007 |
| Hidrógeno H ₂ | 37 | 16 | 31 | 24 | 26 |
| Metano CH ₄ | 3 | 0 | 12 | 0 | 1 |
| Etano C ₂ H ₆ | 1 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 35 | 9 | 28 | 27 | 25 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 7 | 12 | 15 | 13 | 8 |
| Monóxido CO | 387 | 107 | 333 | 397 | 433 |
| Dióxido CO ₂ | 3430 | 1916 | 5294 | 4233 | 3924 |
| Nitrógeno N ₂ | 70600 | 51814 | 63521 | 66017 | 69457 |
| Oxígeno O ₂ | 24500 | 16854 | 14044 | 12008 | 14392 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXXXV muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXXXV. **Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 2/S, Guatemala Sur**

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 21/06/2000 | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 30/08/2006 | 18/05/2007 |
| Humedad (ppm) | 45 | 15 | 20 | 13 | 24 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 23 | 31.4 | 25.9 | 26 | 25.1 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.08 | 0.02 | 0.0209 | 0.0102 | 0.0249 |
| Color ASTM | 3.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| Examen visual | SV | LIMPIO | C&B | Cl&Spk | Cl&Spk |
| % Factor de potencia | 0.026 | NA | 0.0427 | 0.0554 | 0.0423 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 56 | 86 | 52 | 51 | 43 |
| Viscosidad (cSt) | 9.51 | 9 | 15.73 | 15.58 | 15.58 |

Fuente: elaboración propia.

5.4.6. Transformador banco 2, fase T, ID-61697

La tabla CXXXVI muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXXXVI. Gases disueltos, fase 2/T Guatemala Sur

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | |
|---|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 13/09/2001 | 31/10/2002 | 27/01/2004 | 06/12/2005 | 30/08/2006 | 18/05/2007 |
| Hidrógeno H ₂ | 16 | 21 | 16 | 0 | 7 | 13 |
| Metano CH ₄ | 2 | 0 | 0 | 1 | 3 | 1 |
| Etano C ₂ H ₆ | 1 | 1 | 4 | 2 | 2 | 2 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 3 | 6 | 9 | 26 | 30 | 34 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 2 | 10 | 12 | 14 | 11 | 8 |
| Monóxido CO | 195 | 463 | 107 | 394 | 416 | 433 |
| Dióxido CO ₂ | 1252 | 3546 | 1916 | 5204 | 4849 | 5105 |
| Nitrógeno N ₂ | 63923 | 57484 | 51814 | 78530 | 72844 | 52719 |
| Oxígeno O ₂ | 2503 | 3500 | 16854 | 17272 | 12502 | 8062 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXXXVII muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXXXVII. **Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 2/T, Guatemala Sur**

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 13/09/2001 | 31/10/2002 | 27/01/2004 | 06/12/2005 | 30/08/2006 | 18/05/2007 |
| Humedad (ppm) | 27 | 26 | 8 | 27 | 16 | 25 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 36.8 | 36.6 | 30 | 34.4 | 29.3 | 27.8 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.01 | 0.0217 | 0.01 | 0.0209 | 0.0071 | 0.0209 |
| Color ASTM | 1 | 1 | 0.5 | 1.5 | 1 | 1.5 |
| Examen visual | C&B | C&B | | CL&SPK | CL&SPK | CL&SPK |
| % Factor de potencia | 0.0786 | 0.0618 | | 0.0262 | 0.0262 | 0.0627 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 43 | 44 | 80 | 52 | 51 | 43 |
| Viscosidad (cSt) | | | 9.31 | 16.05 | 15.89 | 15.93 |

Fuente: elaboración propia.

5.4.7. Transformador banco 3, fase R, ID-247412-02

La tabla CXXXVIII muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXXXVIII. **Gases disueltos, fase 3/R, Guatemala Sur**

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | | |
|---|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 18-04-00 | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 17-05-07 |
| Hidrógeno H ₂ | 25 | 43 | 44 | 25 | 28 | 15 | 66 |
| Metano CH ₄ | 27 | 39 | 34 | 5 | 20 | 5 | 6 |
| Etano C ₂ H ₆ | 30 | 93 | 89 | 43 | 42 | 26 | 31 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 26 | 98 | 127 | 63 | 54 | 25 | 26 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 25 | 17 | 9 | 2 | 5 | 4 | 14 |
| Monóxido CO | 94 | 175 | 296 | 142 | 413 | 471 | 576 |
| Dióxido CO ₂ | 1080 | 1492 | 1856 | 1294 | 2712 | 2631 | 3558 |
| Nitrógeno N ₂ | 55800 | 49617 | 52350 | 48370 | 62804 | 62666 | 89370 |
| Oxígeno O ₂ | 2470 | 1986 | 857 | 13968 | 2386 | 1434 | 1619 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXXXIX muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXXXIX. Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 3/R, Guatemala Sur

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 18-04-00 | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 17-05-07 |
| Humedad (ppm) | | 11 | 13 | 10 | 11 | 10 | 19 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 30 | 22.5 | 20.8 | 27.7 | 16.9 | 13.4 | 14.7 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.01 | 0.0267 | 0.0532 | 0.03 | 0.0407 | 0.0322 | 0.0725 |
| Color ASTM | 2 | 2 | 2 | 2.5 | 2.5 | 3.0 | 3 |
| Examen visual | sv | CL&SPK | CL&SPK | | Turbio | CL&SPK | CL&SPK |
| % Factor de potencia | 0.085 | 0.1286 | 0.0636 | | 0.1088 | 0.1159 | 0.1224 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 56 | 50 | 48 | 91 | 42 | 36 | 42 |
| Viscosidad (cSt) | | | | 8.98 | 16.74 | 16.6 | 16.61 |

Fuente: elaboración propia.

5.4.8. Transformador banco 3, fase S, ID-217412-01

La tabla CXL muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXL. Gases disueltos, fase 3/S, Guatemala Sur

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | | |
|---|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 18-04-00 | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 17-05-07 |
| Hidrógeno H ₂ | 59 | 67 | 0 | 22 | 23 | 42 | 19 |
| Metano CH ₄ | 21 | 40 | 7 | 0 | 4 | 4 | 0 |
| Etano C ₂ H ₆ | 15 | 76 | 28 | 38 | 13 | 13 | 0 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 27 | 124 | 53 | 12 | 29 | 21 | 0 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 12 | 5 | 2 | 2 | 3 | 7 | 0 |
| Monóxido CO | 92 | 195 | 82 | 167 | 490 | 562 | 32 |
| Dióxido CO ₂ | 918 | 1638 | 1245 | 1405 | 2930 | 3317 | 267 |
| Nitrógeno N ₂ | 52400 | 64650 | 60331 | 48897 | 58690 | 59827 | 43880 |
| Oxígeno O ₂ | 1220 | 3966 | 18313 | 12837 | 2768 | 1270 | 3748 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXLI muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXLI. Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 3/S, Guatemala Sur

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 18-04-00 | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 17-05-07 |
| Humedad (ppm) | | 16 | 34 | 12 | 12 | 13 | 15 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 29 | 21.7 | 20.9 | 23.3 | 11.2 | 10.7 | 16.9 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.02 | 0.0351 | 0.0526 | 0.03 | 0.0431 | 0.0342 | 0.0069 |
| Color ASTM | 1.5 | 2 | 2 | 2.5 | 2.5 | 3 | 0.5 |
| Examen visual | sv | C&B | C&B | NA | C&B | cl&spk | cl&spk |
| % Factor de potencia | 0.077 | 0.1066 | 0.0668 | NA | 0.1106 | 0.1089 | 0.0233 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 53 | 52 | 38 | 91 | 51 | 35 | 45 |
| Viscosidad (cSt) | SV | SV | SV | 9.48 | 16.73 | 16.5 | 17.74 |

Fuente: elaboración propia.

5.4.9. Transformador banco 3, fase T, ID-217410-03

La tabla CXLII muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXLII. Gases disueltos, fase 3/T, Guatemala Sur

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | | | | |
|---|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 18-04-00 | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 17-05-07 |
| Hidrógeno H ₂ | 45 | 63 | 46 | 7 | 16 | 32 | 31 |
| Metano CH ₄ | 20 | 30 | 33 | 0 | 3 | 6 | 1 |
| Etano C ₂ H ₆ | 19 | 54 | 69 | 0 | 2 | 5 | 4 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 21 | 81 | 98 | 1 | 10 | 28 | 28 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 16 | 9 | 6 | 1 | 5 | 7 | 7 |
| Monóxido CO | 170 | 334 | 501 | 59 | 379 | 482 | 391 |
| Dióxido CO ₂ | 1330 | 1851 | 2468 | 603 | 2535 | 3515 | 3103 |
| Nitrógeno N ₂ | 54900 | 52280 | 55498 | 47683 | 20892 | 57225 | 55086 |
| Oxígeno O ₂ | 1530 | 1509 | 1671 | 10043 | 3158 | 863 | 1210 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXLIII muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXLIII. **Pruebas físicas, químicas, eléctricas, fase 3/T, Guatemala Sur**

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 18-04-00 | 13-09-01 | 31-10-02 | 27-01-04 | 20-08-05 | 30-08-06 | 17-05-07 |
| Humedad (ppm) | | 12 | 10 | 16 | 33 | 20 | 20 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 28 | 22.5 | 20.8 | 33.8 | 29 | 27.5 | 26.6 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.02 | 0.0308 | 0.0556 | 0.01 | 0.0169 | 0.0111 | 0.0262 |
| Color ASTM | 2 | 2 | 2.5 | 0.5 | 0.5 | 1.5 | 1.5 |
| Examen visual | sv | C&B | C&B | C&B | CL&SPK | CL&SPK | CL&SPK |
| % Factor de potencia | 0.068 | 0.0789 | 0.0568 | NA | 0.042 | 0.051 | 0.0463 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 47 | 51 | 50 | 84 | 55 | 36 | 39 |
| Viscosidad (cSt) | SV | SV | SV | 19.55 | 20.26 | 20.15 | 20.24 |

Fuente: elaboración propia.

5.4.10. Transformador trifásico banco 4, ID-C13929

La tabla CXLIV muestra los resultados de los análisis de gases disueltos al aceite del transformador.

Tabla CXLIV. **Gases disueltos, banco 4, Guatemala Sur**

| Gas | Análisis de Gases Disueltos (ppm) | | | |
|---|-----------------------------------|------------|------------|------------|
| | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 30/08/2006 | 17/05/2007 |
| Hidrógeno H ₂ | 12 | 11 | 15 | 17 |
| Metano CH ₄ | 0 | 34 | 23 | 27 |
| Etano C ₂ H ₆ | 2 | 8 | 23 | 36 |
| Etileno C ₂ H ₄ | 2 | 2 | 2 | 3 |
| Acetileno C ₂ H ₂ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Monóxido CO | 59 | 167 | 207 | 145 |
| Dióxido CO ₂ | 523 | 1447 | 1914 | 1998 |
| Nitrógeno N ₂ | 21658 | 35416 | 56544 | 45566 |
| Oxígeno O ₂ | 4291 | 4654 | 4759 | 4720 |

Fuente: elaboración propia.

La tabla CXLV muestra los resultados de los análisis físico-químico-eléctrico al aceite del transformador.

Tabla CXLV. Pruebas físicas, químicas, eléctricas, banco 4, Guatemala Sur

| Prueba | Análisis Físico - Químico - Eléctrico | | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------|
| | 27/01/2004 | 20/08/2005 | 30/08/2006 | 17/05/2007 |
| Humedad (ppm) | 11 | 11 | 38 | 10 |
| Tensión interfacial (dinas/cm) | 41.7 | 38.2 | 37.6 | 36.7 |
| Acidez (mgKOH/g) | 0.01 | 0.0088 | 0.0018 | 0.0038 |
| Color ASTM | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Examen visual | NA | C&B | Cl&spk | Cl&spk |
| % Factor de potencia | NA | 0.0221 | 0.0231 | 0.0194 |
| Dieléctrico 25°C (kV) | 94 | 55 | 50 | 48 |
| Viscosidad (cSt) | 9.8 | 18.61 | 18.61 | 18.49 |

Fuente: elaboración propia.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PRUEBAS A TRANSFORMADORES DE POTENCIA DEL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL INDE

El análisis a los transformadores es dividido en tres partes. La primera parte, analiza las pruebas dieléctricas realizadas a los transformadores, para esta se utiliza la prueba de *Overall*, relación de transformación, corriente de excitación, pruebas a las boquillas del transformador, medición de capacitancia C_1 , C_2 y collar caliente, en esta parte se toma en cuenta los resultados de pruebas anteriores.

La segunda parte, analiza los gases disueltos en el aceite, da una descripción de los tipos de falla que ha soportado el transformador, para el análisis se utilizan los diferentes métodos de análisis, método de *Duval*, IEC, *Dörnenburg* y *Rogers*.

La tercera parte, analiza las pruebas físico-químico-eléctrico da información del estado del aceite dieléctrico.

6.1. Análisis de pruebas en transformadores de potencia en Subestación Escuintla 1

Los transformadores analizados forman parte de un banco de transformación trifásico, conformado por tres autotransformadores de 50 MVA cada uno, con voltajes de transformación de 230kV / 138 kV.

6.1.1. Transformador fase R, ID-A01002

Las tablas XII a la XVII, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador, en esta se muestra que el factor de potencia y capacitancia en la prueba de *Overall* se han mantenido constantes, la relación de transformación es la misma en los taps analizados. Sin embargo, únicamente se tienen dos datos de comparación y no se cuenta con prueba de corriente de excitación. La prueba a las boquillas muestra una capacitancia y un factor de potencia estable, prueba de la cual solo se tienen dos muestras y no se cuenta con prueba de collar caliente.

La limitación de este análisis resulta en que la última prueba fue realizada en el año 2006, por lo que es necesario seguir realizando pruebas periódicamente.

La tabla CXLVI muestra el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador de la fase R, resultados presentados en la tabla CII.

Tabla CXLVI. **Análisis gases disueltos, fase R, Escuintla 1**

| Método | <i>Dörmenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|-------------------|------------------------|-----------------|-----------|------------------------------|
| 21/05/2007 | No Cumple | Falla baja temperatura | Falla 300<t<700 | No Aplica | Normal |
| 01/09/2006 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | No Aplica | Falla 300<t<700 | No Aplica | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

El análisis de gases disueltos por medio de los métodos de *Rogers* y *Duval* muestra una falla con temperaturas intermedias, entre 300 y 700 centígrados.

La tabla CIII muestra las pruebas físico-química-eléctricas. Tanto la humedad, la acidez, el factor de potencia y la rigidez dieléctrica en el aceite se ha mantenido en valores aceptables.

Se concluye que, el análisis de gases disueltos con el método de *Duval* y *Rogers*, muestran fallas que provocaron una elevación de temperatura. Es necesario realizar una serie de pruebas dieléctricas, para determinar el estado actual del transformador, verificar si existe sobrecarga en el transformador y verificar el funcionamiento de los sistemas auxiliares de enfriamiento del aceite.

6.1.2. Transformador fase S, ID-A01003

Las tablas XVIII a la XXI, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador. En esta se muestra que el factor de potencia y capacitancia en la prueba de *Overall* se han mantenido, la relación de transformación es la misma en los taps analizados. Sin embargo, únicamente se tienen dos datos de comparación y no se cuenta con prueba de corriente de excitación. La prueba a las boquillas muestra una capacitancia y un factor de potencia estable, prueba de la cual solo se tienen dos muestra y no se cuenta con prueba de collar caliente.

La tabla CXLVII muestra el análisis de los resultados de los gases disueltos del transformador de la fase S, resultados presentados en la tabla CIV.

Tabla CXLVII. **Análisis gases disueltos, fase S, Escuintla 1**

| Método | <i>Dörmenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|-------------------|----------------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| 21/05/2007 | No Cumple | No Aplica | Falla 300<t<700 | Falla 300<t<700 | Normal |
| 01/09/2006 | No Cumple | No Aplica | Falla 300<t<700 | Falla 300<t<700 | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | No Aplica | Falla 300<t<700 | Falla 300<t<700 | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | Falla t<300 | Falla t>700 | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

El análisis de gases disueltos por medio de los métodos de *Duval* y el método de la IEC muestran una falla con temperaturas intermedias, entre 300 y 700 centígrados, estas se pueden registrar en los resultados de las pruebas de años anteriores.

La tabla CV muestra las pruebas físico-química-eléctricas, tanto la humedad, la acidez, el factor de potencia y la rigidez dieléctrica en el aceite se ha mantenido en valores aceptables.

Se concluye que, el análisis de de gases disueltos con el método de *Duval* y el método de IEC, muestran fallas que provocaron una elevación de temperatura. Es necesario realizar una serie de pruebas dieléctricas, para determinar el estado actual del transformador, verificar si existe sobrecarga en el transformador y verificar el funcionamiento de los sistemas auxiliares de enfriamiento del aceite.

6.1.3. Transformador fase T, ID-A01001

Las tablas XXIII a la XXIV, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador, solo se cuenta con las pruebas de *Overall* y la prueba de relación de transformación y ambas fueron realizadas en una ocasión. Sin embargo, al comparar con las pruebas de *Overall* y relación de transformación del transformador de la fase S los resultados son constantes.

La tabla CXLVIII muestra el análisis de los resultados de los gases disueltos del transformador de la fase T, resultados presentados en la tabla CVI.

Tabla CXLVIII. **Análisis gases disueltos, fase T, Escuintla 1**

| Método | <i>Dörmenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|-------------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------------|
| 21/05/2007 | No Cumple | Falla t<300 | Falla 300<T<700 | No Aplica | Normal |
| 01/09/2006 | No Cumple | Falla t<300 | Falla 300<T<700 | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | No Aplica | Falla 300<T<700 | Falla 300<T<700 | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

El análisis de gases disueltos, por medio de los métodos de *Duval* y *Rogers*, muestra fallas con temperaturas intermedias, entre 300 y 700 centígrados, estas se pueden registrar en los resultados de las pruebas de años anteriores.

La tabla CVII muestra las pruebas físico-química-eléctricas, tanto la humedad, la acidez, el factor de potencia y la rigidez dieléctrica en el aceite se ha mantenido en valores aceptables.

Se concluye que, el análisis de de gases disueltos con el método de *Duval* y el método de *Rogers*, muestran fallas que provocaron una elevación de temperatura. Es necesario realizar una serie de pruebas dieléctricas, para determinar el estado actual del transformador, verificar si existe sobrecarga en el transformador y verificar el funcionamiento de los sistemas auxiliares de enfriamiento del aceite.

6.2. Análisis de pruebas en transformadores de potencia en Subestación Guatemala Este

Los transformadores analizados forman parte de un banco de transformación trifásico, conformado por tres autotransformadores de 65 MVA cada uno, con voltajes de transformación de 230KV / 69 KV.

6.2.1. Transformador fase R, ID-1111881

En la tabla XXV se muestran los resultados de la prueba de *Overall*, solo se cuenta con una prueba la cual fue realizada en 1998, por lo cual no es significativa para realizar análisis.

La tabla CXLIX muestra el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador de la fase R, resultados presentados en la tabla CVIII.

Tabla CXLIX. **Análisis gases disueltos, fase R, Guatemala Este**

| Método | <i>Dörnenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|------------------------|---------------|-----------------|-------------|------------------------------|
| 16/05/2007 | Descomposición Térmica | No Aplica | Falla 300<T<700 | Falla T<300 | Normal |
| 30/08/2006 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | No Cumple |

Fuente: elaboración propia.

El análisis de gases disueltos por medio del método de *Duval* muestra una falla con temperaturas intermedias, entre 300 y 700 centígrados, el método de *Dörnenburg* muestra descomposición térmica, muestra que la falla afecto directamente el aislamiento sólido del transformador.

La tabla CIX muestra las pruebas físico-química-eléctricas, tanto la humedad, la acidez, el factor de potencia y la rigidez dieléctrica en el aceite se ha mantenido en valores aceptables.

Se concluye que, el análisis de gases disueltos con el método de *Duval* y el método de *Dörnenburg*, muestran fallas que provocaron una elevación de temperatura, es de tomar en cuenta la descomposición térmica en el transformador. Es necesario realizar una serie de pruebas dieléctricas, para determinar el estado actual del transformador, verificar si existe sobrecarga en el transformador y verificar el funcionamiento de los sistemas auxiliares de enfriamiento del aceite.

6.2.2. Transformador fase S, ID-1111882

Las tablas XXVI a la XXIX, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador, la prueba de *Overall* fue realizada en una ocasión. Sin embargo, al comparar con los resultados de la prueba al transformador de la fase R, los resultados son similares, la prueba de corriente de cortocircuito, relación de transformación y boquillas, quedan como referencia para pruebas futuras.

La tabla CL muestra el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador de la fase S, resultados presentados en la tabla CX.

Tabla CL. **Análisis gases disueltos, fase S, Guatemala Este**

| Método | <i>Dörnenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|------------------------|------------------------|-----------------|-----------|------------------------------|
| 16/05/2007 | Descomposición Térmica | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 30/08/2006 | No Aplica | Falla Baja Temperatura | Falla t>700 | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | No Aplica | Falla 300<t<700 | No Aplica | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

El análisis de gases disueltos por medio del método de *Duval* muestra una falla con temperaturas intermedias, entre 300 y 700 centígrados, el método de *Dörnenburg* muestra descomposición térmica, señal de que la falla afecto directamente el aislamiento sólido del transformador.

La tabla CXI muestra las pruebas físico-química-eléctricas, tanto la humedad, la acidez, el factor de potencia y la rigidez dieléctrica en el aceite se ha mantenido en valores aceptables.

Se concluye que, el análisis de gases disueltos con el método de *Duval* y el método de *Dörnenburg*, muestran fallas que provocaron una elevación de temperatura, es de tomar en cuenta la descomposición térmica en el transformador. Es necesario realizar una serie de pruebas dieléctricas, para determinar el estado actual del transformador, verificar si existe sobrecarga en el transformador y verificar el funcionamiento de los sistemas auxiliares de enfriamiento del aceite.

6.2.3. Transformador fase T, ID- 1111883

La tabla XXX muestra los resultados de la prueba de *Overall*, se cuenta solo con esta prueba, la cual queda como referencia para futuras pruebas.

La tabla CLI muestra el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador de la fase T, resultados presentados en la tabla CXII.

Tabla CLI. **Análisis gases disueltos, fase T, Guatemala Este**

| Método | <i>Dörnenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|------------------------|---------------|-----------------|-------------|------------------------------|
| 16/05/2007 | Descomposición Térmica | No Aplica | Falla 300<t<700 | Falla t<300 | Normal |
| 30/08/2006 | No Aplica | No Aplica | Falla 300<t<700 | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | No cumple | No Aplica | Falla t<300 | Falla t<300 | Normal |
| 27/01/2004 | No cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | No Cumple |

Fuente: elaboración propia.

El análisis de gases disueltos por medio del método de *Duval* muestra una falla con temperaturas intermedias, entre 300 y 700 centígrados. El método de *Dörnenburg* muestra descomposición térmica, señal de que la falla afecto directamente el aislamiento sólido del transformador.

La tabla CXIII muestra las pruebas físico-química-eléctricas, tanto la humedad, la acidez, el factor de potencia y la rigidez dieléctrica en el aceite se ha mantenido en valores aceptables.

Se concluye que, el análisis de gases disueltos con el método de *Duval* y el método de *Dörnenburg*, muestran fallas que provocaron una elevación de temperatura, es de tomar en cuenta la descomposición térmica en el transformador. Es necesario realizar una serie de pruebas dieléctricas, para determinar el estado actual del transformador, verificar si existe sobrecarga en el transformador y verificar el funcionamiento de los sistemas auxiliares de enfriamiento del aceite.

6.3. Análisis de pruebas en transformadores de potencia en Subestación Guatemala Norte

Los transformadores analizados forman parte de dos bancos de transformación trifásico, cada banco formado por tres transformadores. El primer banco, denominado Banco 2, donde cada transformador es de 50 MVA, con voltajes de transformación de 230kV/69kV. El segundo banco, denominado Banco 3, donde cada transformador es de 50 MVA, con voltajes de transformación de 230kV/69kV.

6.3.1. Transformador banco 2, fase R, ID-217210-6

Las tablas XXXI a la tabla XXXVI, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador, la prueba de *Overall* muestran valores constantes en las mediciones de factor de potencia y capacitancia, la prueba de relación de transformación no muestra diferencias en los taps del transformador, la prueba de corriente de excitación muestra que el núcleo del transformador no presenta daño alguno. Las pruebas a las boquillas no muestran daño en las mismas. Sin embargo, todas las pruebas dieléctricas fueron realizadas en el 2003.

La tabla CLII muestra el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador 2/R, resultados presentados en la tabla CXIV.

Tabla CLII. **Análisis gases disueltos, fase 2/R, Guatemala Norte**

| Método | <i>Dörmenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|------------------------|---------------|-----------------|-------------|------------------------------|
| 15/05/2007 | Descomposición Térmica | Falla t>700 | Falla t>700 | Falla t>700 | Deterioró Celulosa |
| 30/08/2006 | Descomposición Térmica | Falla t>700 | Falla t>700 | Falla t>700 | No Cumple |
| 20/08/2005 | Descomposición Térmica | Falla t>700 | Falla 300<t<700 | Falla t>700 | No Cumple |
| 27/01/2004 | No Aplica | No Aplica | Falla t>700 | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

Las pruebas dieléctricas revelan un transformador en buen estado hasta al 2003. Sin embargo, los tres métodos de análisis muestran un transformador con problemas, los métodos de *Duval*, *Rogers* y el método de la IEC muestran fallas de temperatura arriba de 700 centígrados.

El método de *Dörnenburg* muestra descomposición térmica, resultado con es confirmado con la relación CO_2/CO que muestra deterioró en la celulosa.

La tabla CXV muestra las pruebas físico-química-eléctricas, tanto la humedad, la acidez, el factor de potencia se han mantenido. Sin embargo, la rigidez dieléctrica bajo de 54 kV a 36 kV en un año.

Se concluye que, el transformador se encuentra en estado crítico, los resultados muestran falla térmica con temperaturas arriba de 700 centígrados y deterioró del aislamiento sólido del transformador. Es necesario realizar pruebas dieléctricas, *Overall*, relación de transformación y corriente de excitación para determinar la gravedad del daño. Es recomendable realizar mantenimiento mayor al transformador.

6.3.2. Transformador banco 2, fase S, ID-217210-4

Las tablas XXXVII a la XLI, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador, la prueba de *Overall* muestran valores constantes en las mediciones de capacitancia. Sin embargo, la prueba de factor de potencia muestra un aumento en la medición de C_H , la prueba de relación de transformación no muestra diferencias en los diferentes tap del transformador, la prueba de corriente de excitación muestra que el núcleo del transformador no presenta daño alguno. Las pruebas a las boquillas no muestran daño en las mismas.

La tabla CLIII muestra el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador 2/S, resultados presentados en la tabla CXVI.

Tabla CLIII. **Análisis gases disueltos, fase 2/S, Guatemala Norte**

| Método | <i>Dörnenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|
| 15/05/2007 | Descomposición Térmica | Falla t>700 | Falla t>700 | Falla t>700 | Normal |
| 30/08/2006 | Descomposición Térmica | Falla t>700 | Falla t>700 | Falla 300<t<700 | No Cumple |
| 20/08/2005 | No Cumple | Falla t>700 | Falla 300<t<700 | Falla t>700 | No Cumple |
| 27/01/2004 | No Cumple | Falla Baja Temperatura | Falla t>700 | No Aplica | No Cumple |

Fuente: elaboración propia.

Los tres métodos de análisis muestran un transformador con problemas, los métodos de *Duval*, *Rogers* y el método de la IEC muestran fallas térmicas con temperatura arriba de 700 centígrados, el método de *Dörnenburg* muestra descomposición térmica.

La tabla CXVII muestra las pruebas físico-química-eléctricas al aceite, tanto la acidez, el factor de potencia y la rigidez dieléctrica se mantienen constantes. Sin embargo, hay un considerable aumento de la humedad llegando de 5 a 29 ppm.

Se concluye que, el transformador se encuentra en estado crítico, ya que en el análisis de gases disueltos ha determinado falla térmica por medio de tres métodos y con un cuarto se encontró deterioró de la celulosa. Con el análisis físico al aceite se encontró una concentración elevada de humedad, pasando de 5 a 29 ppm en un año, es recomendable cambiar la silica gel del transformador. Es necesario realizar un mantenimiento mayor al transformador, realizar tratamiento al aceite para retirar la humedad.

6.3.3. Transformador banco 2, fase T, ID-217210-2

Las tablas XLVI a la XLII, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador, la prueba de *Overall* muestran valores constantes en las mediciones de capacitancia y factor de potencia, la prueba de relación de transformación no muestra diferencias en los diferentes tap del transformador, la prueba de corriente de excitación muestra que el núcleo del transformador no presenta daño alguno. Las pruebas a las boquillas no muestran daño en las mismas, la prueba de collar caliente queda como referencia para futuras pruebas.

La tabla CLIV el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador 2/T, resultados presentados en la tabla CXVIII.

Tabla CLIV. **Análisis gases disueltos, fase 2/T, Guatemala Norte**

| Método | <i>Dörmenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|-------------------|------------------------|-----------------|-----------|------------------------------|
| 15/05/2007 | No Cumple | Falla Baja Temperatura | Falla t>700 | No Aplica | Normal |
| 30/08/2006 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | No Aplica | No Cumple |
| 20/08/2005 | No Cumple | Falla t>700 | Falla 300<t<700 | No Aplica | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | No Aplica | No Cumple |

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas dieléctricas indican que el sistema de aislamiento del transformador se encuentra en buen estado hasta el 2006.

Sin embargo, al analizar los gases disueltos en el transformador se encuentran fallas térmicas, alcanzando temperaturas por arriba de los 700 centígrados, no se presenta degradación en la celulosa.

La tabla CXIX muestra las pruebas físico-química-eléctricas al aceite, tanto la humedad, la acidez, el factor de potencia y la rigidez dieléctrica se mantienen constantes.

Se concluye que, según indicación de las pruebas dieléctricas, que el sistema de aislamiento se encuentra en buen estado. Sin embargo, las últimas pruebas dieléctricas de *Overall*, relación de transformación y corriente de excitación, así como las pruebas a las boquillas fueron en el 2006, y los análisis de gases indican que la falla térmica por una temperatura superior a los 700 centígrados persiste, esto según el método de *Duval*, por lo que se recomienda realizar lo antes posible pruebas dieléctricas a esta unidad esto con tal de identificar el estado actual del transformador, se recomienda realizar un mantenimiento mayor al transformador en busca de la causa de la falla térmica.

6.3.4. Transformador banco 3, fase R, ID-217210-7

Las tablas XLVIII a la LIII, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador, la prueba de *Overall* muestran valores constantes en las mediciones de capacitancia y factor de potencia, la prueba de relación de transformación no muestra diferencias en los diferentes taps del transformador, la prueba de corriente de excitación muestra que el núcleo del transformador no presenta daño alguno. Las pruebas a las boquillas la medición de capacitancia C_1 y C_2 , así como la prueba de collar caliente muestran boquillas en buen estado.

La tabla CLV muestra el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador 3/R, resultados presentados en la tabla CXX.

Tabla CLV. **Análisis gases disueltos, fase 3/R, Guatemala Norte**

| Método | <i>Dörnenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|------------------------|---------------|--------------|-------------|------------------------------|
| 15/05/2007 | No Cumple | Falla t>700 | Falla t>700 | Falla t>700 | Normal |
| 30/08/2006 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | Descomposición Térmica | Falla t>700 | Falla t>700 | Falla t>700 | Normal |
| 31/10/2002 | No Cumple | Falla t>700 | Falla t>700 | Falla t>700 | Normal |

Fuente: elaboración propia.

Las pruebas dieléctricas presentan un transformador con un sistema de aislamiento en buen estado con un factor de potencia que para el 2008 presenta una tendencia en disminuir. Sin embargo, el análisis de gases disueltos presenta que el transformador sufrió una falla térmica considerable, alcanzando los 700 centígrados, esta falla fue detectada por tres métodos, *Rogers*, *Duval* y el método de la IEC.

La tabla CXXI muestra las pruebas físico-química-eléctricas al aceite, tanto la humedad, la acidez, el factor de potencia y la rigidez dieléctrica se mantienen constantes.

Se concluye que, es necesario actualizar el análisis de gases disueltos al transformador, esto con el fin de determinar si continúa la falla térmica, de continuar será necesario realizar un mantenimiento mayor del transformador en busca de la causa de la elevación de temperatura.

Las pruebas eléctricas indican que el sistema de aislamiento se encuentra en buen estado.

6.3.5. Transformador banco 3, fase S, ID-217210-1

Las tablas LIV a la tabla LVIII, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador, la prueba de *Overall*, prueba de relación de transformación y corriente de excitación. Sin embargo, estas pruebas fueron realizadas en el 2000, por lo que no se pueden utilizar para determinar el estado actual del transformador, y quedan como referencia para futuras pruebas.

La tabla CLVI muestra el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador 3/S, resultados presentados en la tabla CXXII.

Tabla CLVI. **Análisis gases disueltos, fase 3/S, Guatemala Norte**

| Método | <i>Dörnenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|-------------------|---------------|--------------|-------------|------------------------------|
| 15/05/2007 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | No Aplica | Normal |
| 30/08/2006 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | Falla t>700 | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

Con el análisis por medio del método de *Duval* se encuentra un transformador con una falla térmica importante, alcanzando temperaturas arriba de 700 centígrados.

La tabla CXXIII muestra las pruebas físico-química-eléctricas al aceite, tanto la humedad, la acidez, el factor de potencia y la rigidez dieléctrica se mantienen constantes.

Se concluye que, es necesario realizar un mantenimiento al transformador para determinar la causa de la elevación del transformador, esto debido a los resultados encontrados en el análisis de gases disueltos, por el método de *Duval*, en el cual se determinó una falla térmica que provocó temperaturas arriba de los 700 centígrados, es necesario además realizar las pruebas dieléctricas al transformador, la prueba de *Overall*, prueba de relación de transformación, la prueba de corriente de excitación y determinar el estado de las boquillas con la medición de la capacitancias C_1 y C_2 .

6.3.6. Transformador banco 3, fase T, ID-217210-3

Las tablas LIX a la LX, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador, la prueba de *Overall*, y prueba al aceite. Sin embargo, estas pruebas fueron realizadas en el 2000, por lo que no se pueden utilizar para determinar el estado actual del transformador, y quedan como referencia para futuras pruebas.

La tabla CLVII el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador 3/T, resultados presentados en la tabla CXXIV.

Tabla CLVII. **Análisis gases disueltos, fase 3/T, Guatemala Norte**

| Método | <i>Dörmenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|-------------------|------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|
| 15/05/2007 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | No Aplica | Normal |
| 30/08/2006 | No Cumple | Falla Baja Temperatura | Falla t>700 | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | No Aplica | Falla 300<t<700 | Falla 300<t<700 | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

Con el análisis por medio del método de *Duval* encontramos un transformador con una falla térmica importante, alcanzando temperaturas arriba de 700 centígrados.

La tabla CXXV muestra las pruebas físico-química-eléctricas al aceite, tanto la humedad, la acidez, el factor de potencia y la rigidez dieléctrica se mantienen constantes.

Se concluye que, es necesario realizar un mantenimiento al transformador para determinar la causa de la elevación de temperatura, es necesario además realizar las pruebas dieléctricas al transformador, la prueba de *Overall*, prueba de relación de transformación, la prueba de corriente de excitación y determinar el estado de las boquillas con la medición de las capacitancias C₁ y C₂.

6.4. Análisis de pruebas en transformadores de potencia en Subestación Guatemala Sur

Los transformadores analizados forman parte de cuatro bancos de transformación trifásico. El Banco 1, formado por tres autotransformadores de 25 MVA, con voltajes de transformación de 138kV/69kV. El Banco 2, formado por tres autotransformadores de 25 MVA, con voltajes de transformación de 138kV/69kV. El Banco 3, formado por tres autotransformadores de 50 MVA, con voltajes de transformación de 230kV/69kV. El Banco 4, un transformador trifásico de 100 MVA, con voltajes de transformación de 230kV/69kV.

6.4.1. Transformador banco 1, fase R, ID-61699

Las tablas LXI a la LXIV, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador, la prueba de *Overall*, relación de transformación, corriente de excitación y collar caliente. Las pruebas de relación de transformación, corriente de excitación y collar caliente no muestran ningún problema. Sin embargo, la prueba de *Overall* muestra un aumento del factor de potencia en las distintas mediciones, es tomar en cuenta que este aumento sucedió en el transcurso del 2006, de febrero a diciembre.

La tabla CLVIII muestra el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador 1/R, resultados presentados en la tabla CXXVI.

Tabla CLVIII. **Análisis gases disueltos, fase 1/R, Guatemala Sur**

| Método | <i>Dörmenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------|------------------------------|
| 17/05/2007 | No Cumple | Arco Alta Energía | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 30/08/2006 | No Cumple | Arco Alta Energía | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | Descarga Alta Energía | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

Con el análisis por medio del método de *Rogers* se encuentra el transformador con una falla importante, un arco de alta intensidad, en el histórico se puede determinar que la falla ocurrió durante el transcurso del 2006, fecha que corresponde con el aumento del factor de potencia en la prueba de *Overall*, condiciones que pudieran estar relacionadas.

La tabla CXXVII muestra las pruebas físico-química-eléctricas al aceite, tanto la acidez, el factor de potencia y la rigidez dieléctrica se mantienen constantes. Sin embargo, hay un aumento en la concentración de humedad en el transformador, pasando de 14 ppm a 51 ppm en el transcurso de un año.

Se concluye que, el transformador se encuentra en estado crítico, los resultados muestran un aumento en el factor de potencia en la prueba de *Overall*, las pruebas físicas al aceite muestran un aumento en la humedad del aceite, lo anterior dio como resultado la existencia de arcos eléctricos en el interior del transformador. Se recomienda dar mantenimiento al transformador, realizar tratamiento al aceite del transformador con el fin de reducir la humedad en el transformador y sustituir la silica gel en el transformador.

6.4.2. Transformador banco 1, fase S, ID-61701

Las tablas LXV a la LXVIII, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador, la prueba de *Overall*, relación de transformación, corriente de excitación y collar caliente. Las pruebas de relación de transformación, corriente de excitación y collar caliente no muestran ningún problema. Sin embargo, la prueba de *Overall* muestra un aumento del factor de potencia en las distintas mediciones, es tomar en cuenta que este aumento sucedió en el transcurso del 2006, de febrero a noviembre.

La tabla CLIX el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador 1/S, resultados presentados en la tabla CXXVIII.

Tabla CLIX. **Análisis gases disueltos, fase 1/S, Guatemala Sur**

| Método | <i>Dörnenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------|------------------------------|
| 18/05/2007 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 30/08/2006 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | Arco Alta Energía | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | Descarga Alta Energía | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

Los análisis de gases disueltos por medio de los diferentes métodos no muestra falla alguna en los últimos dos años de prueba.

La tabla CXXIX muestra las pruebas físico-química-eléctricas al aceite, tanto la acidez, el factor de potencia dieléctrica y la humedad se mantienen constantes. Sin embargo, la rigidez dieléctrica del aceite muestra una disminución en la última prueba realizada, disminuyendo a 34 KV.

Se concluye que, es necesario dar seguimiento al comportamiento del valor del factor de potencia en las distintas mediciones de la prueba de *Overall*, dar seguimiento así también al valor de la rigidez dieléctrica del aceite del transformador, de presentar tendencia negativa será necesario realizar tratamiento al aceite para que recupere sus propiedades dieléctricas.

6.4.3. Transformador banco 1, fase T, ID-61702

Las tablas LXIX a la LXXII, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador, la prueba de *Overall*, relación de transformación, corriente de excitación y collar caliente, los resultados son constantes.

La tabla CLX el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador 1/T, resultados presentados en la tabla CXXX.

Tabla CLX. **Análisis gases disueltos, fase 1/T, Guatemala Sur**

| Método | <i>Dörnenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|-------------------|---------------|-----------------------|-----------|------------------------------|
| 18/05/2007 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 30/08/2006 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | Descarga Alta Energía | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

El análisis de gases disueltos por medio de los diferentes métodos no muestra falla alguna.

La tabla CXXXI muestra las pruebas físico-química-eléctricas al aceite, tanto la acidez y el factor de potencia se mantienen constantes. Sin embargo, la rigidez dieléctrica disminuyó de 51kV a 36kV para el 2005 y para el 2006 disminuye a 32 kV, la humedad aumento de 17 ppm a 31 ppm.

Se concluye que, el sistema de aislamiento se encuentra en buen estado, la prueba de *Overall* muestra un factor de potencia estable, la corriente de excitación y la relación de transformación no muestran problemas en el núcleo del transformador y el cambiador de taps. El análisis de gases disueltos no muestra fallas importantes, las pruebas físicas, eléctricas y químicas al aceite mantienen resultados constantes. Sin embargo, la disminución de la rigidez dieléctrica y el aumento de la humedad son resultados a tomar en cuenta, se recomienda cambiar la silica gel del transformador. Se recomienda continuar con las pruebas periódicas a esta unidad.

6.4.4. Transformador banco 2, fase R, ID-61698

Las tablas LXXIII a la LXXVI, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador. Las pruebas de relación de transformación, corriente de excitación y collar caliente muestran resultados constantes. Sin embargo, se observa un aumento en el factor de potencia en la prueba de *Overall*, aumento presente en las distintas mediciones de la prueba.

La tabla CLXI muestra el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador 2/R, resultados presentados en la tabla CXXXII.

Tabla CLXI. **Análisis gases disueltos, fase 2/R, Guatemala Sur**

| Método | <i>Dörnenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------|------------------------------|
| 18/05/2007 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 30/08/2006 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | Arco Alta Energía | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | Descarga Alta Energía | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

El análisis de gases disueltos por medio de los diferentes métodos no muestra falla alguna en los últimos dos años de prueba.

La tabla CXXXIII muestra las pruebas físico-química-eléctricas al aceite, tanto la acidez, el factor de potencia, la rigidez dieléctrica y la humedad muestran resultados que se mantienen constantes.

Se concluye que, el sistema de aislamiento se encuentra en buen estado, la corriente de excitación y la relación de transformación no muestran problemas en el núcleo del transformador y el cambiador de taps. El análisis de gases disueltos no muestra fallas importantes, las pruebas físicas, eléctricas y químicas al aceite mantienen resultados constantes. Sin embargo, la prueba de *Overall* muestra un aumento en el valor del factor de potencia en las distintas mediciones, se recomienda continuar con las pruebas periódicas a esta unidad para determinar la evolución en el valor del factor de potencia.

6.4.5. Transformador banco 2, fase S, ID-61696

De la tabla LXXVII a la tabla LXXX, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador. Las pruebas de relación de transformación, corriente de excitación y collar caliente muestran resultados constantes. Sin embargo, se observa un aumento en el factor de potencia en la prueba de *Overall*, aumento presente en las distintas mediciones de la prueba.

La tabla CLXII el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador 2/S, resultados presentados en la tabla CXXXIV.

Tabla CLXII. **Análisis gases disueltos, fase 2/S, Guatemala Sur**

| Método | <i>Dörnenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------|------------------------------|
| 18/05/2007 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 30/08/2006 | No Cumple | No Aplica | Descarga Alta Energía | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | Arco Alta Energía | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | Descarga Alta Energía | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

El análisis de gases disueltos por medio de los diferentes métodos no muestra falla para el último año de prueba.

La tabla CXXXV muestra las pruebas físico-química-eléctricas al aceite, tanto la acidez, el factor de potencia y la rigidez dieléctrica muestran resultados que se mantienen constantes. Sin embargo, la humedad muestra un aumento de 13 ppm a 24 ppm.

Se concluye que, el sistema de aislamiento se encuentra en buen estado, la prueba de *Overall* muestra un factor de potencia y una capacitancia estable, la corriente de excitación y la relación de transformación no muestran problemas en el núcleo del transformador y el cambiador de taps. El análisis de gases disueltos no muestra fallas importantes, las pruebas eléctricas y químicas al aceite mantienen resultados constantes. Sin embargo, la humedad presente en el aceite aumento de 13 a 24 ppm, se recomienda sustituir la silica gel en el tanque de expansión, se recomienda también continuar con las pruebas periódicas a esta unidad.

6.4.6. Transformador banco 2, fase T, ID-61697

De la tabla LXXXI a la tabla LXXXIII, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador. Las pruebas de *Overall*, relación de transformación y corriente de excitación fueron realizadas en una ocasión. Sin embargo, al compararla con las pruebas a los otros transformadores del banco los resultados son similares.

La tabla CLXIII el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador 2/T, resultados presentados en la tabla CXXXVI.

Tabla CLXIII. **Análisis gases disueltos, fase 2/T, Guatemala Sur**

| Método | <i>Dörnenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------|------------------------------|
| 18/05/2007 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 30/08/2006 | No Cumple | Arco Alta Energía | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 06/12/2005 | No Cumple | No Aplica | Descarga Alta Energía | No Aplica | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | Descarga Alta Energía | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

El análisis de gases disueltos por medio de los diferentes métodos no muestra falla para el último año de prueba.

La tabla CXXXVII muestra las pruebas físico-química-eléctricas al aceite, tanto la acidez, el factor de potencia y la rigidez dieléctrica muestran resultados que se mantienen constantes. Sin embargo, la humedad muestra un aumento de 16 ppm a 25 ppm.

Se concluye que, el sistema de aislamiento se encuentra en buen estado, la prueba de *Overall* muestra un factor de potencia y una capacitancia estable, la corriente de excitación y la relación de transformación no muestran problemas en el núcleo del transformador y el cambiador de taps. El análisis de gases disueltos no muestra fallas importantes, las pruebas eléctricas y químicas al aceite mantienen resultados constantes. Sin embargo, la humedad presente en el aceite aumento de 16 a 25 ppm, se recomienda verificar el estado de la silica gel en el tanque de expansión, se recomienda también continuar con las pruebas periódicas a esta unidad

6.4.7. Transformador banco 3, fase R, ID-247412-02

De la tabla LXXXIV a la tabla LXXXVII, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador. Las pruebas de *Overall*, relación de transformación, corriente de excitación y collar caliente muestran resultados constantes.

La tabla CLXIV muestra el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador 3/R, resultados presentados en la tabla CXXXVIII.

Tabla CLXIV. **Análisis gases disueltos, fase 3/R, Guatemala Sur**

| Método | <i>Dörnenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|-------------------|------------------------|-----------------------|-----------|------------------------------|
| 17/05/2007 | No Cumple | No Aplica | Descarga Alta Energía | No Aplica | Normal |
| 30/08/2006 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | Falla Baja Temperatura | Falla t>700 | No Aplica | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | Falla Baja Temperatura | Falla t>700 | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

Con el análisis por medio del método de *Duval* se encuentra el transformador con una falla importante, descarga de alta energía, en el histórico se puede observar la evolución de la falla, para el 2004 al 2006 el método determina falla térmica de alta temperatura, para la última prueba en el 2007 encontramos descarga de alta energía.

La tabla CXXXIX muestra las pruebas físico-química-eléctricas al aceite, tanto la acidez y la rigidez dieléctrica, muestra resultados que se mantienen constantes. Sin embargo, la humedad muestra un aumento de 10 a 19 ppm y el factor de potencia muestra una tendencia a ir incrementando, de 0,10 a 0,11 y finalmente a 0,12.

Se concluye que, el transformador no se encuentra en estado crítico, esto según las pruebas dieléctricas realizadas hasta el 2008. Sin embargo, los análisis de gases disueltos al aceite muestran fallas significativas, esto según método de *Duval*, los cuales no pueden ser obviadas, además las pruebas físicas y eléctricas al aceite muestran un aumento en la humedad y el factor de potencia respectivamente.

Se recomienda actualizar los análisis de gases disueltos, esto con el fin de observar la evolución en la condición del transformador, verificar el sistema de enfriamiento del transformador. De seguir con los resultados negativos en los análisis de gases de disueltos y en las pruebas físicas y químicas al aceite se recomienda realizar mantenimiento mayor al transformador.

6.4.8. Transformador banco 3, fase S, ID-217412-01

De la tabla LXXXVII a la tabla XCII, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador. Las pruebas de *Overall*, relación de transformación, corriente de excitación, prueba a las boquillas y collar caliente muestran resultados constantes.

La tabla CLXV muestra el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador 3/S, resultados presentados en la tabla CXL.

Tabla CLXV. **Análisis gases disueltos, fase 3/S, Guatemala Sur**

| Método | <i>Dörnenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|-------------------|---------------|--------------|-----------|------------------------------|
| 17/05/2007 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 30/08/2006 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | No Aplica | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

El análisis de gases disueltos por medio de los diferentes métodos no muestra falla para los últimos dos años de prueba.

La tabla CXLI muestra las pruebas fisico-química-eléctricas al aceite, la medición de la acidez, la rigidez dieléctrica y la humedad muestran resultados constantes.

Se concluye que, los resultados de análisis disueltos no muestran fallas significativas en los últimos dos años de prueba. Sin embargo, el historial del transformador muestra que hubo un disparo del transformador, durante el 2007, y fue realizado un mantenimiento mayor al transformador, para el 2008 los resultados de pruebas dieléctricas muestran un factor de potencia estable en la prueba de *Overall*. Se recomienda continuar con el análisis de gases disueltos para determinar el estado del transformador.

6.4.9. Transformador banco 3, fase T, ID-217410-03

De la tabla XCIII a la tabla XCVII, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador. Las pruebas de relación de transformación, corriente de excitación, prueba a las boquillas y collar caliente muestran resultados constantes, para la prueba de *Overall* el factor de potencia en la medición de C_L muestra un aumento de 0,68 a 0,80 % Fp.

La tabla CLVI muestra el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador 3/T, resultados presentados en la tabla CXLII.

Tabla CLXVI. **Análisis gases disueltos, fase 3/T, Guatemala Sur**

| Método | <i>Dömenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|------------------|-------------------|-----------------------|-----------|------------------------------|
| 17/05/2007 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 30/08/2006 | No Cumple | Arco Alta Energía | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | Arco Alta Energía | No Aplica | No Aplica | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | Descarga Alta Energía | No Aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

El análisis de gases disueltos por medio de los diferentes métodos no muestra falla para el último año de prueba. Sin embargo, los análisis de años anteriores muestran fallas en el aislamiento.

La tabla CXLIII muestra las pruebas físico-química-eléctricas al aceite, la medición de la acidez, la rigidez dieléctrica y la humedad muestran resultados constantes.

Se concluye que, el sistema de aislamiento se encuentra en buen estado. Sin embargo, las pruebas dieléctricas al transformador datan del 2005, por lo que no son resultados concluyentes sobre el estado actual del transformador, sobre todo cuando esta unidad ha sufrido fallas en el pasado, se recomienda realizar pruebas a la unidad para confirmar el estado del sistema de aislamiento del transformador.

6.4.10. Transformador trifásico banco 4, ID-C13929

De la tabla XCVIII a la tabla CI, muestran los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador. Las pruebas de *Overall*, relación de transformación, corriente de excitación y prueba a las boquillas muestran resultados constantes.

La tabla CLVII muestra el análisis a los resultados de los gases disueltos del transformador Banco 4, resultados presentados en la tabla CXLIV.

Tabla CLXVII. **Análisis gases disueltos, banco 4, Guatemala Sur**

| Método | <i>Dörnenburg</i> | <i>Rogers</i> | <i>Duval</i> | IEC | Relación CO ₂ /CO |
|------------|-------------------|---------------|--------------|-------------|------------------------------|
| 17/05/2007 | No Cumple | No Aplica | No Aplica | Falla t<300 | Normal |
| 30/08/2006 | No Cumple | No Aplica | Falla t<300 | Falla t<300 | Normal |
| 20/08/2005 | No Cumple | No Aplica | Falla t<300 | Falla t<300 | Normal |
| 27/01/2004 | No Cumple | No Aplica | Falla t>700 | No aplica | Normal |

Fuente: elaboración propia.

El análisis de gases disueltos muestra por medio del método de la IEC una falla térmica con temperatura debajo de los 300 centígrados, el método muestra la misma falla desde el 2005.

La tabla CXLV muestra las pruebas físico-química-eléctricas al aceite, la medición de la humedad, acidez y la rigidez dieléctrica muestran resultados constantes.

Se concluye que, el sistema de aislamiento del transformador se encuentra en buen estado. Sin embargo, es necesario determinar la causa en el aumento de temperatura en el transformador, se recomienda inspeccionar el sistema auxiliar de enfriamiento del transformador, continuar con las pruebas de rutina de la unidad.

CONCLUSIONES

1. La indicación de falla más común en los transformadores de potencia es elevación de temperatura en los devanados del transformador y consecuentemente en el aceite dieléctrico. Sin embargo, las causas son varias, desde sobrecarga en el transformador hasta arcos eléctricos en el interior del transformador.
2. Los transformadores de la Subestación Escuintla 1 y Guatemala Este muestran fallas que provocaron alta temperatura, según los resultados del análisis a gases disueltos en el aceite dieléctrico las fallas pueden ser sobrecargas prolongadas a arcos eléctricos entre espiras de un mismo devanado.
3. Los transformadores de la subestación Escuintla 1, muestran que se encuentran en estado crítico, según el análisis de gases disueltos realizado en el 2007.
4. En la subestación Guatemala Sur, muestra problemas el transformador de la fase R del banco 1, según el análisis de gases disueltos y los resultados de las pruebas dieléctricas al transformador. El resto de transformadores del banco así como los transformadores de los bancos 2, 3 y 4 no muestran problemas.

5. Con los resultados de las pruebas dieléctricas y un correcto análisis de gases disueltos al transformador es posible establecer una tendencia en la evolución de una falla o bien en el estado del transformador y establecer mediante este análisis una planificación de los mantenimientos a los transformadores.

RECOMENDACIONES

1. Actualizar las pruebas dieléctricas y al aceite a los transformadores de potencia de las distintas subestaciones del departamento central, sobre todo en las subestaciones Guatemala Este, Guatemala Norte y Escuintla 1.
2. Establecer cuál es la causa de la elevación de temperatura en los distintos transformadores que presentaron la falla térmica, tomando en cuenta que la mayor amenaza para los transformadores es la degradación de su aislamiento sólido.
3. Continuar con las pruebas periódicas a los transformadores, es recomendable al menos una prueba al año. Con relación a las pruebas al aceite del transformador no existe problema alguno debido a que la muestra puede ser tomada con el transformador energizado.
4. Los transformadores que en los análisis realizados en el presente trabajo de graduación resultaron con problemas, es necesario actualizar las pruebas a los transformadores del departamento central, de continuar la tendencia en los resultados desfavorables, debe de planificarse la salida de línea de la unidad para su posterior mantenimiento para establecer la causa del problema y corregirlo.

BIBLIOGRAFÍA

1. BOURGAULT, André. *Field experience with on-line dissolved gas monitoring in power transformers*. United States: GE Syprotec, 2001. 9 p.
2. Doble engineering company. *Automated insulated insulation analyzer, power and distribution transformer*. Massachusetts: Doble Engineering Company, 2001. 357 p.
3. Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers*. United States: IEEE, 1991. 10 p.
4. International electrotechnical commission. *Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – guide to the interpretation of dissolved a free gases analysis 2a ed*. United States: IEC, 2003. 15 p.
5. PORTILLO LAURINO, Álvaro. *Mantenimiento de transformadores, análisis cromatográfico – DGA*. Guatemala: s. e., 2005. 10 p.
6. _____ *Mantenimiento de transformadores, ensayos de aceite*. Guatemala: s. e., 2005. 6 p.

7. Subdirección de generación del centro de capacitación de Celaya. *Operación y mantenimiento de transformadores de potencia*. Celaya, México: Subdirección de generación del centro de capacitación de Celaya, 2000. 355 p
8. *Testing and maintenance of high-voltage bushings*. Denver, Colorado: Department of the interior, Bureau of Reclamation, 1991. 6 p.
9. TOBÍAS, Guty. *Transformadores, pruebas, ensayos y diagnósticos*. Guatemala: s. e., 2010. 93 p.
10. VAN BOLHUIS, J.P.; GUSLKI, E.; SMITH, J.J. *Monitoring and diagnostic of transformer solid insulation*. United States: IEEE, 2002. 534 p.

ANEXO

La siguiente tabla muestra un resumen de los valores en las concentraciones de gases disueltos en el aceite, propuestos como típicos por la normal IEC y la clasificación en diferentes estados del transformador que hace la norma IEEE.

Valores típicos de gases disueltos en Transformadores de Potencia

| Gas | IEC | | IEEE | | | |
|-------------------------------|------------|------|----------|-----------|------------|----------|
| | A.2 | A.4 | Estado 1 | Estado 2 | Estado 3 | Estado 4 |
| H ₂ | 60-150 | 100 | 100 | 101-700 | 701-1800 | >1800 |
| CH ₄ | 40-110 | 50 | 120 | 121-400 | 401-1000 | >1000 |
| C ₂ H ₂ | 3-50 | 5 | 35 | 36-50 | 51-80 | >80 |
| C ₂ H ₄ | 60-280 | 50 | 50 | 51-100 | 101-200 | >200 |
| C ₂ H ₆ | 50-90 | 50 | 65 | 66-100 | 101-150 | >150 |
| CO | 540-900 | 200 | 350 | 351-570 | 571-1400 | >1400 |
| CO ₂ | 5100-13000 | 5000 | 2500 | 2500-4000 | 4001-10000 | >10000 |
| TDCG | 753-1580 | 455 | 720 | 721-1920 | 1921-4630 | >4630 |

Fuente: Portillo, Álvaro. Mantenimiento de Transformadores, Análisis Cromatográfico. p. 2.

IEC Columna A.2

Se aplica a transformadores donde el aceite del transformador no se mezcla con el aceite del conmutador de tap bajo carga.

IEC Columna A.4

Se aplica a transformadores de distribución de menos de 10 MVA, de uso industrial, no aplica a empresas eléctricas.

IEEE Estado 1

Sí el total de gases combustibles se encuentra abajo del valor propuesto indica que el transformador opera satisfactoriamente. Cualquier valor de uno de los gases combustibles arriba del límite propuesto es indicación de un posible problema y debe de existir una investigación adicional al equipo.

IEEE Estado 2

Si el total de gases combustibles se encuentra entre el rango propuesto indica que la concentración se encuentra arriba de lo normal. Cualquier valor de uno de los gases combustibles arriba del límite propuesto es indicación de un posible problema y debe de existir una investigación adicional al equipo. Deben de ser tomadas acciones para establecer una tendencia. Fallas en el transformador podrían estar presentes.

IEEE Estado 3

Si el total de gases combustibles se encuentra entre el rango propuesto indica un alto nivel de descomposición. Cualquier valor de uno de los gases combustibles arriba del límite propuesto es indicación de un posible problema y debe de existir una investigación adicional. Acciones deben de ser tomadas lo antes posible para establecer una tendencia. Fallas en el transformador están probablemente presentes.

IEEE Estado 4

Si el total de gases combustibles se encuentra entre el rango propuesto indica descomposición excesiva. De continuar el transformador en operación podría resultar en falla.

