

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **REHABILITACIÓN DE UNA SUBESTACIÓN MÓVIL 115/13,8 kV; 30 MVA, MARCA I.E.M. (MÉXICO) EN CORPOELEC**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Marquez N., Juan A.  
para optar al título de  
Ingeniero Electricista

Caracas, 2017

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **REHABILITACIÓN DE UNA SUBESTACIÓN MÓVIL 115/13,8 kV; 30 MVA, MARCA I.E.M. (MÉXICO) EN CORPOELEC**

Profesor Guía: Ing. Alexander Cepeda  
Tutor Industrial: Ing. Braulio Ramos

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Marquez N., Juan A.  
para optar al título de  
Ingeniero Electricista

Caracas, 2017

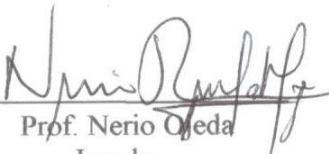
## CONSTANCIA DE APROBACIÓN

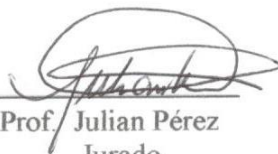
Caracas, 01 de noviembre de 2017


Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller **Juan A. Márquez N.**, titulado:

**" REHABILITACIÓN DE UNA SUBESTACIÓN MÓVIL 115/13,8kV, 30MVA  
MARCA I.E.M. (MÉXICO) EN CORPOELEC"**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al **Título de Ingeniero Electricista en la mención Potencia**, sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, y lo declaran **APROBADO**.

  
Prof. Nerio Ojeda  
Jurado

  
Prof. Julian Pérez  
Jurado

  
Prof. Alexander Cepeda  
Guía

## **DEDICATORIA**

*A mi hija, por ser la luz de mi vida, la razón y motivación para ser una mejor persona cada día y así poder guiarte en tu camino, **TE AMO** Zoe Ariadna Marquez Barrios.*

*A mis padres Nancy del Carmen Navarro Maluenga y Graciano Antonio Marquez Ortiz, mis tutores, mentores y mejores ejemplos de vida, gracias por su amor y apoyo incondicional, **LOS AMO**.*

*A mi bella esposa, por brindarme su apoyo y amor día a día, gracias por elegirme y querer compartir tu vida junto a mí, **TE AMO** Soleil Carolina Barrios Díaz.*

*A toda mi familia, por ayudarme a ser una persona íntegra, apoyándome, aconsejándome y motivándome en todo momento, **LOS AMO** Familia.*

*A todos y cada uno de ustedes, muchas gracias.*

## **AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS**

A mis padres Nancy Navarro y Graciano Marquez, los cuales me han brindado su inmenso amor, un cariño incondicional, pero sobre todo me han dado las fuerzas para levantarme y continuar a pesar de las adversidades.

A esa mujer hermosa Soleil Carolina y a nuestra princesa Zoe Ariadna, que me han tenido paciencia y me han brindado su apoyo y amor en todo momento durante este periodo de estudio.

A mi Abuela Luisa, mis tíos John Marquez, Magali Marquez y Yolanda Marcelina que Dios los tenga en su Gloria, y que lamentablemente no podrán compartir junto a mi este logro, pero sé que siempre me estarán guiando y protegiendo, los extraño.

A mi Familia, que han sido un pilar fundamental en mi formación, mi Abuela Juana, mis tíos Eugenio, Omaira, Victoria, Luisa, Pancho, Raúl, Sobeida, América, Teresa, Coromoto, Zafiro, a mis hermanos Gracianito y Ernesto, y a todos mis primos.

A mis hermanos y amigos de vida, con los que compartí, comparto y seguiré compartiendo; Luna, Miguel, La China, El Gordo, Cabeza, Marcel, El Menor, Edgar, Manzanilla, Jessenia y a aquellos que saben que aprecio y que de una u otra forma me han brindado su mano en los momentos más difíciles, se les quiere y aprecia.

Especial agradecimiento a *Mi Tío*, Lic. Julio Cesar Díaz, gracias por tu colaboración, ayuda y apoyo, se te quiere y aprecia.

Al Ing. Braulio Ramos, por su tutela y por brindarme la oportunidad de desarrollar este tema para la realización de mi Trabajo Especial de Grado.

Al Prof. Ing. Alexander Cepeda, por su guía y colaboración durante la realización de este Trabajo.

Al personal de CORPOELEC de la Gerencia de Recuperación de Transformadores y Reactancias (GRTR), Ing. Eleazar Romero, Ing. Jonathan Carta, Ing. Julio Villasana, Ing. José Zapata, Téc. Luis Pacheco, Téc. Cesar Estévez, Téc. Sebastián Lartiguez, Téc. Castillo, Téc. Berlis, Téc. Daza, Cesar Tovar, Godofredo Asta, Jesús Bastardo, Julio Gil, Merilio Naguanagua, del Nogal, Luis, Víctor, Magallanes, Ibarra, Harry, Ronald, Sandoval, Nelly, Manuel, Sra. Josefina, a todo el personal de la Misión Cuba-Venezuela, todos y cada uno de ustedes aportaron de manera directa e indirecta, ayudándome a comprender y sobrellevar el día a día de trabajo en una empresa del ramo eléctrico, así como por compartir sus conocimientos, vivencias y experiencias en el amplio y vasto tema del mantenimiento y recuperación de las subestaciones y los transformadores eléctricos.

Al Ing. Nuncio Pinto de la empresa PRECELCA, por sus recomendaciones, aportes y datos en lo que respecta a diseño de transformadores de potencia.

Muchas Gracias a todos ustedes y a aquellos que de forma directa o indirecta han influido en mi formación como persona íntegra.

**Marquez N., Juan A.**

**REHABILITACIÓN DE UNA SUBESTACIÓN MÓVIL 115/13,8 kV;  
30 MVA, MARCA I.E.M. (MÉXICO) EN CORPOELEC**

**Tutor Académico: Ing. Alexander Cepeda. Tutor Industrial: Ing. Braulio Ramos. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Potencia. Institución: CORPOELEC. Trabajo de Grado. 2017. 105h + Anexos.**

**Palabras Claves:** Sistema eléctrico de potencia, subestación eléctrica móvil, transformador de potencia, pruebas eléctricas de diagnóstico.

**Resumen.** La subestación eléctrica móvil, marca IEM 26-1737; con relación de tensiones de 115/13,8 kV; potencia 30 MVA, es una subestación reductora, de tipo intemperie, con tecnología híbrida (AIS y GIS) en su aislamiento y está preparada para integrarse con los equipos de maniobras de subestaciones tipo Radial I con salida para 13,8 kV o destino en el cual deba conectarse, siempre y cuando operen con los niveles de tensión de la misma. Esta subestación se encontraba prestando servicio en la Subestación Santa Clara, Estado Carabobo, en la población de Mariara, cuando se presentó un evento que provoco condiciones anormales para la operación de la S/E móvil; sin embargo, las protecciones en el lado de alta y baja tensión de la móvil, así como las propias del transformador no actuaron ante esta situación, lo que ocasiono daños en varios componentes de toda la unidad. La Gerencia de Recuperación de Transformadores y Reactancias (GRTR) ente adscrito a CORPOELEC, se propuso la idea de estudiar el estado actual de la S/E móvil para verificar la posibilidad de recuperarla y rehabilitarla, con el propósito de poder integrarla a los equipos de transformación que conforman el sistema eléctrico de potencia venezolano. Por estas razones se le aplicaron una serie de pruebas eléctricas de diagnóstico a los equipos que conforman la móvil, entre las cuales están, medición de la resistencia óhmica de devanados, relación de transformación, corriente de excitación, resistencia de aislamiento en DC, factor de potencia, rigidez dieléctrica del aceite y cromatografía de gases, con el análisis de estos ensayos en conjunto, permitieron evaluar la condición general de la móvil posterior a la falla, para con esto poder exponer las diferentes acciones a implementar con la finalidad de presentar una propuesta con estimación de costos, para una futura rehabilitación de la S/E móvil IEM 26-1737.

## ÍNDICE GENERAL

|   |             |
|---|-------------|
| <b>CONSTANCIA DE APROBACIÓN</b> .....   | <b>iii</b>  |
| <b>DEDICATORIA</b> .....  | <b>iv</b>   |
| <b>RECONOCIMIENTOS</b> .....  | <b>v</b>    |
| <b>RESUMEN</b> .....  | <b>vii</b>  |
| <b>ÍNDICE GENERAL</b> .....   | <b>viii</b> |
| <b>LISTA DE FIGÚRAS</b> .....   | <b>xii</b>  |
| <b>LISTA DE TABLAS</b> .....  | <b>xiii</b> |
| <b>SIGLAS O ABREVIATURAS</b> .....  | <b>xvi</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....   | <b>1</b>    |
| <b>CAPÍTULO I</b>   |             |
| <b>ASPECTOS GENERALES SOBRE LA EMPRESA CORPOELEC</b>  |             |
| <b>Y PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA</b> .....  | <b>3</b>    |
| 1.1 Aspectos generales sobre la empresa.....  | 3           |
| 1.2 Planteamiento del problema.....   | 4           |
| 1.3 Objetivo General.....   | 4           |
| 1.4 Objetivos Específicos.....  | 5           |
| 1.5 Limitaciones.....   | 6           |
| 1.6 Justificación .....   | 6           |
| 1.7 Alcance .....   | 7           |
| <b>CAPÍTULO II</b>  |             |
| <b>MARCO REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....  | <b>8</b>    |
| 2.1 Sistema eléctrico de potencia.....  | 8           |
| 2.2 Subestaciones eléctricas (S/E) .....  | 9           |
| 2.2.1 Clasificación de la subestaciones eléctricas.....   | 10          |
| 2.3 Esquema de las subestaciones eléctricas utilizadas por CORPOELEC<br>en los sistemas de transmisión y distribución ..... | 13          |
| 2.4 Subestación eléctrica móvil I.E.M. 26-1737; 115/13,8 kV; 30 MVA   | 14          |



|                                 |  |           |
|---------------------------------|--|-----------|
| 2.5                             | Características generales de la Subestación eléctrica móvil  |           |
|                                 | IEM 26-1737.....   | 15        |
| 2.6                             | Principales equipos y componentes de la Subestación eléctrica móvil  |           |
|                                 | IEM 26-1737 115/13,8 kV; 30 MVA.....   | 16        |
| 2.6.1                           | Transformador de potencia .....  | 17        |
| 2.6.2                           | Interruptores y seccionadores de potencia .....  | 21        |
| 2.6.3                           | Pararrayos o descargadores.....  | 24        |
| 2.6.4                           | Sistema de refrigeración o enfriamiento .....  | 25        |
| 2.6.5                           | Celdas de media tensión.....   | 26        |
| 2.6.6                           | Transformadores de medida.....   | 27        |
| 2.6.7                           | Equipos de servicios auxiliares .....  | 28        |
| 2.6.8                           | Relés.....   | 31        |
| 2.6.9                           | Semirremolque .....  | 34        |
| 2.7                             | Pruebas eléctricas de diagnóstico aplicadas a transformadores de potencia .....                            | 35        |
| 2.7.1                           | Prueba de medición de la relación de transformación .....  | 36        |
| 2.7.2                           | Prueba de medición de la resistencia óhmica de devanados.....  | 37        |
| 2.7.3                           | Prueba de medición de la corriente de excitación.....  | 39        |
| 2.7.4                           | Prueba de medición de factor de potencia o factor de disipación y medición de las capacitancias .....      | 40        |
| 2.7.5                           | Prueba de medición de la resistencia de aislamiento en corriente continua .....                            | 40        |
| 2.7.6                           | Prueba de medición de la rigidez dieléctrica del aceite .....  | 42        |
| 2.7.7                           | Prueba de Cromatografía de gases .....   | 43        |
| <b>CAPÍTULO III</b>             |  |           |
| <b>MARCO METODOLÓGICO .....</b> |  | <b>45</b> |
| 3.1                             | Análisis de las posibles causas que ocasionaron la falla en la S/E móvil IEM 26-1737.....                  | 45        |
| 3.2                             | Pruebas eléctricas de diagnóstico realizadas al transformador de potencia de la S/E móvil IEM 26-1737..... | 46        |

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| 3.2.1  | Prueba de medición del factor de potencia o factor de disipación y medición de capacitancias.....                      | 47        |
| 3.2.2  | Prueba de medición de la relación de transformación .....  | 50        |
| 3.2.3  | Prueba de medición de la corriente de excitación.....  | 54        |
| 3.2.4  | Prueba de medición de la resistencia óhmica de devanados.....  | 56        |
| 3.2.5  | Prueba de medición de la resistencia de aislamiento en corriente continua (DC).....                                    | 59        |
| 3.2.6  | Prueba de medición de la rigidez dieléctrica del aceite .....  | 61        |
| 3.2.7  | Prueba de Cromatografía de gases .....   | 63        |
| 3.2.8  | Estado actual del transformador de potencia de la S/E móvil IEM 26-1737.....   | 64        |
| 3.3  | Pruebas eléctricas de diagnóstico aplicadas al transformador de servicios auxiliares de la S/E móvil IEM 26-1737 ..... | 66        |
| 3.3.1  | Prueba de medición del factor de potencia o factor de disipación y medición de capacitancias.....                      | 66        |
| 3.3.2  | Prueba de medición de la resistencia de aislamiento en corriente continua (DC).....                                    | 68        |
| 3.4  | Prueba de funcionamiento de los interruptores de potencia ubicados en el lado de alta tensión (115 kV) .....           | 69        |
| 3.5  | Prueba de medición de la relación de transformación a los transformadores de corriente (TC) .....                      | 69        |
| 3.6  | Prueba de funcionamiento de los rollos de cables de potencia para conexión de la S/E móvil IEM 26-1737.....            | 70        |
| 3.6.1  | Prueba de medición de la resistencia de aislamiento en corriente continua (DC).....                                    | 70        |
| 3.6.2  | Prueba de medición del factor de potencia o factor de disipación y medición de capacitancias.....                      | 71        |
| <br><b>CAPÍTULO IV</b>                                 |  |           |
| <b>EVALUACIÓN, RECUPERACIÓN, SUSTITUCIÓN Y ADICIÓN</b> |  |           |
| <b>DE EQUIPOS A LA S/E MÓVIL IEM 26-1737 .....</b>     |  | <b>73</b> |

|   |  |            |
|---|--|------------|
| 4.1   | Dispositivos, equipos e instrumentos que resultaron afectados por la falla que presentó la subestación eléctrica móvil IEM 26-1737 ... | 73         |
| 4.1.1   | Núcleo, devanados de alta tensión y devanados de baja tensión .....  | 74         |
| 4.1.2   | Cableado de media tensión y control .....  | 77         |
| 4.1.3   | Celdas de media tensión.....   | 78         |
| 4.1.4   | Equipos indicadores de temperatura .....   | 80         |
| 4.2   | Recuperación o sustitución de los equipos afectados por la falla en la S/E móvil IEM 26-1737 .....                                     | 81         |
| 4.2.1   | Diseño de devanados 115/13,8 kV; 30 MVA, para el transformador de potencia la S/E móvil IEM 26-1737 .....                              | 82         |
| 4.2.2   | Características generales del reconfigurador a implementar en la salida de media tensión (13,8 kV) como sistema de protección .....    | 85         |
| 4.2.3   | Características generales del cambiador de tomas bajo carga (CTBC) a conectarse en el transformador como sistema de regulación .....   | 88         |
| <b>CAPITULO V</b>   |  |            |
| <b>PROPUESTA PARA LA REHABILITACIÓN Y FUTURA PUESTA EN SERVICIO DE LA S/E MÓVIL IEM 26-1737 .....</b> |  |            |
|   |  | <b>92</b>  |
| 5.1   | Estimación de costos generales para las reparaciones, modificaciones y adición de equipos a realizarse en la S/E móvil 26-1737 .....   | 92         |
| 5.1.1   | Devanados de alta tensión (115 kV), baja tensión (13,8 kV) y devanado de regulación.....   | 93         |
| 5.1.2   | Cambiador de tomas bajo carga (CTBC).....  | 94         |
| 5.1.3   | Reconfigurador para la salida en baja tensión (13,8 kV).....   | 95         |
| 5.1.4   | Indicadores de temperatura .....   | 95         |
| 5.2   | Propuesta para la rehabilitación de la S/E móvil IEM 26-1737.....  | 96         |
| <b>CONCLUSIONES.....</b>  |  | <b>100</b> |
| <b>RECOMENDACIONES.....</b>   |  | <b>102</b> |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   |  | <b>103</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>  |  | <b>105</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>   |  | <b>106</b> |

## LISTA DE FIGURAS

| FIGURAS   | Pág. |
|---|------|
| <b>Figura 1.</b> Esquema básico de un sistema eléctrico de potencia .....   | 9    |
| <b>Figura 2.</b> Relés multifunción para protección.....  | 33   |
| <b>Figura 3.</b> Diagrama de conexiones prueba de medición de capacitancias y factor de potencia en AC, en el lado de alta tensión..... | 48   |
| <b>Figura 4.</b> Diagrama de conexiones prueba de relación de transformación.....   | 52   |
| <b>Figura 5.</b> Diagrama de conexiones prueba de corriente de excitación .....   | 55   |
| <b>Figura 6.</b> Diagrama de conexiones prueba de medición de resistencia óhmica de devanado en el lado de alta tensión .....           | 59   |
| <b>Figura 7.</b> Diagrama de conexiones prueba de resistencia de aislamiento en DC.....   | 61   |
| <b>Figura 8.</b> Desencubado de la parte activa del transformador de potencia de la S/E móvil IEM 26-1737 .....                         | 65   |
| <b>Figura 9.</b> Parte activa de la S/E móvil IEM 26-1737, posterior a la falla.....  | 74   |
| <b>Figura 10.</b> Deformación del devanado de alta tensión H1 (115 kV).....   | 75   |
| <b>Figura 11.</b> Parte superior de la columna del núcleo de los devanados H1/x1 .....  | 76   |
| <b>Figura 12.</b> Cables de salida en 13,8 kV de la S/E móvil IEM 26-1737.....  | 78   |
| <b>Figura 13.</b> Celda de Interruptor Automático GIS CPG 1 (O-V), marca ORMAZABAL.....   | 79   |
| <b>Figura 14.</b> Indicadores de temperatura del aceite y devanados.....  | 81   |
| <b>Figura 15.</b> Reconector Hawker Siddeley Switchgear, modelo HORIZON 38 kV .....   | 88   |
| <b>Figura 16.</b> CTBC marca ABB, modelo UZFRN 250/300 .....  | 91   |

## LISTA DE TABLAS

| TABLAS   | Pág. |
|--|------|
| <b>Tabla 1.</b> Orden de trabajo (O.T.) o contrato de la S/E móvil IEM 26-1737 .....   | 15   |
| <b>Tabla 2.</b> Características generales del transformador de potencia de la S/E .....<br>móvil IEM 26-1737 .....                                 | 16   |
| <b>Tabla 3.</b> Masa aproximada del transformador de potencia. ....  | 18   |
| <b>Tabla 4.</b> Características generales de los pasatapas o bushings .....  | 21   |
| <b>Tabla 5.</b> Características técnicas del módulo PASS MO SBB.....   | 23   |
| <b>Tabla 6.</b> Características técnicas de los pararrayos o descargadores. ....   | 25   |
| <b>Tabla 7.</b> Arreglo de componentes del sistema de refrigeración. ....  | 26   |
| <b>Tabla 8.</b> Niveles de tensión del transformador de servicios auxiliares IEM.....  | 30   |
| <b>Tabla 9.</b> Peso máximo transmitido a la calzada. ....   | 35   |
| <b>Tabla 10.</b> Pruebas de rutina, diseño y otras, para transformadores sumergidos<br>en aceite. ....   | 36   |
| <b>Tabla 11.</b> Tolerancias de las variables en las pruebas a los transformadores. ....   | 36   |
| <b>Tabla 12.</b> Tensión mínima DC para medir la resistencia de aislamiento. ....  | 41   |
| <b>Tabla 13.</b> Clasificación de las condiciones o estado del aislamiento. ....   | 42   |
| <b>Tabla 14.</b> Normativa para el uso de aceite mineral dieléctrico nuevo y usado, en<br>transformadores y equipos de potencia en CORPOELEC ..... | 43   |
| <b>Tabla 15.</b> Límite de las concentraciones de gases.....   | 44   |
| <b>Tabla 16.</b> Resultados de la prueba de medición del factor de potencia<br>y capacitancias.....  | 49   |
| <b>Tabla 17.</b> Medición del factor de potencia y capacitancias (fabricante IEM).....   | 49   |
| <b>Tabla 18.</b> Relación de transformación de la S/E móvil IEM 26-1737 .....  | 51   |
| <b>Tabla 19.</b> Relación de transformación de la S/E móvil IEM 26-1737<br>(fabricante IEM) .....  | 52   |

|                  |  |    |
|------------------|--|----|
| <b>Tabla 20.</b> | Prueba de corriente de excitación realizada al transformador.....  | 54 |
| <b>Tabla 21.</b> | Valores de resistencias de los devanados de alta tensión (30° C.).....   | 56 |
| <b>Tabla 22.</b> | Valores de resistencias de los devanados de alta tensión, corregidos<br>a 85° C. ....                            | 56 |
| <b>Tabla 23.</b> | Valores de resistencias de los devanados de baja tensión (30° C.).....   | 56 |
| <b>Tabla 24.</b> | Valores de resistencias de los devanados de baja tensión, corregidos<br>a 85° C. ....                            | 57 |
| <b>Tabla 25.</b> | Valores de resistencias de los devanados de alta tensión fabricante<br>IEM (85° C.).....                         | 57 |
| <b>Tabla 26.</b> | Valores de resistencia de los devanados de baja tensión fabricante<br>IEM (85° C.).....                          | 57 |
| <b>Tabla 27.</b> | Medición de la resistencia de aislamiento entre el núcleo y tierra.....  | 60 |
| <b>Tabla 28.</b> | Prueba de rigidez dieléctrica, medición de tensión de ruptura.....   | 62 |
| <b>Tabla 29.</b> | Gases presentes en el aceite del transformador de la S/E móvil<br>26-1737.....                                   | 63 |
| <b>Tabla 30.</b> | Resultados prueba de medición del factor de potencia y capacitancias<br>aplicados al transformador para SA. .... | 67 |
| <b>Tabla 31.</b> | Medición de la resistencia de aislamiento en DC. ....  | 68 |
| <b>Tabla 32.</b> | Relación de transformación de los transformadores de corriente. ....   | 69 |
| <b>Tabla 33.</b> | Medición del aislamiento de los conductores externos de conexión para<br>la S/E móvil IEM 26-1737 .....          | 71 |
| <b>Tabla 34.</b> | Resultados prueba de medición de factor de potencia y capacitancias<br>aplicados a los conductores externos..... | 72 |
| <b>Tabla 35.</b> | Comparación entre devanados anteriores y nuevos .....  | 82 |
| <b>Tabla 36.</b> | Datos del devanado de regulación en alta tensión (115 kV).....   | 84 |
| <b>Tabla 37.</b> | Características técnicas del reconector HORIZON 38 kV .....  | 86 |
| <b>Tabla 38.</b> | Límites de aplicación para el CTBC .....   | 90 |
| <b>Tabla 39.</b> | Cotizaciones para devanados de alta tensión y regulación .....   | 93 |
| <b>Tabla 40.</b> | Cotizaciones para devanados de baja tensión .....  | 93 |
| <b>Tabla 41.</b> | Cotizaciones para cambiador de tomas bajo carga (CTBC) .....   | 94 |

|                  |   |    |
|------------------|---|----|
| <b>Tabla 42.</b> | Cotizaciones para reconector con tensión nominal 38 kV .....                                    | 95 |
| <b>Tabla 43.</b> | Cotizaciones para indicador de temperatura de devanado .....                                    | 96 |
| <b>Tabla 44.</b> | Cotizaciones para indicador de temperatura de aceite .....                                      | 96 |
| <b>Tabla 45.</b> | Costo de los componentes eléctricos para la rehabilitación de la S/E<br>móvil IEM 26-1737 ..... | 98 |
| <b>Tabla 46.</b> | Costo total para la rehabilitación de la S/E móvil IEM 26-1737 .....                            | 99 |

## SIGLAS O ABREVIATURAS

|                  |  |
|------------------|--|
| <b>CORPOELEC</b> | Corporación Eléctrica Nacional.                            |
| <b>MPPEE</b>     | Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica.    |
| <b>CADAFE</b>    | Compañía Anónima De Administración y Fomento Eléctrico.    |
| <b>GRTR</b>      | Gerencia de Recuperación de Transformadores y Reactancias. |
| <b>CRTR</b>      | Centro de Recuperación de Transformadores y Reactancias.   |
| <b>EEI</b>       | Energy Electrical Integrators Corp.                        |
| <b>COVENIN</b>   | Comisión Venezolana de Normas Industriales.                |
| <b>IEEE</b>      | Institute of Electrical and Electronics Engineers.         |
| <b>IEC</b>       | International Electrotechnical Commission.                 |
| <b>ANSI</b>      | American National Standard Institute.                      |
| <b>ASTM</b>      | American Society for Testing Materials.                    |
| <b>NFPA</b>      | National Fire Protection Association.                      |
| <b>NETA</b>      | International Electrical Test Association.                 |
| <b>S/E</b>       | Subestación Eléctrica.                                     |
| <b>MVA</b>       | Mega Volt-Ampers.  |
| <b>kV</b>        | Kilovoltios.   |
| <b>Kg</b>        | Kilogramo.   |
| <b>AIS</b>       | Air Insulated Switchgear.                                  |
| <b>GIS</b>       | Gas Insulated Switchgear.                                  |
| <b>SA</b>        | Servicios Auxiliares.                                      |
| <b>CDC</b>       | Centro de Distribución y Control.                          |
| <b>PMYC</b>      | Protección Medición y Control.                             |
| <b>TC</b>        | Transformador de Corriente.                                |
| <b>TP</b>        | Transformador de Potencial.                                |



## INTRODUCCIÓN

CORPOELEC es una empresa eléctrica socialista, adscrita al Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica (MPPEE), con la visión de reorganizar y unificar el sector eléctrico venezolano a fin de garantizar la prestación de un servicio eléctrico, buscando soluciones que permitan fortalecer al sector eléctrico venezolano, para brindar un servicio de calidad, confiable y eficiente. La subestación eléctrica móvil marca IEM, con relación de tensión de 115/13,8 kV, potencia 30 MVA, la cual se encontraba prestando servicio en la Subestación Santa Clara, en la población de Mariara, Municipio Diego Ibarra, cuando se presentó un evento que provocó condiciones anormales para la operación de la móvil, sin embargo las protecciones propias del transformador no actuaron ante esta situación, tampoco las protecciones externas del lado de baja tensión de la móvil, lo que ocasiono daños en varios componentes de la S/E móvil debido al tiempo de duración de la falla.

Las subestaciones eléctricas móviles son una solución para sustituciones temporales, también en casos de emergencias eléctricas debido a causas naturales (descargas atmosféricas, terremotos, etc.) o por maniobras realizadas por personal operador que conlleven a fallas en el sistema, ya que ellas pueden sustituir una subestación completa o parcialmente (Bahía), dependiendo de la carga que vaya a suplir. Además, estas subestaciones se desplazan con gran facilidad y pueden estar integradas por todo tipo de componentes que constituyen la subestación, incluyendo los equipos de protección y control, lo cual permite que este tipo de subestaciones sean completamente autónomas. Las ventajas que presentan estas unidades son los motivos por los cuales la Gerencia de Recuperación de Transformadores y Reactancias (GRTR), se propuso la idea de estudiar el estado actual de la S/E móvil IEM 26-1737, para verificar la posibilidad de rehabilitarla o recuperarla, para así poder integrarla a los equipos de transformación que conforman el sistema eléctrico

de potencia. Estos motivos antes expuesto son las razones por las cuales se aplicaron una serie de pruebas eléctricas de diagnóstico para evaluar la condición de la S/E móvil posterior a la falla y los daños internos que pudo sufrir el transformador de potencia de dicha unidad, así como los demás componentes que la conforman.

Entre las pruebas eléctricas que se le implementaron al transformador de potencia de la S/E móvil, las cuales permiten determinar el estado en que se encuentra esa unidad, a fin de poder emitir un veredicto o diagnóstico sobre la posible condición del transformador, ya que estas pruebas de evaluación sirven como base para verificar y analizar los cambios o variaciones con respecto a los valores iniciales de puesta en servicio o de la última prueba realizada a la unidad bajo estudio. Entre las pruebas eléctricas realizadas al transformador y siguiendo los lineamientos establecidos en las normas, podemos mencionar la prueba de medición de la relación de transformación, prueba de medición de la resistencia óhmica de los devanados, prueba de medición de la corriente de excitación, prueba de medición del factor de potencia o factor de disipación y medición de las capacitancias del sistema aislante, prueba de medición del aislamiento en corriente directa (Megado), prueba de rigidez dieléctrica o tensión de ruptura del aceite y prueba de cromatografía de gases.

Las diferentes acciones o medidas a tomar para la rehabilitación de la S/E móvil, dependerán de los análisis de resultados que brinden las pruebas eléctricas al transformador de potencia por ser la unidad más importante de la subestación eléctrica, y la respectiva evaluación de los demás equipos que conforman la S/E móvil que resultaron afectados por la falla, donde se analizará y se estudiará, la mejor solución a nivel técnico y económico, para la recuperación de estos componentes afectados, con estimación de costos mediante cotizaciones y licitaciones económicas, para la viabilidad de este proyecto y una futura puesta en servicio de la S/E móvil marca IEM 26-1737, asegurando que esta subestación cumpla con la especificaciones técnicas y normativa exigida por la empresa CORPOELEC.

# **CAPÍTULO I**

## **ASPECTOS GENERALES SOBRE LA EMPRESA CORPOELEC Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 Aspectos generales sobre la empresa**

El 31 de julio de 2007, el gobierno crea la Corporación Nacional Eléctrica (CORPOELEC), mediante el Decreto 5330, publicado en Gaceta Oficial 38736. CORPOELEC es una empresa eléctrica socialista, adscrita al Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica (MPPEE). Es una institución que nace con la visión de reorganizar y unificar el sector eléctrico venezolano a fin de garantizar la prestación de un servicio eléctrico. Este proceso de integración permite fortalecer al sector eléctrico para brindar un servicio de calidad, confiable y eficiente. CORPOELEC como una empresa operadora estatal es la encargada de la realización de las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de potencia y energía eléctrica [1].

El Centro de Recuperación de Transformadores y Reactancias (CRTR), es un ente adscrito a la Gerencia de Recuperación de Transformadores y Reactancias (GRTR) de CORPOELEC, con una amplia experiencia acumulada en el servicio del sector eléctrico, 29 trabajadores del CRTR laboran de manera comprometida para reparar y realizar mantenimiento a transformadores de potencia, autotransformadores y reactancias, así como subestaciones eléctricas móviles y celdas de tensión móviles, que luego son incorporados en el Sistema Interconectado Nacional (SIN), con el

objeto de optimizar las subestaciones del país y para beneficio de las comunidades a lo largo de todo el territorio nacional.

## **1.2 Planteamiento del problema**

El caso específico estudiado en este proyecto es plantear una propuesta para la rehabilitación de una subestación eléctrica móvil, marca IEM (México) 115/13,8 kV; 30 MVA, la cual salió fuera de servicio por una falla en el sistema, cuando prestaba servicio en la S/E Santa Clara, en la población de Mariara, Municipio Diego Ibarra, Estado Carabobo. Por esta razón las subestaciones eléctricas móviles deben poseer un sistema de protección y control capaz de detectar y despejar las condiciones eléctricas que difieran del normal funcionamiento de los equipos de alta y baja tensión, ya sea por fallas en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) por acciones de maniobra durante operaciones de mantenimiento o descargas atmosféricas. Debido al costo de estas unidades se generó la necesidad de recuperar esta subestación, la cual puede funcionar como respaldo ante cualquier eventualidad que se presente en el sistema eléctrico y que opere con las tensiones con las que está diseñada la móvil.

## **1.3 Objetivo General**

Proyectar la rehabilitación de una subestación eléctrica móvil, marca IEM (México), 115/13,8 kV; 30 MVA, en el Centro de Recuperación de Transformadores y Reactancias de CORPOELEC, Subestación La Horqueta-Villa de Cura.

## 1.4 Objetivos Específicos

- Documentar los diferentes componentes que conforman la subestación eléctrica móvil 115/13,8 kV; 30 MVA, con datos suministrados por el fabricante, así como de las normas y manuales que suministre la GRTR.
- Evaluar las condiciones de operación de la subestación eléctrica móvil antes de la ocurrencia de la falla y las posibles causas que originaron la misma.
- Analizar la situación del estado actual de la unidad de transformación (Transformador de Potencia) de la subestación eléctrica móvil, mediante la aplicación de pruebas eléctricas de diagnóstico, como: Medición del factor de potencia o Prueba de aislamiento en AC., Prueba de corriente de excitación, Prueba de relación de transformación, Prueba de resistencia de devanado, Prueba de aislamiento en DC., Prueba de rigidez dieléctrica del aceite, y también haciendo uso de las especificaciones técnicas suministrada por la empresa fabricante.
- Exponer los posibles daños que están presente en los dispositivos, equipos e instrumentos que conforman la subestación eléctrica móvil 115/13,8 kV; 30 MVA, y con esto presentar un plan de recuperación o reparación de estos dispositivos exponiendo las especificaciones técnicas de los mismos, con una respectiva estimación de costos.
- Diseñar una propuesta indicando las diferentes recomendaciones a tomar en cuenta para la rehabilitación y futura puesta en servicio de la subestación eléctrica móvil 115/13,8 kV; 30 MVA, marca IEM (MEXICO).

## **1.5 Limitaciones**

Debido a la emergencia eléctrica a nivel nacional presente entre los años 2015 y 2016, y el hecho de que para poder realizar el estudio en campo referente a las pruebas eléctricas de diagnóstico con sus respectivas mediciones y verificación del estado de los equipos que conforman la S/E móvil se debió realizar con personal autorizado de la empresa CORPOELEC, así como procesar toda la permisología pertinente para la realización de las mismas, ya que la unidad se encuentra ubicada en el patio de 765 kV de la subestación La Horqueta, por lo que en ocasiones no se podía tener el acceso necesario debido a la disponibilidad limitada del personal del CRTR, estos factores incidieron directamente en la variable tiempo del período de realización de este proyecto.

## **1.6 Justificación**

En las últimas décadas las compañías eléctricas venezolanas y ahora CORPOELEC, se han enfocado en la búsqueda de soluciones para evitar interrupciones en el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SIN). Con este fin aparecen las subestaciones eléctricas móviles que podrán sustituir completa o parcialmente (bahía) a una subestación convencional durante tareas de reparación o mantenimientos de las mismas, así como durante circunstancias de emergencias (debidas a fallas en el sistema, catástrofes naturales, entre otras causas) donde se interrumpa el suministro de energía eléctrica.

Con la rehabilitación de esta S/E móvil son muchos los beneficios que obtendría CORPOELEC con la ayuda de esta unidad, como es la continuidad y rapidez en la puesta en servicio, entre otros; debido que estas subestaciones móviles son utilizadas por las diferentes compañías eléctricas en el mundo para mejorar la flexibilidad y confiabilidad de sus redes eléctricas en función de los requerimientos de demanda y asimilar la carga de subestaciones fijas o convencionales que requieren mantenimiento.

## **1.7 Alcance**

El alcance de este trabajo consiste en el desarrollo de una propuesta de rehabilitación de una S/E móvil 115/13,8 kV; 30 MVA, marca IEM 26-1737, para una futura puesta en servicio de la misma, asegurando que esta subestación cumpla con la especificaciones técnicas y normativa exigida por la empresa CORPOELEC, para poder cubrir contingencias y salidas de operación de subestaciones eléctricas convencionales que manejen los niveles de tensión con los que opera esta S/E móvil.

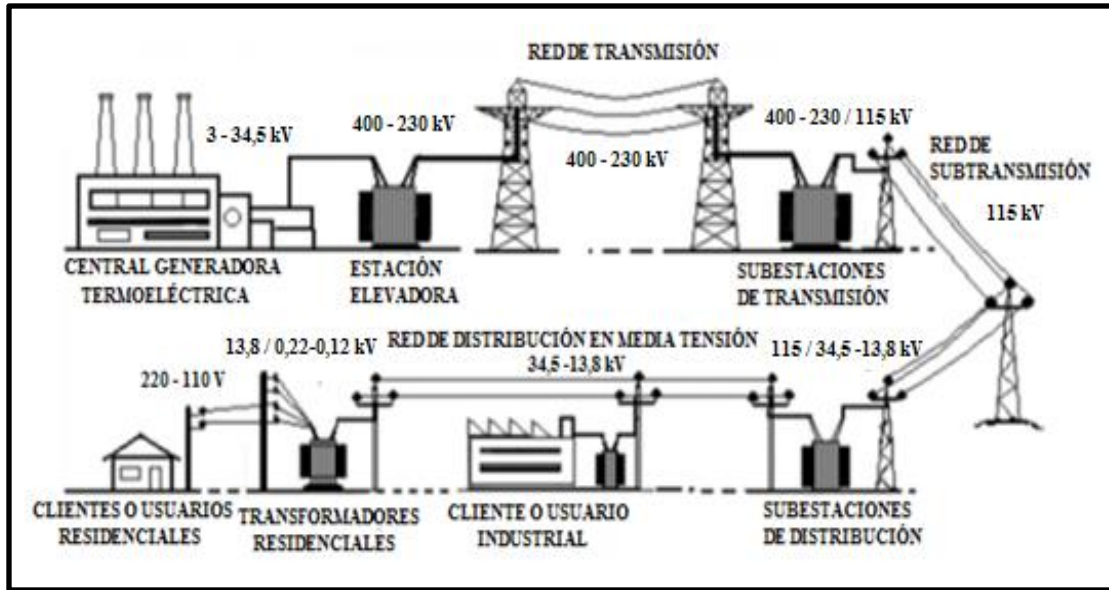
## **CAPÍTULO II**

### **MARCO REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **2.1 Sistema eléctrico de potencia**

El sistema eléctrico de potencia es una red interconectada formada por un conjunto de unidades, entre las cuales se encuentran las centrales generadoras, subestaciones de transmisión, subestaciones de distribución e interconexión y los suscriptores o consumidores conectados a dicho sistema. El objetivo de todo sistema eléctrico de potencia es suministrar la energía eléctrica necesaria para satisfacer de manera eficaz, confiable y segura el desarrollo de un país. Para lograr esto es necesario generar, transmitir y distribuir la energía, creando un enlace efectivo desde las plantas de generación hasta los centros de consumo o receptores. Dentro de un sistema eléctrico de potencia se encuentran las subestaciones eléctricas, las cuales constituyen los nodos del sistema eléctrico, donde converge y se deriva la energía eléctrica en circuitos de diferentes tipos y niveles de tensión, mediante la acción de sistemas de protección, medición y control, facilitando el suministro y transporte de la electricidad, por eso estas instalaciones son parte fundamental de todo sistema de potencia eléctrico, en la Figura 1 se muestra un ejemplo de un sistema eléctrico de potencia, desde su generación con una planta termoeléctrica, la transmisión y distribución de la que se encargan las líneas de enlaces y subestaciones eléctricas, hasta los consumidores como los son las empresas y hogares residenciales [31].





**Figura 1.** Esquema básico de un sistema eléctrico de potencia.

**Fuente:** Enríquez Harper Gilberto, *Manual del técnico en subestaciones eléctricas industriales y comerciales.*

## 2.2 Subestaciones eléctricas (S/E)

Una subestación eléctrica es un conjunto de equipos y dispositivos, cuya operación en conjunto permiten la modificación de los parámetros de un sistema eléctrico, como lo son la tensión y la corriente eléctrica, manteniendo constantes la potencia y la frecuencia. Sus funciones principales son transformar, distribuir, controlar y medir la energía eléctrica, garantizando la seguridad, confiabilidad y eficiencia del sistema mediante el uso de equipos automatizados de protección, medición y control, con la finalidad de salvaguardar el estado de los diferentes componentes que la conforman. Las subestaciones se encuentran interconectadas mediante las líneas de transmisión o distribución según sea el caso, permitiendo transportar la energía eléctrica a través de grandes distancias donde sea requerida [31].

## **2.2.1 Clasificación de las subestaciones eléctricas**

Las subestaciones eléctricas se clasifican de diferentes maneras, incluyendo por la función que desempeñan, por su nivel de tensión, por su forma de instalación y por su tipo de aislamiento [31].

### **2.2.1.1 Clasificación de las subestaciones eléctricas de acuerdo con la función que desempeñan**

Respecto a la función que desempeñan, las S/E se clasifican en:

- Subestaciones elevadoras: este tipo de subestaciones normalmente son utilizadas en centrales de generación. Su función principal es elevar las tensiones de salida de las unidades generadoras, de un nivel de media tensión a un nivel de alta tensión, para transmitir y minimizar las pérdidas en las líneas de transmisión de la energía eléctrica que es generada [31].
- Subestaciones reductoras: al contrario de las subestaciones elevadoras, estas subestaciones se encargan de disminuir la magnitud de la tensión eléctrica de transmisión a niveles acordes para su distribución [31].
- Subestaciones de maniobra: las subestaciones tipo maniobra son utilizadas sólo para realizar operaciones de conexión y desconexión, es decir, distribuyen el flujo de energía hacia otros nodos de la red mediante maniobras, según los requerimientos y condiciones del sistema [31].

### **2.2.1.2 Clasificación de las subestaciones eléctricas de acuerdo con su nivel de tensión**

Respecto a su nivel de tensión, las subestaciones se clasifican de la siguiente manera:

- Subestaciones de transmisión: estas subestaciones son las encargadas de reducir una tensión de transmisión a uno de subtransmisión. En general, las subestaciones de transmisión manejan tensiones primarias de 765, 400 y 230 kV, mientras que la tensión secundaria es de 115 kV [31].
- Subestaciones de distribución: las subestaciones de distribución son las encargadas de reducir una tensión de transmisión o subtransmisión a uno de media tensión. Generalmente, las subestaciones de distribución manejan una tensión primaria de 115 kV y una tensión secundaria que varía entre 34,5 y 13,8 kV [31].

### **2.2.1.3 Clasificación de las subestaciones eléctricas de acuerdo con su tipo de aislamiento**

Respecto a su tipo de aislamiento, las subestaciones se clasifican de la siguiente manera:

- Subestaciones aisladas en aire (AIS, Air Insulated Switchgear): son subestaciones en las cuales su aislamiento está dado por el aire del medio ambiente en que se encuentran. Este tipo de subestaciones son afectadas por la contaminación y las características atmosféricas del sitio donde se ubican, incluyendo la presión, temperatura y principalmente la altitud [31].

- Subestaciones aisladas en gas (GIS, Gas Insulated Switchgear): los elementos que conforman este tipo de subestaciones se encuentran dentro de módulos herméticamente cerrados, que contienen gas a presión, por ejemplo el SF<sub>6</sub> (hexafluoruro de azufre) como medio aislante. Este tipo de subestaciones tienen la ventaja de no ser afectadas por condiciones atmosféricas, además de permitir su uso en espacios reducidos por ser muy compactas en su diseño [31].
- Subestaciones híbridas: la tecnología híbrida se crea para poder reducir espacio respecto a las subestaciones convencionales y como una solución que combina las ventajas de ambas tecnologías (AIS y GIS). Debido al encapsulamiento son muy fiables y seguras ante cualquier tipo de medioambiente, el ahorro de espacio es muy significativo siendo esto una ventaja a la hora de utilizar este módulo híbrido en aplicaciones móviles [31].

#### **2.2.1.4 Clasificación de las subestaciones eléctricas de acuerdo con su forma de instalación**

Respecto a su forma de instalación, las subestaciones se pueden clasificar como:

- Subestaciones tipo intemperie: son subestaciones instaladas en áreas exteriores, diseñadas específicamente para operar al aire libre bajo las condiciones ambientales del sitio de instalación. Estas condiciones ambientales características son: precipitaciones, contaminación, humedad, entre otros factores ambientales [31].
- Subestación tipo interior o encapsulada: son subestaciones instaladas en áreas interiores como edificaciones. Este tipo de instalación brinda mayor

protección contra condiciones atmosféricas, además de brindar la ventaja de ocupar menor espacio [31].

### **2.3 Esquema de las subestaciones eléctricas utilizadas por CORPOELEC en los sistemas de transmisión y distribución**

Los diseños de las subestaciones eléctricas utilizadas en CORPOELEC se pueden clasificar en dos tipos de acuerdo a la norma CADAPE NS-P [2], la cual establece las especificaciones técnicas de las subestaciones a diseñar e implementar dentro del sistema eléctrico nacional: entre las que se pueden mencionar, las subestaciones radiales y subestaciones nodales.

#### **2.3.1 Subestación tipo radial**

Estas subestaciones eléctricas son alimentadas solamente de una fuente, por lo cual el flujo de potencia se establece en un solo y único sentido, estos sistemas radiales trabajan con niveles de tensión de llegada de 115 o 34,5 kV, equipados a su vez con transformadores reductores que modifican las tensiones a la salida del sistema a los niveles de tensión de 34,5 y 13,8 kV. Existen dos tipos de subestaciones de tipo radial; entre las cuales están la Subestación radial I, la cual opera con la tensión de llegada en 115 kV y tensión a la salida de 34,5 y/o 13,8 kV, y la Subestación radial II, que opera con tensión de llegada de 34,5 kV y a la salida con nivel de tensión de 13,8 kV. Ambos esquemas de subestaciones están diseñados para transmitir la energía eléctrica en los sistemas de las redes de distribución [2].

### **2.3.2 Subestación tipo nodal**

Este tipo de subestaciones se encuentran interconectadas entre sí, formando una malla de conexión entre ellas (anillo), lo cual permite que el flujo de energía eléctrica se pueda dar en ambos sentidos, tomando en cuenta las condiciones de operación del sistema eléctrico, este esquema puede trabajar con niveles de tensión de entrada de 765; 400; 230; 115 kV y manejando a la salida tensiones de 230; 115; 34,5; 13,8 kV, entre otras, dependiendo del nivel de tensión a utilizar [2].

### **2.4 Subestación eléctrica móvil IEM 26-1737; 115/13,8 kV; 30 MVA**

La subestación eléctrica móvil marca IEM, orden de trabajo (O.T.) 26-1737; con relación de tensiones de 115/13,8 kV; y una potencia nominal 30 MVA, grupo de conexión Estrella-Neutro/Estrella-Neutro con un desfasaje de cero ( $0^\circ$ ) grados y con devanado Terciario (YNyn0D). Esta móvil se encuentra montada o ensamblada sobre un semirremolque que contiene todo el equipamiento de alta y media tensión, la configuración de la subestación eléctrica móvil se desarrolló según un contrato y en función de las necesidades del cliente (CORPOELEC) tal como se muestra en la Tabla 1; estando determinada por los niveles de tensión, los niveles de aislamiento de los equipos, la potencia del transformador, entre otros aspectos.

La S/E móvil IEM 26-1737, es una subestación reductora, de tipo intemperie, con tecnología híbrida (AIS y GIS) en su aislamiento y está preparada para integrarse con los equipos de maniobras de la subestación eléctrica de distribución o destino en el cual se necesite conectar para entrar en servicio, siempre y cuando operen con los niveles de tensión de la móvil (115/13,8 kV), esta conexión puede realizarse al módulo de maniobra de la instalación por medio de la conexión directa a la barra de energía existente en el lado de alta tensión (115 kV), o por medio de un arreglo montado especialmente para esta finalidad. Si el destino al cual se conectara la S/E

móvil es una subestación eléctrica convencional, la misma deberá ser una subestación tipo Radial I, con salida para 13,8 kV, de acuerdo a las configuraciones y tipos de subestaciones convencionales con las cuales está conformado el sistema eléctrico de la corporación (CORPOELEC).

**Tabla 1.** Orden de Trabajo (O.T.) o contrato de la S/E móvil IEM 26-1737

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <b>Marca</b>            | IEM  |
| <b>Orden de Trabajo</b> | 26-1737  |
| <b>Pedido IEM</b>       | PV 2386  |
| <b>Descripción</b>      | Transformador de Potencia sumergido en aceite mineral aislante |
| <b>Cliente</b>          | Energy Electrical Integrators (EEI) / CORPOELEC                |
| <b>Pedido Cliente</b>   | 0113-10 / NCO / 0710 / 387                                     |
| <b>Destino</b>          | República Bolivariana de Venezuela                             |

**Fuente:** Empresa IEM, Pruebas eléctricas, 6173700N.

## 2.5 Características generales de la Subestación eléctrica móvil IEM 26-1737

Todos los equipos y dispositivos eléctricos que conforman la S/E móvil IEM 26-1737 son de uso exterior y deben estar preparados para soportar las condiciones ambientales que se expresan en la Tabla 2, indicando que la S/E móvil está diseñada para operar en alturas menores a 1000 m.s.n.m., para niveles de altitud mayores al especificado por el fabricante se debe aplicar un factor de corrección por altitud para la capacidad dieléctrica del aislamiento como lo establece la IEEE Std C57.12.00 [6]. Así como también por medidas de seguridad de los equipos que la conforman como del personal que proceda a operarla. Se debe supervisar que la temperatura de los devanados no supere los 85° C, debido que al superar estos límites de temperatura por un tiempo prolongado existe la posibilidad de incendio en la subestación móvil, para lo cual la NFPA 70E [3] y COVENIN 3048 [4] nos indican las medidas que debemos tener en cuenta a la hora de estos sucesos.

**Tabla 2.** Características generales del transformador de potencia de la S/E móvil IEM 26-1737.

| 65° C. de elevación de Temperatura de los Devanados a plena carga continua a 1000 m.s.n.m. |                    | NIVELES BÁSICOS DE IMPULSO (BIL) |                              |                    |                         |     |
|--|--------------------|----------------------------------|------------------------------|--------------------|-------------------------|-----|
|  |                    |                                  |                              | Transformador [kV] | Pasatapa o Bushing [kV] |     |
|  |                    | Dev. Alta Tensión                |                              | 550                |                         | 650 |
|  |                    | Dev. Baja Tensión                |                              | 110                |                         | 150 |
|  |                    | Neutro                           |                              | 110                |                         | 150 |
| Dev. Terciario   |                    | 95                               |                              | 150                |                         |     |
| Libre de BPC   |                    |                                  | Año de Fabricación: 2011     |                    |                         |     |
| Devanado   | Conexión           | Tensión [kV]                     | Capacidad [kVA] OFAF (65 °C) | Frecuencia [Hz]    |                         |     |
| Alta Tensión   | Estrella (Y)       | 115                              | 30000                        | 60                 |                         |     |
| Baja Tensión   | Estrella (Y)       | 13,8                             | 30000                        |                    |                         |     |
| Terciario  | Delta ( $\Delta$ ) | 8,7                              | 3600                         |                    |                         |     |

**Fuente:** Empresa IEM, Placa de datos, 6173710-4.

Por otro lado en el caso de riesgo sísmico, es considerado por el fabricante un nivel de riesgo intermedio para todos los equipos de la unidad móvil, así como las partes y componentes que los conforman, de acuerdo a lo expresado en la norma IEEE 693 [5], debido que la móvil fue fabricada en México y este país es más propenso a actividades sísmicas respecto a gran parte del territorio venezolano. La S/E móvil operará a una frecuencia de sesenta (60) Hertz, las tensiones de los circuitos de entrada y salida se exponen en la Tabla 2, así como las conexiones de cada devanado con su respectiva potencia, junto con el tipo de sistema de enfriamiento que se diseñó para que la subestación operara al máximo de su potencia (30 MVA).

## 2.6 Principales equipos de la subestación eléctrica móvil IEM 26-1737

Entre los principales equipos que conforman la S/E móvil IEM 26-1737 y que constituyen los elementos más importantes de la misma, ya que su operación en



conjunto y localización estratégica permiten satisfacer los requerimientos de funcionalidad y operatividad de la instalación, así como la respectiva normativa que debe considerarse para la puesta en operación de la móvil, se encuentran los siguientes componentes.

### **2.6.1 Transformador de potencia**

El transformador de potencia es una máquina eléctrica estática que se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética, lo cual permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna (AC), transfiriendo la energía eléctrica sin presentar variación en la frecuencia y en la potencia eléctrica. El transformador es el equipo de mayor importancia dentro de la S/E móvil, el cual se diseñó y construyó siguiendo los lineamientos estipulados en la norma IEEE Std C57.12.00 [6]. Su núcleo y devanados (parte activa) se encuentran sumergidos en aceite mineral dieléctrico que actúa como aislante y refrigerante. La refrigeración que se adaptó a esta unidad transformadora es de aceite forzado y aire forzado (OFAF: Oil Forced Air Forced), por otro lado el espacio restante entre el nivel de aceite en el interior de la unidad transformadora de tensión y la tapa de la cuba o tanque es ocupada por un gas inerte (Nitrógeno) cuya función es evitar el paso de la humedad hacia el aislante líquido dieléctrico (Aceite). El transformador es totalmente sellado, en su parte superior se encuentra la tapa soldada alrededor de toda la periferia del mismo, pero guardando la hermeticidad que es tan fundamental en estos equipos de transformación de energía.

#### **2.6.1.1 Características técnicas**

- Normativa de diseño: IEEE Std C57.12.00 [6].
- Potencia nominal: 30 MVA.
- Impedancia de cortocircuito ( $Z_{CC}\%$ ): 10,94% (85° C.).
- Grupo vectorial: YNyn0D.

- Polaridad: Sustractiva.
- Tipo de núcleo: Columnas.
- Tipo material de los devanados: Cobre.
- Tipo de aislamiento: Aislado en aceite.
- Tipo de aceite: Inhibido (Tipo II)
- Tensiones nominales:
  - Lado de alta tensión: 115 kV
  - Lado de baja tensión: 13,8 kV.
- Tipo de instalación: Exterior o Intemperie.
- Altitud de operación:  $\leq 1000$  m.s.n.m.
- Tipo de enfriamiento: OFAF.
- Número de fases: 3 fases (3  $\phi$ ).
- Frecuencia nominal: 60 Hz.
- Presión de diseño de tanque y accesorios:
  - Positiva: 103 kPa.      Negativa: Vacío completo.
- Tipo de cambiador de toma: Sin carga (desenergizado).
- Lado de operación CTSC: Lado de alta tensión (115 kV).
- Numero de posiciones o taps: 5 posiciones (“3” Nominal).
- Temperatura máxima devanados: 65° C.
- Temperatura ambiente de oper.:  $\leq 45^\circ$  C.
- Dimensiones aproximadas cuba o tanque:
  - Largo: 3.300 mm    Altura: 3.030 mm    Ancho: 1.600 mm.

El peso de cada componente interno y externo que conforman el transformador de potencia se indica en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Masa aproximada del transformador de potencia.

| <b>Peso de los equipos</b>               | <b>[Kg]</b> |
|--|-------------|
| DEVANADO DE ALTA TENSIÓN                 | 570         |
| DEVANADO DE BAJA TENSIÓN                 | 431         |
| DEVANADO TERCARIO                        | 151         |
| NÚCLEO-BOBINAS                           | 17.700      |
| TANQUE Y ACCESORIOS                      | 5.850       |
| AISLAMIENTO                              | 978         |
| ACEITE                                   | 8.950       |
| <b>CONTENIDO DE ACEITE EN LITROS [L]</b> |             |
| ACEITE                                   | 10300       |

**Fuente:** Empresa IEM, Plano S/E móvil partida, 6173710A-1.

### 2.6.1.2 Cambiador de tomas sin carga (CTSC)

El cambiador de tomas sin carga (CTSC), su función es realizar los ajustes en la relación de tensión del transformador, en este caso específico para variaciones de carga en forma estacional. Es el único componente del transformador que posee movimiento, estos cambiadores se operan en forma manual con el transformador desenergizado (sin tensión) y los cambios de taps o posición los ejecuta el operador de la subestación. Cambiando la relación de espiras del transformador se cambia la relación de tensión del lado de alta respecto al lado de baja tensión, esto se logra mediante la modificación de un parámetro fundamental en los transformadores que es su relación de transformación ( $a$ ), que para un transformador ideal o sin pérdidas puede calcularse como se muestra en la ecuación (1).

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \quad (1)$$

Dónde:  $a$ : Relación de transformación (Adimensional).  
 $N_1$ : Número de vueltas del devanado primario (vueltas).  
 $N_2$ : Número de vueltas del devanado secundario (vueltas).  
 $E_1$ : Tensión en el devanado de alta tensión (V).  
 $E_2$ : Tensión en el devanado baja tensión (V).

A nivel eléctrico el cambiador de tomas o derivaciones, solo suma o resta espiras (vueltas) al devanado donde se encuentre conectado (devanado de regulación), por lo general están conectados en el lado de alta tensión del transformador ya que el nivel de corriente que se maneja en ese lado es menor respecto al lado de baja tensión, en el caso de la móvil en estudio se encuentra en el lado de alta tensión (115 kV) con cinco (5) posiciones o taps de tensión, con una regulación de  $\pm 5\%$  con pasos o variación de tensión de  $\pm 2,5\%$ , expresándolo en voltios es de 2.875 V o 2,875 kV, siendo este el valor del porcentaje de desviación entre taps del CTSC, el cual se calcula mediante la ecuación (2).

$$\%Desv = \frac{V_{Mayor} - V_{menor}}{V_{Nominal} * (n-1)} * 100 \quad (2)$$

Dónde:  $\%Desv$ : Porcentaje de desviación de tensión del CTSC.  
 $V_{Mayor}$ : Tensión de mayor valor, posición “1” del CTSC.  
 $V_{menor}$ : Tensión de menor valor, posición “5” del CTSC.  
 $V_{Nominal}$ : Tensión nominal del transformador, posición “3” del CTSC.  
 $n$ : número de posiciones totales (5) del CTSC.

### 2.6.1.3 Pasatapas o Bushings

Los conductores aislados, pasatapas o bushing son parte importante en un transformador sumergido en aceite, ya que son los elementos de enlace por los cuales circulan altas tensiones eléctricas permitiendo la conexión de los cables de acometidas con la parte activa que se encuentra dentro de la cuba o tanque del transformador. Los pasatapas de la S/E móvil se encuentran gobernados por la norma IEC 60137-1 [9]. En el lado de alta tensión (115 kV) estos bushing son de tipo capacitivo estando constituidos de material aislante de poliuretano o goma siliconada, para el lado de baja tensión (13,8 kV) son de tipo sólido y están fabricados de material cerámico, estos conductores aislados son homogéneos, libre de cavidades para evitar disminuciones o mermas en la resistencia mecánica y/o calidad dieléctrica de los mismos. Para el sellado entre tanque y herraje se emplean empaques de caucho (Empacaduras) o de material sintético, resistentes al aceite a altas temperaturas y a la intemperie.

En el caso de los pasatapas de los neutros del lado de alta y baja tensión son idénticos a los utilizados en las fases de los devanados de baja tensión (13,8 kV), diseñándose para la misma clase de tensión o voltaje y capacidad de corriente, para el devanado terciario es diferente debido a los niveles de tensión que maneja este arrollado, cada pasatapa o bushing se detalla sus características o niveles básicos de aislamiento en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Características generales de los pasatapas o bushings.

| <b><i>BUSHINGS INSTALADOS EN EL LADO DE ALTA TENSION 115 KV</i></b>           |  |
|---|--|
| <b>Fabricante</b>   | ABB  |
| <b>Tipo</b>   | Capacitivo, papel impregnado en resina (RIP) |
| <b>Modelo</b>   | GSA 145-0A/1600/0.3                          |
| <b>Tensión de oper. Nominal</b>   | 138 kV                                       |
| <b>Nivel básico de Impulso (BIL)</b>  | 650 kV                                       |
| <b>Distancia de fuga mínima</b>   | 4595 mm                                      |
| <b>Corriente de soporte</b>   | 1600 A                                       |
| <b><i>BUSHINGS INSTALADOS EN EL LADO DE BAJA TENSION 13,8 KV Y NEUTRO</i></b> |  |
| <b>Fabricante</b>   | NMC  |
| <b>Tipo</b>   | Solido                                       |
| <b>Estilo</b>   | 63-6787-SP                                   |
| <b>Tensión de oper. Nominal</b>   | 23 kV  |
| <b>Nivel básico de Impulso (BIL)</b>  | 150 kV                                       |
| <b>Corriente de soporte</b>   | 2000 A                                       |
| <b>Distancia de fuga mínima</b>   | 482 mm                                       |
| <b><i>BUSHINGS INSTALADOS EN EL NEUTRO DE ALTA TENSION Y TERCARIO</i></b>     |  |
| <b>Fabricante</b>   | NMC  |
| <b>Tipo</b>   | Solido                                       |
| <b>Estilo</b>   | 63-6787-SP                                   |
| <b>Tensión de oper. Nominal</b>   | 23 kV  |
| <b>Nivel básico de Impulso (BIL)</b>  | 150 kV                                       |
| <b>Corriente de soporte</b>   | 800 A  |
| <b>Distancia e fuga mínima</b>  | 482 mm                                       |

**Fuente:** Empresa IEM, Plano bushings y pararrayos, 6173703-1.

### 2.6.2 Interruptores y seccionadores de potencia

Los interruptores de potencia son dispositivos cuyo propósito es efectuar la conexión y desconexión de circuitos con o sin carga de una subestación. Dichos aparatos deben ser capaces de interrumpir el flujo de corriente en caso de que se presenten circunstancias anormales para la operación o condiciones de falla en el sistema eléctrico, que puedan afectar las instalaciones y componentes de la

subestación, en consecuencia, deben ser capaces de soportar los esfuerzos eléctricos y térmicos a los que son sometidos para librar dicha anomalía o avería del sistema.

### **2.6.2.1 Interruptor y seccionador en el sector de alta tensión 115 kV**

El equipo utilizado para el sector de alta tensión (115 kV) es una unidad de la empresa ABB, de la serie PASS MO SBB (Plug And Switch System Multi Operations Single BusBar), es un módulo compacto híbrido el cual se encuentra compuesto por un seccionador con llave de aterramiento y un interruptor de potencia, estos dos equipos están montados en un mismo cuerpo aislados en Hexafluoruro de Azufre ( $SF_6$ ) y se rigen según las normas IEC 62271-100 [10] para los interruptores y IEC 62271-102 [11] para los seccionadores, el módulo en general está fabricado bajo la norma para equipos de alta tensión IEC 60694 [7] y para lo que corresponde al  $SF_6$  se normaliza mediante la IEC 62271-203 [12].

El Interruptor de entrada (lado de 115 kV) es el responsable por la energización de la subestación móvil, este equipo se puede operar tanto en forma local en el panel de control como en forma remota a través del relé de disparo (86) comandado por el relé MULTILIN 745 marca General Electric, ubicado en el tablero de protección medición y control (PMYC), que se encuentra en el Centro de Distribución y Control (CDC), todo esto se logra mediante el switch de control de interruptor (52-CS), lo cual permite controlar este dispositivo para las operaciones de abrir o cerrar, luego de accionado el resorte para la apertura se debe volver a cargar el mismo mediante la acción de una manivela o directamente en el panel de control. Las características generales del módulo híbrido ABB modelo PASS MO SBB se exponen en la Tabla 5, la cual nos indica los valores nominales con los que opera dicha unidad, también se presentan los datos técnicos tanto del interruptor como del seccionador que conforman el módulo híbrido aislado en  $SF_6$ .

**Tabla 5.** Características técnicas del módulo PASS MO SBB.

| N° de serie: 95217      Año: 2011              |                             |
|--|-----------------------------|
| DATOS TÉCNICOS                                 |                             |
| Tensión Nominal                                | 145 kV                      |
| Tensión Soportada a Impulso (BIL)              | 650 kV                      |
| Tensión de Soporte a Frec. Industrial (SIL)    | 275 kV                      |
| Frecuencia Nominal                             | 60 Hz                       |
| Intensidad Nominal                             | 2000 A                      |
| Intensidad de Corta Duración (1 seg)           | 40 kA                       |
| Intensidad de Cierre (Cresta)                  | 104 kA                      |
| SF <sub>6</sub> Nom. Presión Relativa (20° C.) | 0.56 MPa                    |
| Peso de SF <sub>6</sub> en Tres Polos          | 40 Kg                       |
| Peso Total                                     | 1750 Kg                     |
| Máxima y Mínima Temperatura [° C.]             | +40°/-30°                   |
| DATOS INTERRUPTOR                              |                             |
| Tipo de Mecanismo                              | Resorte                     |
| Intensidad de Cortocircuito                    | 40 kA                       |
| Secuencia de Operación                         | 0-0,3s-CO-15s-CO            |
| Motor  | 120 V <sub>DC</sub> ; 900 W |
| Frecuencia Nominal                             | 60 Hz                       |
| DATOS SECCIONADOR                              |                             |
| Tipo de Mecanismo                              | BES7                        |
| Motor  | 120 V <sub>DC</sub> ; 900 W |

**Fuente:** Datasheet PASS MO SBB, ABB.

### 2.6.2.2 Interruptor y seccionador en el sector de baja tensión 13,8 kV

Para el lado de baja tensión (13,8 kV) la función de interrupción está a cargo de la Celda de Interruptor Automático GIS CPG 1 (O-V) marca ORMAZABAL. Esta unidad híbrida se encuentra compuesta por un interruptor y un seccionador accionados por motores, los cuales a su vez son comandados por los relés de actuación de la misma, esta celda seccionadora e interruptora puede ser maniobrada a través del comando local motorizado y también remotamente. La acción de apertura o cierre solamente deberá ser ejecutada con el interruptor del lado de alta tensión en posición abierto, esto a fin de que se evite operaciones en carga. En caso de que un

operador intente accionarlo con el interruptor de alta en posición cerrado, un contacto auxiliar pasante comandado por el relé supervisor de bobina (95) desligará automáticamente el interruptor del lado de alta tensión. La Celda de Protección con Fusibles GIS CPG 2 (O-F) es la encargada de la protección del transformador de servicios auxiliares, está compuesta por una unidad seccionadora con características de 24 kV de tensión de operación y corriente de accionamiento de 1600 A, con abertura motorizada y fusibles con especificaciones de tensión de operación 24 kV y corriente de ruptura de 25 kA.

### **2.6.3 Pararrayos o descargadores**

La función principal de este equipo es proteger la instalación eléctrica (transformador, interruptor, seccionador, etc.) contra sobretensiones tanto de origen externo (provocadas por fenómenos atmosféricos) como interno (ondas a frecuencia industrial debida a maniobras dentro de la misma instalación), drenando esa enorme energía a través de un conductor al sistema de puesta a tierra de la S/E móvil, para mantener los valores de tensión dentro de los límites de soporte de los demás componentes de la móvil, como el fabricante no especifica una norma se consultó las normas COVENIN 599 [13] y la IEEE Std C62.22 [14]. Los pararrayos o descargadores se encuentran instalados en el punto con mayor probabilidad de sufrir sobretensiones como es la entrada (115 kV), donde están ubicados tres pararrayos uno por cada fase, las características de los mismos se describen en la Tabla 6. La salida de baja tensión (13,8 kV) no posee descargadores o pararrayos, debido que toda la aparamenta o componentes de media tensión se encuentra dentro de un cubículo denominado Centro de Distribución y Control (CDC), el cual a su vez se encuentra conectado al sistema de puesta a tierra de la unidad móvil.



**Tabla 6.** Características técnicas de los pararrayos o descargadores.

| <b>Lado de alta tensión 115 Kv</b>           |                            |
|--|----------------------------|
| <b>Fabricante</b>                            | ABB                        |
| <b>Tipo</b>                                  | Polímero (Goma Siliconada) |
| <b>Modelo</b>                                | Q102SA082C                 |
| <b>Tensión asignada (Clase)</b>              | 102 kV                     |
| <b>Tensión máx. de serv. continuo (MCOV)</b> | 82 kV <sub>rms</sub>       |
| <b>Distancia de fuga mínima</b>              | 3388 mm                    |

**Fuente:** Empresa IEM, Plano bushings y pararrayos, 6173703-1.

#### **2.6.4 Sistema de refrigeración o enfriamiento**

El sistema de enfriamiento permite disipar el calor generado por las pérdidas que se originan en el transformador; dicho calor afecta la vida útil del aislamiento tanto líquido (aceite dieléctrico) como sólido (papel kraft) del equipo, por lo cual debe ser disipado al medio ambiente. El sistema de enfriamiento implementado en la subestación móvil es de tipo OFAF (Oil Forced Air Forced), esto indica que es de aceite forzado y aire forzado, dimensionado de modo que permita la operación continua del transformador al 100% de su capacidad o potencia nominal, en cualquier tap o relación de transformación sin que sean excedidos los valores límites de elevación de temperatura de los devanados (85°C.) especificados en las características generales de la móvil, esto se logra mediante la operación de los dos sistemas de enfriamiento con los que está provisto la S/E móvil. El enfriamiento del aislante líquido es realizado por medio de un conjunto de refrigeración que está compuesto por:

- 2 Motobombas para aceite forzado con tapón de drene (7,5 HP; 3φ; 60 Hz; 208 V, 1735 rpm) marca ABS, Modelo VMOA 150; ubicadas en la parte superior del transformador de potencia, estas se encargan de forzar la circulación del aceite por el sistema (OF), su nomenclatura es 88P-1 (lado de alta tensión 115 kV) y 88P-2 (lado de baja tensión 13,8 kV).

- 4 Moto ventiladores o enfriadores (1,5 HP, 3φ; 60 Hz; 208 V, 900 rpm), marca ENERFIN, dos (2) por cada radiador de enfriamiento (AF), su nomenclatura es 88F-1 y 88F2 conforman un sistema junto a 88P-1, por otro lado 88F-3 y 88F-4 están asociadas con 88P-2.
- 2 Refrigeradores de calor (Radiadores): un conjunto para el grupo conformado por la motobomba 88P-1 junto con los enfriadores 88F-1 y 88F-2, el otro radiador lo conforman la Motobomba 88P-2 y los enfriadores 88F-3 y 88F-4.

**Tabla 7.** Arreglo de componentes del sistema de refrigeración.

| ENFRIAMIENTO TIPO | ENFRIADORES | BOMBA |
|-------------------|-------------|-------|
| OFAF              | 1           | 88F-1 |
|                   |             | 88F-2 |
|                   | 2           | 88F-3 |
|                   |             | 88F-4 |
|                   |             | 88P-1 |
|                   |             | 88P-2 |

**Fuente:** Autor.

### 2.6.5 Celdas de media tensión

Las celdas de media tensión tienen la función de recibir y distribuir la energía eléctrica, están formadas por un conjunto de secciones verticales en donde están ubicados los relés de control de los equipos de maniobra (conmutadores de control de apertura y cierre de interruptores) y de medida (transformadores de corriente y de potencial). Adicionalmente en el Centro de Distribución y Control (CDC) se encuentran los equipos de protección y control (GE MULTILIN 745, GE MULTILIN F650, dispositivo de monitoreo de parámetros eléctricos, etc.) que cumple la función de recibir y distribuir de manera segura la energía eléctrica, así como de alertar o actuar ante cualquier funcionamiento erróneo en la S/E móvil que pueda causar alguna falla o avería. Las celdas de media tensión son construidas de

manera modular, de forma que en un módulo tenemos los equipos de maniobra y medida (Celda de Interruptor Automático y Celda de Protección con Fusibles), en otro los equipos de protección y control (Celda de Protección, Medición y Control).

## **2.6.6 Transformadores de medida**

Los transformadores de medida y protección son necesarios debido que estos nos permiten llevar señales de tensión y corriente a un valor proporcional muy inferior al nominal que entrega la unidad transformadora en la S/E móvil con relación de tensión 115/13,8 kV en cada arrollado. Dado que las tensiones son muy altas para ser censadas por equipos de medición, se procede a utilizar los transformadores de medida, donde los valores que obtengamos en el lado de baja tensión de dicho instrumento así como la magnitud de la corriente presente en ese devanado puede ser extrapolada y con esto conocer el valor de los mismos (tensión y corriente) en el lado de alta tensión de ese transformador de medida. De acuerdo a esto, tenemos dos tipos de transformadores de medida en la S/E móvil IEM 26-1737.

### **2.6.6.1 Transformadores de corriente (TC)**

Estos dispositivos son capaces de transformar la corriente que circula por el lado primario o de mayor relación y convertirla proporcionalmente a un valor de corriente en su lado secundario o de menor relación a uno de magnitud inferior con un ángulo de desfasaje cercano o igual a cero grados ( $0^\circ$ ), con esto se puede lograr aislar los instrumentos de protección, medición y control (relés) conectados a los circuitos de alta y baja tensión. En el lado de alta tensión de la S/E móvil se encuentra 3 TC tipo boquilla o bushing, los cuales están ubicados en los pasatapas del módulo híbrido aislado en SF<sub>6</sub>, uno por fase con la notación TC11 (H<sub>1</sub>), TC12 (H<sub>2</sub>), TC13 (H<sub>3</sub>), los cuales poseen una relación de transformación 250/5 A, Clase 5P20, 20 VA, y son utilizados para la protección diferencial y sobrecorriente, están diseñado siguiendo los lineamientos de la IEC 60044-1 [8].

En el lado de baja tensión (13,8 kV), están ubicados 9 TC; 3 TC internos en la Celda de Interruptor Automático CPG-1 en el Centro de Distribución y Control, uno por fase tipo ventana con la notación TC21 ( $X_1$ ), TC22 ( $X_2$ ), TC23 ( $X_3$ ), con relación de transformación 1200/5 A, Clase 5P20, 15 VA, siendo utilizados para la protección diferencial. Por otro lado los otros 6 TC tipo ventana, se encuentra ubicados en la línea de 13,8 kV; 3 TC uno por fase con la notación TC31 ( $X_1$ ), TC32 ( $X_2$ ), TC33 ( $X_3$ ), con relación de transformación 2000/5 A (ajustado a 1200/5 A), Clase 0,2, 15 VA, utilizados para medición, llegando su conexión con el Transformador de Potencial (TP). Los 3 TC restantes, conectados uno por fase con notación TC41 ( $X_1$ ), TC42 ( $X_2$ ), TC43 ( $X_3$ ), con relación de transformación 2000/5 A (ajustado a 1200/5 A), Clase 5P20, 15 VA, utilizado para protección de sobrecorriente.

#### **2.6.6.2 Transformadores de potencial (TP)**

Los transformadores de potencial son aquellos donde la tensión secundaria (baja tensión) es proporcional a la tensión primaria (alta tensión), con un desfase muy próximo o igual a cero grados ( $0^\circ$ ). Estos transformadores en la subestación móvil se encuentran en el lado de baja tensión, 3 TP internos en la Celda de Interruptor Automático CPG-1 en el Centro de Distribución y Control, uno por fase tipo inductivo, modelo ventana, con la notación TP1 ( $X_1$ ), TP2 ( $X_2$ ), TP3 ( $X_3$ ), con relación de transformación  $13.800:\sqrt{3}/120:\sqrt{3}$  V, Clase 0.2, 50 VA, instalados para medición y control.

#### **2.6.7 Equipos de servicios auxiliares**

En toda subestación eléctrica es necesaria y fundamental la existencia de unos sistemas auxiliares, complementarios a los servicios primarios, que permiten garantizar la calidad y continuidad del suministro de energía eléctrica. Los equipos de

servicios auxiliares están formados por fuentes de alimentación de corriente continua (rectificador, banco de baterías) y corriente alterna (transformador de servicios auxiliares) que alimentan en baja tensión a los sistemas de protección, control, señalización, alumbrado, alarmas, los motores de accionamiento de interruptores y seccionadores, los sistemas de refrigeración de los equipos y celdas, entre otros. Entre los principales componentes de los servicios auxiliares propios de la móvil, podemos mencionar los siguientes.

### **2.6.7.1 Transformador de servicios auxiliares**

El transformador de servicios auxiliares está fabricado por la empresa IEM, con relación de transformación de tensión 13800/208-120 V, 30KVA, este equipo tiene la misión de proporcionar corriente alterna a los equipos de medición, protección y control. Su devanado primario se conecta en paralelo a la Celdas de Protección CPG-2, que se encuentra en la cabina de servicios auxiliares o Centro de Distribución y Control, de tal manera que transforme la energía recibida y alimente desde su devanado secundario en baja tensión a los servicios auxiliares de la subestación eléctrica móvil, así como los aparatos de medida y los relés de protección, ya que estos equipos no están contruidos para soportar elevadas tensiones. Además por protección, es importante controlar la presencia de esas altas tensiones en los equipos cuando van a estar cerca del personal destinado a operar la móvil.

Los devanados de este transformador tanto en media tensión (13,8 kV) como en baja tensión (208Y/120) su material es el Aluminio (Al), con un sistema de enfriamiento tipo aceite natural y aire natural (ONAN: Oil Natural Air Natural), su diagrama de conexión es Dyn5, impedancia porcentual es  $\%Z = 2,82\%$  y puede operar a alturas menores a los 1000 m.s.n.m., para que no experimenten cambios en las propiedades de su aislamiento. Los devanados pueden operar a una temperatura máxima de +105 °C (40°C temperatura ambiente, más 65°C máxima elevación de la

temperatura en los arrollados), sus niveles básicos de aislamiento (BIL) en media tensión (13,8 kV) 95 kV y en baja tensión (208Y/120 V) 30 kV a 85 °C, en la Tabla 8 se expresan las relaciones de tensiones del transformador de servicios auxiliares.

**Tabla 8.** Niveles de tensión del transformador de servicios auxiliares IEM.

| <b>POSC.</b>        | <b>DEV.</b> | <b>TENSIÓN [V]</b> | <b>CORRIENTE [A]</b> |
|---------------------|-------------|--------------------|----------------------|
| <b>1</b>            | <b>M.T</b>  | 14.490             | 1,20                 |
| <b>2</b>            |             | 14.145             | 1,23                 |
| <b>3</b>            |             | 13.800             | 1,26                 |
| <b>4</b>            |             | 13.455             | 1,29                 |
| <b>5</b>            |             | 13.110             | 1,32                 |
| <b>BAJA TENSIÓN</b> |             | 208                | 83,27                |

**Fuente:** Empresa IEM, Placa de datos SA, 6173704A-4.

### 2.6.7.2 Rectificador

El rectificador es de marca MEI, modelo KFW30-130, este es el equipo encargado de la entrega de tensión y de corriente continua ( $V_{DC}$  e  $I_{DC}$ ) para los diferentes equipos tanto de medición y control, así como también tiene la función de cargar las baterías de forma que estas siempre tengan acumulada energía eléctrica para cuando se necesiten. El rectificador de baterías está equipado internamente con un módulo que permite transformar la tensión de entrada 208 VAC, 3 $\phi$ , 60Hz, y así poder obtener una tensión con 120  $V_{DC}$  y 30  $A_{DC}$ ; este panel es el responsable de reemplazar la energía en toda la S/E móvil en caso de que el banco de baterías deje de funcionar cuando la subestación no se encuentre en operación, pero debe estar alimentado con una tensión AC procedente del transformador de servicios auxiliares, esto con la finalidad de disponer de energía para que los sistemas de protección y medición puedan actuar.

### **2.6.7.3 Banco de baterías**

Las baterías son tipo AGM marca HBL, las cuales tienen por finalidad reemplazar temporalmente la entrega de tensión continua ( $V_{DC}$ ) para el Centro de Distribución y Control (CDC), así como los demás dispositivos de medición y protección en caso de que falte la alimentación del rectificador, por lo general el banco de baterías entra en función cuando la móvil no tiene alimentación alterna ( $V_{AC}$ ) del exterior (desenergizada) o cuando se necesite trasladar la S/E móvil a un determinado lugar donde se requiera su servicio. La alimentación del banco de baterías se realiza desde el rectificador a través de un cable con un calibre mínimo AWG 6, con una tensión 120  $V_{DC}$  y 200 Ah. Es un arreglo de sesenta (60) baterías (Pb-Acido) de 2,0  $V_{DC}$ ; 200 Ah c/u, de tipo industrial y libres de mantenimiento. Este banco de baterías se rigió o fue fabricado siguiendo la IEC 60896-21 [28].

### **2.6.7.4 Cabina de distribución de servicios auxiliares (AC/DC)**

Los servicios auxiliares tanto en corriente continua como en corriente alterna estarán separados en diferentes circuitos. Cada uno de estos componentes estará dotado de un elemento de protección (magneto térmico y/o diferencial), de manera que haya una distribución de energía tanto en corriente alterna (AC) como en corriente continua (DC), por lo tanto este panel contendrá todas las señales y equipos necesarios para controlar los equipos auxiliares y su correcto funcionamiento. Se encuentra conectado al sistema de puesta a tierra que se encuentra alrededor de toda la móvil para protección de los equipos internos a esta cabina en caso de algún evento o descarga atmosférica.

### **2.6.8 Relés**

Los relés de protección tienen la función de desconectar cualquier equipo o parte del sistema que comience a operar de manera anormal lo más rápido posible, a

la vez, deben limitar el daño producido al resto de los equipos por esta anomalía, manteniendo la integridad y estabilidad del sistema de potencia. Los relés son los encargados de enviar el comando para la actuación de los interruptores que son los equipos de corte o desconexión de la S/E móvil. Entre los relés que conforman el sistema de protección de la móvil, los cuales deben ser capaces de aportar al sistema disponibilidad, confiabilidad y estabilidad, podemos mencionar los siguientes.

#### **2.6.8.1 Relé multifunción MULTILIN 745**

Se encuentra ubicado en el tablero o celda de Protección Medición y Control (PMYC), es de marca General Electric (GE) modelo SR745W2P5G5HIAE, compuesto por un relé de sobrecorriente instantáneo el cual lo utiliza como protección de respaldo para el transformador de potencia y se activa cuando la corriente que circula supera la intensidad nominal y necesitan reajustarse o reprogramarse según las condiciones del sistema de potencia, su función en el código ANSI es 50, también posee un relé sobrecorriente temporizado el cual activa un mecanismo de tiempo al detectar la falla o una operación fuera del ajuste del equipo, su función en el código ANSI es 51. Por último está equipado con un relé diferencial que tiene como objetivo detectar las corrientes en los dos extremos, funcionando como la protección principal del transformador de potencia, comparando los valores de corrientes obtenidos y activándose cuando detecta una diferencia entre ellos de acuerdo a su programación, este tipo de relé utilizado en la subestación móvil se muestra en la Figura 2.

#### **2.6.8.2 Relé multifunción MULTILIN F650**

El relé multifunción MULTILIN F650, marca General Electric (GE) modelo F650BABF1G0HIH, se encuentra ubicado en el tablero o celda de Protección





### **2.6.9 Semirremolque**

Según COVENIN 2402 [15] este vehículo es denominado un semirremolque ya que carece de motor y su carga se apoya en el camión tractor que lo remolca. Es de tipo cama baja, compuesto de 3 ejes, 12 cauchos o llantas 285/70 R19.5 Radial más una de repuesto. Sus dimensiones efectivas son 15 metros de largo por 3 metros de ancho, está equipado con un sistema de frenos de aire y un tanque de reserva de aire, suspensión neumática independiente y freno manual. Alrededor de todo el perímetro del semirremolque se encuentra el sistema de puesta a tierra (SPAT) de la S/E móvil, provisto de cables de 2/0 o 4/0 con 10 terminales de conexión tipo mordaza, ubicados en puntos específicos donde es necesitada la conexión a tierra.

Para sostener esta unidad de transporte se cuenta con un patín telescópico mecánico con bases planas articuladas tipo zapata de arena, para soportar el semirremolque completo cuando este estacionado en operación o fuera de servicio. El sistema de señalización de la unidad está equipado con reflectores de color ámbar, reflectores rojos, luces de alto (Stop), luces indicadores de cambio de dirección (direccionales), una defensa posterior para proteger las luces instaladas en ese lugar y guardafangos.

Lo que respecta a transporte o traslado de esta unidad, apoyándonos en la norma COVENIN 0614 [16], indica que para camiones tractores de 3 ejes enganchados a semirremolques de ejes compuesto de 12 cauchos, el máximo permitido es de 48.000 Kg como se indica en la Tabla 9, para el caso de semirremolque se debe tener presente que el peso o carga en el eje delantero es el de la unidad motriz (camión tractor) más la carga que transmite el semirremolque.

**Tabla 9.** Peso máximo transmitido a la calzada.

| <b>Vehículo</b>                      | <b>Designación del vehículo Según NVC 2402</b> | <b>Peso Bruto Vehicular [Kg]</b> |
|--------------------------------------|--|----------------------------------|
| Camiones tractores con semirremolque | 2S1  | 32.000                           |
|                                      | 2S2  | 39.000                           |
|                                      | 2S3  | 46.000                           |
|                                      | 3S1  | 39.000                           |
|                                      | 3S2  | 46.000                           |
|                                      | 3S3  | 48.000                           |

**Fuente:** COVENIN 0614, *Límite de peso para vehículos de carga.*

## **2.7 Pruebas eléctricas de diagnóstico aplicadas a transformadores de potencia**

Las pruebas eléctricas aplicadas a los transformadores de potencia permiten determinar el estado en que se encuentra esa unidad a fin de poder emitir un veredicto o diagnóstico sobre la posible condición del transformador, ya que esta evaluación sirve como base para verificar los cambios o variaciones con respecto a los valores iniciales de puesta en servicio o de la última prueba realizada al espécimen bajo estudio. Mediante la aplicación de una serie de pruebas eléctricas en conjunto ya sean de rutina, diseño y otras como se expresa en la Tabla 10. Esto debido, que el referenciarse en una sola prueba no brinda una información completa y general para poder realizar un análisis eficaz que permita determinar el estado del aislamiento sólido y líquido, así como también las circunstancias, efectos o daños presentes en el núcleo o devanados de la parte activa del transformador de potencia. En consecuencia nos referenciaremos de acuerdo a lo expresado en la norma IEEE Std C57.12.00 [6], la cual indica las valoraciones respecto a las tolerancias o apreciación para cada tipo de prueba eléctrica aplicadas a un transformador eléctrico dependiendo de las variables a ser censadas, como se exhibe en la Tabla 11. Entre las pruebas eléctricas de diagnóstico que se le pueden realizar a un transformador de potencia y que brindan información acerca del estado de los componentes de la unidad transformadora, podemos mencionar las siguientes, prueba de medición de la relación de

transformación, prueba de medición de la corriente de excitación, prueba de medición del factor de potencia o factor de disipación y medición de capacitancias, prueba de medición de la resistencia de devanados, prueba de medición de la resistencia de aislamiento en corriente continua (DC), prueba de medición de la rigidez dieléctrica y cromatografía de gases presentes en el aceite.

**Tabla 10.** Pruebas de rutina, diseño y otras, para transformadores sumergidos en aceite.

| <b>501 V y mayores tensiones</b> |               |               |              |
|----------------------------------|---------------|---------------|--------------|
| <b>Prueba</b>                    | <b>Rutina</b> | <b>Diseño</b> | <b>Otras</b> |
| Resistencia de Devanados         | <b>X</b>      |               |              |
| Relación de transformación       | <b>X</b>      |               |              |
| Corriente de excitación          | <b>X</b>      |               |              |
| Factor de potencia o disipación  |               |               | <b>X</b>     |
| Resistencia de aislamiento       |               |               | <b>X</b>     |

**Fuente:** IEEE Std C57.12.00, *Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers.*

**Tabla 11.** Tolerancias de las variables en las pruebas a los transformadores.

| <b>Cantidades medibles</b> | <b>Tolerancia de las pruebas</b> |
|----------------------------|----------------------------------|
| <b>Perdidas</b>            | $\pm 3,0 \%$                     |
| <b>Tensión</b>             | $\pm 0,5 \%$                     |
| <b>Corriente</b>           | $\pm 0,5 \%$                     |
| <b>Resistencia</b>         | $\pm 0,5 \%$                     |
| <b>Frecuencia</b>          | $\pm 0,5 \%$                     |
| <b>Temperatura</b>         | $\pm 1,0^\circ \text{C}$ .       |

**Fuente:** IEEE Std C57.12.00, *Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers.*

### 2.7.1 Prueba de medición de la relación de transformación

Esta prueba indica la relación entre las espiras y tensiones presentes entre el devanado de alta tensión respecto al devanado de baja tensión, denominándose relación de transformación. Mediante esta prueba se puede determinar la existencia

de espiras o pletinas en cortocircuito en el devanado y discontinuidad en los arrollados (circuito abierto). Esta evaluación debe realizarse en cada posición del cambiador de tomas o derivaciones de la unidad transformadora, la norma IEEE Std C57.12.90 [17] especifica los procedimientos a seguir y las diferentes variables a tener en cuenta para la realización de dicho ensayo, siendo la relación de tensiones o relación de transformación la principal, la cual de acuerdo al tipo de conexión del transformador (YNyn0D) de la S/E Móvil es:

$$RT_{YNyn0} = \frac{V_{HLL}}{V_{bLL}} \quad (3)$$

Dónde:  $RT_{YNyn0}$ : valor de la relación de transformación.  
 $V_{HLL}$ : tensión en el lado de alta tensión del transformador, dada por el CTSC.  
 $V_{bLL}$ : tensión en el lado de baja tensión 13,8 kV del transformador.

El cálculo de la desviación en la medida de la relación de transformación o relación de tensiones, se expresa en la Tabla 11 ( $\leq \pm 0,5\%$ ), y se puede realizar este cómputo mediante la ecuación (4):

$$Desv(\%) = \frac{(RT_{Teórica} - RT_{Medida})}{RT_{Teórica}} * 100\% \leq \pm 0,5\% \quad (4)$$

Dónde:  $Desv(\%)$ : porcentaje de desviación de la relación de transformación teórica respecto a la medida en campo.  
 $RT_{Teórica}$ : relación de transformación calculada teóricamente.  
 $RT_{Medida}$ : relación de transformación calculada en campo.

## 2.7.2 Prueba de medición de la resistencia óhmica de devanado

Esta prueba se realiza para medir la resistencia óhmica de cada devanado a manera de calcular las pérdidas por efecto Joule, así como la componente de caída de

tensión por resistencia que origina la elevación de temperatura bajo carga. Esta evaluación óhmica puede indicarnos la presencia de cortocircuitos entre espiras o pletinas de los devanados bajo estudio, problemas de contacto o circuito abierto en hebras del arrollado y también permite la verificación de las conexiones internas de los conductores como del cambiador de tomas, a fin de comprobar que las mismas estén realizadas correctamente y por lo tanto que no existan falsos contactos o puntos de alta resistencia en las soldaduras de los devanados y demás componentes. Las pérdidas debido al efecto Joule se calculan mediante la ecuación (5).

$$P_{Rm} = I^2 * R_m \quad (5)$$

Dónde:  $P_{Rm}$ : Potencia que disipa la resistencia a medir.  
 $I$ : Corriente que circula por la resistencia a medir.  
 $R_m$ : Resistencia a medir.

En esta prueba por lo general los valores de resistencia de cada devanado, obtenido o medidos en campo se deben referenciar a una temperatura de 20° C., o pueden expresarse a una temperatura deseada, tal como se indica en la IEEE Std C57.12.90 [17], a través de la ecuación (6).

$$R_{Ref} = R_m * \frac{(T_{Ref} + T_k)}{(T_m + T_k)} \quad (6)$$

Dónde:  $R_{Ref}$ : valor de resistencia referenciada a temperatura deseada.  
 $R_m$ : valor de resistencia medida en campo.  
 $T_k$ : Temperatura de ebullición del material del devanado,

- $T_k$ : 234,5° C (Cobre)
- $T_k$ : 225° C (Aluminio)

 $T_{Ref}$ : Temperatura a la cual se quiere referenciar el valor de resistencia.  
 $T_m$ : Temperatura a la cual se midió la resistencia en campo.

Para poder determinar el error o incertidumbre presente en cada medida, se referenciarán los datos o resultados obtenidos mediante la ecuación (7), tal como se expresa a continuación.

$$\%Error = \frac{|Valor_{Teórico} - Valor_{Práctico}|}{Valor_{Teórico}} * 100 \quad (7)$$

Dónde: *%Error*: Discrepancia en porcentaje entre el valor teórico respecto al valor práctico.

*Valor<sub>Teórico</sub>*: Valor teórico de referencia.

*Valor<sub>Práctico</sub>*: Valor obtenido al realizar la medición.

### 2.7.3 Prueba de medición de la corriente de excitación

La corriente de excitación de un transformador se puede obtener en el devanado de alta tensión (primario) al aplicar a éste una diferencia de potencial, manteniendo el devanado de baja tensión (secundario) en circuito abierto. Esta prueba permite detectar en el núcleo desgaste en las láminas que lo conforman o pérdida de su aislamiento, malas uniones y corrientes circulantes en el mismo, así como también permite comprobar si existen desplazamientos o daños en los devanados, cortocircuitos o aberturas (circuito abierto) entre espiras, malas conexiones que originen puntos de alta impedancia y problemas de contacto en el cambiador de tomas o derivaciones. La magnitud de la corriente de excitación depende en parte de la tensión aplicada, del número de vueltas y dimensión del devanado, de la reluctancia y de otras condiciones tanto geométricas como eléctricas que existen en el transformador, entre los factores que pueden afectar la medición en esta prueba se encuentran, el magnetismo remanente en el núcleo del transformador y la inducción electromagnética, la norma IEEE Std C57.12.90 [17] brinda una guía para la realización de este ensayo.

#### **2.7.4 Prueba de medición del factor de potencia o factor de disipación y medición de las capacitancias**

El principio fundamental de esta evaluación es la detección de algunos cambios en las características del aislamiento tanto sólido (Papel) como líquido (Aceite), producidos por envejecimiento, humedad y contaminación, como resultado del tiempo y condiciones de operación del equipo, también permite medir las pérdidas de potencia debido a las corrientes de fuga que circulan a través del aislamiento. La corriente de fuga es la que fluye sobre la superficie del aislamiento, esta corriente es irreversible, permanece constante y constituye un factor primario para juzgar las condiciones del aislamiento, a su vez permite inferir si existen deformaciones mecánicas en el núcleo o devanados. Para realizar esta prueba se debe aplicar un potencial determinado al aislamiento que se desea probar, con el objeto de conocer la potencia que se disipa a través de él y la capacitancia que presenta el mismo. Los estándares para la realización de esta prueba y la medición de los diferentes parámetros eléctricos se encuentran expresados en la norma IEEE C57.12.90 [17].

#### **2.7.5 Prueba de medición de la resistencia de aislamiento en corriente continua (DC)**

Esta prueba permite determinar la resistencia del aislamiento de bobinas individuales, entre bobinas, desde las bobinas a tierra y del núcleo respecto a tierra. Con esto poder determinar si existen algún tipo de deformación mecánica o cortocircuitos en estos componentes, también verificar si existe presencia de humedad, contaminación o envejecimiento en los aislamientos. La resistencia de aislamiento se cuantifica en el rango de los Giga Ohm ( $G\Omega$ ) y se puede calcular mediante la corriente y la tensión aplicada a la salida del transformador por el principio de Ley de Ohm. La medición de la resistencia de aislamiento en DC suele ser afectada por variables como temperatura, humedad, inducción electromagnética,



tensión de prueba y capacidad del transformador, los estándares de esta prueba están normalizados en la IEEE Std C57.12.90 [17]. La medición de resistencia de aislamiento en corriente continua es en sí misma una prueba de potencial, por esto debe restringirse a valores apropiados que dependan de la tensión nominal de operación del equipo que se va a probar y de las condiciones en que se encuentre su aislamiento, indicando si existe presencia de humedad o suciedad en él mismo, para esto la norma ANSI/NETA MTS [19] nos suministra los valores de tensión en corriente continua a aplicarse sobre un espécimen bajo estudio dependiendo de su tensión nominal, tal como se indica en la Tabla 12, ya que si la tensión de prueba es alta se puede provocar fatiga en el aislamiento y en consecuencia daños al equipo que se está probando.

En esta prueba se busca obtener los valores de las curvas denominadas *absorción dieléctrica*, la cual puede calcularse comparando los valores de resistencia a los 60 segundos (1 minuto) entre la medida a los treinta (30) segundos de iniciado el ensayo y el *índice de polarización dieléctrica*, la cual puede calcularse comparando los valores resistivos obtenidos a los diez (10) minutos contra el medido al minuto (1) de iniciada la prueba, los valores para la determinación del estado del aislamiento se expresan en la Tabla 13, dependiendo de las magnitudes obtenidas de las relaciones para los índices de absorción e índice de polarización.

**Tabla 12.** Tensión mínima DC para medir la resistencia de aislamiento.

| <b>Voltaje del Transformador (V)</b> | <b>Mínimo Voltaje de Prueba DC (V)</b> |
|--------------------------------------|--|
| 0-600                                | 1000                                   |
| 601-5000                             | 2500                                   |
| > 5000                               | 5000                                   |

**Fuente:** ANSI/NETA MTS, *Standard for maintenance testing specifications for Electrical Power Equipment and Systems*.

**Tabla 13.** Clasificación de las condiciones o estado del aislamiento.

| <b>IA e IP</b>      | <b>Condición del aislamiento</b> |
|---------------------|----------------------------------|
| $I < 1,0$           | Degradado                        |
| $1,0 < I < 1,1$     | Pobre                            |
| $1,1 < I < 1,25$    | Cuestionable                     |
| $1,25 < I \leq 2,0$ | Regular                          |
| $I > 2,0$           | Bueno                            |

**Fuente:** Normas CADAPE, parámetros GRTR.

Dónde: **IA:** Índice de absorción.  
**IP:** Índice de polarización.

### 2.7.6 Prueba de medición de la rigidez dieléctrica del aceite

Entre los mantenimientos más comunes o rutinarios que se les realizan a las unidades transformadoras, se encuentran las pruebas de análisis de aceites dieléctricos (Prueba de análisis físico-químico). Esta prueba permite estimar la condición del aislamiento líquido (Aceite) de estos equipos de transformación, así como su posible vida útil en servicio, permitiendo la operación confiable y segura en el sistema eléctrico. Es de resaltar que las pruebas de aceites dieléctricos realizada a los equipos de potencia para estimar su condición, es de fácil aplicación y la confiabilidad de los resultados depende en gran medida de la toma de muestra al espécimen bajo estudio. Las normas internacionales IEC 60156 [23], ASTM D-1816 [22], así como las normas nacionales COVENIN 2283 [21] y COVENIN 3256 [26], se utilizan como referencia a la hora de realizar recepción y las pruebas de análisis físico-químicos de aceites nuevos, tratados y en uso para transformadores de potencia. En estas normas antes expresadas se establecen los procedimientos tanto para la toma de muestras, como para la realización de la prueba con electrodos semiesféricos, que son los que posee el equipo a utilizar, la separación entre electrodos es de 2,5 mm, esta se realiza mediante una barra que brinda dicha separación como lo indica la norma IEC 60156 [23], por otro lado el equipo de medición puede poseer un agitador magnético que tiene la función de simular el movimiento del aceite dentro del transformador, ya sea por convección o por trasegar el líquido mediante las bombas colocadas en la parte superior del transformador de potencia.

**Tabla 14.** Normativa para el uso de aceite mineral dieléctrico nuevo y usado, en transformadores y equipos de potencia en CORPOELEC.

| <b>CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS</b>                       |                |                                       |                |
|---|----------------|---------------------------------------|----------------|
| <b>Tensión de ruptura dieléctrica mínima en kV:</b>     | <b>Límites</b> | <b>NORMA PARA EL METODO DE ENSAYO</b> |                |
|   |                | <b>ASTM</b>                           | <b>COVENIN</b> |
| Electrodos de discos, separación 2,54 mm (0,1pulg.)     | > 35           | D - 877                               | 1403           |
| Electrodos VDE separación 1,02 mm (0,04 pulg.)          | > 25           | D - 1816                              | 2283           |
| Electrodos VDE separación 2,03 mm (0,08 pulg.)          | > 50           | D - 1816                              | 2283           |
| <b>Factor de potencia a 60 Hz, porcentaje máximo a:</b> |                |                                       |                |
| 25° C.  | ≤ 0,05         | D -924                                | 1182           |
| 100° C.   | ≤ 0,30         | D -924                                | 1182           |

**Fuente:** CORPOELEC, *Transformadores aislados en Aceite*, Manual de adiestramiento.

### 2.7.7 Prueba de cromatografía de gases

El aspecto más importante del análisis de gases disueltos tanto individuales como totales presentes en el transformador, consiste en evaluar y diagnosticar correctamente la falla activa dependiendo de la presencia y cantidad de gases formados como resultado de la descomposición del aceite y la descomposición de la celulosa (papel), estos gases específicos se tienden a disolverse en el aceite pudiendo ser analizados mediante la técnica de Cromatografía de Gases. El método de análisis de gases disueltos en aceite dieléctrico se encuentra estandarizado bajo la norma ASTM D3612-02 [25]. Para realizar este análisis, primero se debe tomar una muestra de aceite de la unidad a evaluar siguiendo el método de toma de muestra de aceites para el análisis de gases disueltos generalizado en la norma ASTM D-3613 [27]. Por último los gases contenidos en el lazo de inyección son introducidos en el cromatógrafo de gases donde son separados, identificados y determinados cuantitativamente.

La principal ventaja de este método y por lo que se ha convertido en una herramienta poderosa a la hora de diagnosticar el estado del transformador, se debe que al producirse una falla de tipo eléctrico o térmico en el interior del transformador se generan gases combustibles como el *Metano* ( $CH_4$ ), *Etano* ( $C_2H_6$ ), *Acetileno* ( $C_2H_2$ ) y *Etileno* ( $C_2H_4$ ) y gases no combustibles como *Hidrogeno* ( $H_2$ ), *Monóxido de Carbono* ( $CO$ ) y *Dióxido de Carbono* ( $CO_2$ ) disueltos en el aceite, a excepción de *Oxígeno* ( $O_2$ ) y *Nitrógeno* ( $N_2$ ) que no se forman a partir de la descomposición del aceite o la celulosa, lo que ofrece una temprana detección de una falla presente en la unidad transformadora de acuerdo a los valores en partes por millón (ppm) de cada gas en particular, los valores límites de concentración de estos gases antes expuestos se expresan en la Tabla 15 a fin de tener presente las magnitudes para poder determinar la congregación de los vapores presentes en el aceite y realizar una conclusión efectiva del estado del transformador bajo estudio. Entre los métodos empleados por el equipo o dispositivo para el análisis de gases disueltos (AGD), para detectar el tipo de una posible falla o avería existente, tomando en cuenta los gases antes expuestos se encuentran, Relación de Rogers, Triángulo de Duval, ETRA de Japón y Gases claves de la IEEE.

**Tabla 15.** Límite de las concentraciones de gases.

| <b>Gas</b>                 | <b>Abrev.</b> | <b>Precaución</b> | <b>Advertencia</b> |
|----------------------------|---------------|-------------------|--------------------|
| <b>Hidrogeno</b>           | $H_2$         | 100               | 700                |
| <b>Dioxido de Carbono</b>  | $CO_2$        | 2500              | 4000               |
| <b>Monoxido de Carbono</b> | $CO$          | 350               | 570                |
| <b>Etileno</b>             | $C_2H_4$      | 50                | 100                |
| <b>Etano</b>               | $C_2H_6$      | 65                | 100                |
| <b>Metano</b>              | $CH_4$        | 120               | 400                |
| <b>Acetileno</b>           | $C_2H_2$      | 2                 | 5                  |
| <b>GCDT</b>                |               | 700               | 1900               |

**Fuente:** ASTM D-3612-02, *Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography.*

Dónde: *GCDT*: Gases Concentrados Dentro del Transformador.

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### **3.1 Análisis de las posibles causas que ocasionaron la falla en la S/E móvil IEM 26-1737**

La S/E móvil se encontraba en operación en la S/E Santa Clara, en el Estado Carabobo, alimentando varios circuitos que llegaban a la población de Mariara, Municipio Diego Ibarra. Un vehículo particular se estrelló contra un poste de distribución ocasionando un cortocircuito entre dos circuitos eléctricos, sin embargo las protecciones propias del transformador en el lado de baja tensión (salida) no actuaron o se accionaron ante la presencia de la condición de falla, hasta que la protección del lado de alta tensión (entrada) de la móvil mediante la ayuda del relé de protección diferencial fue la que desconectó o colocó fuera de servicio a la S/E móvil, pero ya ese evento había ocasionado daños severos al transformador de potencia, en las celdas de media tensión en el lado de baja tensión, Centro de Distribución y Control (CDC), así como el cableado del lado de baja y los dispositivos de señalización y alarma.

Esta fue la poca información proporcionada referente a esta eventualidad que presentó la S/E móvil IEM 26-1737 mientras se encontraba en operación, la cual fue suministrada de manera verbal por el ingeniero tutor industrial de este proyecto, ya que la empresa CORPOELEC por motivos de seguridad y confidencialidad, no proveyó los respectivos informes técnicos ni cualquier otro documento o información concernientes al estado ante y durante la falla que se suscitó en la subestación.

Debido a estos motivos antes expuestos, nos referenciaremos en las pruebas eléctricas de diagnósticos que se le aplicaran al transformador de potencia y los demás componentes que conforman la S/E móvil IEM 26-1737, para poder estudiar, analizar, e inferir sobre el estado de la móvil y lo afectada que resultó producto de la avería que se originó mientras se encontraba en operación.

### **3.2 Pruebas eléctricas de diagnóstico realizadas al transformador de potencia de la S/E móvil IEM 26-1737**

Para estudiar el estado posterior a la falla que se presentó mientras se encontraba en operación el transformador de potencia de la S/E móvil IEM, O.T. 26-1737, los componentes que la conforman y la condición del aislamiento tanto líquido (aceite dieléctrico) como sólido (papel kraft); se le realizaron una serie de pruebas eléctricas de diagnóstico para poder analizar si la unidad transformadora de la móvil amerita que sean tomada una serie de medidas para su recuperación, reparación o respectiva sustitución de partes en específico, en caso de que el daño sufrido no fuese de gran magnitud y permita proponer acciones para la rehabilitación de la misma.

Las normas que se enfocan en los aspectos de las pruebas eléctricas para transformadores de potencia se encuentran en IEEE Std C57.12.90 [17] y IEC 60076-3 [20], estas son una guía ya que en su contenido mencionan y especifican los procedimientos, conexiones y formas de realizar los diferentes tipos de pruebas eléctricas, debido a los muchos criterios, medidas, valores de referencia y tolerancias que pudiesen ser tomados en cuenta en la realización de estas evaluaciones eléctricas, tal como se indica en la Tabla 11 (Ver Cap. II, pág. 36), asociadas a las pruebas eléctricas de diagnóstico indicadas en la Tabla 10 (Ver Cap. II, pág. 36), que se le implementaran a la unidad de transformación, mucha de esta información fue suministrada por la GRTR y el personal que en ella labora que intervino en la

realización de las mismas. Entre las pruebas eléctricas que se le realizaron a la unidad transformadora (Transformador de potencia) podemos mencionar las siguientes.

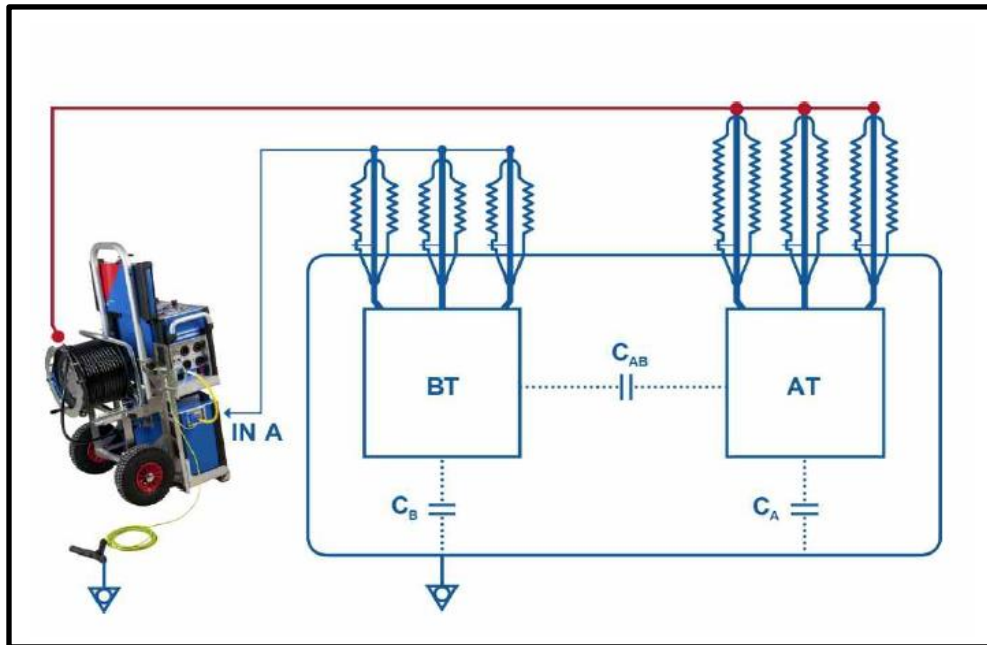
### **3.2.1 Prueba de medición del factor de potencia en AC o factor de disipación y medición de las capacitancias**

Los resultados prácticos que brindo la realización de este ensayo están plasmados en la Tabla 16, el equipo utilizado para la medición de las variables eléctricas presentes en esta prueba es de marca Omicron con las unidades CPC-100 y CP-TD1, la precisión, tolerancia y clase de medición de estos equipos están expresados en el Anexo G. Para realizar la evaluación de la corriente de excitación se cortocircuitaron los pasatapas o bushings ( $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ ) del lado de alta tensión (115 kV), y también los conductores aislados ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ) del lado de baja tensión (13,8 kV), como se representa gráficamente en la Figura 3. El equipo eléctrico de prueba utilizado realiza tres modos de evaluación (UST, GST, GST-g) para medir el factor de potencia o factor de disipación entre los devanados, cuba y núcleo de la parte activa del transformador y también la medición de las capacitancias existentes entre estos, los métodos de prueba son:

- a) **UST** (Underground Specimen Test): solo se mide la corriente que circula, capacitancia que se genera y el factor de potencia o disipación entre los devanados de alta tensión respecto a los de baja tensión y viceversa ( $C_{HL} = C_{LH}$  o  $C_{AB} = C_{BA}$ , como se muestra en la Figura 3), no se mide la corriente ni la capacitancia que circula o se genera hacia la cuba o tanque. El cable de potencia del equipo se encarga de inyectar tensión (cable rojo, en la Figura 3), mientras que el cable de baja tensión (cable negro) censa toda la información de las variables eléctricas presentes en la realización de la prueba.
- b) **GST** (Ground Specimen Test): se cuantifica la corriente, el factor de potencia y la capacitancia existente entre los devanados de alta tensión y el arrollado de

baja tensión ( $C_{HL}$  o  $C_{LH}$ ), y además se le suma el que se genera entre el devanado al que se le está inyectando tensión (cable de potencia) y la cuba o tanque, tanto en el caso del devanado de alta tensión ( $C_H$  o  $C_A$ ) como en el de baja tensión ( $C_L$  o  $C_B$ ). El valor total en este modo de prueba es la suma de ambas corrientes y ambas capacitancias generadas entre los puntos de medición ( $C_{HL}+C_H$  o  $C_{LH}+C_L$ , en la Figura 3 se representa  $C_{AB}+C_A$  o  $C_{BA}+C_B$ ).

- c) **GST-g** (Ground Specimen Test with Guard connection): en este modo se procede a medir la corriente, el factor de potencia y la capacitancia que se forma por el devanado al cual se está inyectando tensión (cable de potencia) hacia la cuba o tanque, en el caso del devanado de alta tensión se representa ( $C_H$  o  $C_A$ ) y en el de baja tensión ( $C_L$  o  $C_B$ ). Esto se obtiene debido que el transformador como tal es representado como un condensador, donde las placas son los devanados y las partes contenedoras son la cuba o tanque ( $C_H$  o  $C_L$ , en la Figura 3, es  $C_A$  o  $C_B$ ).



**Figura 3.** Diagrama de conexiones prueba de medición de capacitancias y factor de potencia en AC, en el lado de alta tensión.

**Fuente:** Autor.



**Tabla 16.** Resultados de la prueba de medición del factor de potencia y capacitancias.

| <b>Medición del devanado de alta tensión respecto al de baja tensión</b> |                     |                       |                          |                   |
|--|---------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|
|  | <b>Tensión [kV]</b> | <b>Corriente [mA]</b> | <b>Capacitancia [nf]</b> | <b>Factor [%]</b> |
| <b>GST</b>   | 1                   | 45,95 ± 0,01          | 17,314 ± 0,001           | 99,59 ± 0,01      |
| <b>GST – g</b>   | 1                   | S.L.C.S.              | N.M.E.                   | N.M.E.            |
| <b>UST</b>   | 1                   | S.L.C.S.              | N.M.E.                   | N.M.E.            |
| <b>Medición del devanado de baja tensión respecto al de alta tensión</b> |                     |                       |                          |                   |
|  | <b>Tensión [kV]</b> | <b>Corriente [mA]</b> | <b>Capacitancia [nf]</b> | <b>Factor [%]</b> |
| <b>GST</b>   | 1                   | S.L.C.S.              | N.M.E.                   | N.M.E.            |
| <b>GST – g</b>   | 1                   | S.L.C.S.              | N.M.E.                   | N.M.E.            |
| <b>UST</b>   | 1                   | S.L.C.S.              | N.M.E.                   | N.M.E.            |

**Fuente:** Autor [31/08/2015].

Dónde: **S.L.C.S.:** Supero el Límite de Corriente de Salida permisible por el equipo de medición.

**N.M.E.:** No realizo Medición el Equipo, por superar los valores límites de programación del mismo.

**Tabla 17.** Medición del factor de potencia y capacitancias (fabricante IEM).

| <b>Medición del devanado de alta tensión respecto al de baja tensión</b> |                     |                       |                          |                   |
|--|---------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|
|  | <b>Tensión [kV]</b> | <b>Corriente [mA]</b> | <b>Capacitancia [nf]</b> | <b>Factor [%]</b> |
| <b>GST</b>   | 2,5                 | -                     | 10,235                   | 0,18              |
| <b>GST – g</b>   | -                   | -                     | -                        | -                 |
| <b>UST</b>   | 2,5                 | -                     | 7,140                    | 0,16              |
| <b>Medición del devanado de baja tensión respecto al de alta tensión</b> |                     |                       |                          |                   |
|  | <b>Tensión [kV]</b> | <b>Corriente [mA]</b> | <b>Capacitancia [nf]</b> | <b>Factor [%]</b> |
| <b>GST</b>   | 2,5                 | -                     | 13,032                   | 0,16              |
| <b>GST – g</b>   | -                   | -                     | -                        | -                 |
| <b>UST</b>   | 2,5                 | -                     | 11,966                   | 0,13              |

**Fuente:** Empresa IEM, pruebas eléctricas, 6173700N [08/03/2011].

Mediante esta prueba solo se pudo obtener resultado en el modo GST (Ground Specimen Test) del devanado de alta tensión respecto al arrollado de baja tensión (HL), el valor obtenido FP  $\approx$  99 % siendo este valor de factor de potencia demasiado elevado para esta modalidad al compararlo con los datos suministrados por el fabricante y mientras lo esperado de acuerdo a la norma IEEE Std C57.12.00 [6] para que el equipo pueda considerarse adecuado para entrar en operación es  $fp \leq \pm 0,5\%$ ,

como se indica en la Tabla 11 (Ver Cap. II, pág. 36), indicando que la corriente de fuga es sumamente elevada debido al pobre aislamiento existente entre los devanados y el arrollado de alta tensión respecto a la cuba o tanque conectado a tierra. En las demás modalidades (UST y GST-g) no se pudo obtener resultados en el equipo, debido que las magnitudes de las corrientes superaban los valores de soporte de las variables eléctricas con los que está programado el instrumento de medición utilizado. Para el caso de baja respecto a alta tensión en ninguno de los modos (UST, GST, GST-g) se obtuvo dato alguno, debido que nuevamente los resultados obtenidos excedieron los estándares normalizados por el equipo para ser medidos. Todo estos factores negativos fueron ocasionados por la falla que presentó la unidad móvil, juzgando estas magnitudes obtenidas en la prueba tanto para el lado de alta tensión (115 kV) como el de baja tensión (13,8 kV), podemos inferir que existe una extrema presencia de humedad y contaminación (suciedad) de los elementos que conforman el aislamiento tanto líquido (aceite dieléctrico) como sólido (papel kraft), así como desperfectos en los devanados, lo que puede indicar deformaciones axiales o radiales que pueden traducirse en cortocircuitos o aberturas entre espiras a lo largo de toda la estructura del arrollado, tanto en alta como en baja tensión.

### **3.2.2 Prueba de medición de la relación de transformación**

Para realizar esta prueba estandarizada bajo la IEEE C57.12.70 [18] según referencia del fabricante del equipo de medición empleado marca Megger, Modelo TTR S/N: 9912152, cuya precisión y clase de medición se encuentran expresadas en el Anexo G, como se muestra en la Figura 4. Este ensayo se realiza conectando los cables a los devanados de alta y baja tensión del transformador de potencia, de acuerdo al tipo de conexión del transformador (YNyn0D), el equipo realiza una serie de mediciones aplicando una tensión que puede ser de 80 V o 8 V (AC), y realiza ajustes en sus medidas para poder dar precisión a su lectura e indicar la relación calculada entre el devanado de alta y baja tensión del transformador. Esta evaluación no se

realizó a nivel trifásico (3 $\phi$ ) debido que los devanados “H<sub>1</sub>/X<sub>1</sub>” presentan daños a lo largo de su arrollado y no existe continuidad entre sus vueltas o espiras, por lo tanto se realizó la prueba de manera monofásica (1 $\phi$ ) exponiendo los resultados en la Tabla 18, donde se especifican las variables presentes en este estudio. La expresión utilizada para el cálculo de la relación de transformación teórica se muestra en la ecuación (3) (Ver Cap. II, Pág. 37), así como el valor respecto a la desviación en la medida que debe ser  $\leq \pm 0,5\%$  (Tabla 11), para considerar que la comparación entre la relación de transformación en cada nivel de tensión de acuerdo al cambiador de derivaciones sin carga (CTSC) de la S/E móvil sea aceptable.

**Tabla 18.** Relación de transformación de la S/E móvil IEM 26-1737.

| Posición # 1<br>Pos. Calc. = 8,7500<br>V <sub>Prueba</sub> = 80 V |                             | H <sub>1</sub> -H <sub>0</sub> /X <sub>1</sub> -X <sub>0</sub> | H <sub>2</sub> -H <sub>0</sub> /X <sub>2</sub> -X <sub>0</sub> | H <sub>3</sub> -H <sub>0</sub> /X <sub>3</sub> -X <sub>0</sub> |
|---|-----------------------------|--|--|--|
|   |                             | <b>Relación</b>  | N.M.E.   | 10,7327 ± 0,0001   |
|   | <b>Desv [%]</b>             | N.M.E.   | -22,66 ± 0,01  | -0,69 ± 0,01   |
|   | <b>Fase [c.rad]</b>         | N.M.E.   | -3,12 ± 0,01   | -0,49 ± 0,01   |
|   | <b>I<sub>EXC</sub> [mA]</b> | N.M.E.   | 235 ± 0,1  | 67,7 ± 0,1   |
| Posición # 2<br>Pos. Calc. = 8,5417<br>V <sub>Prueba</sub> = 80 V |                             | H <sub>1</sub> -H <sub>0</sub> /X <sub>1</sub> -X <sub>0</sub> | H <sub>2</sub> -H <sub>0</sub> /X <sub>2</sub> -X <sub>0</sub> | H <sub>3</sub> -H <sub>0</sub> /X <sub>3</sub> -X <sub>0</sub> |
|   |                             | <b>Relación</b>  | N.M.E.   | 10,4735 ± 0,0001   |
|   | <b>Desv [%]</b>             | N.M.E.   | -22,62 ± 0,01  | -0,70 ± 0,01   |
|   | <b>Fase [c.rad]</b>         | N.M.E.   | -3,09 ± 0,01   | -0,47 ± 0,01   |
|   | <b>I<sub>EXC</sub> [mA]</b> | N.M.E.   | 247 ± 0,1  | 70,9 ± 0,1   |
| Posición # 3<br>Pos. Calc. = 8,3333<br>V <sub>Prueba</sub> = 80 V |                             | H <sub>1</sub> -H <sub>0</sub> /X <sub>1</sub> -X <sub>0</sub> | H <sub>2</sub> -H <sub>0</sub> /X <sub>2</sub> -X <sub>0</sub> | H <sub>3</sub> -H <sub>0</sub> /X <sub>3</sub> -X <sub>0</sub> |
|   |                             | <b>Relación</b>  | N.M.E.   | 10,2192 ± 0,0001   |
|   | <b>Desv [%]</b>             | N.M.E.   | -22,63 ± 0,01  | -0,89 ± 0,01   |
|   | <b>Fase [c.rad]</b>         | N.M.E.   | -2,95 ± 0,01   | -0,45 ± 0,01   |
|   | <b>I<sub>EXC</sub> [mA]</b> | N.M.E.   | 260 ± 0,1  | 74,5 ± 0,1   |
| Posición # 4<br>Pos. Calc. = 8,1250<br>V <sub>Prueba</sub> = 80 V |                             | H <sub>1</sub> -H <sub>0</sub> /X <sub>1</sub> -X <sub>0</sub> | H <sub>2</sub> -H <sub>0</sub> /X <sub>2</sub> -X <sub>0</sub> | H <sub>3</sub> -H <sub>0</sub> /X <sub>3</sub> -X <sub>0</sub> |
|   |                             | <b>Relación</b>  | N.M.E.   | 9,9536 ± 0,0001  |
|   | <b>Desv [%]</b>             | N.M.E.   | -22,51 ± 0,01  | -0,72 ± 0,01   |
|   | <b>Fase [c.rad]</b>         | N.M.E.   | -2,94 ± 0,01   | -0,45 ± 0,01   |
|   | <b>I<sub>EXC</sub> [mA]</b> | N.M.E.   | 273 ± 0,1  | 78,2 ± 0,1   |
| Posición # 5<br>Pos. Calc. = 7,9529<br>V <sub>Prueba</sub> = 80 V |                             | H <sub>1</sub> -H <sub>0</sub> /X <sub>1</sub> -X <sub>0</sub> | H <sub>2</sub> -H <sub>0</sub> /X <sub>2</sub> -X <sub>0</sub> | H <sub>3</sub> -H <sub>0</sub> /X <sub>3</sub> -X <sub>0</sub> |
|   |                             | <b>Relación</b>  | N.M.E.   | 9,6953 ± 0,0001  |
|   | <b>Desv [%]</b>             | N.M.E.   | -21,90 ± 0,01  | -0,31 ± 0,01   |
|   | <b>Fase [c.rad]</b>         | N.M.E.   | -2,93 ± 0,01   | -0,44 ± 0,01   |
|   | <b>I<sub>EXC</sub> [mA]</b> | N.M.E.   | 288 ± 0,1  | 82,3 ± 0,1   |

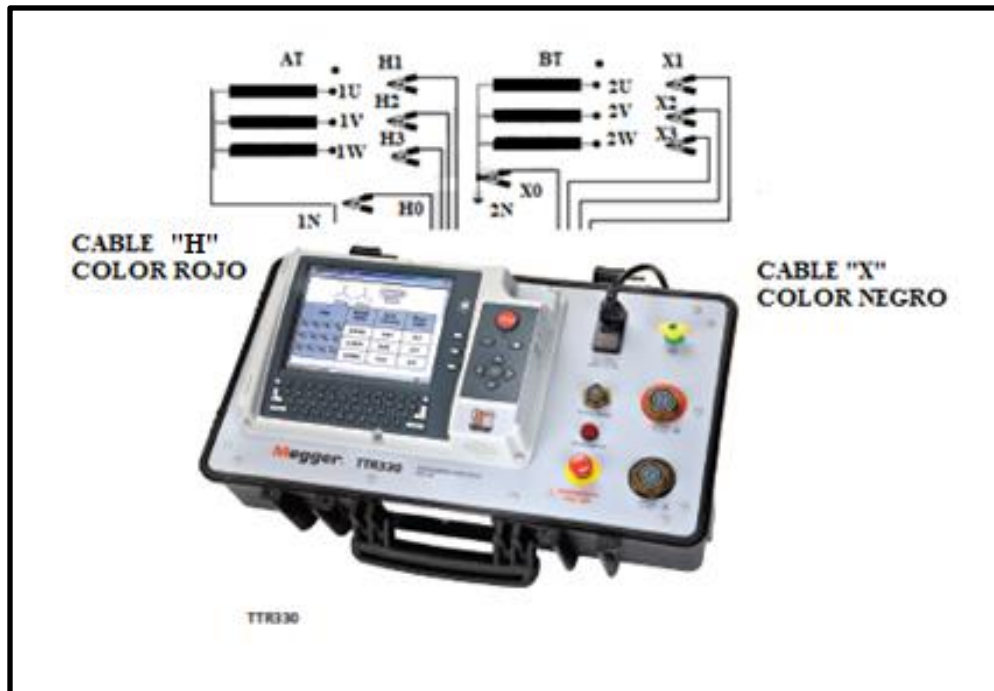
**Fuente:** Autor [25/08/2015].

Dónde: N.M.E.: No realizo Medición el Equipo, por superar los valores límites con los cuales está programado.

**Tabla 19.** Relación de transformación de la S/E móvil IEM 26-1737 (IEM).

|  |                 |                   |                   |                   |
|--|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Posición # 1</b><br>Pos. Calc. = 8,7500 |                 | $H_1-H_0/X_1-X_0$ | $H_2-H_0/X_2-X_0$ | $H_3-H_0/X_3-X_0$ |
|  | <b>Relación</b> | 8,765             | 8,767             | 8,765             |
|  | <b>Desv [%]</b> | 0,171             | 0,194             | 0,171             |
| <b>Posición # 2</b><br>Pos. Calc. = 8,5417 |                 | $H_1-H_0/X_1-X_0$ | $H_2-H_0/X_2-X_0$ | $H_3-H_0/X_3-X_0$ |
|  | <b>Relación</b> | 8,560             | 8,562             | 8,560             |
|  | <b>Desv [%]</b> | 0,215             | 0,238             | 0,215             |
| <b>Posición # 3</b><br>Pos. Calc. = 8,3333 |                 | $H_1-H_0/X_1-X_0$ | $H_2-H_0/X_2-X_0$ | $H_3-H_0/X_3-X_0$ |
|  | <b>Relación</b> | 8,354             | 8,355             | 8,354             |
|  | <b>Desv [%]</b> | 0,248             | 0,260             | 0,248             |
| <b>Posición # 4</b><br>Pos. Calc. = 8,1250 |                 | $H_1-H_0/X_1-X_0$ | $H_2-H_0/X_2-X_0$ | $H_3-H_0/X_3-X_0$ |
|  | <b>Relación</b> | 8,140             | 8,140             | 8,139             |
|  | <b>Desv [%]</b> | 0,185             | 0,185             | 0,172             |
| <b>Posición # 5</b><br>Pos. Calc. = 7,9529 |                 | $H_1-H_0/X_1-X_0$ | $H_2-H_0/X_2-X_0$ | $H_3-H_0/X_3-X_0$ |
|  | <b>Relación</b> | 7,937             | 7,934             | 7,933             |
|  | <b>Desv [%]</b> | 0,257             | 0,219             | 0,206             |

**Fuente:** Empresa IEM, pruebas eléctricas, 6173700N [18/03/2011].



**Figura 4.** Diagrama de conexiones prueba de relación de transformación.

**Fuente:** Autor.

Debido a que el devanado de alta tensión ( $H_1$ ) y el arrollado de baja tensión ( $X_1$ ) de la primera fase no presentan continuidad a lo largo de toda su trayectoria, la prueba de relación de transformación se realizó monofásicamente ( $1\phi$ ) conectando  $H_1-H_0/X_1-X_0$ ;  $H_2-H_0/X_2-X_0$ ;  $H_3-H_0/X_3-X_0$ , midiendo la relación en todas las posiciones (1 a 5) del cambiador de tomas sin carga o en vacío (CTSC). En el primer devanado ( $H_1-H_0/X_1-X_0$ ) el equipo señaló que las fases a medir presentaron problemas de continuidad para realizar la medición de su relación de transformación, esto primeramente permite señalar que los arrollados no presentan continuidad (circuito abierto) o el problema reside en el cambiador de tomas que puede interrumpir la continuidad del circuito. Por lo que respecta a los otros dos devanados restantes  $H_2-H_0/X_2-X_0$  y  $H_3-H_0/X_3-X_0$ , se pudo obtener la relación de transformación entre devanados de alta y baja tensión como se muestra en la Tabla 18, esto permite analizar e inferir que el devanado de  $H_1-H_0$  y  $X_1-X_0$ , presenta una abertura en su arrollado que interrumpe la continuidad en el mismo y debido a esto no se puede obtener dicha relación, descartando que el problema radique en el cambiador de tomas ya que este se varió o conmutó en todas sus posiciones y las demás mediciones en las bobinas que conforman la parte activa del transformador si presentaron un resultado en su relación de transformación.

El devanado  $H_2-H_0/X_2-X_0$  se encuentra muy por encima en lo que respecta al valor del porcentaje de desviación ( $-22,63 \pm 0,01$  [%]) permitido según las tolerancias mostradas en la Tabla 11 ( $Desv \leq \pm 0,5\%$ ) y a los datos suministrados por el fabricante especificados en la Tabla 19 ( $0,26 \pm 0,01$  [%]), indicando la existencia de espiras o pletinas en cortocircuito por la elevada corriente y la diferencia entre la relación de transformación teórica de acuerdo a cada posición del cambiador de tomas y la que se obtuvo en la realización de la prueba. El devanado que presentó mejor estado de acuerdo a los resultados obtenidos en esta prueba, es el arrollado  $H_3-H_0/X_3-X_0$ , ya que la desviación en su relación de transformación ( $0,89 \pm 0,01$  [%]), aunque este valor obtenido se encuentra por encima de lo que establecen los

estándares exigidos por la empresa CORPOELEC y la norma IEEE Std C57.12.00 [6] ( $\text{Desv} \leq \pm 0,5\%$ ), por otro lado la corriente de excitación de la prueba que experimentó este devanado resulta muy elevada, lo que nos indica la presencia de espiras o pletinas en cortocircuito por desgaste en su aislamiento pero en menor magnitud que en  $H_2-H_0/X_2-X_0$ .

### 3.2.3 Prueba de medición de la corriente de excitación

La prueba de corriente de excitación fue realizada con la ayuda de los equipos de medición marca Omicron, con sus modelos CPC-100 y CP-TD1, como se indica en la Figura 5, esta evaluación se realiza sobre el devanado de mayor tensión (115 kV) debido que la corriente que circula por este arrollado es mucho menor respecto a la que experimenta el devanado de baja tensión (13,8 kV), dejando los terminales de menor tensión desconectados o libres (excepto el “ $X_0$ ”, que se conecta a tierra) de todo contacto con partes del transformador y del personal encargado, a fin de evitar las tensiones inducidas al energizar los devanados. El dispositivo de medición inyectó o suministró al devanado de alta tensión un voltaje de 1000 V (1 kV) para la recolección de datos o resultados. Develando que para el devanado “ $H_1-H_0$ ” existe una abertura entre sus espiras, debido que el equipo no realizó medición al no poder inyectar tensión, indicando en su pantalla que se encuentra la fase bajo prueba abierta (Open Circuit), debido a esto no se pudo censar o medir las variables eléctricas a considerar, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 20. En lo que respecta a los devanados “ $H_2-H_0$ ” y “ $H_3-H_0$ ”, tampoco pudo obtenerse medición, pero a diferencia que para el arrollado “ $H_1-H_0$ ” que no experimento circulación de corriente a través de sus devanados, las corrientes que se generaban en los arrollados “ $H_2-H_0$ ” y “ $H_3-H_0$ ” para esta prueba superaban los niveles de corriente de salida con los cuales está programado el equipo de pruebas utilizado, una de las principales razones son problemas en el núcleo, lo cual puede deberse a daños o cambios en su geometría ocasionando que esta corriente de vacío aumente desproporcionadamente y se pierda

la relación entre corrientes circulantes en el núcleo (las corrientes debido al flujo magnético en las columnas de los extremos del núcleo del transformador deben ser iguales, mientras la que circula por la columna del medio su valor será cercano a dos tercios de la magnitud obtenida en los extremos, debido a la configuración de conexión del transformador YNyn0), también puede deberse a fallas en el aislamiento entre laminaciones o los tornillos de sujeción del núcleo, otro factor que puede ocasionar una corriente excesiva es cortocircuitos presentes entre las espiras del devanado, cuyo valor se adiciona a la corriente normal de excitación.

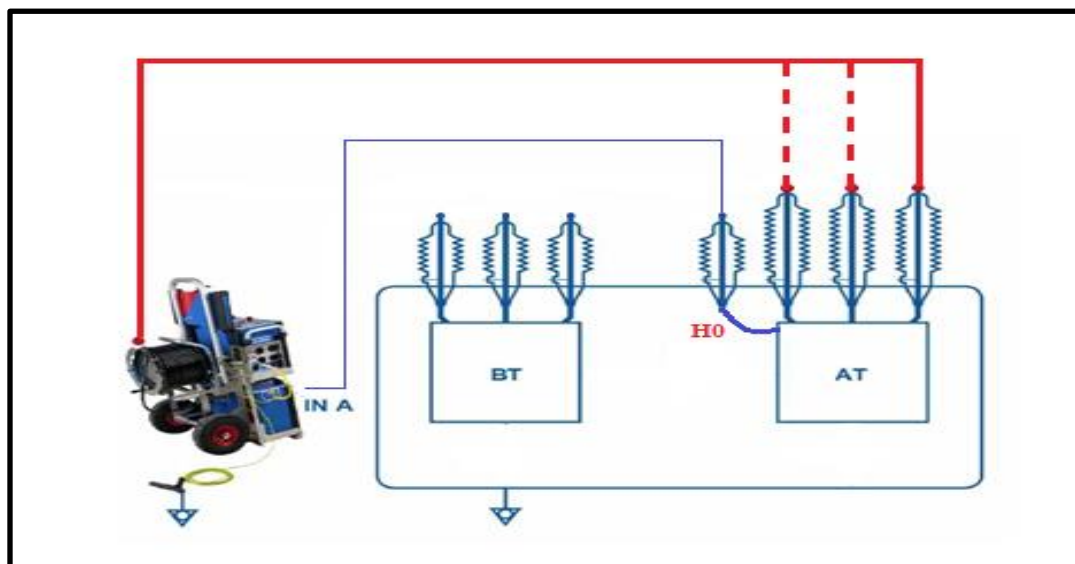
**Tabla 20.** Prueba de corriente de excitación realizada al transformador.

| Tensión de Prueba<br>1 kV | Posición CTSC | $H_1-H_0$ [mA] | $H_2-H_0$ [mA] | $H_3-H_0$ [mA] |
|---------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
|                           | 1             | N.M.E.         | S.L.C.S.       | S.L.C.S.       |
|                           | 2             | N.M.E.         | S.L.C.S.       | S.L.C.S.       |
|                           | 3             | N.M.E.         | S.L.C.S.       | S.L.C.S.       |
|                           | 4             | N.M.E.         | S.L.C.S.       | S.L.C.S.       |
|                           | 5             | N.M.E.         | S.L.C.S.       | S.L.C.S.       |

**Fuente:** Autor [31/08/2015].

Dónde: **S.L.C.S.:** Supero el Límite de Corriente de Salida permisible por el equipo de medición.

**N.M.E.:** No realizo Medición el Equipo, por no haber continuidad en el devanado.



**Figura 5.** Diagrama de conexiones prueba de corriente de excitación.

**Fuente:** Autor.

### 3.2.4 Prueba de medición de la resistencia óhmica de devanado

Se conectó el equipo de medición marca Vanguard Instruments tal como se muestra en la Figura 6, la información del modelo WRM-40<sup>TM</sup> en lo que respecta a precisión o incertidumbre, tolerancia y clase de medición se encuentra expresada en el Anexo G. Para la obtención de los valores se deben normalizar los resultados a un valor de temperatura, la IEEE Std C57.12.90 [17] suministra la fórmula para calcular el valor de resistencia corregida en temperatura. Los valores de resistencia óhmica de los devanados del transformador de potencia se exponen en las Tablas 21 y 23, pudiendo referenciar los datos o valores obtenidos en campo a una temperatura deseada mediante la ecuación (6) (Ver Cap. II, pág. 38), estos resultados se muestran en las Tablas 22 y 24.

**Tabla 21.** Valores de resistencias de los devanado de alta tensión [30° C.].

| Posición DETC | H <sub>1</sub> -H <sub>0</sub> [Ω] | H <sub>2</sub> -H <sub>0</sub> [Ω] | H <sub>3</sub> -H <sub>0</sub> [Ω] | I <sub>H1-H0</sub> [mA] | I <sub>H2-H0</sub> [mA] | I <sub>H3-H0</sub> [mA] |
|---------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1             | N.M.E.                             | 1,482 ± 0,001                      | 1,483 ± 0,001                      | N.M.E.                  | 5,79 ± 0,01             | 5,79 ± 0,01             |
| 2             | N.M.E.                             | 1,447 ± 0,001                      | 1,447 ± 0,001                      | N.M.E.                  | 5,91 ± 0,01             | 5,91 ± 0,01             |
| 3             | N.M.E.                             | 1,410 ± 0,001                      | 1,411 ± 0,001                      | N.M.E.                  | 6,02 ± 0,01             | 6,02 ± 0,01             |
| 4             | N.M.E.                             | 1,376 ± 0,001                      | 1,377 ± 0,001                      | N.M.E.                  | 6,15 ± 0,01             | 6,14 ± 0,01             |
| 5             | N.M.E.                             | 1,342 ± 0,001                      | 1,343 ± 0,001                      | N.M.E.                  | 6,26 ± 0,01             | 6,27 ± 0,01             |

**Fuente:** Autor [09/09/2015].

Dónde: **N.M.E.:** No realizo Medición el Equipo, debido que no logro inyectar corriente al circuito.

**Tabla 22.** Valores de resistencias devanados de alta tensión, corregidos [85° C.].

| Posición DETC | H <sub>1</sub> -H <sub>0</sub> [Ω] | H <sub>2</sub> -H <sub>0</sub> [Ω] | H <sub>3</sub> -H <sub>0</sub> [Ω] |
|---------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1             | N.M.E.                             | 1,7902 ± 0,0001                    | 1,7914 ± 0,0001                    |
| 2             | N.M.E.                             | 1,7479 ± 0,0001                    | 1,7479 ± 0,0001                    |
| 3             | N.M.E.                             | 1,7032 ± 0,0001                    | 1,7044 ± 0,0001                    |
| 4             | N.M.E.                             | 1,6621 ± 0,0001                    | 1,6633 ± 0,0001                    |
| 5             | N.M.E.                             | 1,6211 ± 0,0001                    | 1,6223 ± 0,0001                    |

**Fuente:** Autor [09/09/2015].

Dónde: **N.M.E.:** No realizo Medición el Equipo, debido que no logro inyectar corriente al circuito.



**Tabla 23.** Valores de resistencias de los devanados de baja tensión [30° C.].

| $X_1-X_0$ (m $\Omega$ ) | $X_2-X_0$ [m $\Omega$ ] | $X_3-X_0$ [m $\Omega$ ] | $I_{X_1-X_0}$ [A] | $I_{X_2-X_0}$ [A] | $I_{X_3-X_0}$ [A] |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| N.M.E.                  | 20,46 $\pm$ 0,01        | 16,71 $\pm$ 0,01        | N.M.E.            | 29,76 $\pm$ 0,01  | 30,14 $\pm$ 0,01  |

**Fuente:** Autor [09/09/2015].

Dónde: **N.M.E.:** No realizo Medición el Equipo, debido que no logro inyectar corriente al circuito.

**Tabla 24.** Valores de resistencias devanados de baja tensión, corregidos a [85° C.].

| $X_1-X_0$ (m $\Omega$ ) | $X_2-X_0$ [m $\Omega$ ] | $X_3-X_0$ [m $\Omega$ ] |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| N.M.E.                  | 24,71 $\pm$ 0,01        | 20,19 $\pm$ 0,01        |

**Fuente:** Autor [09/09/2015].

Dónde: **N.M.E.:** No realizo Medición el Equipo, debido que no logro inyectar corriente al circuito.

**Tabla 25.** Valores de resistencias devanados de alta tensión fabricante IEM [85° C.].

| Posición DETC | $H_1-H_0$ [ $\Omega$ ] | $H_2-H_0$ [ $\Omega$ ] | $H_3-H_0$ [ $\Omega$ ] |
|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1             | 1,8377                 | 1,8397                 | 1,8402                 |
| 3             | 1,7516                 | 1,7533                 | 1,7536                 |
| 5             | 1,6650                 | 1,6670                 | 1,6675                 |

**Fuente:** Empresa IEM, pruebas eléctricas, 6173700N [28/03/2011].

**Tabla 26.** Valores de resistencias devanados de baja tensión fabricante IEM [85° C.].

| $X_1-X_0$ (m $\Omega$ ) | $X_2-X_0$ [m $\Omega$ ] | $X_3-X_0$ [m $\Omega$ ] |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 20,49                   | 20,31                   | 20,22                   |

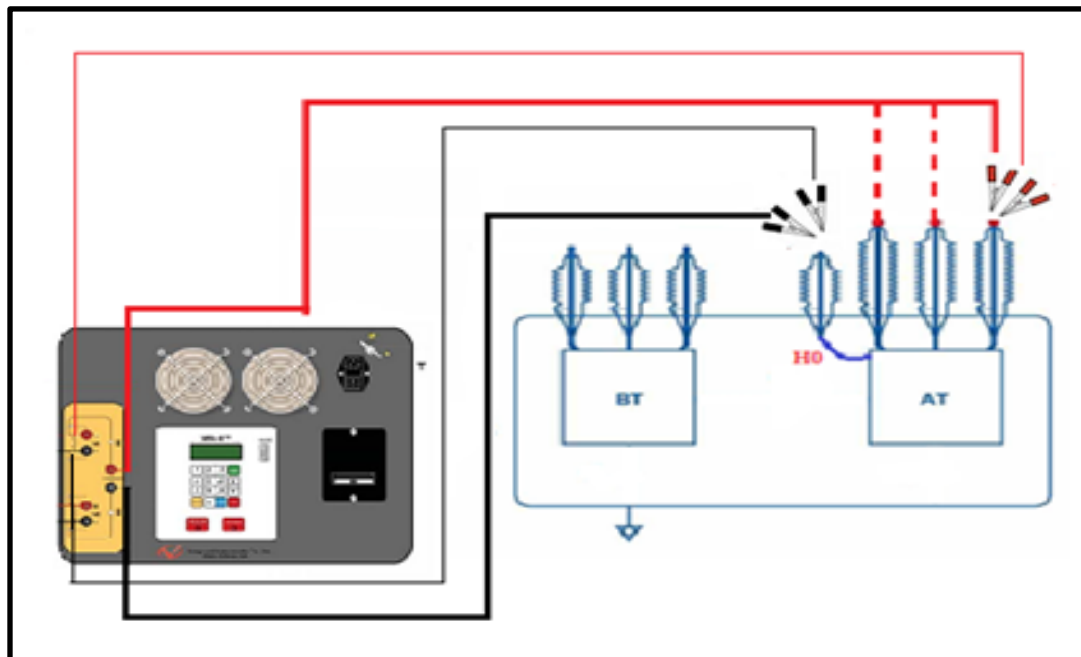
**Fuente:** Empresa IEM, pruebas eléctricas, 6173700N [28/03/2011].

De la prueba de medición de la resistencia óhmica de los devanados se infiere que estos valores resistivos en los devanados de alta (“ $H_2-H_0$ ” y “ $H_3-H_0$ ”) están por debajo de los suministrados por la empresa fabricante (IEM), los cuales deberían estar por el orden de los  $R_{Total} = 5,5175\Omega$  a 85° C., para la suma de los tres devanados, debido que el devanado “ $H_1-H_0$ ” y “ $X_1-X_0$ ”, no se pudo obtener una lectura del valor de resistencia óhmica del devanado, ya que el equipo de medición utilizado no pudo inyectar corriente con su fuente de alimentación (Fuente de Corriente), indicando que

este devanado presenta una abertura entre las espiras que conforman sus devanados, tal como se muestra en las Tablas 21 y 23. Solo se tomaran en cuenta los valores obtenidos de los devanados de alta tensión “H<sub>2</sub>-H<sub>0</sub>” y “H<sub>3</sub>-H<sub>0</sub>”, en la posición 3 (Nominal) del cambiador de tomas sin carga (en vacío), que son  $R_{H_2-H_0} = 1,410 \pm 0,001$  [ $\Omega$ ] y  $R_{H_3-H_0} = 1,411 \pm 0,001$  [ $\Omega$ ], los resultados obtenidos de las mediciones realizadas se obtuvieron a 30° C., sumando ambos valores obtenemos  $R_m = 2,821 \pm 0,001$  [ $\Omega$ ], referenciando estos valores a 85° C., obtenemos que  $R_m = 3,4076 \Omega \pm 0,0001$  [ $\Omega$ ];  $R_{H_2-H_0} = 1,7032 \pm 0,0001$  [ $\Omega$ ] y  $R_{H_3-H_0} = 1,7044 \pm 0,0001$  [ $\Omega$ ], aplicando la ecuación (6) (Ver Cap. II, pág. 38) los resultados se muestran en la Tabla 22. Para las resistencias de los devanados “H<sub>2</sub>-H<sub>0</sub>” y “H<sub>3</sub>-H<sub>0</sub>”, el fabricante suministra los siguientes datos  $R_{H_2-H_0} = 1,7533$  [ $\Omega$ ] y  $R_{H_3-H_0} = 1,7536$  [ $\Omega$ ] mostrados en la Tabla 25, sumando estos valores  $R_{H_2+H_3} = 3,5069 \pm 0,001$  [ $\Omega$ ] referenciados a 85° C., lo que indica que los datos obtenidos en campo, están por debajo de los suministrados por el fabricante, aplicando la ecuación (7) (Ver Cap. II, pág. 39), indicando un error porcentual de  $E_{\%}(R_{H_2-H_0}) = 2,857$  [%];  $E_{\%}(R_{H_3-H_0}) = 2,805$  [%], como conjunto  $E_{\%}(R_{H_2+H_3}) = 2,831$  [%], estos datos calculados respecto a la tolerancia se encuentra por encima de lo expresado en la Tabla 11 ( $\%R < \pm 0,5\%$ ), mediante esta información y resultados, podemos concluir que ambos devanados pueden tener espiras en cortocircuito, lo que trae consigo que la resistencia del arrollado disminuya su valor de fábrica o diseño.

Para el caso de los devanados de baja tensión (13,8 kV), no se obtuvo lectura de la resistencia del devanado “X<sub>1</sub>-X<sub>0</sub>” con el equipo de medición debido al estado del arrollado el cual posee una abertura entre sus espiras, para  $R_{X_2-X_0} = 20,46 \pm 0,01$  [m $\Omega$ ] y  $R_{X_3-X_0} = 16,71 \pm 0,01$  [m $\Omega$ ] a 30° C., al referenciar estos a 85° C., obtenemos  $R_{X_2-X_0} = 24,71 \pm 0,01$  [m $\Omega$ ] y  $R_{X_3-X_0} = 20,19 \pm 0,01$  [m $\Omega$ ] como se indican en la Tabla 24, sumando ambos valores obtenemos la resistencia del devanado de baja a 85° C.,  $R_{X_2+X_3} = 44,90 \pm 0,01$  [m $\Omega$ ] siendo el valor suministrado por la empresa IEM para la suma de los dos devanados de baja  $R_{m(X_2+X_3)} = 40,53 \pm 0,01$  [m $\Omega$ ] a 85° C., y por separado se obtienen  $R_{X_2-X_0} = 20,31$  [m $\Omega$ ] y  $R_{X_3-X_0} = 20,22$  [m $\Omega$ ], como se

muestra en la Tabla 26. Comparando ambos resultados para los casos de  $R_{X_2-X_0}$  y  $R_{X_3-X_0}$ , presentan una discrepancia de acuerdo a la ecuación (7), entre la resistencia medida y la que suministra el fabricante indicando un error porcentual de  $E_{\%}(R_{X_2-X_0}) = 17,81 [\%]$ ;  $E_{\%}(R_{X_3-X_0}) = 0,15 [\%]$ , para el conjunto de  $R_{(X_2+X_3)}$  obtenemos  $E_{\%}(R_{X_2+X_0}) = 9,73 [\%]$  muy por encima de lo especificado en la Tabla 11 ( $\%R < \pm 0,5\%$ ), lo que podemos inferir o concluir que el devanado de baja tensión “ $X_2-X_0$ ” ( $R_{X_2-X_0}$ ) presenta cambios en su geometría o deformaciones, lo que ocasionó una conexión o acople en puntos específicos con la bobina del devanado terciario “ $Y_2$ ” o el de alta tensión “ $H_2$ ”, originando que el valor medido u obtenido estuviese por encima del suministrado por el fabricante. Para el otro devanado de baja tensión “ $X_3-X_0$ ” ( $R_{X_3-X_0}$ ), la tolerancia o error en porcentaje es de  $E_{\%}(R_{X_3-X_0}) = 0,15 [\%]$ , cuya magnitud se encuentra por debajo de la tolerancia establecida para la prueba ( $\%R < \pm 0,5\%$ ), indicando que este devanado no sufrió alteraciones notables a nivel de su geometría ni deformaciones aparentes.



**Figura 6.** Diagrama de conexiones prueba de medición de resistencia óhmica de devanado en el lado de alta tensión.

**Fuente:** Autor.

### 3.2.5 Prueba de medición de la resistencia de aislamiento en corriente continua (DC)

En la Figura 7 se muestra el diagrama de conexiones para obtener el valor de la resistencia de aislamiento en corriente directa (DC), este ensayo se pudo realizar con la implementación del equipo de medición marca Megger modelo MIT 1020/2, expresando las características del mismo en lo referente a clase medición y apreciación en el Anexo G. Según la ANSI/NETA MTS [19] los valores mínimos de tensión o voltaje DC para suministrar al espécimen bajo estudio están descritos en la Tabla 12 (Ver Cap. II, pág. 41), y con esto poder medir la resistencia de aislamiento presente en los transformadores de potencia sumergidos en aceite, en la Tabla 27 se muestran los resultados obtenidos en campo respecto a la resistencia de aislamiento en DC presente en el transformador de potencia de la S/E móvil 26-1737 durante la realización de esta evaluación.

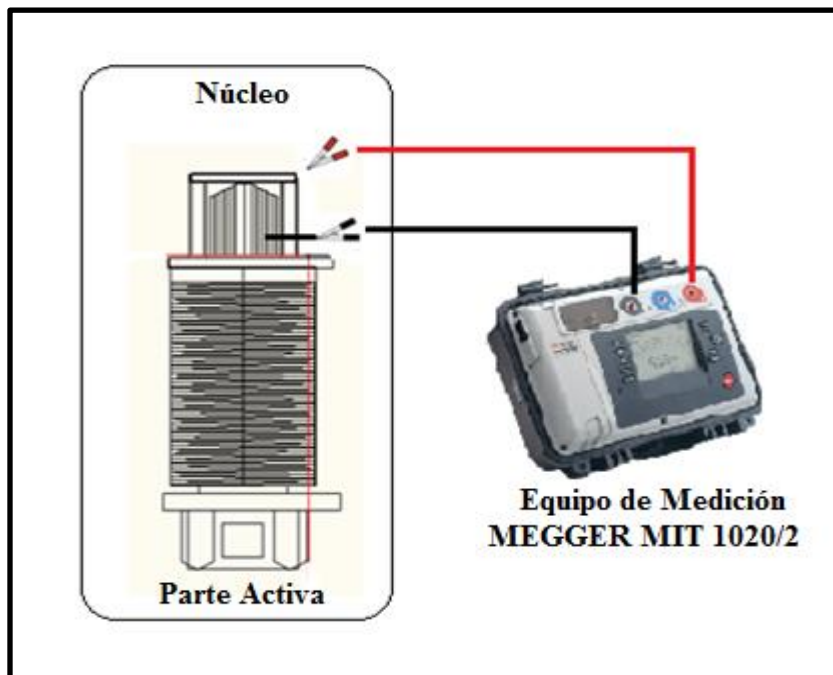
**Tabla 27.** Medición de la resistencia de aislamiento entre el núcleo y tierra.

| Tensión DC [kV] | ENERGIZADO | ATERRADO      | MΩ (30 seg)   |
|-----------------|------------|---------------|---------------|
| 0,50 ± 0,01     | Núcleo     | Yugo (Tierra) | 0,010 ± 0,001 |

**Fuente:** Autor [11/08/2015].

Esta valoración se realizó con la parte activa del transformador sumergida en aceite a diferencia que la realizada por el fabricante que fue con la parte activa desencubada. El equipo de medición utilizado registró  $0,010 \pm 0,001$  [MΩ], para una tensión de prueba que suministró de  $0,50 \pm 0,01$  [kV] en DC, ya que el dispositivo de medición no pudo elevar más la tensión de prueba por el estado del aislamiento entre las partes medidas o evaluadas, este valor obtenido en esta prueba resulto estar muy por debajo en magnitud respecto al suministrado por la empresa fabricante (IEM) de 200 [MΩ] para una tensión de prueba de 1000 [V] en DC (para un transformador sin aceite en su interior).

Lo que al comparar ambos resultados nos indica que el núcleo no posee un correcto aterramiento respecto a un solo punto del yugo o soportes del mismo llevado a tierra, develando que el aislamiento entre ellos es muy deficiente con posibles cortocircuitos entre laminaciones del núcleo, conexiones directa entre varios puntos del núcleo y el yugo, presencia extrema de humedad y desechos entre ellos, alteración de la adecuada geometría del núcleo debido a desplazamientos ocasionados por la falla, pudiendo presentar corrientes elevadas que implicaría un sobrecalentamiento de los componentes que conforman la parte activa del transformador, traduciéndose en pérdidas de energía eléctrica para la unidad transformadora.



**Figura 7.** Diagrama de conexiones prueba de resistencia de aislamiento en DC.

**Fuente:** Autor

### 3.2.6 Prueba de medición de la rigidez dieléctrica del aceite

El equipo utilizado para realizar la medición de la tensión de ruptura del aceite dieléctrico se rige por la norma IEC 60156 [23], es de marca BAUR, modelo DPA

75C y toda la información del mismo se expresa en el Anexo G. Para realizar la prueba primero se extrajo la muestra de la parte inferior del transformador de potencia de la S/E móvil IEM 26-1737, debido que la contaminación de la muestra es mayor en la parte más baja en el equipo (Transformador de potencia) que la contiene, esto se logró con la ayuda de un recipiente de vidrio de color ámbar el cual debe estar totalmente seco y libre de posibles residuos e impurezas de muestras anteriores, su tamaño es tres veces mayor al de la celda del equipo donde se realiza la prueba, sin embargo para poder evitar una errónea realización de esta evaluación nos referenciamos en la norma COVENIN 3256 [26], esta expone como es el procedimiento para extraer una muestra de aceite dieléctrico, se debe llenar el recipiente y enjuagar la tapa con el líquido extraído, solo un 3% aproximadamente del frasco debe estar libre con la nueva muestra a examinar, y luego se agita suavemente sin generar burbujas hasta cubrir toda la parte interna del recipiente, los mismos pasos se le aplicaron al recipiente del equipo de medición. Este proceso se repitió tres veces para asegurar que exista una distribución homogénea de las partículas de impurezas contenidas en el líquido a estudio.

El equipo está configurado para realizar seis mediciones, con periodos de tiempos establecidos de acuerdo a la IEC 60156 [23], que son dos (2) minutos de espera entre cada medición. Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla 28 indicando que el aceite respecto a su tensión de ruptura se encuentra en estado óptimo para ser un aceite usado, ya que su tensión promedio o valor medio es de  $61,7 \pm 0,1$  [kV], superando los 50 [kV] que exigen COVENIN 2283 [21], IEC 60156 [23] y ASTM D-1816 [22] para aceites dieléctricos usados, esto nos indica que el aceite no requiere de ningún tratamiento especial para mejorar su rigidez dieléctrica o tensión de ruptura, sin embargo cuando se reincorpore el aceite al transformador, se le debe realizar un tratamiento de secado o vacío y de filtración o recirculación del aceite, para evitar la contaminación que pueda generarse mientras se encuentra fuera de la unidad transformadora o al momento de la reincorporación al transformador de potencia.

**Tabla 28.** Prueba de rigidez dieléctrica, medición de tensión de ruptura.

| <b>MUESTRA DE ACEITE</b> |            |                        |                       |
|--------------------------|------------|------------------------|-----------------------|
| <b>MEDICIONES</b>        | <b>kV</b>  | <b>Frecuencia [Hz]</b> | <b>Distancia [mm]</b> |
| 1                        | 51,4 ± 0,1 | 60 ± 1                 | 2,5 ± 0,1             |
| 2                        | 60,3 ± 0,1 |                        |                       |
| 3                        | 58,2 ± 0,1 |                        |                       |
| 4                        | 58,1 ± 0,1 |                        |                       |
| 5                        | 67,4 ± 0,1 |                        |                       |
| 6                        | 65,0 ± 0,1 |                        |                       |
| <b>Valor Medio [kV]</b>  |            | 61,7 ± 0,1             |                       |
| <b>Desv. Est. [kV]</b>   |            | 3,2 ± 0,1              |                       |
| <b>D/M [%]</b>           |            | 5,2 ± 0,1              |                       |

**Fuente:** Autor [28/08/2015].

### 3.2.7 Prueba de Cromatografía de gases

El taller de la GRTR basa sus análisis en los metodos Gases Claves (Bajo estandares de la IEEE), Relación de Rogers y el Triángulo de Duval, el análisis que brinda el equipo de medición marca General Electric (GE), modelo Transport X S/N 40-0157-04, referenciandose en las normas o estandares bajo los cuales esta configurado y con los datos obtenidos en la Tabla 29, se encontro un estado normal y aceptable respecto a la condición del aceite, el único gas que se encuentra en mayor medida pero no a un valor que se considere para estar atentos, es el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) que fue de 1051 ppm, pero es menor al valor de precaución considerado por la ASTM 3612-02 [25] expresado en la Tabla 15 (Ver Cap. II, pág. 44) y la norma IEEE Std C57.104 [24], los cuales son 2500 ppm para estar en condición precavida por el estado del aislante líquido y 4000 ppm para que se considere en estado de advertencia o emergencia, pero el valor obtenido aún esta por debajo de los valores considerados críticos.

**Tabla 29.** Gases presentes en el aceite del transformador de la S/E móvil 26-1737.

| Gas                 | Abrev.                        | Concentración [ppm] |
|---------------------|-------------------------------|---------------------|
| Hidrogeno           | H <sub>2</sub>                | < 5,0 ± 0,1         |
| Dioxido de Carbono  | CO <sub>2</sub>               | 1051 ± 1            |
| Monoxido de Carbono | CO                            | < 1,0 ± 0,1         |
| Etileno             | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 1,0 ± 0,1           |
| Etano               | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 1,0 ± 0,1           |
| Metano              | CH <sub>4</sub>               | 2,0 ± 0,1           |
| Acetileno           | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 0,0 ± 0,1           |
| GCDT                |                               | 5,0 ± 0,1           |

Fuente: Autor [10/08/2015].

Dónde: **GCDT:** Gases Concentrados Dentro del Transformador.  
*ppm:* partes por millón.

Por otro lado el método de Relación de Rogers no planteo ningún diagnóstico sobre los gases presentes en el aceite, esto debido que la IEEE Std C57.104 [24] sugiere que se use este método siempre y cuando las concentraciones de los gases excedan los niveles normales de referencia, pero como ningún valor esta por encima de sus valores estandar, el metodo no brindo un diagnóstico disponible. Para el método de Triángulo de Duval, se pudo obtener un diagnóstico que fue el de una falla térmica 300°C. - 700°C., este diagnóstico es el que tomaremos en cuenta, ya que corresponde a lo sucedido con la S/E móvil que presentó un exceso de temperatura en el interior del transformador e incineración del aislante sólido (Papel Kraft Aislante), al observar la muestra de aceite obtenida se pudo verificar particulas o residuos de papel aislante incinerado.

### 3.2.8 Estado actual del transformador de potencia de la móvil IEM 26-1737

Debido a la condición de operación anormal o fuera de los parametros eléctricos que experimentó el transformador de potencia de la S/E móvil mientras se encontraba en servicio en la S/E Santa Clara en el poblado de Mariara, en el Estado



Carabobo, esta avería ocasionó la salida de la móvil del sistema eléctrico nacional. Para establecer un diagnóstico general sobre esta unidad transformadora, nos referenciamos en las pruebas eléctricas de diagnóstico que se le realizaron y las cuales fueron explicadas anteriormente, por lo cual podemos inferir que la mayor incidencia de la falla se encontró en los devanados de la primera fase tanto en alta tensión “H<sub>1</sub>” (115 kV) como en baja tensión “X<sub>1</sub>” (13,8 kV), que fue donde la falla incidió con más énfasis, debido a esta razón no se pudo obtener resultado alguno en la realización de las pruebas eléctricas sobre estos arrollados, deduciendo que estos han perdido la continuidad a lo largo de su trayectoria (Circuito Abierto) y presentan desplazamientos o deformaciones en su geometría. Este suceso ocasionó que las demás fases (H<sub>2</sub>/X<sub>2</sub>; H<sub>3</sub>/X<sub>3</sub>) que conforman la parte activa resultaran afectadas pero no en gran magnitud como donde se originó la falla (H<sub>1</sub>/X<sub>1</sub>/Y<sub>1</sub>), el otro daño aparente se encuentra en el devanado “X<sub>2</sub>” del cual se puede inferir que presenta deformaciones en su geometría y posible cortocircuito o punto de contacto con el devanado terciario o el de alta tensión de su fase (“H<sub>2</sub>/Y<sub>2</sub>”), aunque las alteraciones a nivel eléctrico y mecánico no son tan extremas en los arrollados “H<sub>2</sub>”, “H<sub>3</sub>” y “X<sub>3</sub>”, respecto a los antes descritos.

Estas conclusiones realizadas se comprobaron al desencubar la parte activa del transformador de potencia, lo cual se realizó para verificar a fondo y evidenciar los datos obtenidos en las evaluaciones eléctricas, corroborando que el mayor daño se presentó en la fase (H<sub>1</sub>/X<sub>1</sub>/Y<sub>1</sub>), conjunta a esta se encuentra la segunda fase (H<sub>2</sub>/X<sub>2</sub>/Y<sub>2</sub>), que al ser la más próxima al sitio donde se originó la falla también resulto afectada, por último y con una menor incidencia, así como escaso deterioro en su estructura está la tercera fase (H<sub>3</sub>/X<sub>3</sub>/Y<sub>3</sub>), en la Figura 8 se muestra la parte activa del transformador desencubado posterior a la falla, observandose en este los daños y deformaciones a causa de la misma.



**Figura 8.** Desencubado de la parte activa del transformador de potencia de la S/E móvil IEM 26-1737.

**Fuente:** Autor [15/10/2015].

Al examinar en físico la parte activa se comprueba el resultado de los análisis de las pruebas eléctricas de diagnóstico, donde en el devanado de baja tensión de la primera fase (“X<sub>1</sub>”) fue donde radico la falla, presentando el mismo deformaciones axiales y radiales de gran magnitud debido a la magnitud de la averia eléctrica afectando a los arrollados adyacentes (“H<sub>1</sub>” y “Y<sub>1</sub>”), ocasionado también desplazamiento axial y radial en estos. A su vez laminaciones del núcleo resultaron afectadas, soldandose o fusionandose en varios puntos de la columna que atraviesa los devanados (H<sub>1</sub>, X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>), por lo cual deberan tomarse extremas medidas para la recuperación de estas partes afectadas en la parte activa del transformador de potencia de la S/E móvil IEM O.T. 26-1737.

### **3.3 Pruebas eléctricas de diagnósticos aplicadas al transformador de servicios auxiliares de la S/E móvil IEM 26-1737**

Para determinar el estado del transformador para servicios auxiliares serie 11002340 fabricado por la empresa IEM, se le realizaron una serie de pruebas eléctricas y con esto verificar si este equipo puede entrar en servicio o requiere de procedimientos y mantenimientos para su recuperación, para así poder alimentar los dispositivos de protección, medición y control de la S/E móvil IEM 26-1737, así como el suministro de energía al rectificador y al banco de baterías, encargados de la alimentación a los componentes que trabajan con tensión o voltaje continuo (DC) en la móvil. Entre las pruebas eléctricas aplicadas al transformador de servicios auxiliares mencionaremos las siguientes.

#### **3.3.1 Prueba de medición del factor de potencia en AC o factor de disipación y medición de las capacitancias**

Para esta prueba se utilizó un equipo de medición especializado en el control de las variables relacionadas con el factor de potencia o disipación y las capacitancias presentes, sus resultados prácticos están plasmados en la Tabla 30. Para poder realizar esta prueba se cortocircuitaron los pasatapas o bushings ( $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ ) del lado de media tensión (13,8 kV), y también los conductores aislados ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_0$ ) del lado de baja tensión (208Y/120 V). Aplicando los tres modos de prueba (UST, GST, GST-g) para medir el factor de potencia o factor de disipación entre los devanados, cuba y núcleo de la parte activa del transformador de servicios auxiliares y también la medición de las capacitancias existentes entre estos.

**Tabla 30.** Resultados prueba de medición del factor de potencia y capacitancias aplicados al transformador para SA.

| <b>Medición del devanado de media tensión respecto al de baja tensión</b> |                     |                       |                          |                   |
|---|---------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|
|   | <b>Tensión [kV]</b> | <b>Corriente [mA]</b> | <b>Capacitancia [nf]</b> | <b>Factor [%]</b> |
| <b>GST</b>  | 2,496 ± 0,001       | 1,4530 ± 0,0001       | 1,5413 ± 0,0001          | 0,2551 ± 0,0001   |
| <b>GST – g</b>  | 2,499 ± 0,001       | 0,5078 ± 0,0001       | 0,5353 ± 0,0001          | 0,2890 ± 0,0001   |
| <b>UST</b>  | 2,502 ± 0,001       | 0,9492 ± 0,0001       | 1,0061 ± 0,0001          | 0,2448 ± 0,0001   |

**Fuente:** Autor [22/10/2015].

Mediante los resultados obtenidos en esta evaluación respecto a la medición del factor de potencia o factor de disipación y medición de las capacitancias, se puede inferir que el transformador se encuentra en óptimas condiciones en los que respecta al aislamiento presente entre devanados y el aislamiento tanto sólido como líquido, esto al compararlo con la norma IEC Std C57.12.00 [6], que establece un valor referencia del factor de potencia para considerar en óptimas condiciones una unidad transformadora ( $fp < \pm 5\%$ ), observando que los datos obtenidos se encuentran por debajo de este parámetro. Por otro lado no se realizó la prueba de baja tensión (208Y/120) respecto a media tensión (13,8 kV), debido que se le debe implementar al circuito una tensión de prueba muy baja y esto ocasiona que los resultados difieran y no se mantenga una relación ni cohesión entre los mismos, por lo cual solo nos basaremos en la prueba de media tensión respecto a la baja tensión.

### **3.3.2 Prueba de medición de la resistencia de aislamiento en corriente continua (DC)**

Para obtener el valor de la resistencia de aislamiento en corriente directa (DC), esta prueba se realizó con la ayuda de un equipo medición siguiendo la referencia expuesta en la Tabla 12 (Ver Cap. II. Pág. 41), donde nos indica la tensión a implementarle al circuito de acuerdo a los niveles de tensión de la unidad transformadora. Se alimentó con una tensión directa o continua de 5000 V por el lado de media tensión (13,8 kV) y se registró los valores de la resistencia de aislamiento

en DC presente en la parte activa de este transformador, los resultados se plasman en la Tabla 31.

**Tabla 31.** Medición de la resistencia de aislamiento en DC.

| <b>KV (DC)</b> | <b>ENERGIZADO</b> | <b>ATERRADO</b>     | <b>MΩ (30 seg)</b> | <b>MΩ (60 seg)</b> | <b>MΩ (10 min)</b> |
|----------------|-------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 5,00 ± 0,01    | <b>MT</b>         | <b>Tierra-BT(G)</b> | 2230 ± 10          | 3030 ± 10          | 3900 ± 10          |
| 1,00 ± 0,01    | <b>BT</b>         | <b>Tierra-MT(G)</b> | 2170 ± 10          | 3180 ± 10          | 4810 ± 10          |

**Fuente:** Autor [22/10/2015].

De los resultados obtenidos se puede calcular los índices de absorción y polarización, con la curva que describe la resistencia de aislamiento respecto al tiempo que transcurre durante la prueba, para el índice de absorción el cual relaciona la resistencia obtenida a los 30 segundos de haber iniciado la prueba, con el valor obtenido al minuto, se obtuvo un valor  $IA = 1,36$  [Adimensional], por otro lado el índice de polarización del transformador experimento un valor de  $IP = 1,29$  [Adimensional], infiriendo que el aislamiento se encuentra en un estado regular debido al valor de los índices de absorción e índice de polarización obtenidos, referenciándose con los datos mostrados en la Tabla 13 (Ver Cap. II, pág. 42). Por otro lado para baja tensión (208Y/120) se obtuvo  $IA = 1,47$  [Adimensional] y  $IP = 1,51$  [Adimensional]. Donde podemos concluir con esta prueba que el aislamiento se encuentra en su gran parte libre de contaminación, humedad, al obtener valores que lo ubican entre los parámetros para ser considerado en estado regular.

### **3.4 Prueba de funcionamiento de los Interruptores de potencia ubicados en el lado de alta tensión (115 kV)**

Para estos equipos solo se procedió a verificar mediante acción manual en su panel local, la apertura y cierre de los interruptores marca ABB modelo PASS MO SBB, resultando satisfactoria dicha prueba ya que este mecanismo no presentaba desperfectos en su accionar, tampoco a la hora de cargar su fuelle o resorte que es el

mecanismo encargado de preparar al interruptor para poder entrar en operación una vez se ha accionado o abierto sus contacto internos, ya sea la parte seccionadora o interruptora que conforman estos equipos.

### 3.5 Prueba de medición de la relación de transformación a los transformadores de corriente (TC)

Estos transformadores de corrientes ubicados dentro de los bushings de los módulos híbridos PASS MO SBB (Interruptor y seccionador), son utilizados para protección y medición en el transformador de potencia, así como de toda la móvil en general, por esto su correcto funcionamiento es de vital importancia para salvaguarda de los equipos y el personal encargado de operarlos, para verificar que estos dispositivos no sufrieron daño alguno, se le realizó una prueba de medición de la relación de transformación de los devanados internos que conforman este componente, los resultados prácticos se muestran en la Tabla 32.

**Tabla 32.** Relación de transformación de los transformadores de corriente.

|  |                     |                 |                 |                 |
|--|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Pos. Calc. = 50</b><br><b>V<sub>Prueba</sub> = 8 V</b>  |                     | <b>TC11(H1)</b> | <b>TC12(H2)</b> | <b>TC13(H3)</b> |
|  | <b>Relación</b>     | 49,84 ± 0,01    | 49,88 ± 0,01    | 49,85 ± 0,01    |
|  | <b>Desv [%]</b>     | 0,64 ± 0,01     | 0,48 ± 0,01     | 0,59 ± 0,01     |
|  | <b>Fase [c.rad]</b> | -0,34 ± 0,02    | -0,28 ± 0,02    | -0,30 ± 0,02    |
| <b>Pos. Calc. = 400</b><br><b>V<sub>Prueba</sub> = 8 V</b> |                     | <b>TC31(x1)</b> | <b>TC32(x2)</b> | <b>TC33(x3)</b> |
|  | <b>Relación</b>     | 399,89 ± 0,01   | 399,92 ± 0,01   | 399,95 ± 0,01   |
|  | <b>Desv [%]</b>     | 0,22 ± 0,01     | 0,16 ± 0,01     | 0,10 ± 0,01     |
|  | <b>Fase [c.rad]</b> | -0,28 ± 0,02    | -0,20 ± 0,02    | -0,14 ± 0,02    |
| <b>Pos. Calc. = 400</b><br><b>V<sub>Prueba</sub> = 8 V</b> |                     | <b>TC41(x1)</b> | <b>TC42(x2)</b> | <b>TC43(x3)</b> |
|  | <b>Relación</b>     | 398,24 ± 0,01   | 398,68 ± 0,01   | 397,95 ± 0,01   |
|  | <b>Desv [%]</b>     | 0,44 ± 0,01     | 0,33 ± 0,01     | 0,51 ± 0,01     |
|  | <b>Fase [c.rad]</b> | -0,38 ± 0,02    | -0,32 ± 0,02    | -0,40 ± 0,02    |

**Fuente:** Autor [23/10/2015].

Estudiando los registro que brindo la medición de la relación de transformación de los transformadores de corriente del lado de alta tensión (115 kV), se puede inferir que los tres (3) TC se encuentran en buen estado para entrar en servicio y censar la corriente que circulara entre ellos sin presentar excesivas alteraciones entre la lectura real y la que brindará el equipo de medición, aunque el transformador de corriente que se encuentra en la línea referente a H3, no se encuentra dentro de los parametros de desviación de la relación ( $0,51 \pm 0,01$  [%]) respecto al que suministra la norma IEC Std C57.12.00 [6] ( $< \pm 0,5$ ), aun con este diferencia de fase ( $0,01 \pm 0,01$  [%]) se puede considerar utilizarlo por la mínima diferencia entre ambos valores.

### **3.6 Prueba de funcionamiento de los rollos de cables de potencia para conexión de la S/E móvil IEM 26-1737**

Los cables o conductores de potencia son utilizados para poder realizar la conexión desde la salida de media tensión (13,8 kV) de la S/E Móvil IEM 26-1737, tambien se le realizaron pruebas eléctricas para verificar el estatus de los mismos, para poder ser utilizados al momento de la móvil entrar en servicio y que estos no sean un punto o foco de futuras fallas por averías que puedan presentar. Entre las evaluaciones que se le realizaron a estos conductores mencionaremos.

#### **3.6.1 Prueba de medición de la resistencia de aislamiento en corriente continua (DC)**

Al proceder a alimentar estos cables con tensión, se procedió a realizarlo por la parte de cobre que compone el conductor, mientras que se registraron los datos de la variables presentes a censar en la prueba por la pantalla o chaqueta que envuelve a dicho conductor conectada la misma a una referencia de tierra, obteniendo los siguientes valores expresados en la Tabla 33 para la resistencia de aislamiento en DC presente entre la recubierta aislante del conductor y el cobre que lo conforma.

**Tabla 33.** Medición del aislamiento de los conductores externos de conexión para la S/E móvil IEM 26-1737.

| Tensión DC [kV] | ENERGIZADO                      | ATERRADO                   | [MΩ] (60 seg) |
|-----------------|---------------------------------|----------------------------|---------------|
| 5,00 ± 0,01     | <b>Fase R</b> (Parte Conductor) | <b>Pantalla</b> (Chaqueta) | 1600 ± 10     |
| 5,00 ± 0,01     | <b>Fase S</b> (Parte Conductor) | <b>Pantalla</b> (Chaqueta) | 4880 ± 10     |
| 5,00 ± 0,01     | <b>Fase T</b> (Parte Conductor) | <b>Pantalla</b> (Chaqueta) | 3810 ± 10     |

**Fuente:** Autor [27/10/2015].

Con estos resultados de la resistencia de aislamiento en DC de los conductores para la conexión externa de la S/E Móvil IEM 26-1737, que sirven de enlace entre la móvil y el sitio donde este destinada a conectarse, podemos inferir que estos cables estan en óptimas condiciones eléctricas para entrar en servicio, ya que presenta un buen aislamiento libre de impurezas entre la parte conductora de cada fase y su pantalla o chaqueta.

### 3.6.2 Prueba de medición del factor de potencia o factor de disipación y medición de las capacitancias.

Para esta evaluación del factor de disipación presente en los conductores de conexión de la móvil, se les implemento una tensión de prueba de 10 [kV], para observar el comportamiento de los mismos a la hora de entrar en servicio y que por ellos circule la tensión nominal en media tensión (13,8 kV), los datos obtenidos de esta evaluación se expresan en la Tabla 34.

**Tabla 34.** Resultados prueba de medición del factor de potencia y capacitancias aplicados a los conductores externos.

| <b>Medición del devanado de media tensión respecto al de baja tensión</b> |                |                |                   |                 |
|---|----------------|----------------|-------------------|-----------------|
|   | Tensión [kV]   | Corriente [mA] | Capacitancia [nf] | Factor [%]      |
| <b>UST – R</b>  | 9,998 ± 0,001  | 27,73 ± 0,01   | 33,861 ± 0,001    | 0,1219 ± 0,0001 |
| <b>UST – S</b>  | 10,002 ± 0,001 | 24,72 ± 0,01   | 33,827 ± 0,001    | 0,1037 ± 0,0001 |
| <b>UST – T</b>  | 9,999 ± 0,001  | 25,53 ± 0,01   | 33,843 ± 0,001    | 0,1109 ± 0,0001 |

**Fuente:** Autor [27/10/2015].



## **CAPÍTULO IV**

### **EVALUACIÓN, RECUPERACIÓN, SUSTITUCIÓN Y ADICIÓN DE EQUIPOS A LA S/E MÓVIL IEM 26-1737**

#### **4.1 Dispositivos, equipos e instrumentos que resultaron afectados en la S/E móvil IEM 26-1737**

Los dispositivos y equipos que se detallaran a continuación, son los que resultaron afectados por la falla que se presentó en la S/E móvil IEM 26-1737 y que dejó fuera de operación a dicha unidad por la magnitud del cortocircuito presentado, la condición actual de estos equipos se dedujo mediante la aplicación de las pruebas eléctricas de diagnóstico detalladas en el capítulo anterior, criterios y experiencia técnica de la empresa CORPOELEC, visualización y análisis del estado físico, como el operativo a nivel eléctrico de los diferentes dispositivos que conforman la móvil.

Entre los criterios que se tomaron como premisa para la selección de los equipos a implementarse o incorporarse a la S/E móvil IEM 26-1737, de acuerdo a lo estipulado por la empresa cliente CORPOELEC, podemos mencionar principalmente el área económica que se refiere intrínsecamente a los costos de los materiales o dispositivos; las condiciones eléctricas de funcionamiento, manejo, operación, necesidades de mantenimiento y capacitación de los operadores de los equipos; uniformidad y experiencia comprobada en campo del parque de instrumentos del sistema eléctrico nacional, por último la relación de incertidumbre, precisión o aproximación de los aparatos o unidades a implementar.

#### 4.1.1 Núcleo, devanados de alta tensión y devanados de baja tensión

La parte activa del transformador de potencia fue una de las piezas afectadas por la condición anormal de operación que presentó la S/E móvil IEM 26-1737, infiriendo sobre su estado actual mediante una serie de pruebas eléctricas aplicadas al mismo, comprobándose el análisis realizado a esa unidad al desencubar su parte activa y observar la magnitud de la avería. En la Figura 9 se pueden examinar los devanados exteriores de alta tensión ( $H_1/H_2/H_3$ ) de la parte activa del transformador de potencia, destacando que el devanado “ $H_1$ ” (Izquierda en la Figura 9) es el arrollado que sufrió el daño más severo con la falla registrada en la S/E móvil, al presentar desplazamiento axial y radial (deformación), así como incineración de su aislamiento sólido.



**Figura 9.** Parte activa de la S/E móvil IEM 26-1737, posterior a la falla.

**Fuente:** Autor [15/10/2015]

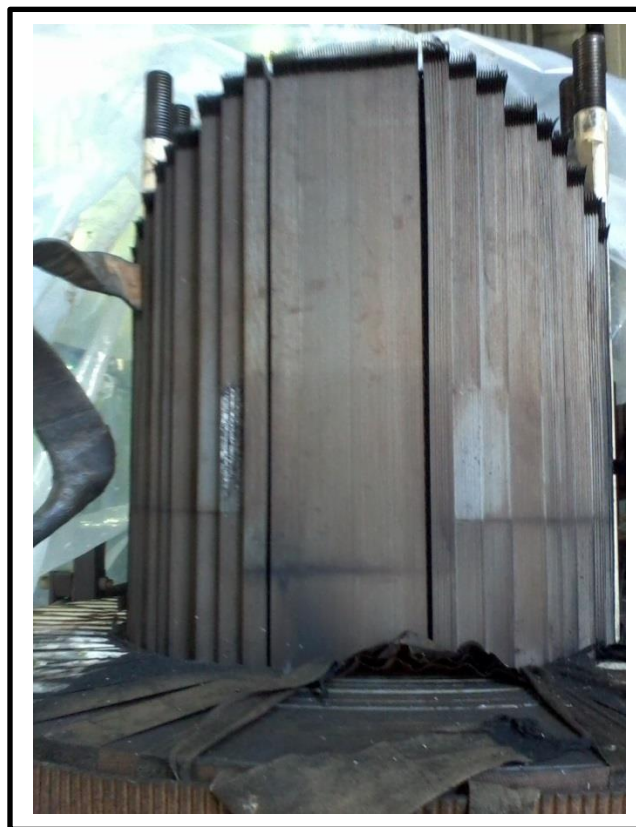
Aunque los devanados “H<sub>2</sub>” y “H<sub>3</sub>” (central y derecha en la Figura 9), no sufrieron daños físicos aparentes, los daños eléctricos son significativos en ciertos arrollados de acuerdo a lo expresado y analizado en las pruebas eléctricas de diagnóstico implementadas a esta unidad, por estas razones lo mejor es proponer la sustitución de todos estos bobinados tanto los de alta tensión (H<sub>1</sub>/H<sub>2</sub>/H<sub>3</sub>) como los de baja tensión (X<sub>1</sub>/X<sub>2</sub>/X<sub>3</sub>), manteniendo entre los parámetros sus propiedades eléctricas y mecánicas, con esto proceder a diseñar unos nuevos devanados con la característica de que a los arrollados de alta tensión se le puedan adaptar un devanado de regulación para la conexión a un cambiador de tomas bajo carga (CTBC), con una regulación +5/-15 % en 17 posiciones o pasos de tensión, con el objetivo de brindar un mejor rendimiento, adecuación y funcionamiento de la S/E móvil en nuestro sistema eléctrico interconectado nacional, el cual presenta demasiadas fluctuaciones de tensión, lo que hace obligatorio el uso de estos cambiadores de derivaciones bajo carga (en tensión), evitando que estas unidades de transformación de energía tenga que salir de operación para realizar las respectivas modificaciones en las tensiones.



**Figura 10.** Deformación del devanado de alta tensión H1 (115 kV).

**Fuente:** Autor [15/10/2015]

En la Figura 10, se observa con detalle el daño que sufrió el devanado de alta tensión “H<sub>1</sub>” (115 kV) y el arrollado de baja tensión “X<sub>1</sub>” (13,8 kV), presentando casos extremos de desplazamiento axial y radial, pérdida de aislamiento sólido e incineración del mismo, por lo cual estos devanados deben sustituirse por el mal estado en que se encuentran, los bobinados en mejor estado se utilizaran como patrón para el diseño de los nuevos arrollados, para realizar las modificaciones referente al cambiador de tomas bajo carga que se adaptara a la S/E móvil. Para el devanado terciario se tomó la decisión técnica de sustituirlos por cilindros de cartón de alta resistencia con la mismas medidas geométricas de estos, esta determinación se basó tomando el aspecto económico y técnico, apoyándonos en la experiencia de la GRTR referente a este tipo de arrollados, respetando el diseño en cuanto a distancias mínimas entre devanados y núcleos, en vista de que esta medida no repercuta en ser punto de origen de otras fallas a futuro.



**Figura 11.** Parte superior de la columna del núcleo de los devanados H1/x1.

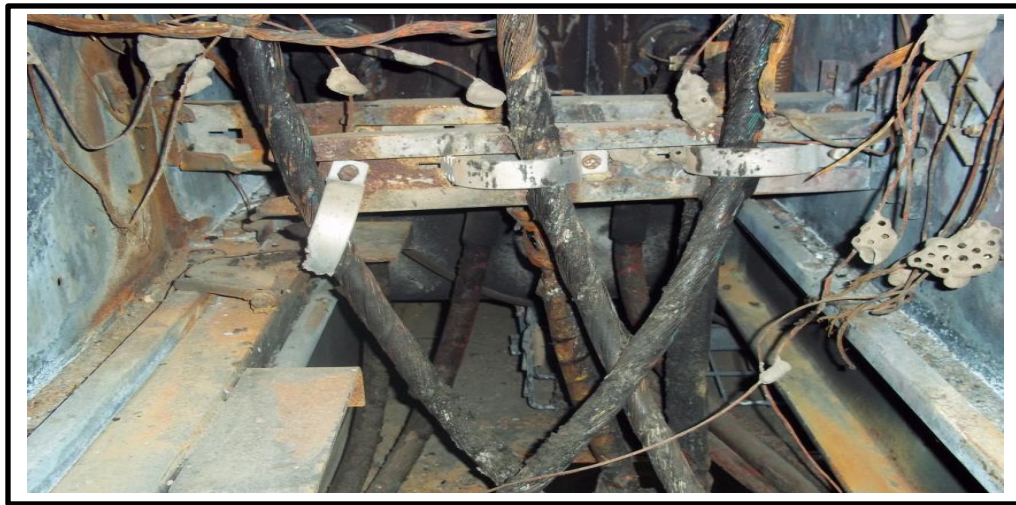
**Fuente:** Autor [16/10/2015]

Debido que en la prueba de medición del aislamiento en corriente continua (DC) del núcleo respecto al yugo conectado a tierra, se obtuvo un bajo valor respecto al suministrado por el fabricante, en la Figura 11 puede observarse en parte el daño sufrido en el núcleo del transformador siendo la imagen mostrada la parte superior de la columna de los devanados  $H_1/X_1/Y_1$ , por lo que se propone aplicar un tratamiento especial a las chapas o laminaciones que conforman el núcleo para poder mejorar el aislamiento entre ellas y respecto a los soportes del mismo (Yugo), pero sobre todo es primordial mejorar el aislamiento entre las láminas que se encuentre en mal estado (Puntos de fusión entre láminas) como se mostró en la Figura 11, para evitar cualquier desperfecto por corrientes indeseadas que causen pérdidas o alzas desproporcionada de la temperatura en la unidad transformadora a la hora de entrar en servicio.

#### **4.1.2 Cableado de media tensión y de control**

El cableado de media tensión ubicado en la salida de la S/E móvil fue el que resulto más afectado en toda la unidad debido que los efectos de la falla ingresaron por esta serie de conductores y al no poder actuar las protecciones en baja tensión (13,8 kV) de la móvil, esa alta corriente que se generó debido a esa avería quedo circulando por los conductores un tiempo prolongado, ocasionando un calentamiento excesivo hasta llegar a la incineración de los mismos. Por este mal estado en que se encuentran estos cables es necesaria su sustitución por conductores con la misma o mayor capacidad, para poder soportar las sollicitaciones eléctricas y térmicas que se puedan originar debido a estar en servicio o a desperfectos en el sistema eléctrico. En la Figura 12 se presenta el mal estado (incineración) en que se encuentran los conductores de conexión en la salida de la S/E móvil IEM 26-1737, ubicados en la parte inferior del Centro de Distribución y Control (CDC) y el semirremolque de la móvil.

Otra serie de cables que resultaron afectados por la eventualidad que se presentó en la móvil, fueron los conductores de tensión AC/DC, así como los de control del módulo híbrido PASS MO SBB interruptor y seccionador en el lado de alta tensión (115 kV), presentando incineración en gran parte de su extensión lo que amerita una inminente sustitución, para poder realizar la comunicación con el relé de control multifunción MULTILIN 745 y poder accionar el interruptor de potencia.



**Figura 12.** Cables de salida en 13,8 kV de la S/E móvil IEM 26-1737.

**Fuente:** Autor [15/10/2015]

#### **4.1.3 Celdas de media tensión**

Para el lado de baja tensión (13,8 kV) la función de interrupción estaba a cargo de la Celda de Interruptor Automático GIS CPG 1 (O-V) y la Celda de Protección con Fusibles GIS CPG 2 (O-F), ambas de marca ORMAZABAL. Estas unidades eran las encargadas de proteger al transformador de potencia de la S/E móvil por el lado de baja tensión (13,8 kV), así como también salvaguardar el transformador de servicios auxiliares, la no acción de estos equipos dieron paso a esa condición eléctrica de operación anormal o avería que ocasionó tan graves daños en toda la móvil.

La Celda de Interruptor Automático GIS CPG 1 (O-V), fue la que resultó más agraviada debido que todos sus componentes se encuentran calcinados debido al incendio que se originó en el Centro de Distribución y Control (CDC), en la Figura 20 se observa el estado en el cual quedó la Celda de Interruptor Automático GIS CPG 1 (O-V), y debido a la gravedad de su situación es necesario remover esta unidad ya que no puede implementársele un mantenimiento para su recuperación.



**Figura 13.** Celda de Interruptor Automático GIS CPG 1 (O-V), marca ORMAZABAL.

**Fuente:** Autor [15/10/2015]

Por otro lado, la Celda de Protección con Fusibles GIS CPG 2 (O-F) pudo cumplir con su función de proteger el transformador de servicios auxiliares del daño que pudo ocasionarle el estado de falla de la móvil, sin embargo esta celda también se

vio afectada por el incendio en el CDC, por lo cual sus componentes se encuentran en estado deplorable que no permiten que esta celda pueda entrar en operación, lo que conlleva a que ambas celdas de protección en el lado de baja tensión tengan que ser sustituidas, y proponer diferentes posibilidades de equipos eléctricos disponibles que puedan cumplir esta función, adecuando un buen sistema de coordinación de protección a fin de que otro percance de esta magnitud no vuelva a repetirse.

#### **4.1.4 Equipos indicadores de temperatura**

Los termómetros que señalan el calor presente o emanado de los devanados y el aceite dieléctrico donde se encuentra sumergida la parte activa de la S/E, debido a las altas temperaturas (entre 300° a 700° C.) que se originaron en el interior de la cuba o tanque del transformador de potencia de la móvil, y además el derrame de aceite, así como el incendio que se presentó en la parte externa del transformador de potencia, todos estos factores afectaron a los indicadores de temperaturas que se encontraban instalados en la S/E móvil.

Estos instrumentos tampoco actuaron o enviaron una señal de alarma o apertura al gabinete de control del transformador ante el súbito aumento de la temperatura interna en el transformador, los parámetros con los cuales se encuentra configurado para la alarma (+95° C.) y para el disparo o desconexión (+105° C.), por lo que al sustituir estos equipos se debe comprobar el buen funcionamiento de los mismos con la finalidad de evitar estos futuros accidentes. En la Figura 14 se observan los termómetros de los devanados y del aceite dieléctrico (aislante o refrigerante líquido) luego del incendio que se originó en el lateral del lado de panel de control de la móvil, estos instrumentos de medición deberán sustituirse por unas unidades nuevas que contemplen los mismos parámetros de los de diseño del transformador de potencia de la subestación eléctrica móvil IEM 26-1737.





**Figura 14.** Indicadores de temperatura del aceite y devanados.

**Fuente:** Autor [29/05/2015]

#### **4.2 Recuperación o sustitución de los equipos afectados por la falla en la S/E móvil IEM 26-1737**

Se estudiaron las diferentes medidas en el ámbito eléctrico, económico, técnico y de factor tiempo, tomando como premisa los criterios expuestos anteriormente en el inicio de este capítulo, para seleccionar la decisión más acertada y conveniente para la empresa CORPOELEC, a fin de que este proyecto sea materializado de forma rápida, eficiente y satisfactoria, para añadir esta S/E móvil IEM 26-1737 a la red de equipos que funcionan en los sistemas de potencia, ya sea de respaldo o para entrar en servicio en caso de emergencias. Los elementos o componentes que fueron afectados en la móvil expuestos anteriormente, se procederán a recuperar, reparar o sustituir de acuerdo a su estado o condición, entre las acciones a realizar para la rehabilitación de la móvil y brindar una propuesta para mejoras tecnológicas que propicien un mejor funcionamiento de la móvil, mencionaremos las siguientes.

#### 4.2.1 Diseño de devanados 115/13,8 kV; 30 MVA, para el transformador de potencia de la S/E móvil IEM 26-1737

Se presenta un cuadro comparativo entre los resultados obtenidos en los cálculos de diseño de los nuevos devanados, tanto para el lado de alta tensión (115 kV) como para baja tensión (13,8 kV) de la parte activa del transformador de potencia de la S/E móvil, bajo la premisa de utilizar el mismo núcleo con sus dimensiones correspondientes. Esto debido a lo afectado que resultaron estar los arrollados de la primera fase ( $H_1/X_1$ ), luego de las condiciones de operación fuera de los límites eléctricos de servicios a las que fueron sometidos por tiempo prolongado. Respecto a los devanados antes instalados en la unidad transformadora con datos suministrados por el fabricante y medidas realizadas sobre estos componentes, los resultados se presentan en la Tabla 35, la información más ampliada sobre los cálculos, gráficas y fórmulas utilizadas para el diseño de devanados se detallan en el ANEXO C.

**Tabla 35.** Comparación entre devanados anteriores y nuevos.

| Parámetros   | Devanados Nuevos          | Devanados anteriores |
|--|---------------------------|----------------------|
| Potencia aparente nominal ( $S_n$ )                          | 30 [MVA]                  | 30 [MVA]             |
| Conexión   | YNyn0                     | YNyn0D               |
| Tensión en Dev. de alta tensión                              | 115 [kV]                  | 115 [kV]             |
| Tensión en Dev. de baja tensión                              | 13,8 [kV]                 | 13,8 [kV]            |
| Frecuencia ( $f$ )   | 60 [Hz]                   | 60 [Hz]              |
| Tensión por espira   | 67,549 [V]                | -                    |
| Número de espira del Dev. Alta tensión                       | 1050 [Vueltas]            | -                    |
| Número de espira del Dev. Baja tensión                       | 120 [Vueltas]             | -                    |
| Inducción magnética ( $B$ )                                  | 1,52381 [T]               | -                    |
| Sección de la columna  | 0,16641 [m <sup>2</sup> ] | -                    |
| Sección neta de la columna                                   | 0,21032 [m <sup>2</sup> ] | -                    |
| Altura de la ventana del núcleo                              | 1500 ± 10 [mm]            | 1500 ± 10 [mm]       |
| Distancia entre centros de las columnas                      | 900 ± 10 [mm]             | 900 ± 10 [mm]        |
| Masa del núcleo magnético                                    | 13562,632 [Kg]            | 17700 [Kg]*          |
| Pérdidas por kilogramo a la inducción magnética especificada | 0,95 [W/Kg]               | -                    |

**Tabla 35. (Cont.)**

|   |  |                                  |
|---|--|----------------------------------|
| <b>Pérdidas en el hierro</b>                      | 22285,092 [W]                                | 20742 [W]                        |
| <b>Corriente de vacío</b>                         | 2,28691 [A]                                  | 2,14 [A]                         |
| <b>Numero de discos Dev. Alta tensión</b>         | 75 [Discos]                                  | 75 [Discos]                      |
| <b>Numero de discos Dev. Baja tensión</b>         | 40 [Discos]                                  | 40 [Discos]                      |
| <b>Conductor de alta tensión seleccionado</b>     | 14*(7,1 mm x 1 mm)                           | 14*(7,1 mm x 1 mm)               |
| <b>Conductor de baja tensión seleccionado</b>     | 3*(14 mm x 4 mm)                             | 3*(14 mm x 4 mm)                 |
| <b>Área del conductor de alta tensión</b>         | 6,885 [mm <sup>2</sup> ]                     | 6,885 [mm <sup>2</sup> ]         |
| <b>Área del conductor de baja tensión</b>         | 55,14 [mm <sup>2</sup> ]                     | 55,14 [mm <sup>2</sup> ]         |
| <b>Recubrimiento de conductores</b>               | Alta: 1.2 [mm]<br>Baja: 0.6 [mm]             | Alta: 1.2 [mm]<br>Baja: 0.6 [mm] |
| <b>Densidad de corriente para AT</b>              | 1,56254*10 <sup>6</sup> [A/mm <sup>2</sup> ] | -                                |
| <b>Densidad de corriente para BT</b>              | 1,56254*10 <sup>6</sup> [A/mm <sup>2</sup> ] | -                                |
| <b>Diámetro interno Dev. AT</b>                   | 770 ± 10 [mm]                                | 770 ± 10 [mm]                    |
| <b>Diámetro externo Dev. AT</b>                   | 850 ± 10 [mm]                                | 850 ± 10 [mm]                    |
| <b>Diámetro interno Dev. BT</b>                   | 620 ± 10 [mm]                                | 620 ± 10 [mm]                    |
| <b>Diámetro externo Dev. BT</b>                   | 700 ± 10 [mm]                                | 700 ± 10 [mm]                    |
| <b>Diámetro interno Dev. Terc.</b>                | 510 ± 10 [mm]                                | 510 ± 10 [mm]                    |
| <b>Diámetro externo Dev. Terc.</b>                | 560 ± 10 [mm]                                | 560 ± 10 [mm]                    |
| <b>Altura de Dev. Alta tensión</b>                | 1350 ± 10 [mm]                               | 1350 ± 10 [mm]                   |
| <b>Altura de Dev. Baja tensión</b>                | 1350 ± 10 [mm]                               | 1350 ± 10 [mm]                   |
| <b>Masa de Dev. Baja tensión</b>                  | 443,239 [Kg]                                 | 431 [Kg]                         |
| <b>Masa de Dev. Alta tensión</b>                  | 567,311 [Kg]                                 | 570 [Kg]                         |
| <b>Masa de los devanados</b>                      | 1010,550 [Kg]                                | 1001 [Kg]                        |
| <b>Resistencia del Dev. Alta tensión</b>          | 1,93443 [Ω]                                  | 1,8402 [Ω]                       |
| <b>Resistencia del Dev. Baja tensión</b>          | 22,794 [mΩ]                                  | 20,49 [mΩ]                       |
| <b>Perdidas en el cobre (<math>P_{Fe}</math>)</b> | 24199,789 [W]                                | -                                |
| <b>Reactancia Porcentual</b>                      | 11,09349 [%]                                 | -                                |
| <b>Resistencia Porcentual</b>                     | 0,16133 [%]                                  | -                                |
| <b>Impedancia Porcentual</b>                      | 11,09467 [%]                                 | 10,97 [%]                        |
| <b>Eficiencia del transformador</b>               | 99,73818 [%]                                 | -                                |
| <b>Regulación</b>                                 | 2,36267 [%]                                  | -                                |

\*: Suma de todos los componentes de la parte activa (Núcleo, soportes del núcleo y bobinas).

**Fuente:** Autor.

La finalidad de calcular los parámetros generales más importantes que conforman la parte activa del transformador de potencia (núcleo y devanados), fue para poder conocer las bases de diseño y la metodología que se debe seguir para tener

en cuenta a la hora de configurar estos subsistemas o componentes que son la parte fundamental del transformador de potencia, para lo cual se utilizó una herramienta digital, como lo es el programa de simulación matemática MAPLE 13, que fue de gran ayuda a la hora de realizar estos cálculos eléctricos. En la Tabla 36 se expone la configuración y relaciones de tensiones del transformador de potencia con conexión YNyn0 y una potencia de 30 MVA, especificando las espiras o vueltas que conforman el devanado de regulación del transformador de potencia, el cual se acoplara a un cambiador de tomas bajo carga (CTBC) de tipo inversor con preselector para 17 posiciones (N+8;N;N-8), que se le adicionara a la móvil para la regulación o modificación de la tensión en carga (con tensión), dependiendo de la demanda del sistema eléctrico nacional y las caídas de tensión presentes cuando se encuentre en operación la unidad transformadora de la móvil.

**Tabla 36.** Datos del devanado de regulación en alta tensión (115 kV).

| <b>Tap o Posición</b> | <b>Alta tensión [kV]</b> | <b>N° de Espiras</b> | <b>Corriente [A]</b> |
|-----------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|
| <b>1</b>              | 120,750 ± 0,010          | 1050                 | 143,441 ± 0,001      |
| <b>2</b>              | 119,310 ± 0,010          | 1037                 | 145,172 ± 0,001      |
| <b>3</b>              | 117,880 ± 0,010          | 1025                 | 146,934 ± 0,001      |
| <b>4</b>              | 116,440 ± 0,010          | 1012                 | 148,751 ± 0,001      |
| <b>5</b>              | 115,000 ± 0,010          | 1000                 | 150,613 ± 0,001      |
| <b>6</b>              | 113,560 ± 0,010          | 988                  | 152,523 ± 0,001      |
| <b>7</b>              | 112,130 ± 0,010          | 975                  | 154,468 ± 0,001      |
| <b>8</b>              | 110,690 ± 0,010          | 963                  | 156,478 ± 0,001      |
| <b>9</b>              | 109,250 ± 0,010          | 950                  | 158,541 ± 0,001      |
| <b>10</b>             | 107,810 ± 0,010          | 937                  | 160,658 ± 0,001      |
| <b>11</b>             | 106,380 ± 0,010          | 925                  | 162,817 ± 0,001      |
| <b>12</b>             | 104,940 ± 0,010          | 913                  | 165,052 ± 0,001      |
| <b>13</b>             | 103,500 ± 0,010          | 900                  | 167,348 ± 0,001      |
| <b>14</b>             | 102,060 ± 0,010          | 887                  | 169,709 ± 0,001      |
| <b>15</b>             | 100,600 ± 0,010          | 875                  | 172,172 ± 0,001      |
| <b>16</b>             | 99,100 ± 0,010           | 862                  | 174,779 ± 0,001      |
| <b>17</b>             | 97,750 ± 0,010           | 850                  | 177,192 ± 0,001      |

**Fuente:** Autor.

El devanado terciario en conexión delta o triángulo (D o  $\Delta$ ), encargado de suprimir las componentes de tercer y quinto armónico de la onda sinusoidal fundamental, se omitirá o prescindirá del mismo por razones primeramente económicas, por lo cual todos los cálculos para el diseño de los devanados se realizaron sin tomar en cuenta esta bobina, los cuales serán sustituidos por cartón prensado (PressBoard) de alta resistencia que cubra las mismas dimensiones y geometría del devanado terciario (“Y”).

#### **4.2.2 Características generales del reconector a implementar en la salida de media tensión (13,8 kV) como sistema de protección**

El reconector que la GRTR ha destinado a colocar a la salida de la S/E móvil IEM 26-1737, es de marca Hawker Siddeley Switchgear (HSS), modelo HORIZON 38 kV, trifásico ( $3\phi$ ), con interrupción por vacío y ha sido diseñado para sistemas de distribución de energía eléctrica de hasta 38 kV. Este reconector será el encargado de salvaguardar la S/E móvil en la salida de baja tensión (13,8 kV), sustituyendo las celdas de media tensión (Celda de Interruptor Automático GIS CPG 1 O-V y la Celda de Protección con Fusibles GIS CPG 2 O-F), que resultaron afectadas por el siniestro ocurrido en la móvil, se programara mediante el protocolo de servicio donde este destinado a operar, las curvas de programación están basadas en las que expone las normas IEC 60947-2 [30], entre ellas están:

- Curva Inversa (C1).
- Curva Muy Inversa (C2).
- Curva Extremadamente Inversa (C3).
- Curva Inversa de Tiempo Largo (C4).
- Curva Inversa de Tiempo Corto (C5).

El restaurador HORIZON está aprobado para ser compatible con los controles del software PANACEA Plus. Este tipo de reconectador es muy resistente al ozono, oxígeno, humedad, contaminación y luz ultravioleta. Tiene tres módulos interruptores de polímero sólido, un transformador de corriente encapsulado y además es adecuado para funcionar a temperaturas de -50°C a +50°C., en la Tabla 37 se exponen las características técnicas de este tipo de reconectador, las cuales han sido aprobadas por la empresa CORPOELEC y los criterios técnicos bajo los cuales esta compañía se rige, ya que ha funcionado eficazmente en otras aplicaciones móviles utilizadas por la corporación.

**Tabla 37.** Características técnicas del reconectador HORIZON 38 kV.

| <b>Descripción del Equipo</b>                           | <b>HORIZON 38</b>  | <b>Celdas MT<br/>(CPG O-V/O-F)</b> |
|---|--------------------|------------------------------------|
| <b>Tensión nominal de operación</b>                     | 38 [kV]            | 24 [kV]                            |
| <b>Corriente nominal</b>                                | 2000 [A]           | 1600 [A]                           |
| <b>Tensión de prueba en seco 60 Hz, 1 minuto</b>        | 80 [kV]            | -                                  |
| <b>Tensión de prueba en húmedo 60 Hz, 10 segundos</b>   | 80 [kV]            | -                                  |
| <b>Nivel de Aislamiento impulso atmosférico (BIL)</b>   | 200 [kV]           | 150 [kV]                           |
| <b>Corriente de ruptura de cortocircuito</b>            | 31,5 [kA]          | 25 [kA]                            |
| <b>Frecuencia nominal de operación</b>                  | 60 [Hz]            | 60 [Hz]                            |
| <b>Vida mecánica (Operaciones de Cierre y apertura)</b> | 10000 [Oper.]      | -                                  |
| <b>Tiempo de cierre</b>                                 | 45 [ms]            | -                                  |
| <b>Tiempo de apertura</b>                               | 35 [ms]            | -                                  |
| <b>Tipo de mecanismo de actuación</b>                   | Actuador magnético | -                                  |
| <b>Material de los bushings</b>                         | Cerámico           | Cerámico                           |
| <b>Material del tanque</b>                              | Acero Inoxidable   | -                                  |
| <b>Temperatura de operación</b>                         | -50 a +50 [°C].    | -                                  |
| <b>Peso</b>   | 700 [Kg]           | -                                  |

**Fuente:** Datasheet Hawker Siddeley Switchgear, Recloser Horizon.

Al igual para los tiempos de actuación de los cierres del equipo luego de registrar la falla, el cual cuenta con la opción de realizar 3 cierres en caso de persistir la avería en el sistema eléctrico, el tiempo de actuación máximo para el total de los 3 cierres es de 45 seg, los cuales serán estipulados por el usuario en destino, dependiendo de las condiciones del sistema. La coordinación de las protecciones de la S/E móvil IEM 26-1737 se explicara con más detalles en el ANEXO D, siendo está una programación básica o estándar en caso de que la subestación o sitio donde este destinada a prestar servicio está unidad no presente condiciones especiales de programación respecto a las curvas, coordinación y tiempos de actuación de los equipos de protección, en la Figura 15 se muestra el reconectador marca Hawker Siddeley Switchgear (HSS), modelo HORIZON 38 kV, trifásico (3 $\phi$ ), siendo este el equipo encargado de la protección de la salida en media tensión (13,8 kV) de la S/E móvil IEM, así como todos los dispositivos ubicados en el Centro de Distribución y Control (CDC).

Este equipo reconectador HORIZON 38 kV, presenta características eléctricas más robustas respecto a las celdas de media tensión CPG O-V y CPG O-F anteriormente ubicadas en la salida de la S/E móvil para protección, medición y control, de acuerdo a lo especificado en la Tabla 37. Otro aspecto que se tomó en consideración para la elección del reconectador como equipo de resguardo para la salida de la móvil IEM, es su historial de trabajo en otras aplicaciones en S/E móviles pertenecientes a CORPOELEC de otras empresas fabricantes (por ejemplo EFACEC), su buen desempeño a nivel eléctrico como dispositivo de salvaguarda de las mismas, funciona como punto de inflexión para ser considerado primeramente por encima de otros equipos eléctricos para cumplir la tarea de protección, medición y control en la salida de media tensión (13,8 kV) de la S/E móvil IEM 26-1737.



**Figura 15.** Reconector Hawker Siddeley Switchgear, modelo HORIZON 38 kV.  
**Fuente:** Datasheet Hawker Siddeley Switchgear, Recloser Horizon.

#### **4.2.3 Características generales del cambiador de tomas bajo carga (CTBC) a conectarse en el transformador como sistema de regulación de tensión**

La S/E móvil IEM 26-1737 realizaba la regulación de tensión en el lado de alta tensión (115 kV) mediante un cambiador de tomas sin carga o en vacío (sin tensión) de 5 posiciones, por lo cual para poder variar dicha tensión era necesario sacar de operación o servicio la unidad móvil y manualmente un operador mediante el volante de cambio de tap o posición, realizaba el ajuste al nivel de tensión o relación de transformación requerida. Este procedimiento representaba un problema muy



complejo debido que el sistema eléctrico de potencia que es coordinado por CORPOELEC presenta muchas fluctuaciones de tensión a lo largo del día, existiendo horas de mayor demanda energética dependiendo de la carga conectada. Esto fue uno de los factores fundamentales que influyo que la GRTR tomara la determinación de sustituir este cambiador de tomas sin carga por un conmutador de derivaciones bajo carga (en tensión), el cual mediante su programación y mecanismo automatizado, al observar variaciones considerables en la tensión del sistema eléctrico superiores a los pasos de tensión establecidos en su programación, realizará los cambios en la relación de tensión del transformador que mejor se adapte a la demanda en ese momento en específico.

El cambiador de tomas a conectar en S/E móvil es de marca ABB, modelo UZFRN 250kV/300A. Se utiliza en combinación con transformadores de potencia sumergidos en aceite, controlando así la magnitud de la tensión en el lado donde se requiera modificar la misma, en el caso de la móvil IEM se procederá a localizar en el lado de alta tensión (115 kV). Es un cambiador de tomas bajo carga trifásico (3 $\phi$ ), basando su principio de conmutación en un autotransformador preventivo (reactancias), un tiempo por operación de aproximadamente 2 segundos, con interrupción de la corriente de carga mediante ruptores al vacío, su tanque o cuba está diseñado o apto para soportar pleno vacío ( $\pm 15$  psi) y su mecanismo consta de 17 posiciones (8L-N-8R). Este CTBC se adaptara para que su regulación sea de +5% y -15% referentes a la tensión nominal, los valores límites de tensión para operación de este CTBC se exponen en la Tabla 38, esto debido a las exigencias del sistema eléctrico donde los estudios realizados por la empresa han demostrado que es la más óptima forma de regulación adaptada al sistema de potencia eléctrico de nuestro país. Este modelo de cambiador de tomas consta de un recipiente de aceite que incluye selectores de tomas y preselectores (inversores o de paso grueso/fino), ruptores al vacío e interruptores by-pass, alojamiento en carcasa independiente del conjunto contactos de levas/mecanismo de accionamiento, entre otros componentes.

**Tabla 38.** Límites de aplicación para el CTBC.

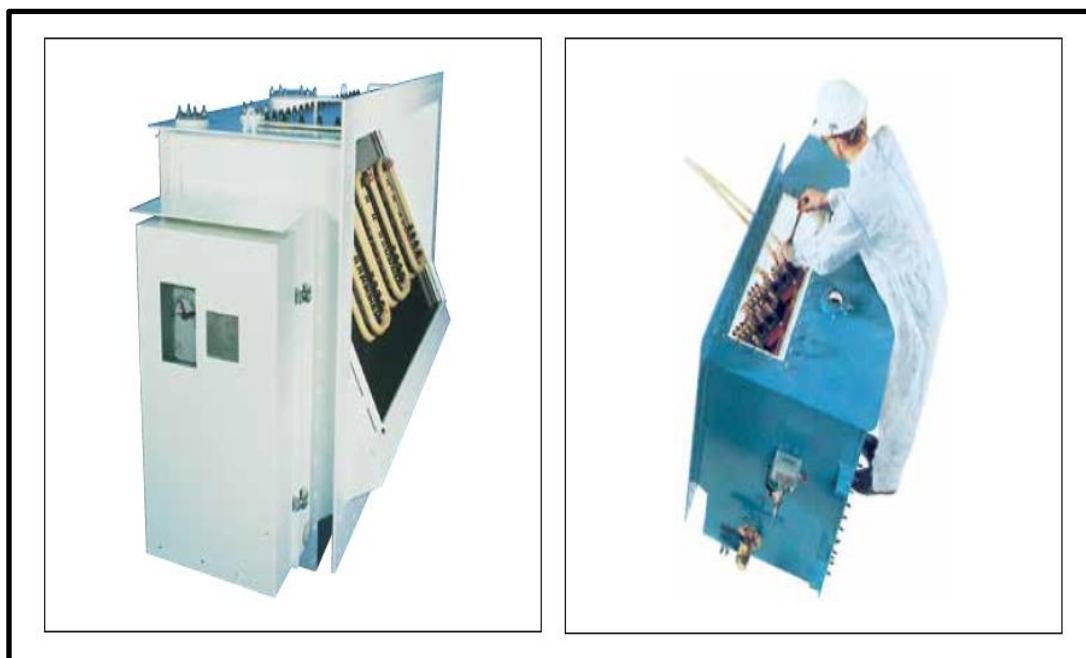
| <b>Conmutador de derivaciones</b>                                 | <b>CTBC (OLTC)</b>   | <b>CTSC (DETC)</b> |
|---|----------------------|--------------------|
| <b>Modelo del Cambiador de Tomas Bajo Carca</b>                   | UZFRN 250/300        | -                  |
| <b>Tensión de servicio entre fases y a tierra</b>                 | 15 [kV]              | -                  |
| <b>kVA de regulación trifásico</b>                                | 9500 [kVA]           | -                  |
| <b>Corriente de paso del cambiador</b>                            | 1320 [A]             | -                  |
| <b>Tensión entre tomas</b>  | 300 [V]              | -                  |
| <b>Sobretensión de impulso (Onda completa) fase a tierra</b>      | 250 [kV]             | -                  |
| <b>Sobretensión de impulso (Onda completa) entre fases</b>        | 150 [kV]             | -                  |
| <b>Sobretensión de impulso (Onda completa) entre tomas</b>        | 45 [kV]              | -                  |
| <b>Tensión aplicada de prueba a frecuencia de red entre tomas</b> | 15 [kV] valor eficaz | -                  |
| <b>Número de posiciones (estándar)</b>                            | 17 [posic.]          | 5 [posic.]         |
| <b>Secciones de devanado de regulación</b>                        | 9 [8 efect.]         | 3 [2 efect.]       |
| <b>Porcentaje de regulación</b>                                   | (+5/-15)%            | (+5/-5)%           |
| <b>Porcentaje de desviación entre taps</b>                        | (±1,25)%             | (±2,5)%            |

**Fuente:** Conmutadores bajo carga, tipo UZF, ABB.

Este equipo conmutador de derivaciones puede ser acoplado en cualquier parte de la S/E móvil de acuerdo a su fabricación por lo cual se diseñó la móvil en Autocad (Ver Anexo E) con la finalidad de comprobar si era posible la implementación de este equipo de acuerdo a sus dimensiones y el área disponible en el transformador de la móvil, a su vez esta comandado por un gabinete de control el cual protege todo el mecanismo de accionamiento remoto y manual, a su vez también se debe adaptar un tanque de expansión horizontal con capacidad para suministrar la cantidad de aceite mineral aislante, aguantar la expansión y contracción del mismo.

Otro componente que se debe colocar es un respirador o secador de aire de gel de Sílice y opcional se puede colocar un relé de Jansen para estudiar y monitorear el

estado del aceite que circula en el cambiador, las conexiones entre este conmutador y la parte activa (salidas de los devanados) del transformador de potencia, se pueden realizar por la parte superior del cambiador de tomas, tal como se muestra en la Figura 16 del modelo de conmutador de derivaciones marca ABB, modelo UZFRN 250kV/300A; a implementar en la S/E móvil IEM 26-1737.



**Figura 16.** CTBC marca ABB, modelo UZFRN 250/300.  
**Fuente:** Conmutadores bajo carga, tipo UZF, ABB.

## **CAPITULO V**

### **PROPUESTA PARA LA REHABILITACIÓN Y FUTURA PUESTA EN SERVICIO DE LA S/E MÓVIL IEM 26-1737**

#### **5.1 Estimación de costos generales para las reparaciones, modificaciones y adición de equipos a realizarse en la S/E móvil IEM 26-1737**

Para este trabajo la escogencia de cada uno de los equipos a adicionar, sustituir o reparar para la rehabilitación del transformador de potencia, así como la futura puesta en servicio de la S/E móvil IEM 26-1737, se tomaron como premisa los parámetros correspondientes a la parte económica o presupuesto avalado por la empresa, así como los criterios eléctricos de la empresa antes mencionados (Ver Cap. IV, pág. 73), los cuales se le implementaron a una serie de cotizaciones de los diferentes dispositivos seleccionados teniendo en cuenta las características técnicas, seguridad y confiabilidad al estar en operación en nuestro sistema interconectado a nivel nacional, ya que mucho de estos componentes han demostrado tener buena experiencia operando en otras subestaciones o aplicaciones móviles.

Con la finalidad de aprovechar de la mejor manera los recursos económicos asignados a este plan de recuperación de la S/E móvil IEM 26-1737, de tal manera que se asegure eficiencia, seguridad y rentabilidad, a continuación se presentan una serie de cotizaciones de diferentes fabricantes de dispositivos eléctricos, esto basado en los componentes a ser agregados o sustituidos en la subestación móvil.

### 5.1.1 Devanados de alta tensión (115 kV), baja tensión (13,8 kV) y devanado de regulación

La información para la construcción de los arrollados para el transformador de potencia de la S/E móvil se le suministró a varias empresas nacionales e internacionales de las cuales se pudo obtener las cotizaciones mostradas en la Tabla 39 para los devanados de alta tensión junto al arrollado de regulación (115 kV) y en la Tabla 40 se expresan las correspondientes a las bobinas de media tensión (13,8 kV). Estas empresas son nacionales y ambas empresas han estado presentes en varios proyectos realizados anteriormente por la empresa CORPOELEC, las especificaciones técnicas son las mismas que se expresaron en la Tabla 35 (Ver Cap. IV pág. 82) para el diseño de los devanados tanto de alta tensión y regulación (115 kV), y media tensión (13,8 kV), el arrollado terciario (D o  $\Delta$ ) será sustituido por un cilindro de cartón de alta resistencia con las mismas medidas geométricas.

**Tabla 39.** Cotizaciones para devanados de alta tensión y regulación.

| EMPRESA   | CANTIDAD | COSTO $C_U$ [Bs] | TOTAL [Bs]    |
|-----------|----------|------------------|---------------|
| EMPRESA 1 | 3        | 20.000.000,00    | 60.000.000,00 |
| EMPRESA 2 | 3        | 21.500.000,00    | 64.500.000,00 |

**Fuente:** Autor.

**Tabla 40.** Cotizaciones para devanado de baja tensión.

| EMPRESA   | CANTIDAD | COSTO $C_U$ [Bs] | TOTAL [Bs]    |
|-----------|----------|------------------|---------------|
| EMPRESA 1 | 2        | 13.500.000,00    | 27.000.000,00 |
| EMPRESA 2 | 2        | 15.500.000,00    | 31.000.000,00 |

**Fuente:** Autor.

### 5.1.2 Cambiador de Tomas Bajo Carga (CTBC)

Para este dispositivo eléctrico debido a su complejidad en sentido de operación el mismo no es fabricado en este país por lo cual debe ser importado, las empresas que presentaron sus cotizaciones fueron expresadas en la Tabla 41. Para este componente la premisa por encima de las características técnicas del equipo y la parte económica, su selección estuvo dada por las distancias de ubicación disponibles dentro de las medidas preliminares del semirremolque con que se construyó la S/E móvil IEM, sin obviar la confiabilidad y seguridad del dispositivo, para obtener una mejor ubicación y localización de los dispositivos eléctricos a implementar en la móvil, se procedió a diseñar la misma con una herramienta informática de dibujo asistido AutoCAD, con esto poder comprobar que se respeten y cumplan las distancias mínimas, esto puede observarse con más detalle en el ANEXO E.

Entre las cotizaciones de las marcas fabricantes de cambiadores de tomas bajo carga (CTBC), teniendo en cuenta los requerimientos suministrados por la empresa CORPOELEC, junto a las características de diseño de los devanados. Se decidió utilizar modelos de 17 posiciones o pasos (8L-N-8R), todos estos tipos de CTBC se pueden acoplar a las paredes del tanque del transformador de potencia de la S/E móvil, aunque deben guardar hermeticidad para evitar la entrada de humedad al interior del transformador.

**Tabla 41.** Cotizaciones para Cambiador de Tomas Bajo Carga (CTBC).

| <b>EMPRESA</b>   | <b>CANTIDAD</b> | <b>COSTO <sup>c</sup>/<sub>U</sub> [\$]</b> | <b>COSTO [Bs/\$]*<br/>Tasa SIMADI</b> | <b>TOTAL [Bs]</b> |
|------------------|-----------------|---|---------------------------------------|-------------------|
| <b>EMPRESA 3</b> | 1               | 130.000,00                                  | 87.588.800,00                         | 87.588.800,00     |
| <b>EMPRESA 4</b> | 1               | 58.061,00                                   | 39.119.179,36                         | 39.119.179,36     |
| <b>EMPRESA 5</b> | 1               | 85.000,00                                   | 57.269.600,00                         | 57.269.600,00     |

\*: La Tasa de cambio SIMADI para el 31/12/2016 era de 673,76 Bs por cada dólar [\$].

**Fuente:** Autor.

### 5.1.3 Reconectador para la salida en baja tensión (13,8 kV)

Para la implementación de este equipo como sistema de protección en la salida de baja tensión (13,8 kV) de la S/E móvil 26-1737, se consultaron varias empresas fabricantes de este dispositivo las cuales presentaron sus valoraciones, mientras que de algunas marcas particulares de reconectores ya se conocía su costo actual en el mercado debido a la implementación en otras subestaciones o aplicaciones móviles de CORPOELEC, esta información se encuentra expresada en la Tabla 42, entre las cotizaciones obtenidas podemos mencionar.

**Tabla 42.** Cotizaciones para reconectador con tensión nominal 38 kV.

| <b>EMPRESA</b>    | <b>CANTIDAD</b> | <b>COSTO [\$]</b> | <b>COSTO [Bs/\$]*<br/>Tasa SIMADI</b> | <b>TOTAL [Bs]</b> |
|-------------------|-----------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------|
| <b>EMPRESA 7</b>  | 1               | 14.500,00         | 9.769.520,00                          | 9.769.520,00      |
| <b>EMPRESA 8</b>  | 1               | 15.000,00         | 10.106.400,00                         | 10.106.400,00     |
| <b>EMPRESA 9</b>  | 1               | 13.500,00         | 9.095.760,00                          | 9.095.760,00      |
| <b>EMPRESA 10</b> | 1               | 12.000,00         | 8.085.120,00                          | 8.085.120,00      |
| <b>EMPRESA 11</b> | 1               | 11.000,00         | 7.411.360,00                          | 7.411.360,00      |

\*: La Tasa de cambio SIMADI para el 31/12/2016 era de 673,76 Bs por cada dólar [\$].

**Fuente:** Autor.

### 5.1.4 Indicadores de temperatura

Para los indicadores de temperatura (Termómetros) tanto de aceite como para los devanados que conforman la parte activa del transformador, se procedió a recopilar información de evaluaciones en cuanto a costo realizadas con anterioridad por la empresa CORPOELEC ya que estos equipos son ampliamente utilizados en los transformadores de potencia del sistema interconectado nacional, sin embargo

también se recibieron valoraciones de otras empresas fabricantes de estos equipos de medida, entre las empresas que presentaron sus modelos podemos mencionar.

**Tabla 43.** Cotizaciones para indicador de temperatura de devanado.

| EMPRESA    | CANTIDAD | COSTO $c_u$ [\$] | COSTO [Bs/\$]*<br>Tasa SIMADI | TOTAL [Bs]   |
|------------|----------|------------------|-------------------------------|--------------|
| EMPRESA 12 | 1        | 800,00           | 539.008,00                    | 539.008,00   |
| EMPRESA 13 | 1        | 1.500,00         | 1.010.640,00                  | 1.010.640,00 |
| EMPRESA 14 | 1        | 1.100,00         | 741.136,00                    | 741.136,00   |

\*: La Tasa de cambio SIMADI para el 31/12/2016 era de 673,76 Bs por cada dólar [\$].

**Fuente:** Autor.

**Tabla 44.** Cotizaciones para indicador de temperatura de aceite.

| EMPRESA    | CANTIDAD | COSTO $c_u$ [\$] | COSTO [Bs/\$]*<br>Tasa SIMADI | TOTAL [Bs]   |
|------------|----------|------------------|-------------------------------|--------------|
| EMPRESA 12 | 1        | 650,00           | 437.944,00                    | 437.944,00   |
| EMPRESA 13 | 1        | 1.500,00         | 1.010.640,00                  | 1.010.640,00 |
| EMPRESA 14 | 1        | 1.000,00         | 673.760,00                    | 673.760,00   |

\*: La Tasa de cambio SIMADI para el 31/12/2016 era de 673,76 Bs por cada dólar [\$].

**Fuente:** Autor.

## 5.2 Propuesta para la rehabilitación de la S/E móvil IEM 26-1737

Con la finalidad de generar un beneficio útil, eficiente y eficaz para el sistema eléctrico nacional, se presenta esta propuesta de inversión para la rehabilitación de la S/E móvil IEM 26-1737 con el objetivo de conocer la rentabilidad económica, técnica y social de la misma, esto de acuerdo a los requerimientos de los componentes o dispositivos eléctricos para la recuperación de la subestación eléctrica móvil IEM 26-1737. Se estudiaron las mejores opciones mediante una serie de cotizaciones y valoraciones por parte de diferente empresas nacionales e internacionales del ramo eléctrico, las cuales posteriormente pasaran a un proceso de licitación para la asignación de los recursos económicos a la mejor alternativa, de acuerdo a las



experiencias que han tenido con los equipos requeridos operando en el sistema eléctrico nacional, así como la parte económica y técnica.

Esta fase del proyecto dependió en gran parte de la experiencia de la Gerencia de Recuperación de Transformadores y Reactancias (GRTR), ya que en base a sus conocimientos y experiencia técnica en la recuperación y mantenimiento de los transformadores, reactancias y aplicaciones móviles, se tomaron las decisiones correspondientes para el dimensionamiento y forma de esta propuesta de rehabilitación, orientando la escogencia de los diferentes equipos a implementar, adicionar, recuperar o sustituir en la subestación móvil para su futura puesta en operación, en la Tabla 45 se presentan las propuestas sobre las escogencias de los equipos eléctricos, así como el costo económico de cada uno de ellos y en conjunto para la recuperación de la S/E móvil IEM 26-1737. Para la escogencia en lo que respecta a los devanados tanto de alta/regulación y media tensión, la premisa para la escogencia de la cotización expresada por la empresa fabricante estuvo determinada explícitamente por el aspecto económico, ya que a ambas empresas se le suministro las características eléctricas de construcción y detalles de los devanados a incorporar en la parte activa de la S/E móvil, en vista de que la EMPRESA 1, presento un proyecto más económico respecto a la otra fábrica cotizante se realizó dicha escogencia. Para el caso del conmutador de derivaciones bajo carga, nos basamos en la misma particularidad que para los devanados, que es el aspecto económico, ya que el modelo cotizado por la EMPRESA 4, se ajusta las especificaciones eléctricas solicitadas por CORPOELEC para este equipo y su previa utilización en otras aplicaciones en transformadores de potencia recuperados y modificados para operar en el sistema eléctrico de potencia venezolano.

Por otro lado para el caso del reconectador, la parte económica no fungió como premisa, sino las características eléctricas técnicas de operación del equipo, debido que este reconectador a implementar ha presentado funcionamiento óptimo en el sistema eléctrico en lo referente a protección y despeje de fluctuaciones en los niveles

de tensión y corriente en el sistema, esto se infiere de la experiencia técnica de la GRTR supervisando los equipos de transformación de las subestaciones y el estudio de los puntos de origen de la fallas en los mismos, ya que la S/E móvil su sistema de protección en media tensión (Celdas de MT marca Ormazabal CPG O-V/CPG O-F), no actuaron ante la situación de falla que se presentó, ocasionando la salida de operación de la móvil. Por estos puntos antes expuestos se realiza la escogencia del equipo cotizado por la EMPRESA 8, como sistema de protección a implementar en la salida de la S/E móvil IEM 26-1737. Por ultimo en lo que respecta a los indicadores de temperatura, se escogieron los presentados por la EMPRESA 14, debido que estos equipos están equipados con contactos para la señalización (°C) de alarma y disparo de las protecciones de la móvil para ser programadas por el usuario a la hora de un ascenso en la temperatura del equipo, también permite un monitoreo remoto, ya que admite el intercambio de información mediante un software de programación entre el dispositivo y equipo de computación, ventaja que el modelo ostentado por la EMPRESA 12 no cuenta. En lo referente a los expuestos por la EMPRESA 13 los cuales presentan las mismas ventajas que los presentados por la EMPRESA 14, el punto de diferencia entre ambas cotizaciones fue el aspecto económico.

**Tabla 45.** Costos de los componentes eléctricos para la rehabilitación de la S/E móvil IEM 26-1737.

| EQUIPO                                     | EMPRESA       | COSTO [\$] | COSTO*<br>[\$/Bs] | COSTO [Bs]    | TOTAL [Bs]    |
|--|---------------|------------|-------------------|---------------|---------------|
| Dev. Alta Tensión<br>[115 kV]              | EMPRESA 1     | -          | -                 | 60.000.000,00 | 60.000.000,00 |
| Dev. Baja Tensión<br>[13,8 kV]             | EMPRESA 1     | -          | -                 | 27.000.000,00 | 27.000.000,00 |
| Cambiador de Tomas<br>Bajo Carga (17 Pos.) | EMPRESA 4     | 58.061,00  | 39.119.179,36     | -             | 39.119.179,36 |
| Reconectador [38<br>kV]                    | EMPRESA 8     | 15.000,00  | 10.106.400,00     | -             | 10.106.400,00 |
| Indicador de Temp.<br>de Devanado          | EMPRESA<br>14 | 1.100,00   | 741.136,00        | -             | 741.136,00    |
| Indicador de Temp.<br>de Aceite            | EMPRESA<br>14 | 1.000,00   | 673.760,00        | -             | 673.760,00    |

\*: La Tasa de cambio SIMADI para el 31/12/2016 era de 673,76 Bs por cada dólar [\$].

**Fuente:** Autor.

Por otra parte a estos costos de equipos a implementar en la subestación móvil, también se le debe agregar los costos referentes a la ingeniería aplicada para la futura rehabilitación, estos costos de ingeniería representaran un 40% de los gastos presupuestados para la adquisición de los componentes eléctricos, en la Tabla 46 se presentan en detalle la inversión y gastos a realizar para la adquisición de los equipos eléctricos a incorporar e implementar por parte de la empresa CORPOELEC para llevar a cabo este proyecto de reposición y recuperación de la S/E móvil IEM 26-1737.

**Tabla 46.** Costo total para la rehabilitación de la S/E móvil IEM 26-1737.

| <b>TIPO DE COSTOS</b> | <b>COSTO<br/>[\$]</b> | <b>COSTO<br/>[\$/Bs]*</b> | <b>COSTO [Bs]</b>     | <b>TOTAL [Bs]</b>     |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| COSTO DE EQUIPOS      | 75.161,00             | 50.640.475,36             | 87.000.000,00         | 137.640.475,36        |
| COSTO DE INGENIERÍA   | 30.064,40             | 20.256.190,15             | 34.800.000,00         | 55.056.190,15         |
| <b>COSTO TOTAL</b>    | <b>105.225,40</b>     | <b>70.896.665,51</b>      | <b>121.800.000,00</b> | <b>192.696.665,51</b> |

\*: La Tasa de cambio SIMADI para el 31/12/2016 era de 673,76 Bs por cada dólar [\$].

**Fuente:** Autor.

Para hacer factible esta propuesta de inversión se le asignara por parte de la empresa CORPOELEC a la Gerencia de Recuperación de Transformadores y Reactancias (GRTR) un monto de capital determinado, así como una serie de insumos eléctricos de varios tipos, para poder llevar a cabo este plan de rehabilitación de la S/E móvil IEM 26-1737. Todo esto con la finalidad de que represente un beneficio tangible y cuantificable en lo que se refiere a recursos, tiempo y dinero. Además representa un avance de suma importancia para la industria eléctrica nacional, ya que capacitamos y especializamos al personal que labora dentro de CORPOELEC para la recuperación y mantenimiento de las subestaciones eléctricas móviles, siendo estos equipos de vital importancia dentro del sistema eléctrico nacional, por brindar una solución rápida en cuanto a tiempo a la hora suplir averías o fallas de mediana y gran magnitud.

## CONCLUSIONES

Mediante el análisis exhaustivo de las pruebas eléctricas de diagnóstico aplicadas al transformador de potencia, permitieron inferir en la condición o estado de esta unidad, así como de los diferentes componentes y equipos que conforman la S/E móvil IEM 26-1737, indicando los elementos que sufrieron mayor daño debido a la falla que se presentó en el sistema eléctrico cuando se encontraba en operación. Por esto se plasma en este proyecto una serie de medidas para poder sustituir o reparar estos equipos por la gravedad de su situación, basadas en los diferentes criterios técnicos de la Gerencia de Recuperación de Transformadores y Reactancias (GRTR) e investigación a través de bibliografía especializada en el tema.

Entre las adecuaciones que se formularon en la S/E móvil, se encuentra el diseño de nuevos devanados con relación de tensión 115/13,8 kV, con 17 salidas del devanado de regulación para conexión de un cambiador de tomas bajo carga (CTBC), el cual permitirá las conmutaciones de las magnitudes en la tensión del devanado de alta tensión sin tener que sacar la móvil de servicio, lo cual representa una gran ventaja respecto al conmutador de tensión sin carga o en vacío (CTSC) que tenía conectado anteriormente la móvil.

El uso de las herramientas computacionales ayudo a simplificar en cuestión de tiempo los resultados y cálculos expresados en este proyecto, estos programas de modelación matemática (MAPLE) y de dibujo asistido en computadora (AutoCAD) fueron una gran ayuda a la hora de realizar los diferentes cálculos para los nuevos devanados y para la adición de los demás equipos eléctricos mencionados, con la finalidad de verificar y/o determinar su ubicación respecto a sus dimensiones para respetar las distancias y espacios con los que está diseñada la S/E móvil IEM 26-1737.

Se pudo comprobar que para el diseño de transformadores eléctricos de potencia basado en bibliografías, esto suministra especímenes desproporcionados en dimensiones respecto a los equipos actuales, debido que este tipo de bosquejo asume decisiones y valores que sólo son válidos para esos casos puntuales que se plantean para el transformador que está siendo diseñado, por lo que se buscó consulta y sugerencias con empresas especializadas y así poder conocer los datos vigentes para poder esbozar una adecuada y actualizada propuesta en lo que ha devanados se refiere.

El diseño de un transformador es una labor muy amplia y compleja, la cual no se podría abarcar en su totalidad en este Trabajo Especial de Grado. Por lo cual solo se plantean las bases preliminares para el bosquejo de un transformador de potencia, como se muestra en el Anexo C, por lo que quedó una serie cálculos excluidos como los cálculos referentes a los esfuerzos (eléctricos y mecánicos) que debe soportar, pérdidas adicionales, entre otros. Debido que se consideraran aproximados bajo los cuales fue primeramente diseñada y fabricada la S/E móvil IEM 26-1737.

## **RECOMENDACIONES**

La empresa CORPOELEC debe encargarse de suministrar toda la información técnica pertinente y necesaria para la realización de estudios y futuros proyectos que estén relacionados al sistema eléctrico de potencia venezolano, con esto asegura que la orientación que se brinde en dicha investigación sea veraz y que se reduzca el tiempo de ejecución con el cual puedan ser resueltas las propuestas o planteamientos a nivel de ingeniería básica e ingeniería de detalles.

Se deben realizar mejoras tecnológicas que permitan al operador verificar el estado y funcionamiento de la S/E móvil IEM 26-1737, mediante la ayuda de equipos de protección provistos con softwares especializados en esta materia, para la supervisión remota del espécimen en tiempo real a través de un computador, y con esto evitar que sea gravemente afectada debido a fallas internas o externas, siempre y cuando primeramente se realice un buen estudio para la coordinación de protecciones de acuerdo al lugar donde vaya suplir la demanda de energía eléctrica la móvil.

La empresa CORPOELEC debe mantener este plan de mejoras tecnológicas, recuperación o rehabilitación y mantenimiento de equipos que conforman el sistema eléctrico de potencia venezolano, ya que con esto podemos capacitar y adiestrar al personal técnico que labora en esta empresa, a la hora de suscitarse cualquier eventualidad en la red eléctrica. Con esto no tener que recurrir a consultores extranjeros, ocasionando mayor inversión económica, ya que la inversión sería con capital en moneda extranjera y por otro lado alargando los tiempos de ejecución debido a traslado de ese personal especializado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Corporación Eléctrica Nacional (CORPOELEC)* [en línea]. <<http://www.corpoelec.gob.ve/quienes-somos>>
- [2] *Comité de Normalización, Ingeniería y Métodos. NS-P, Especificaciones técnicas sobre las subestaciones normalizadas de CADAFE.* (Norma) Caracas, CADAFE 1984.
- [3] NFPA 70E, *Norma para la seguridad eléctrica en lugares de trabajo.* (Norma) 2009.
- [4] COVENIN 3048, *Sistema de protección contra incendios en plantas de generación y subestaciones eléctricas de transmisión.* (Norma) 1993.
- [5] IEEE 693, *Recommended Practice for Seismic Design of Substations.* (Norma) 1997.
- [6] IEEE Std C57.12.00, *Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers.* (Norma) 1993.
- [7] IEC 60694, *Specifications for HV Switchgear and Controlgear.* (Norma) 2002.
- [8] IEC 60044-1, *Instrument transformers – Part 1: Current Transformers.* (Norma) 2003.
- [9] IEC 60137-1, *Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V.* (Norma) 2003.
- [10] IEC 62271-100, *High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: High-voltage alternating-current circuit-breakers.* (Norma) 2001.
- [11] IEC 62271-102, *High-voltage switchgear and controlgear - Part 102: High-voltage alternating current disconnectors and earthing switches.* (Norma) 2002.
- [12] IEC 62271-203, *High-voltage switchgear and controlgear - Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV.* (Norma) 2003.
- [13] COVENIN 599, *Código de protección contra rayos.* (Norma) 1973.
- [14] IEEE Std C62.22, *Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems.* (Norma) 1997.
- [15] COVENIN 2402, *Tipología de los vehículos de carga.* (Norma) 1997.
- [16] COVENIN 0614, *Límite de peso para vehículos de carga.* (Norma) 1997.

- [17] IEEE Std C57.12.90, *Test Code for Liquid-Immersed Regulating Transformers Power Distribution Equipment and Systems*. (Norma) 1999.
- [18] IEEE Std C57.12.70, *Standard for Standard Terminal Markings and Connections for Distribution and Power Transformers*. (Norma) 2000.
- [19] ANSI/NETA MTS, *Standard for maintenance testing specifications for Electrical Power Equipment and Systems*. (Norma) 2011.
- [20] IEC Std 60076-3, *Power transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air*.
- [21] COVENIN 2283, *Líquidos aislantes. Métodos de ensayo para la determinación de la tensión de ruptura a frecuencia industrial utilizando electrodos esféricos o semiesféricos*. (Norma) 1997.
- [22] ASTM D-1816, *Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE Electrodes*. (Norma) 2003.
- [23] IEC 60156, *Insulating liquids - Determination of the breakdown voltage at power frequency - Test method*. (Norma) 1995.
- [24] IEEE Std C57.104, *Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers*. (Norma) 1991.
- [25] ASTM D-3612-02, *Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography*. (Norma) 2003.
- [26] COVENIN 3256, *Método de toma de muestra de dieléctricos líquidos*. (Norma) 1997.
- [27] ASTM D-3613, *Standard Practice for Sampling Insulating Liquids for Gas Analysis and Determination of Water Content*. (Norma) 2000.
- [28] IEC 60896-21, *Stationary lead-acid batteries - Part 21: Valve regulated types - Methods of test*. (Norma) 2004.
- [29] CADAFE DNS-03, *Diseño Normalizado de Subestaciones, Sistemas de Protección TOMO III*. (Norma) Caracas 1980.
- [30] IEC 60947-2, *Low-voltage switchgear and controlgear – Part 2: Circuit-breakers*. (Norma) 2003.
- [31] Enríquez Harper Gilberto, *Manual del técnico en subestaciones eléctricas industriales y comerciales*, Limusa, 2008.



## BICLIOGRAFÍA

Corporación Eléctrica Nacional (CORPOELEC) [En línea].  
<<http://www.corpoelec.gob.ve>>

Corporación Eléctrica Nacional (CORPOELEC), *Transformadores aislados en Aceite* Manual de adiestramiento, 2015.

Chapman Stephen, *Máquinas eléctricas*, tercera edición, 2000.

Dasgupta Indranjit, "*Power Transformer Quality Assurance*", New Age International Publishers, 2009.

Enríquez Harper Gilberto, *Manual del técnico en subestaciones eléctricas industriales y comerciales*, Limusa, 2008.

Carta Jonathan, *Diseño de un transformador de potencia 115/13,8 kV; 36 MVA, con cambiador de tomas bajo carga según especificaciones técnicas de CADAFE*, (Tesis). Aragua: Universidad Bicentenario de Aragua, 2005.

CADAFE, *Transformadores de potencia, Volumen I, II y III*, Proyecto Desarróllate, 2007.

CADAFE, Gerencia de Operaciones, *Guía para el mantenimiento, transporte y puesta en servicio de subestaciones móviles*, 1986.

Long NG Arturo José, *Pruebas eléctricas de diagnósticos a los transformadores de potencia*, (Tesis). Caracas: Universidad Simón Bolívar, 2012.

Maschinenfabrik Reinhausen [en línea] <<http://www.reinhausen.com/es>>.

Cooper Power System [en línea] <<http://www.cooperindustries.com/es>>.

Omicron [en línea] <<http://www.omicronusa.com>>.

Megger [en línea] <<http://www.megger.com>>.

GE Digital Energy [en línea] <<http://www.gedigitalenergy.com>>.

Vanguard Instruments [en línea] <<http://www.vanguardinstruments.com.ar>>.

Baur [en línea] <<http://www.baur.at>>.