



REPÚBLICA DEL ECUADOR

**Escuela Politécnica Nacional**

" E SCIENTIA HOMINIS SALUS "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

***Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.***

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **GUÍA TÉCNICA PARA LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE ADQUISICIÓN Y MANTENIMIENTO PARA TRANSFORMADORES COMBINADOS (TRAFOMIX) Y CAJAS DE MANIOBRAS PARA LA EMPRESA ELÉCTRICA QUITO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA ELÉCTRICA**

**MARJORIE GABRIELA SÁNCHEZ VACA**

**DIRECTOR: Ing. Miguel Ángel Lucio Castro, MSc.**

**CODIRECTOR: Ing. Carlos Fabian Gallardo Quingatuña, PhD**

**Quito, octubre 2020**

## **AVAL**

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Marjorie Gabriela Sánchez Vaca, bajo nuestra supervisión.

---

**Ing. MIGUEL ANGEL LUCIO CASTRO, MSc.  
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**Ing. CARLOS FABIÁN GALLARDO QUINGATUÑA, PhD.  
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo, Marjorie Gabriela Sánchez Vaca, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

---

MARJORIE GABRIELA SÁNCHEZ VACA

## DEDICATORIA

*A Dios por haberme dado la sabiduría y paciencia para cumplir con uno de los logros más importantes de mi vida.*

*A mis padres Milton y Janneth quienes con su cariño, esfuerzo y paciencia supieron guiar mi vida a lo largo de estos años y me han alentado siempre a continuar el camino hasta llegar a la meta.*

*A David, por brindarme su cariño y apoyo moral durante todo este proceso.*

*A mi hermana Emily, que mi ejemplo sea una buena guía en su vida.*

*Gabriela*

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme dado la sabiduría necesaria para concluir este proyecto, por siempre haber estado conmigo en todo momento y protegerme todos los días, por las oportunidades que me ha dado siempre y la felicidad que he tenido en mi vida.

A mis padres, gracias por todo el sacrificio que han hecho siempre para que a mi hermana y a mí nunca nos falte nada, por haberme permitido estudiar en la universidad que soñé y sobre todo porque a pesar de todos mis errores nunca han dejado de apoyarme.

A mis abuelos, tíos y primos, por haber colaborado con su granito de arena para que pudiera culminar con mi carrera.

A David, por haber sido una luz en mi vida en los momentos difíciles. Gracias por el amor y paciencia con los que me has acompañado en estos años y sobre todo gracias por querer siempre que sea mejor cada día.

Quiero agradecer de manera especial al Ing. Lenin Quisaguano, al Ing. Geovanny Trujillo y a todos quienes conforman el Laboratorio de Transformadores de la Empresa Eléctrica Quito por toda la apertura y conocimientos que me brindaron para la elaboración de este proyecto.

Mi agradecimiento al Ing. Juan Ramírez, por su buena predisposición y ser guía en la elaboración de este proyecto. Gracias por los buenos consejos y recomendaciones que me permitieron llevar a feliz término mi tesis.

Al Msc. Miguel Lucio por sus concejos y tiempo brindados para resolver mis inquietudes y concluir satisfactoriamente con este trabajo.

Finalmente, quiero agradecer infinitamente a la Escuela Politécnica Nacional que me otorgó la oportunidad de estudiar en sus instalaciones y convertirme en profesional. Gracias a todos mis profesores por todo el conocimiento transmitido durante todos mis años de estudio; y a mis amigos quienes hicieron de esta etapa algo que siempre recordare.

*Gabriela*

# ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	1
1.2 ALCANCE .....	2
1.3 MARCO TEÓRICO .....	2
1.3.1. CAJAS DE MANIOBRA .....	2
1.3.1.1 Características Constructivas .....	3
1.3.1.1.1 Tanque.....	3
1.3.1.1.2 Seccionador.....	4
1.3.1.1.3 Bujes y Conectores .....	5
1.3.1.1.4 Conexiones Internas.....	6
1.3.1.1.5 Aislante .....	7
1.3.1.1.6 Protecciones .....	8
1.3.1.2 Tipos de Cajas de Maniobra .....	8
1.3.2 TRANSFORMADORES COMBINADOS DE MEDIDA .....	10
1.3.2.1 Características Constructivas .....	11
1.3.2.1.1 Tanque.....	11
1.3.2.1.2 Transformador de Corriente .....	12
1.3.2.1.3 Transformador de Voltaje.....	12
1.3.2.1.4 Aislamiento .....	13
1.3.3. ENSAYOS DE LABORATORIO Y NORMATIVA.....	13
1.3.3.1. Normativa .....	14
1.3.3.2 Definiciones.....	16
1.3.3.3 Clasificación de Ensayos .....	17
1.3.3.3.1 Pruebas Tipo .....	17
1.3.3.3.2 Pruebas de Rutina.....	21
1.3.3.3.3 Pruebas Especiales.....	26

1.3.3.3.4 Pruebas de Recepción .....	26
1.3.3.3.5 Pruebas de Mantenimiento .....	26
1.3.3.3.6 Ensayos Sobre el Aceite Aislante .....	26
1.3.4 EQUIPOS DE LABORATORIO PARA ENSAYOS .....	29
1.3.4.1. Voltaje a Frecuencia Industrial Requerido.....	29
1.3.4.2. Potencia a Frecuencia Industrial Requerida.....	30
1.3.4.3. Generación del Voltaje Alterno de Ensayo.....	31
2. METODOLOGÍA.....	36
2.1. COMPILACIÓN DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA DE LOS EQUIPOS Y LA NORMATIVA.....	36
2.2. ESPECIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS.....	37
2.2.1. DISPOSITIVOS ESPECIFICADOS EN LAS NORMAS QUE SE REQUIEREN PARA LOS ENSAYOS .....	37
2.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS DE ACUERDO CON LOS EQUIPOS EXISTENTES EN EL LABORATORIO.....	38
2.3. CONSTRUCCIÓN DE LA GUÍA TÉCNICA.....	38
2.4. RECOMENDACIÓN DE EQUIPOS.....	39
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	40
3.1. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN DE LOS EQUIPOS Y NORMATIVA .....	40
3.1.1. VOLTAJES Y CORRIENTES DE LOS EQUIPOS.....	40
3.1.2. INFORMACIÓN TÉCNICA DE LOS INSTRUMENTOS DE LABORATORIO.....	41
3.2. ESPECIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS.....	42
3.2.1. ENSAYOS QUE SE REALIZAN SOBRE LOS EQUIPOS ACTUALMENTE .....	42
3.2.1.1. Pruebas en las Cajas de Maniobras.....	42
3.2.1.2. Pruebas en los Transformadores Combinados de Medida.....	48
3.2.2. ENSAYOS APLICABLES Y NO APLICABLES EN EL LABORATORIO DE TRANSFORMADORES DE LA EEQ. ....	54
3.3. GUÍA TECNICA DE ENSAYOS.....	54
3.3.1. ENSAYOS SOBRE TRANSFORMADORES COMBINADOS DE MEDIDA .....	54
3.3.1.1. Voltaje Soportado (Voltaje Aplicado) A Frecuencia Industrial Sobre Los Bornes Primarios .....	54
3.3.1.2. Voltaje Inducido Sobre Los Bornes Primarios .....	58
3.3.1.3. Medición de Descargas Parciales (DP).....	62



3.3.1.4.	Voltaje Aplicado Entre Secciones.....	66
3.3.1.5.	Voltaje Aplicado Sobre los Bornes Secundarios.....	69
3.3.1.6.	Prueba de Precisión.....	72
3.3.1.7.	Verificación de la marcación de terminales.....	78
3.3.1.8.	Sobrevoltaje Entre Espiras del Transformador de Corriente.....	82
3.3.1.9.	Capacitancia y Factor de Disipación.....	85
3.3.1.10.	Polaridad.....	88
3.3.1.11.	Resistencia de Bobinados.....	92
3.3.1.12.	Prueba de Relación de Transformación.....	94
3.3.1.13.	Resistencia de Aislamiento (IR).....	95
3.3.2.	ENSAYOS SOBRE CAJAS DE MANIOBRA.....	99
3.3.2.1.	Prueba de Resistencia de Contactos.....	100
3.3.2.2.	Prueba de Resistencia de Aislamiento.....	102
3.3.2.3.	Voltaje Aplicado a Frecuencia Industrial.....	104
3.3.2.4.	Prueba de Descargas Parciales.....	106
3.3.2.5.	Pruebas de Operatividad.....	110
3.3.3.	ENSAYOS SOBRE ACEITE AISLANTE.....	110
3.3.3.1.	Prueba de la Rigidez Dieléctrica del Aceite Según ASTM D877.....	110
3.3.3.2.	Prueba de la Rigidez Dieléctrica del Aceite Según ASTM D1816.....	112
3.3.4.	RECOMENDACIONES FINALES SOBRE LOS ENSAYOS.....	114
3.4.	RECOMENDACIÓN DE NORMAS.....	115
3.5.	RECOMENDACIÓN DE EQUIPOS OFERTADOS.....	117
3.5.1.	OPCIÓN PARA ENSAYOS DE ALTO VOLTAJE AC.....	117
3.5.2.	OPCIÓN PARA EL EQUIPO DE MEDICION DE DESCARGAS PARCIALES.....	121
3.5.3.	OPCIÓN PARA LOS EQUIPOS PARA LA PRUEBA DE PRECISIÓN Y POLARIDAD.....	123
3.5.4.	OPCIÓN DE EQUIPO PARA EL ENSAYO DE VOLTAJE INDUCIDO 126	
3.5.5.	OPCIÓN DE EQUIPO PARA EL ENSAYO DE SOBREVOLTAJE ENTRE ESPIRAS.....	127
3.5.6.	OPCIÓN DE EQUIPO PARA EL ENSAYO DE CAPACITANCIA Y TANGENTE DE DELTA.....	128
3.5.7.	OPCIÓN DE EQUIPO PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN LA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO.....	129
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	130
4.1.	CONCLUSIONES.....	130

4.2. RECOMENDACIONES .....	132
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133
ORDEN DE EMPASTADO.....	139

## RESUMEN

El presente trabajo está orientado a la estructuración de una guía técnica de pruebas de aceptación y mantenimiento para dos equipos del sistema eléctrico de medio voltaje, estos son: los transformadores combinados de medida y las cajas de maniobra, además, se realiza la recomendación de los dispositivos de laboratorio necesarios para efectuar dichos ensayos dentro del laboratorio de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) y en campo.

La información necesaria sobre los equipos se obtuvo a través de visitas al laboratorio de transformadores de la EEQ y a las empresas que los fabrican. La investigación de la normativa internacional que se aplica a cada uno de los dispositivos, y las características de los instrumentos para el desarrollo de los ensayos se hizo a través del Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN) y en internet; luego se hizo una clasificación de los ensayos en dos categorías: aquellos que se pueden realizar en las condiciones actuales del laboratorio y los que se podrían realizar a futuro; finalmente se elaboró el manual de pruebas.

La guía técnica resultante utiliza los ensayos de rutina especificados en las normas IEC, ANSI/IEEE y ASTM, su estructura contiene las consideraciones previas a la ejecución de los ensayos, los pasos de cada procedimiento, diagramas de conexión, los instrumentos de laboratorio definidos por cada prueba y los criterios de aceptación o rechazo.

Se recomienda la adopción de estas normas o la implementación de una propia con los ensayos aplicables a los transformadores mixtos y a las cajas de maniobra.

**PALABRAS CLAVE:** Ensayos de rutina, ensayos de mantenimiento, equipos de laboratorio.

## **ABSTRACT**

This article is oriented to the structuring of a technical guide for acceptance and maintenance tests for two equipment of the medium voltage electrical system, these are the combined measurement transformers and the Pad-mounted Load-Interrupter switchgear, also, the recommendation of the laboratory devices necessary to make these tests within the Empresa Eléctrica Quito (EEQ) laboratory and in the field.

The necessary information on the equipment was obtained through visits to the EEQ transformer laboratory and the companies that manufacture it. The investigation of the international standards that apply to each of the devices, and the characteristics of the instruments for the development of the tests, was made through the Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN) and on the Internet. The tests were classified into two categories, those that can be done under the current laboratory conditions and those that could be carried out in the future; finally, the test manual was made.

The resulting technical guide uses the routine tests specified in the IEC, ANSI / IEEE and ASTM standards, its structure contains the pre-test considerations, the steps of each procedure, connection diagrams, the laboratory instruments defined by each test and the acceptance or rejection criteria.

The adoption of these standards or the implementation of one is recommended with the tests applicable to combined transformers and Pad-mounted switchgear.

**KEYWORDS:** routine tests, maintenance tests, laboratory equipment.

# **1. INTRODUCCIÓN**

La vida moderna no sería posible sin la existencia de la energía eléctrica. Se encuentra presente en todas las actividades que desarrolla el ser humano, como el trabajo, la alimentación, la salud, el ocio, etc.

Para que sean eficientes cada uno de los procesos de generación, transmisión y distribución, es necesario que los equipos empleados en el sistema eléctrico sean de buena calidad y trabajen en óptimas condiciones durante toda su vida útil. El deterioro de los equipos eléctricos es normal e inicia en el momento en el que se instalan en las redes eléctricas; si no se verifica puede causar fallas eléctricas, mal funcionamiento y en ocasiones daño permanente [1]. Por esta razón es importante su constante evaluación, cuando llegan de fábrica y durante la operación para realizar el mantenimiento necesario.

El laboratorio de Transformadores de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) realiza ensayos de aceptación y mantenimiento de equipos como transformadores de potencia, seccionadores, celdas de distribución, transformadores de medida y otros equipos eléctricos, pero no todos se prueban bajo las normas propias de cada equipo, por lo que en este proyecto se desarrolla una guía de pruebas de recepción y mantenimiento para cajas de maniobra y para transformadores combinados de medida, además se hace la recomendación de los equipos de laboratorio para realizar los ensayos.

## **1.1 OBJETIVOS**

El objetivo general propuesto para este Proyecto Técnico es:

Elaborar una guía técnica para la ejecución de pruebas de laboratorio de transformadores combinados y de cajas de maniobra del sistema de distribución de la Empresa Eléctrica Quito con sustento en la normativa internacional aplicable.

Los objetivos específicos del Proyecto son:

- Recopilar la información de las características técnicas de los transformadores combinados de medida y cajas de maniobra que se emplean en las redes de distribución de la Empresa Eléctrica Quito, así como de las normativas internacionales utilizadas en la realización de ensayos.
- Sintetizar en una compilación los procedimientos e instrumentos necesarios para llevar a cabo los ensayos necesarios a estos equipos.

- Elaborar un documento que contenga la descripción, pasos, referencias y aparatos de laboratorio de los ensayos de recepción y de mantenimiento tanto para los transformadores de medida como para las cajas de maniobra.
- Recomendar la aplicación de las normativas investigadas para transformadores combinados y cajas de maniobra para que sean añadidas a la normativa nacional a través del Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN.

## **1.2 ALCANCE**

- En este proyecto se elaborará una guía técnica de pruebas de transformadores combinados de medida y cajas de maniobra para la Empresa Eléctrica Quito, para ello se realizarán visitas para hacer el respectivo levantamiento de las características técnicas de los transformadores combinados y de las cajas de maniobra existentes en el laboratorio y bodegas de la EEQ para conocer las marcas que poseen, voltajes y corrientes de operación, y su aplicación a la red de distribución.
- Luego se recopilará la información necesaria acerca de las normas internacionales que rigen los ensayos sobre estos elementos y se llevará a cabo la lectura y comprensión de estas para formular una primera estructura de la guía de pruebas.
- A continuación, se sintetizará, qué instrumentos de medida y de laboratorio se utilizan y qué valores son los esperados, para determinar si se pueden aplicar en las condiciones actuales del laboratorio, o si es necesario acondicionarlo con nuevos equipos para realizarlas a futuro. Se observará también el método de trabajo del personal del laboratorio en la actualidad, para conocer cómo se realizan las pruebas y el proceso de recepción en estos días.
- Al final con la información recabada se procederá a la elaboración de la guía detallando los ensayos que deben ejecutarse con su respectivo alcance, las normas que aplican y los resultados que deben obtenerse para llevar a cabo estos ensayos cada vez que sean requeridos dentro de la empresa, así como los instrumentos y equipos necesarios para cada ensayo.

## **1.3 MARCO TEÓRICO**

### **1.3.1. CAJAS DE MANIOBRA**

Son equipos de seccionamiento constituidos por seccionadores de tipo ON – OFF y conectores elastoméricos de medio voltaje, cuya función es habilitar la operación de dos o

más circuitos bajo carga en sistemas de este tipo [2]. Pueden ser de 2, 3, 4, 5 y hasta 6 vías para sistemas monofásicos, bifásicos y trifásicos [3]. La Figura 1.1 presenta una caja de maniobras como las que se comercializan en el Ecuador.



**Figura 1.1.** Caja de maniobras [2].

Se aíslan en aceite dieléctrico, sólido dieléctrico o en hexafluoruro de azufre SF<sub>6</sub>, esto a causa de que los seccionadores se operan bajo carga [4]. Su construcción debe ser robusta, es decir, que casi no sea necesario realizar mantenimientos en su estructura, son de accionamiento manual y todas las conexiones se realizan dentro de la cuba dependiendo de la configuración requerida para garantizar los niveles de voltaje y corriente en cada una de las salidas [5].

Está diseñada para sistemas de distribución subterráneos, con capacidad de voltaje desde 15kV hasta 34,5 kV, un BIL (Nivel Básico de Aislamiento) hasta de 150 kV y capacidad de corriente de 200 A y 600 A son ideales para aplicaciones en servicios públicos, seccionamiento de alimentadores y aplicaciones de protección de circuitos [6] [3].

### **1.3.1.1 Características Constructivas**

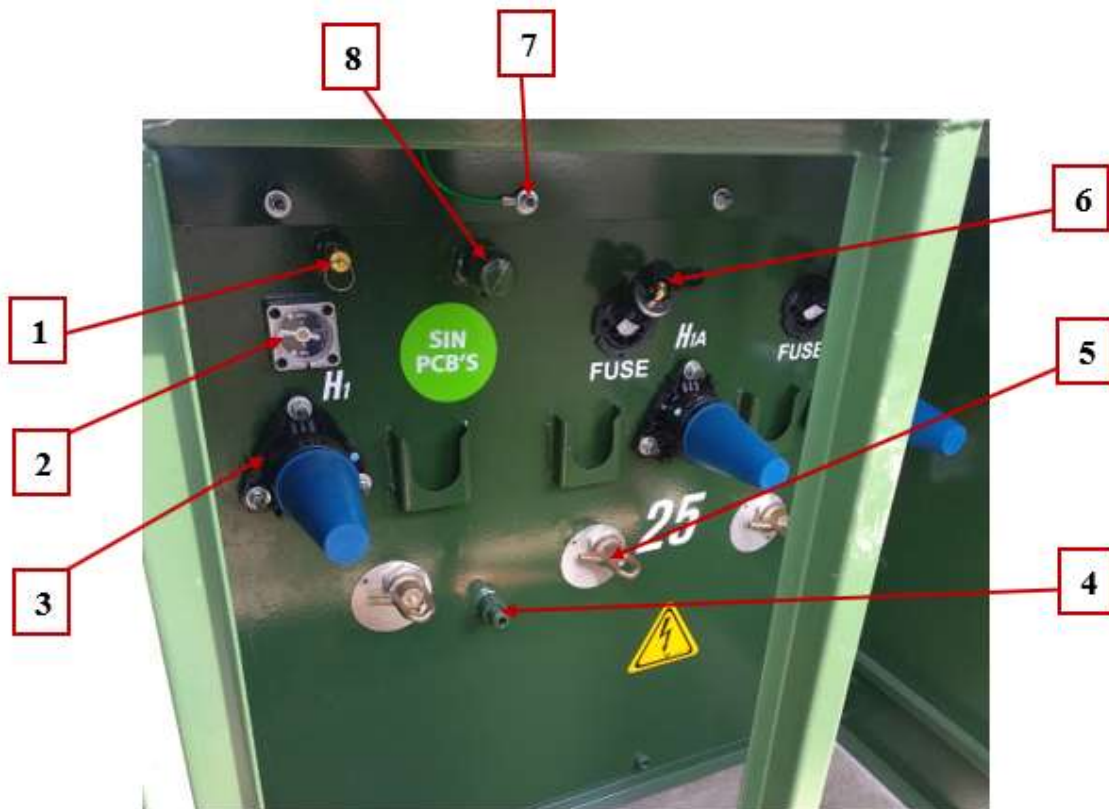
#### **1.3.1.1.1 Tanque**

El tanque es la parte externa del equipo, fabricado de materiales resistentes a la corrosión o con un acabado que soporte golpes y el desgaste, debe ser adecuado para la instalación en áreas descubiertas presentando un grado de protección IP 55 y no debe almacenar agua en ninguna de sus superficies. La estructura está construida en hierro laminado sellado de forma hermética para evitar fugas del líquido o gas aislante, las puertas de

acceso a sus compartimentos pueden ser frontales o de apertura vertical, deben ser lo suficientemente grandes para permitir el trabajo en el equipo [7].

En la Figura 1.2 se indican algunas de las partes del dispositivo.

1. Válvula de alivio de presión
2. Indicador del nivel de aceite
3. Buje Tipo pozo
4. Toma De Muestra Y Drenaje De Aceite
5. Seccionador bajo carga (ON-OFF) Sumergido en aceite
6. Porta fusible tipo BAY-O-NET
7. Puesta a tierra del tanque
8. Toma Para Llenado De Aceite



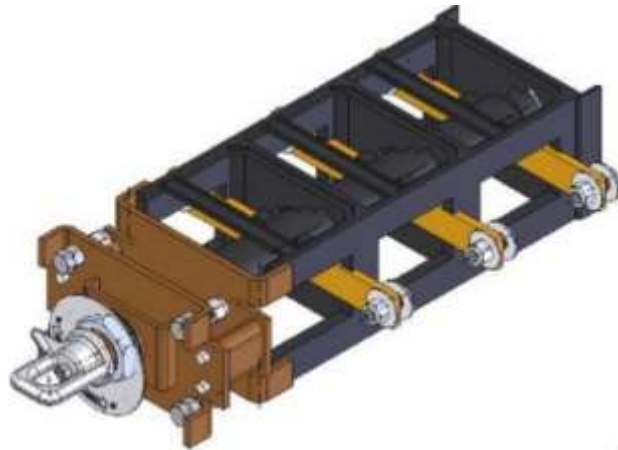
**Figura 1.2.** Partes del tanque de una caja de maniobras monofásica  
[Elaboración propia].

### 1.3.1.1.2 Seccionador

Es un interruptor de dos posiciones, que puede ser monopolar o tripolar, su propósito es aislar eléctricamente a un circuito eléctrico o a un equipo de la red eléctrica para realizar



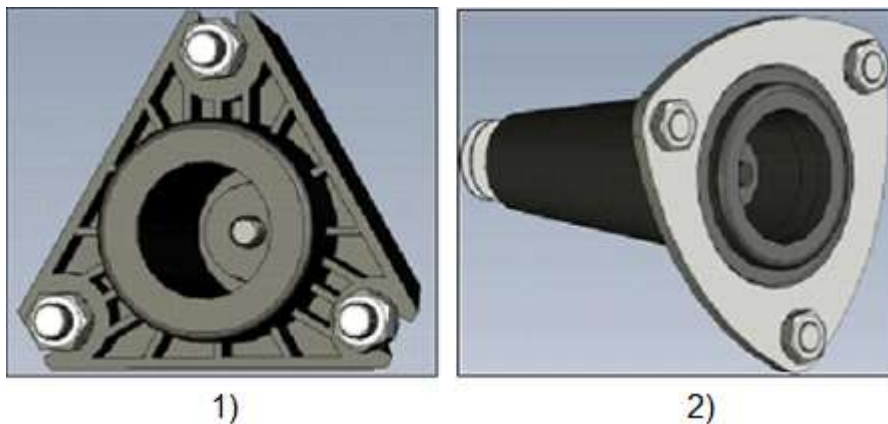
una reconfiguración del sistema o también mantenimiento [8]. En la Figura 1.3 se aprecia la representación de este seccionador.



**Figura 1.3.** Seccionador de dos posiciones (ON - OFF) [8].

#### 1.3.1.1.3 Bujes y Conectores

- a) *Buje tipo pozo*: Colocado en el tanque, posee una abertura donde se introduce otro dispositivo que puede ser un buje tipo inserto, sirve de interfaz entre los accesorios exteriores de conexión al sistema (conectores de tipo codo) y el cableado estructural interno [8]. La Figura 1.4. se presentan dos tipos de bujes: el convencional y el que se emplea en cajas de maniobra tipo sumergible.



**Figura 1.4.** 1) Buje tipo pozo convencional. 2) buje tipo pozo sumergible [8].

- b) *Buje tipo inserto*: Se usa dentro del buje tipo pozo para acoplar un terminal tipo codo, aísla las conexiones para permitir la operación bajo carga de forma adecuada, por su estructura son sencillos de instalar y cambiar en el campo [8]. En la Figura 1.5. se observa un buje tipo inserto.



**Figura 1.5.** Buje tipo inserto. [Elaboración propia].

- c) *Conector tipo codo*: Es un tipo de conector al que se acopla el cable de medio voltaje y lo enlaza al buje de la caja de maniobra. Su diseño permite que, cuando está colocado, los ejes del conductor y el buje sean perpendiculares entre sí [8]. La Figura 1.6 presenta un conector tipo codo.



**Figura 1.6.** Conector tipo codo. [Elaboración Propia].

#### **1.3.1.1.4 Conexiones Internas**

Las conexiones de alto voltaje en el interior de la caja de maniobras se realizan con cables aislados en papel y aceite, o en ocasiones a través de barras [9]. En la Figura 1.7. se observa el cableado interno de una caja de maniobras, los cables están cubiertos con papel de celulosa impregnado en aceite.



**Figura 1.7.** Cableado interno [Elaboración propia].

#### 1.3.1.1.5 Aislamiento

- a) *Aceite Mineral:* Es un aislamiento a prueba de tiempo a base de la destilación fraccionada del petróleo bruto. Dentro de las cajas de maniobra cumple con dos objetivos, estos son aislar los circuitos internos, así como agregar un beneficio de enfriamiento al extraer el calor de los cables y barrajes que se encuentran en el interior del tanque [6] [10].

Sus principales características son:

- Tener una rigidez dieléctrica confiable y normalizada.
  - Mantener una alta calidad de enfriamiento
  - Debe ser de viscosidad baja
  - Tener un punto de congelación bajo y uno de ignición elevado
  - Proporcionar protección a otros sistemas aislantes como el papel [10].
- b) *Gas:* Ofrece una resistencia dieléctrica significativamente mejorada en comparación con el aire. El gas más comúnmente utilizado es el hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ).
- c) *Aire:* Es el aislante más común y el menos costoso. Sin embargo, el aire también tiene las propiedades de resistencia dieléctrica más bajas y requiere equipos físicamente más grandes y resistentes para soportar los efectos de un arco eléctrico [6].

### 1.3.1.1.6 Protecciones

*Fusible tipo Bay-O-Net:* Es un tipo de fusible de expulsión para alto voltaje con capacidad de corte de 3800 A a 8,3kV; de diseño rompe-carga, es extraíble a través del uso de pértigas manuales; se le conoce también como sensor de sobrecarga [11]. La Figura 1.8 presenta un fusible tipo BAY-O-NET con su respectivo portafusible.



**Figura 1.8.** Fusible tipo BAY-O-NET [Elaboración propia].

### 1.3.1.2 Tipos de Cajas de Maniobra

Su diseño y construcción permite clasificarlas de la siguiente manera:

a) Por el tipo de malla:

- *Tipo malla secuencial:* Dentro de la estructura se encuentran conectadas una entrada, una salida y una derivación, todas a través de un seccionador de cuatro posiciones que opera de manera secuencial bajo carga [8].
- *Tipo malla selectiva:* constituida por una entrada, una salida y varias derivaciones, para su operación se utilizan seccionadores ON-OFF, uno por cada circuito [8]. Dentro del mercado ecuatoriano esta es la más común.

b) Por la posición de las puertas de acceso:

- *Con puertas laterales en ambas caras:* Son equipos compactos de poco tamaño, por lo que son menos costosos, sus puertas son de apertura vertical, el acceso a los conectores se realiza tanto por la parte de enfrente como por la parte posterior del equipo [12]. En la Figura 1.9 se observa una caja de maniobras de este tipo.
- *Con puertas frontales:* La estructura de las puertas es de tipo armario, su apertura es horizontal permitiendo el acceso a los conectores solo por la

parte frontal del equipo [12]. Se presenta una caja de maniobra con puertas frontales en la Figura 1.9.



**Figura 1.9.** Caja de maniobras 1) Con puertas laterales en ambas caras. 2) Con puertas frontales [12].

c) Por el lugar de instalación:

- *Tipo pedestal (Padmounted):* Son de uso a la intemperie, resistentes contra la lluvia, humedad, sol y otras condiciones ambientales que pueden causar averías a futuro [5].
- *Tipo sumergible:* Son equipos en los cuales el interruptor y sus accesorios funcionan en el interior de una bóveda o una ubicación inferior al nivel del suelo que por lo general están sujetos al ingreso de agua, por lo que este tipo de dispositivo permite al usuario la operación manual desde arriba [6]. Se observa en la Figura 1.10 una caja de maniobras tipo sumergible.



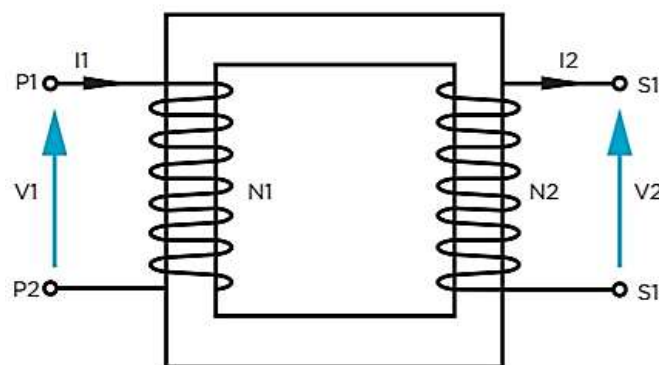
**Figura 1.10.** Caja de maniobras tipo sumergible [6].

### 1.3.2 TRANSFORMADORES COMBINADOS DE MEDIDA

Los transformadores de medida son equipos de características constructivas especiales diseñadas para la medición de la energía. Son máquinas eléctricas que aprovechan las propiedades electromagnéticas de la corriente alterna y de los materiales ferromagnéticos para variar las características eléctricas que se producen a la entrada hasta conseguir las deseadas en la salida con muy poca pérdida de energía [13]. Se observa en la Figura 1.11. el diagrama esquemático de un transformador.

Consta de:

- *Devanado Primario*: es una bobina conductora que se encuentra conectada a la red de alimentación.
- *Núcleo ferromagnético*: su función es ser el eslabón que transfiere la energía entre el bobinado primario y el secundario.
- *Devanado secundario*: es una bobina conductora a la que se conectan los instrumentos de medición [13].



**Figura 1.11.** Diagrama esquemático de un transformador [13].

La diferencia que existe entre las partes del primario con las del secundario permite conseguir la variación de la energía que se manifiesta en uno y otro. El contraste que más sobresale es el número de espiras, en un transformador de acuerdo con la ecuación (1.1) se cumple que:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (1.1)$$

Dónde:

$I_1$  = Intensidad Primaria

$I_2$  = Intensidad Secundaria

$V_1$  = Diferencia de potencial primaria

$V_2$  = Diferencia de potencial Secundaria

$N_1$  = Número de espiras primarias

$N_2$  = Número de espiras secundarias

A esta razón se le denomina relación de transformación, en los transformadores de medida se trata de conseguir que ésta relación sea muy precisa, es decir que fije de forma exacta la proporción entre: las corrientes primaria y secundaria que nos permite tener un transformador de corriente (TC), y de la misma manera lo sea la relación entre los voltajes del primario y el secundario obteniendo un transformador de potencial (TP) [13].

EL transformador combinado de medida es un dispositivo electromagnético que reúne en un solo cuerpo un transformador de corriente y un transformador de potencial, se utilizan para convertir altos voltajes y corrientes en valores estandarizados para la conexión de dispositivos de protección y medición. Son equipos compactos, de fácil instalación y ocupan un espacio reducido sustituyendo a una instalación tradicional de varios transformadores de corriente y voltaje por separado [14] [15].

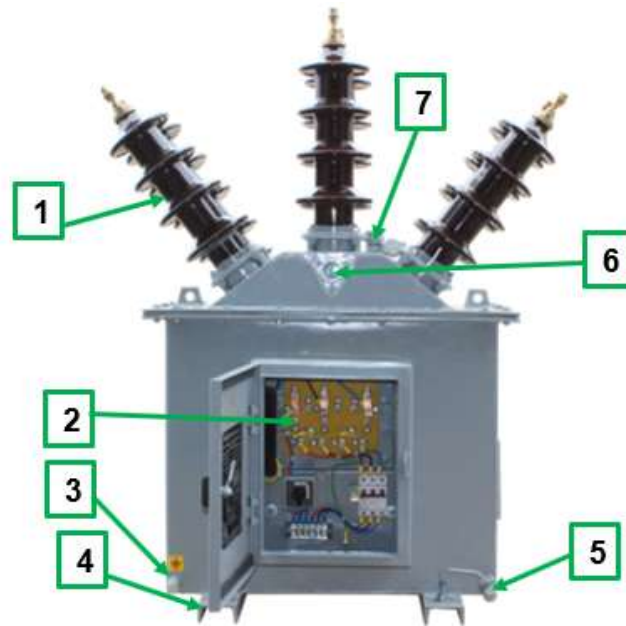
### **1.3.2.1 Características Constructivas**

Contenidos en un solo cuerpo, se encuentran un transformador de corriente TC y un transformador de Potencial TP, aislados en aceite o en solido de resina, sus principales componentes son:

#### **1.3.2.1.1 Tanque**

En el tanque se encuentran sus principales componentes, estos se pueden observar en la Figura 1.12 y son:

1. Bujes de porcelana para línea de alto voltaje
2. Caja de conexiones
3. Puesta a tierra del tanque
4. Bases para anclaje
5. Toma de muestra y drenaje del aceite
6. Indicador del nivel de aceite
7. Tapón de llenado



**Figura 1.12.** Transformador combinado de medida trifásico [16].

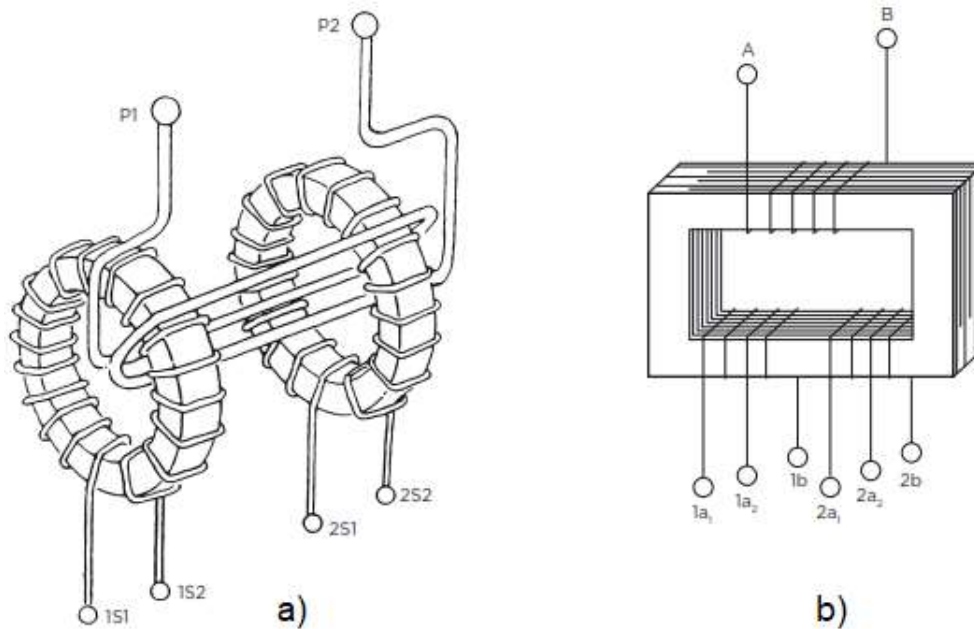
#### **1.3.2.1.2 Transformador de Corriente**

En un transformador de corriente el bobinado primario está formado por una o varias espiras que se conectan en serie con el circuito al que se quiere medir; mientras que el bobinado secundario permite la conexión de los circuitos de corriente de uno o varios dispositivos de medida. Pueden existir uno o diversos arrollamientos secundarios cada uno con su núcleo independiente, este núcleo es de forma toroidal el cual se puede observar en la Figura 1.13. a) [17].

#### **1.3.2.1.3 Transformador de Voltaje**

El primario del transformador está conectado a los bornes entre los que se quiere medir y el secundario se conecta a diferentes aparatos de medición de voltaje conectado en paralelo. Fabricados habitualmente con núcleo en forma rectangular (ver Figura 1.13. b)) con las bobinas secundarias sobre el mismo núcleo por lo que no existe independencia electromagnética entre ellos [17].





**Figura 1.13.** a) Transformador de corriente con núcleos independientes. b) Transformador de voltaje con varios secundarios en un mismo núcleo [17].

#### 1.3.2.1.4 Aislamiento

En todo transformador de medida se debe separar de manera conveniente los circuitos entre sí y del exterior. En los devanados se aísla cada espira de la que se encuentra a continuación para que la corriente las atraviere ordenadamente una después de otra. Para el caso del cobre esmaltado, ya se tiene un primer aislamiento que se refuerza con capas de papel impregnado de gas aislante Hexafluoruro de Azufre ( $\text{SF}_6$ ) o de aceite. Como separación entre una bobina y otra también se utiliza el papel impregnado o resina (hasta medio voltaje). Con el mismo tipo de aislamiento se recubre el núcleo respecto a cada devanado [13].

El aislamiento interno de un transformador mixto es de diferentes materiales dieléctricos como el aceite mineral, resina sintética, hexafluoruro de hidrógeno  $\text{SF}_6$  o aceite biodegradable [16].

### 1.3.3. ENSAYOS DE LABORATORIO Y NORMATIVA

En la actualidad, el desarrollo de los sistemas eléctricos ha crecido en gran medida a causa de la gran demanda de energía eléctrica, pues el mundo moderno depende de ella casi en su totalidad. Por lo tanto, la generación, transmisión y distribución de la energía requiere la construcción de sistemas confiables y seguros que permitan llevar la electricidad a todos

los lugares donde es requerida; esto implica que todos los equipos involucrados dentro del sistema deben estar operativos y provocar el mínimo de fallas. Es esta la razón de realizar constantes estudios a los dispositivos del sistema y a las condiciones de servicio que deben cumplir [18].

### **1.3.3.1. Normativa**

#### **IEEE Std C37.74-2014**

IEEE Standard Requirements for Subsurface, Vault, and Padmounted Load-Interrupter Switchgear and Fused Load-Interrupter Switchgear for Alternating Current Systems up to 38 kV. Contiene las definiciones requeridas, clasificaciones, procedimientos para realizar ensayos tipo y de rutina, y los que se requieren para la construcción de la cámara acorazada Padmounted, e interruptores de carga con o sin fusibles para sistemas de corriente alterna hasta 38 kV de voltaje nominal máximo [7].

#### **IEC 61869–1:2007**

Instrument Transformers - Part 1: General Requirements. Esta norma internacional es aplicable a los transformadores de instrumentos recién fabricados con salida analógica o digital para su uso con instrumentos de medición eléctrica o dispositivos de protección eléctrica con frecuencias nominales de 15 Hz a 100 Hz. Es el reemplazo de la serie IEC 60044 y el primer número de la nueva serie. Contiene los requisitos generales para los transformadores de instrumentos y debe complementarse con las normas de requisitos específicos [19]. Detalla los ensayos tipo, rutina y especiales que certifican la calidad de los dispositivos.

#### **IEC 61869–2:2012**

Instrument Transformers - Part 2: Specific Requirement for Current Transformers. Este estándar es aplicable a los transformadores de corriente inductivos de fabricación reciente para su uso con instrumentos de medición y/o protección eléctrica con frecuencias nominales de 15 Hz a 100 Hz [20].

#### **IEC 61869–3:2011**

Instrument Transformers - Part 3: Additional Requirements for Inductive Voltage Transformers. Esta norma se aplica a los transformadores de voltaje que se utilizan para medición y/o protección, es la parte 3 de la serie que complementa a la parte 1 con criterios específicos para los transformadores de potencial [21].

### **IEC 61869–4:2013**

Instrument Transformers - Part 4: Additional Requirements for Combined Transformers. se aplica a los transformadores combinados de fabricación reciente para su uso con instrumentos de medición eléctrica y dispositivos de protección eléctrica a frecuencias de 15 Hz a 100 Hz. Esta norma sugiere que si bien, dentro de la misma cuba se encuentran el transformador de corriente y el transformador de potencial, estos deben ensayarse por separado, a excepción del ensayo de precisión el cual toma en cuenta la influencia del transformador de corriente sobre el de voltaje y viceversa [22].

### **IEC 60060–1:2010**

High Voltage Tests Techniques – Part 1: General Definitions and Test Requirements. En esta norma se presentan los lineamientos que se aplican a las pruebas dieléctricas con: voltaje alterno, voltaje directo, voltaje de impulso, y una combinación de estos. Este documento aplica en ensayos sobre equipos que tienen un voltaje más alto para equipo  $U_m$  superior a 1kV [23].

### **IEEE Std C57.13-2016**

IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers. Se indican las características eléctricas, dimensionales y mecánicas, teniendo en cuenta cierto grado de seguridad, para los transformadores de corriente y de voltaje de acoplamiento inductivo que son utilizados en la medición de electricidad y el control de equipos asociados con la generación, transmisión y distribución de corriente alterna. El objetivo es proporcionar una base para el rendimiento y la intercambiabilidad de los dispositivos cubiertos y ayudar en la selección adecuada de estos. También se abordan las precauciones de seguridad. Se proporcionan clases de precisión para el servicio de medición [24].

### **ANSI/NETA MTS-2007**

Standard for Maintenance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems. El propósito de esta especificación es asegurar que los equipos y sistemas eléctricos probados estén operativos, cumplan con las normas aplicables, las tolerancias del fabricante, y sean adecuados para un servicio continuo. Esta norma incorpora exhaustivas pruebas e inspecciones de campo que evalúan la capacidad para un servicio continuo, condiciones de mantenimiento y la confiabilidad de los equipos y sistemas de distribución de energía eléctrica [25].

## **ASTM D877**

Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes. Señala la aplicación de dos procedimientos diferentes para la evaluación de la rigidez dieléctrica del aceite aislante, utiliza voltajes alternos con frecuencias entre 45 y 65 Hz y los electrodos que se usan en la descarga son en forma de discos. Esta norma es ampliamente utilizada sobre aceites que ya se encuentran en uso [26].

## **ASTM D1816-12**

Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes. Se usa para evaluar la rigidez dieléctrica del aceite a través de electrodos VDE. El método de prueba es sensible a los efectos nocivos de la humedad en la solución, especialmente cuando hay fibras de celulosa presentes en el líquido. Se ha encontrado que es especialmente útil en el diagnóstico y las investigaciones de laboratorio de la resistencia a la ruptura dieléctrica del líquido aislante dentro de los sistemas de aislamiento [27].

### **1.3.3.2 Definiciones**

- *Voltaje más elevado para equipo ( $U_m$ ):* Es el valor r.m.s. más elevado de voltaje fase- fase para el que está diseñado el equipo con respecto a su aislamiento [19].
- *Transformador de potencial no conectado a tierra:* Es un transformador que tiene todas las partes de su devanado primario, incluidos los terminales, aislados de tierra a un grado correspondiente a su nivel de aislamiento nominal [21].
- *Transformador de potencial conectado a tierra:* Es un transformador de voltaje monofásico que tiene un extremo de su devanado primario conectado a tierra directamente, o un transformador de voltaje trifásico que tiene el punto de estrella de su devanado primario conectado a directamente a tierra [21].
- *Error de relación ( $\varepsilon$ ):* Es el error que un transformador de instrumentos introduce en la medición y que surge del hecho de que la relación de transformación real no es igual a la relación de transformación nominal [19].
- *Desplazamiento de fase ( $\Delta\varphi$ ):* Es la diferencia entre los fasores de corriente o voltaje primarios y los fasores secundarios. El desplazamiento de fase es positivo si el fasor de corriente o voltaje secundario adelanta al primario [19].

- *Clase de precisión:* Designación dada a un transformador de instrumentos cuyos errores de relación y desplazamiento de fase permanecen dentro de los límites especificados en las condiciones de uso prescritas [19].
- *Corriente térmica nominal de corta duración ( $I_{th}$ ):* Valor r.m.s. de la corriente primaria que puede soportar un transformador durante un segundo sin sufrir daños cuando se cortocircuita el secundario [19].
- *Corriente dinámica nominal ( $I_{dyn}$ ):* Es el valor r.m.s. de la corriente primaria que un transformador de instrumentos puede soportar sin sufrir daños debido a las fuerzas electromagnéticas resultantes cuando se cortocircuita la bobina secundaria [19].

### 1.3.3.3 Clasificación de Ensayos

Los ensayos son necesarios para demostrar que el equipo bajo prueba cumple los requisitos específicos y los estándares de calidad [28]. De acuerdo con las normas [7] [19] existen tres tipos de pruebas que se conocen como pruebas tipo, de rutina y especiales. En el artículo [29] se menciona dos clasificaciones más, las pruebas de aceptación y de mantenimiento. En este documento se describen algunos ensayos adicionales sobre el aceite.

#### 1.3.3.3.1 Pruebas Tipo

Son ensayos que se realizan a los equipos para demostrar que cumplen con los requisitos de calidad, en la etapa de diseño, dados en normas. Se ejecutan sobre una muestra de cada modelo. Con estas pruebas se puede justificar que los dispositivos fabricados con el mismo esquema son válidos [28] [30].

Dentro de este grupo de pruebas se encuentran los siguientes ensayos:

#### **Incremento de Temperatura**

La energía térmica dentro de los núcleos de los transformadores provoca en el material ferromagnético una desalineación en sus dipolos magnéticos. Según la ley de Curie, al incrementar la temperatura en los materiales ferromagnéticos, estos pierden su capacidad magnética es decir se tornan menos magnéticos o paramagnéticos [31].

La prueba de aumento de temperatura se utiliza para validar la capacidad de los equipos para soportar una temperatura nominal dentro de un marco de tiempo operativo [32].

Para efectuar la prueba se coloca el transformador con las conexiones operativas adecuadas, y se mide el incremento de la temperatura en los devanados por el método de resistencias o con termocuplas [19].

## Humedad

Esta prueba se realiza con la finalidad de comprobar que el aislamiento exterior de ciertos equipos, como en los transformadores, puede soportar voltajes más altos de lo habitual incluso en condiciones desfavorables como cuando operan bajo la lluvia [30].

## Prueba de Impulso

Los ensayos de impulso se realizan en los diferentes dispositivos eléctricos para determinar que su aislamiento es capaz de soportar de forma satisfactoria los posibles sobrevoltajes que puedan ocurrir debido a: descargas atmosféricas (impulso tipo rayo) o maniobra de disyuntores o seccionadores (impulso tipo maniobra) [30].

La prueba consiste en aplicar una voltaje de ensayo con una forma de onda normalizada, la cual se indica en la Figura 1.14 para impulso tipo rayo y en la Figura 1.15 para impulso tipo maniobra; este se aplica tanto para polaridades positivas como negativas, y se deben emplear quince impulsos consecutivos por cada polaridad. El equipo pasa la prueba si después de los dos grupos de descargas no existen interrupciones [19] [7].

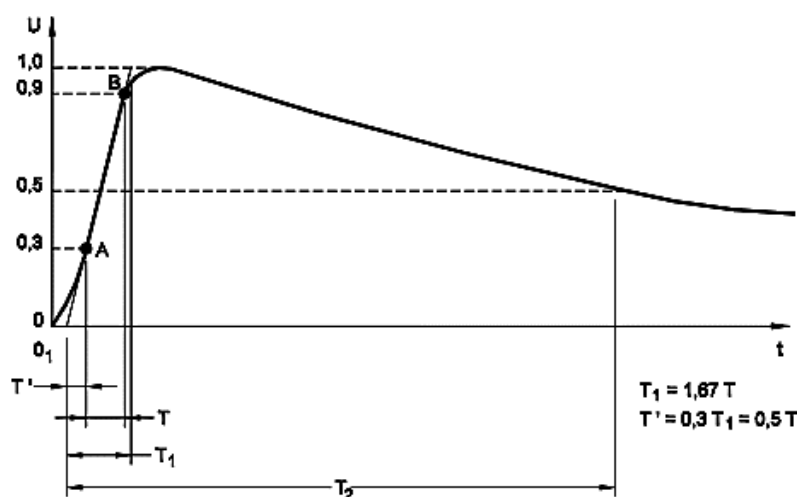
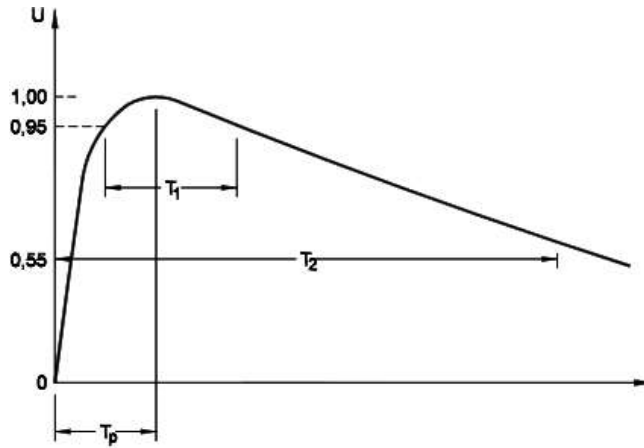


Figura 1.14. Forma de onda del Impulso tipo rayo normalizado [23].



**Figura 1.15.** Forma de onda del Impulso tipo maniobra normalizado [23].

### Compatibilidad Electromagnética EMC

Se usa para garantizar que el dispositivo evaluado no emita una gran cantidad de interferencia electromagnética y continúe su funcionamiento sin perturbaciones en presencia de varios fenómenos electromagnéticos [33].

Esta prueba se realiza colocando el dispositivo de prueba completo con todos sus accesorios, seco y limpio, a la misma temperatura del laboratorio, verificado que sus conexiones no produzcan interferencia; el voltaje de ensayo se debe aplicar entre uno de los terminales del devanado primario y la tierra, mientras lo que no va a medirse se conecta a tierra. Se aplica un voltaje de acondicionamiento  $U_a$  que se obtiene con la ecuación (1.2) durante 30 s y luego este se reduce en un tiempo de 10 segundos a un valor de  $U_{a1}$  definido en la ecuación (1.3), finalmente mantenerse en ese valor por 30 segundos antes de tomar la medición de las perturbaciones radioeléctricas. Se considera que el dispositivo pasa la prueba si el voltaje de radio interferencia no excede a 2500  $\mu\text{V}$  [19].

$$U_a = 1,5 \times \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (1.2)$$

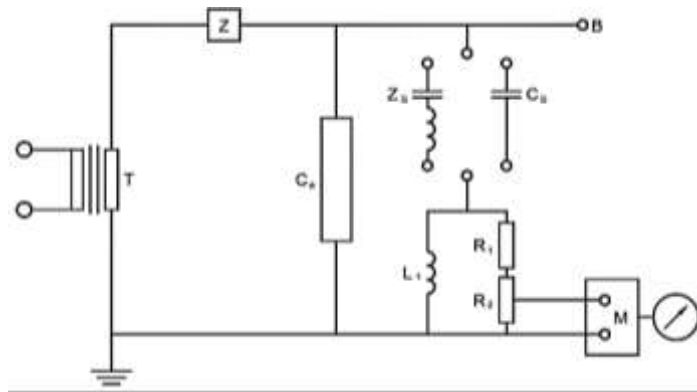
$$U_{a1} = 1,1 \times \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (1.3)$$

Donde:

$U_a$  y  $U_{a1}$  = voltajes de acondicionamiento

$U_m$  = voltaje más alto para equipo

En la Figura 1.16. se observa el diagrama del circuito de medición de perturbaciones radioeléctricas.



**Figura 1.16.** Circuito de medición de perturbaciones radioelétricas [19].

### **Resistencia de Corrientes de Cortocircuito.**

El propósito de esta prueba es verificar que el dispositivo a evaluar es capaz de transportar una corriente nominal de cortocircuito, incluidas la corriente pico nominal soportada y la corriente nominal soportada de corta duración para el tiempo requerido.

Todas las partes metálicas del dispositivo de prueba deben estar conectados para las pruebas a corriente pico soportada y de corta duración. Solo se deben probar los conductos, interconexiones, interruptores de puesta a tierra y barras calificados para soportar el cortocircuito [7].

### **Verificación del Grado de Protección de los Encapsulados**

Se lleva a cabo esta prueba para verificar la protección que deben dar los encapsulados contra el ingreso de partículas o agua y su resistencia a golpes mecánicos [30].

Un grado incorrecto de protección de la cuba puede ocasionar fallas dentro de una instalación, afectar el servicio eléctrico y atentar contra la seguridad de la instalación y de las personas. Dentro de esta prueba se debe verificar el código IP (Ingress Protection) este es una composición de caracteres alfanuméricos que indican el nivel de protección de la caja contra ingreso de agua y polvo, y también contra contactos directos [34].

Además, se hace una prueba mecánica donde se aplican golpes a los puntos del recinto que se consideran débiles [19].

### **Estanqueidad del Encapsulado a temperatura ambiente**

La estanqueidad del encapsulado quiere decir que este es totalmente hermético a la entrada de polvo, agua y partículas extrañas [34]. Esta prueba es importante para dispositivos que están aislados con gas. Cada abertura del encapsulado se sella con el dispositivo de cerrado original, la caja se llena con la mezcla de gases que se utiliza en servicio a la



presión de relleno nominal y a una temperatura ambiente de 20°C. El ensayo sigue el método acumulativo, la sensibilidad de la medición debe ser de 0,25%/año [19].

### **Presión Sobre el Encapsulado**

El objetivo de esta prueba es evidenciar que el encapsulado metálico puede soportar la presión del gas aislante en su interior. Es una prueba que se lleva a cabo en dispositivos aislados en SF<sub>6</sub> [19].

#### **1.3.3.3.2 Pruebas de Rutina**

Son pruebas para la verificación de la calidad en los procesos de fabricación. Estas deben revelar que el equipo es capaz de soportar condiciones de estrés que pueden presentarse durante el periodo de servicio sin perjudicar las propiedades y la fiabilidad del objeto de prueba [28] [19].

Se utilizarán estos experimentos para la construcción del manual, dentro de ellos encontramos los siguientes:

### **Voltaje Aplicado A Frecuencia Industrial**

El ensayo de voltaje aplicado se especifica para demostrar que el aislamiento interno de los dispositivos evaluados sea el adecuado, y así asegurar que este resistirá los esfuerzos eléctricos a los que será sometido durante su operación en el sistema [35].

Se realiza la prueba con un voltaje alterno, de onda sinusoidal y a frecuencia industrial, es decir 60 Hz. El voltaje de ensayo se define como su valor de cresta dividido por  $\sqrt{2}$  [23].

La norma IEC 61869-1 indica que para los transformadores de medida que se utilizan en alturas mayores a 1000 m, el voltaje de descarga disruptivo para el aislamiento externo es afectado por la reducción de la densidad del aire, por lo que se debe aplicar un factor de corrección por altitud, el cual se obtiene con la ecuación (1.4) y se puede observar en la Figura 1.17 [19].

$$k = e^{m \cdot \left( \frac{H-1000}{8150} \right)} \quad (1.4)$$

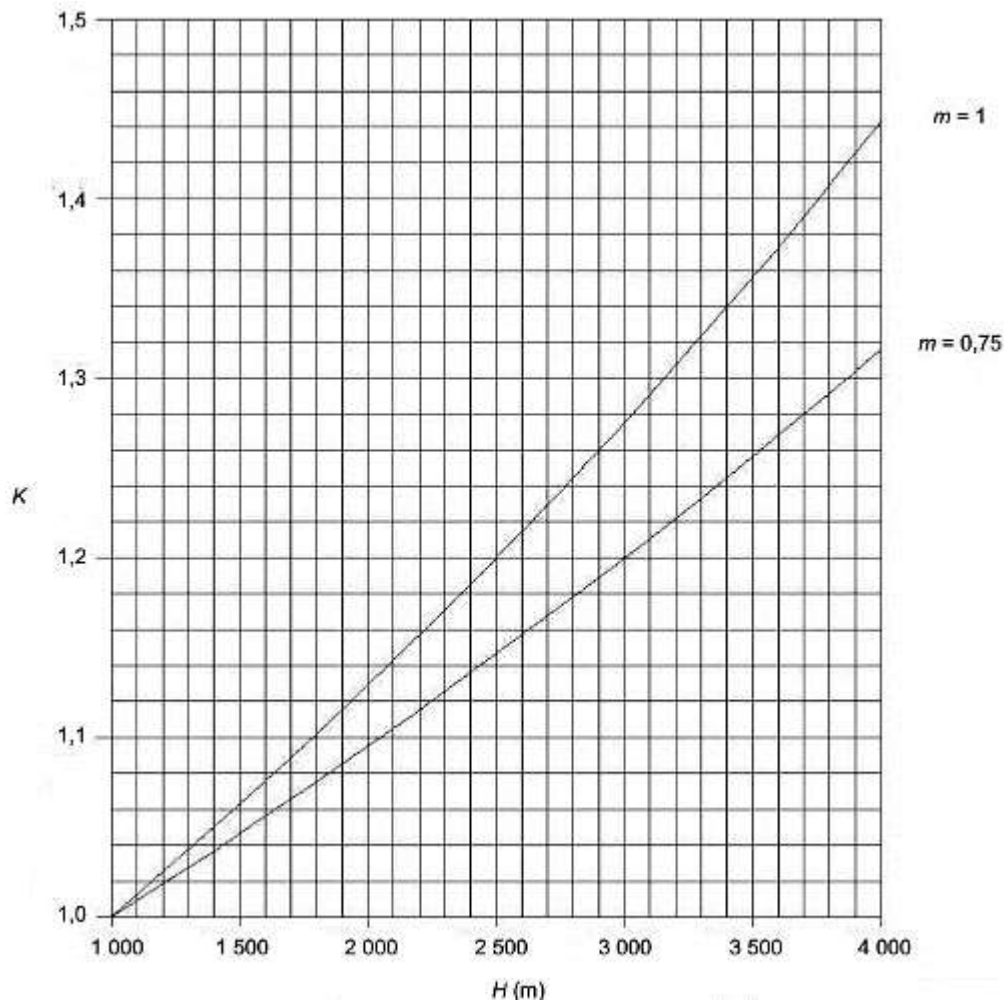
Donde:

$k$  = Factor de corrección por altitud que se obtiene de las curvas de la Figura 1.17.

$H$  = Es la altura en metros

$m = 1$  para frecuencia industrial y voltaje de impulso tipo rayo

$m = 0,75$  para voltaje de impulso tipo maniobra



**Figura 1.17.** Factor de corrección por altitud [19].

Mientras que la norma IEEE C37.74 indica que para las cajas de maniobra se aplique un factor de corrección por altitud de acuerdo con la norma IEC 60071-2:1996, el cual se obtiene con la ecuación (1.5) [36].

$$k_a = e^{m\left(\frac{H}{8150}\right)} \quad (1.5)$$

Donde los parámetros son los mismos que los descritos en la ecuación (1.4).

### **Voltaje Inducido**

Es un ensayo que permite probar si el aislamiento entre espiras, capas y secciones de las bobinas del transformador de instrumentos es de la calidad necesaria. Se aplica un voltaje,

el doble de nominal, en el devanado secundario. El flujo de trabajo en el núcleo está determinado por la ecuación (1.6) [37]:

$$\phi_{max} = \frac{E}{4,44 \cdot f \cdot N} \quad (1.6)$$

Donde:

$\phi_{max}$  = es el flujo de trabajo máximo en el núcleo del transformador.

$E$  = es la fuerza electromotriz f.e.m. del primario o del secundario

$f$  = es la frecuencia de trabajo

$N$  = es el número de espiras del devanado primario o secundario.

Si se aplica un voltaje dos veces el nominal, el flujo también se incrementa causando que se sature el núcleo; para evitar este efecto negativo se aumenta la frecuencia a un valor de 120 Hz [37].

### **Descargas Parciales**

Las descargas parciales (DP) son descargas dieléctricas que surgen dentro de un área parcial del sistema de aislamiento eléctrico sólido o líquido que es sometido al estrés de altos voltajes [38].

Una medición de DP es una herramienta no destructiva con el objetivo de determinar la condición del aislamiento del objeto de ensayo y cerciorarse de que no existen fuentes de descargas parciales posterior a pruebas de alto voltaje o después de la operación normal del equipo dentro del sistema eléctrico [39].

Es recomendable hacer una valoración de descargas parciales de diagnóstico cuando se obtienen valores anormales, como el incremento de gas disuelto en el aceite o luego de una medición de DP que ha fallado durante las pruebas de aceptación [38].

### **Precisión**

Los transformadores de medida pueden desarrollar desviaciones de relación y fase. Una mala operación del transformador, con cargas, corrientes o voltajes que sean diferentes a las habituales, puede causar cambios en el error de relación y el desplazamiento de fase. Esto puede provocar errores de lectura, pérdidas en la entrada y en algunos casos, existen espiras cortocircuitadas, por lo que debe observarse la conexión de los bornes secundarios

para evitar cortocircuitos especialmente en los TPs. Esta prueba puede realizarse durante la producción, en laboratorios de pruebas o cuando el equipo ya está instalado en el campo [40]. La prueba de precisión tiene por objetivo comprobar que el transformador cumple con los límites de error correspondientes a la clase de precisión asignada [30].

### **Sobrevoltaje Entre Espiras**

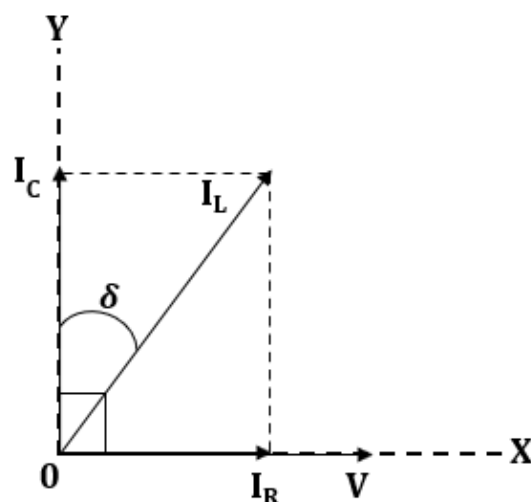
Es una prueba que solo se realiza a los transformadores de corriente, sirve para verificar que el aislamiento entre espiras y capas de una bobina se encuentre en óptimas condiciones [30].

### **Verificación de la Marcación de Terminales**

La conexión errónea de equipos puede causar daños en su estructura interna o fallas en el aislamiento, rotura del equipo e incluso incendios. Por ello se realiza la verificación visual de la marcación en los terminales, para evitar errores al conectar los equipos a la red [30].

### **Capacitancia y factor de disipación**

Un aislante puro (ideal) cuando se conecta entre la línea y tierra se comporta como un capacitor, la corriente que lo atraviesa solo tiene una componente capacitiva más no una resistiva; en la práctica, debido al envejecimiento, las impurezas y la humedad, no existen materiales aislantes totalmente puros; como consecuencia, fluye una corriente de fuga a través del aislante con una componente resistiva [41].



**Figura 1.18.** Diagrama vectorial de la corriente de fuga de un aislante [41].

En los materiales aislantes de buena calidad la relación entre la componente capacitiva y resistiva es baja; esta dependencia se conoce como tan-delta o factor de disipación [41] y se puede apreciar en la Figura 1.18. donde:

$I_L$  = Corriente de fuga

$I_C$  = Componente capacitiva de la corriente de fuga

$I_R$  = Componente resistiva de la corriente de fuga

$\delta$  = Ángulo de pérdida.

En la Figura 1.18 se observa que la relación  $I_R$  a  $I_C$  es la tangente del ángulo  $\delta$  descrita por la ecuación (1.7).

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} \quad (1.7)$$

El objetivo de este ensayo es averiguar si los materiales aislantes de los transformadores de instrumentos son de buena calidad y si aún conservan sus propiedades aislantes [41].

### **Polaridad**

La polaridad de una bobina del transformador es la designación de la dirección instantánea de la corriente que la atraviesa. Se dice que los devanados del transformador tienen la misma polaridad cuando, en un instante dado, la corriente ingresa por el primario y sale por el secundario en la misma dirección como si ambos formaran un solo circuito [24].

Se usan dos métodos para identificar este parámetro, uno a través de la comparación con un transformador de polaridad conocida y el otro con la medición de los voltajes en los bobinados [24].

Garantizar, mediante una comprobación, que la polaridad sea correcta entre los devanados primario y secundario permite estimar que la dirección del flujo de energía es la adecuada; evita el mal funcionamiento de los dispositivos que se conectan en el secundario de los transformadores de instrumentos [40].

### **Resistencia de Devanados**

La resistencia del devanado secundario influye en el nivel de inducción de los transformadores de corriente, la caída de voltaje a través de la resistencia del devanado secundario define la inducción. Por esta razón es importante tomar en cuenta el valor de este parámetro. [40].

### **Resistencia de Contactos**

Es la resistencia al flujo de corriente causada por las condiciones de la superficie u otras razones, cuando los contactos del dispositivo se unen entre sí [42].

El estudio de este valor mide la resistencia de las conexiones eléctricas como: terminaciones, conectores, secciones de barras o conexiones de cables. Se debe hacer de forma periódica para revisar que los contactos del dispositivo se encuentren sanos y funcionales, ya que permite identificar la corrosión por contacto de estos, caso contrario pueden causar arco eléctrico, pérdida de fase, caídas de voltaje e incluso incendios [42].

Este ensayo es importante para contactos que transportan corrientes elevadas, pues una mayor resistencia puede conducir a que disminuya la capacidad de carga de corriente y por ende mayores pérdidas [42].

#### **1.3.3.3.3 Pruebas Especiales**

Son opcionales y permiten garantizar el cumplimiento de requisitos especiales de las normas, se llevan a cabo solo si existe un acuerdo entre el fabricante y el comprador [30].

#### **1.3.3.3.4 Pruebas de Recepción**

Son pruebas que se efectúan en equipos nuevos o reparados para verificar que no ha sufrido daños en el traslado, cumple con las especificaciones y se ha instalado correctamente. Permiten establecer referencias para otros ensayos en el futuro [29]. Algunos de los ensayos descritos en el apartado de pruebas de rutina se usan dentro de las pruebas de recepción.

#### **1.3.3.3.5 Pruebas de Mantenimiento**

Estos ensayos se hacen de forma periódica durante toda la vida útil del equipo, con el objetivo de comprobar si el dispositivo se encuentra en condiciones de funcionamiento satisfactorias, además permite detectar fallas oportunamente. Su ejecución es necesaria en momentos en los que se tiene la sospecha de que un equipo tiene errores o ha sido sometido a condiciones de trabajo extremas [29].

#### **1.3.3.3.6 Ensayos Sobre el Aceite Aislante**

El aceite de hidrocarburo (aceite mineral # 10) se utiliza como fluido aislante en transformadores y disyuntores debido a su alta resistencia dieléctrica y estabilidad química. Para mantener adecuadamente el aceite del transformador libre de contaminantes, se necesita una inspección regular del transformador y la purificación del aceite [1].

En los transformadores el aceite cumple las funciones de ser aislante y refrigerante disipando el calor generado hacia el exterior; mientras que, en los interruptores, aparte de

ser parte del sistema de aislamiento tiene un objetivo adicional, el cual es extinguir el arco eléctrico durante la apertura de contactos [43].

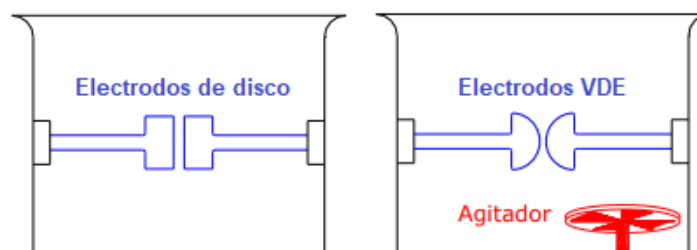
El aceite del transformador reacciona con el oxígeno para formar ácidos orgánicos, ésteres y compuestos fenólicos que finalmente conducen al lodo del transformador. La tasa de este fenómeno aumenta con una mayor exposición al aire y a la temperatura. También debe tenerse en cuenta que el oxígeno es más soluble en aceite que el que se encuentra en el aire. El lodo no solo afectará negativamente las propiedades dieléctricas del aceite, sino que además interferirá con la disipación de calor dentro del transformador. El propósito de estas pruebas es trazar el deterioro gradual y tomar medidas preventivas antes de que el aceite aislante llegue a un punto donde la falla del transformador sea inevitable. Las pruebas de rutina que se realizan con aceite aislante se señalan en la Tabla 1.1 [1].

**Tabla 1.1.** Pruebas de rutina para líquidos aislantes [1].

Prueba	Método de Prueba ASTM
Rigidez dieléctrica	D877, D1816
IFT	D971, D2285
Número de Neutralización (Acides)	D974, D664, D1534
Color	D1500
Factor de potencia/Factor de disipación	D924

### Rigidez Dieléctrica

Esta es una prueba donde se aplica un sobrevoltaje alterno a los líquidos aislantes para detectar su resistencia a la ruptura. Se usan dos electrodos diferentes, la copa Verband Dentschev Elektrotechniker (VDE) se utiliza para aceites a base de minerales; tiene una separación de 1 a 2 mm con una tasa de aumento del voltaje de 500 V/s. La copa de disco se usa para aceites a base de minerales y líquidos sintéticos como Askarel, silicona y otros, tiene un espaciado de 2,54 mm, este no debe ser menor a 2,51 mm ni mayor a 2,57 mm con una tasa de aumento de 3000 V/s [1]. En la Figura 1.19 se pueden observar los dos tipos de electrodos.



**Figura 1.19.** Electrodos para la prueba de rigidez dieléctrica [43].

## **Tensión Interfacial (IFT)**

La prueba IFT se emplea como una indicación de las características del lodo del líquido aislante. Es una prueba entre el agua y líquido aislante, la atracción entre las moléculas de agua en la interfaz está influenciada por la presencia de moléculas polares en el líquido de tal manera que la existencia de compuestos más polares provoca una IFT más baja. Los compuestos polares son partículas de lodo o sus predecesores. La prueba mide la concentración de moléculas polares en suspensión y en solución en los líquidos y, por lo tanto, proporciona una medición precisa de los componentes del lodo disuelto en el líquido mucho antes de que precipite cualquier lodo. Se ha establecido que un IFT de menos de 15 dyn / cm casi siempre muestra lodo y un IFT de 15–22 dyn / cm generalmente indica que el aceite está libre de impurezas [1].

## **Número de Neutralización (Acides)**

Los nuevos líquidos aislantes prácticamente no contienen ácidos si se refinan adecuadamente. La prueba de acidez mide el contenido de ácidos formados por oxidación. Estos ácidos se precipitan, a medida que aumenta su concentración, y se convierten en lodo. La ASTM D974 y D664 son pruebas de laboratorio, mientras que la D1534 es una prueba de campo que determina el valor de ácido total aproximado del aceite [1].

El índice de acidez del número de neutralización es los miligramos (mg) de hidróxido de potasio (KOH) requeridos para neutralizar el ácido contenido en 1g de aceite de transformador. Los datos de la prueba indican que la acidez es proporcional a la cantidad de oxígeno absorbido por el líquido, por lo tanto, a cada tipo de transformadores le tomaría diferentes períodos de tiempo desarrollar lodo en su interior [1].

## **Color**

Esta prueba consiste en transmitir luz a través de muestras de aceite y comparar el color observado con una tabla de colores estándar. La tabla de colores varía de 0.5 a 8, con el número de color 1 usado para aceite nuevo [1].

## **Factor de Potencia (Factor de Disipación)**

El factor de potencia indica la pérdida dieléctrica del líquido y, por lo tanto, su calentamiento dieléctrico. La prueba del factor de potencia se usa ampliamente como prueba de aceptación y mantenimiento preventivo para líquidos aislantes. El buen aceite nuevo tiene un factor de potencia de 0.05% o menos a 20 ° C, valores mayores indican deterioro y/o contaminación con humedad, carbono u otro material conductor, barniz o compuestos de



asfalto. El carbono o el asfalto en el líquido puede causar decoloración. El carbono en el aceite no necesariamente aumentará su factor de potencia a menos que también exista presencia de humedad [1].

### **1.3.4 EQUIPOS DE LABORATORIO PARA ENSAYOS**

Una parte importante dentro del proceso para ensayar, tanto los transformadores combinados de medida como las cajas de maniobra, son los equipos de laboratorio, aquellos que generan los voltajes y corrientes necesarios para efectuar las pruebas, y los que complementan la medición de los parámetros que determinan si el dispositivo probado está en óptimas condiciones.

#### **1.3.4.1. Voltaje a Frecuencia Industrial Requerido**

Según la norma IEC 60060-1 el voltaje de ensayo debe ser una señal alterna de frecuencia en un rango de 45 a 65 Hz, la forma de onda se aproxima a una onda sinusoidal con ambos semiciclos muy semejantes [23]. Este valor debe ser calculado considerando todos los factores que disminuyen el aislamiento, por lo que se debe hacer una corrección del voltaje teniendo en cuenta al factor de corrección por condiciones atmosféricas y la reducción o Derating [44].

El factor de corrección por condiciones atmosféricas se calcula con ayuda de la ecuación (1.5).

Mientras que el Derating considera la reducción en la capacidad de generación del voltaje a una tasa del 1% por cada 100 metros de altitud pasado los 1000 metros sobre el nivel del mar. La ciudad de Quito, donde se ubica actualmente el laboratorio de transformadores de la EEQ, tiene una altitud de 2850 m.s.n.m. por lo que se obtiene una reducción del 18,5% en la capacidad de generación de las fuentes de alto voltaje [44].

Para determinar el valor del voltaje a frecuencia industrial se hace uso de la ecuación (1.8) [44].

$$V_{fi} = V_{nfi} \cdot k_a \cdot D_r \quad (1.8)$$

Donde:

$V_{fi}$  = Es el voltaje r.m.s. a frecuencia industrial corregido

$V_{nfi}$  = Es el voltaje soportado a frecuencia industrial de corta duración especificado en la Tabla 1.2.

$k_a$  = Factor de corrección por altitud.

$D_r$  = es la reducción de la capacidad de generación de alto voltaje de la fuente debido a las condiciones del entorno donde se instala. Para este estudio tiene un valor de 1,185 [44].

En la Tabla 1.2. se presentan los valores de aislamiento estándar para Rango I, con los que se debe obtener el voltaje nominal de la fuente de voltaje AC.

**Tabla 1.2.** Valores de aislamiento estándar para Rango I ( $1\text{kV} < U_m < 245\text{ kV}$ ) [44].

Voltaje más elevado para equipo $U_m$ kV (valor r.m.s.)	Voltaje soportado a frecuencia industrial de corta duración normalizado. kV (valor r.m.s.)	Voltaje soportado de impulso tipo rayo normalizado kV (valor r.m.s.)
3,6		20
		40
7,2		40
		60
12		60
		75
		95
17,5		75
		95
24		95
		125
		145
36		145
		170
52	95	250
72,5	140	325
123	185	450
	230	550
145	185	450
	230	550
	275	650
170	230	550
	275	650
	325	750
245	275	650
	325	750
	360	850
	395	950
	460	1050

### 1.3.4.2. Potencia a Frecuencia Industrial Requerida

Las pruebas de aparatos o aislamiento de alto voltaje siempre implican la aplicación de altos voltajes a cargas capacitivas con baja o muy baja disipación de potencia. En general, la disipación de potencia no es de gran importancia si se determina la salida de potencia nominal del suministro. El valor de la potencia nominal  $P_n$  en VA puede calcularse a partir de la ecuación (1.9) [45].

$$P_n = k \cdot V_n^2 \cdot \omega \cdot C_t \quad (1.9)$$

Donde:

$C_t$  = Es la capacitancia del equipo o muestra bajo prueba.

$V_n$  = Es el voltaje r.m.s. nominal del suministro de prueba de alto voltaje

$k$  = Representa valores de capacitancias adicionales, esta variable puede ser  $\geq 1$

$\omega$  = Es el valor de la frecuencia de la red expresada en radianes.

Los valores de  $C_t$  dependen del tipo de equipo que se va a probar, para este estudio se consideran los valores correspondientes a transformadores de medida, bushings u cables de alto voltaje, los cuales se presentan en la Tabla 1.3.

**Tabla 1.3.** Capacitancias típicas de los diferentes equipos sometidos a ensayos de alto voltaje [45].

Objeto de prueba	Capacitancia
Bushings	100-1000pF
Transformador de Potencial	200- 500pF
Cables aislados en papel impregnado de aceite	250-300 pF/m
Cables aislados en gases	Alrededor de 60 pF/m

### 1.3.4.3. Generación del Voltaje Alterno de Ensayo

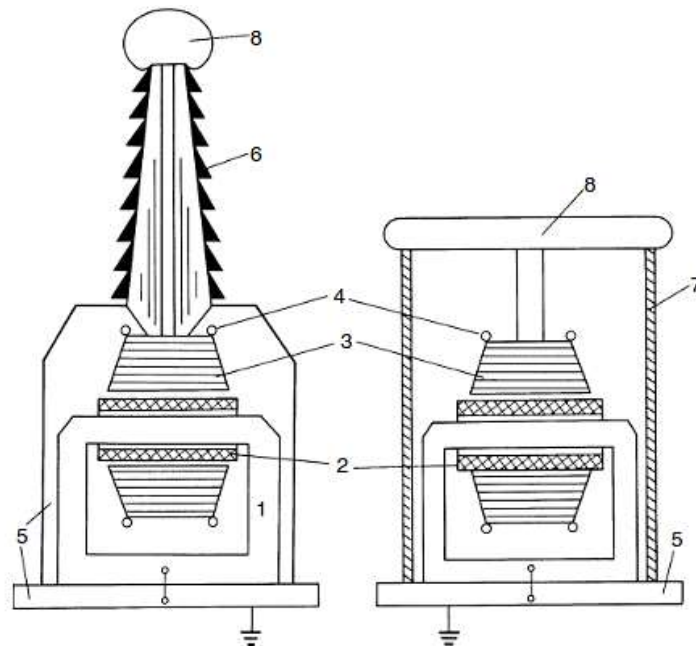
El voltaje alterno de ensayo se obtiene generalmente de un transformador elevador y de forma alternativa por medio de un circuito de resonancia en serie [23].

#### Transformador de Ensayo

Es un transformador monofásico que funciona a frecuencia industrial, 50 o 60Hz, los transformadores de ensayo normalmente utilizados para este propósito son de baja potencia, pero con una clasificación de alto voltaje; se utilizan principalmente para pruebas de corta duración en equipos de alto voltaje [46]. También pueden usarse para frecuencias más altas con voltaje nominal, o para frecuencias más bajas, si los voltajes se reducen de acuerdo con la frecuencia, para evitar la saturación del núcleo [45].

El diseño de un transformador de prueba es similar a un transformador de potencial utilizado para la medición de voltaje y potencia en líneas de transmisión. La densidad de flujo elegida es baja, por lo que no atrae una gran corriente de magnetización que de otra manera saturaría el núcleo y produciría armónicos [46].

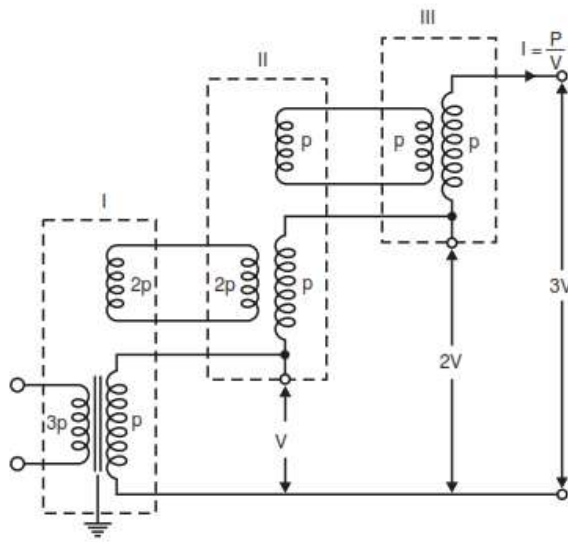
En la Figura 1.20 se puede observar un transformador de ensayo en dos diferentes tipos de configuración.



**Figura 1.20.** Diferentes construcciones de un transformador de ensayo [45].

Para voltajes superiores a 400 kV, se deben conectar en cascada dos o más transformadores dependiendo de los requisitos de voltaje. La Figura 1.21. indica la conexión en cascada de tres transformadores. El primario del transformador de la primera etapa está conectado al suministro de bajo voltaje. Un voltaje está disponible a través del secundario de este transformador. El devanado terciario (devanado de excitación) de la primera etapa tiene el mismo número de vueltas que el devanado primario, y alimenta el primario del transformador de la segunda etapa. El potencial del terciario se fija al a un voltaje  $V$  del devanado secundario. El devanado secundario del transformador de la segunda etapa está conectado en serie con el devanado secundario del transformador de la primera etapa, de modo que hay disponible un voltaje de  $2V$  entre la tierra y el terminal del secundario del transformador de la segunda etapa [46].

Del mismo modo, el transformador de etapa III está conectado en serie con el de la segunda etapa. Con esto, el voltaje de salida entre tierra y el secundario del transformador de la tercera etapa, es de  $3V$ . Cabe señalar que las etapas individuales, excepto la superior, deben tener equipos de tres devanados, pero en la parte superior, sin embargo, será un transformador de dos devanados [46].

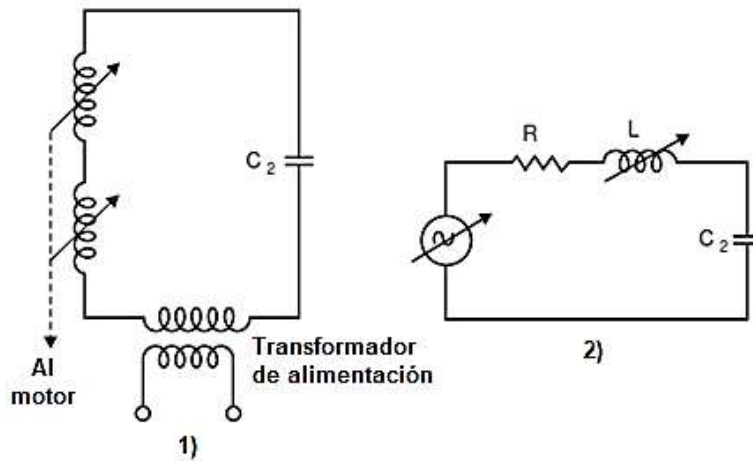


**Figura 1.21.** Transformador en cascada de 3 etapas [46].

La principal desventaja de conectar en cascada los transformadores es que en las etapas inferiores los primarios se cargan con más energía en comparación con las etapas superiores [46].

### **Circuito de Resonancia en Serie**

El circuito de resonancia en serie está conformado por una inductancia en serie con un objeto de ensayo capacitivo conectado a una fuente de potencia de medio voltaje. Otra variante utiliza un condensador en serie con objeto de ensayo inductivo. La estabilidad de la resonancia y del voltaje de prueba depende de la constancia de la frecuencia de alimentación y de las características del circuito de ensayo. Es útil para probar objetos como cables, condensadores o sistemas de aislamiento con gas. En la actualidad se fabrican inductores variables de alto voltaje hasta 300 kV por cada unidad utilizando la técnica del núcleo de hierro dividido y su inductancia puede variar dependiendo de la capacidad de la carga para producir resonancia [23]. En la Figura 1.22 se observa un circuito resonante con inductores de alto voltaje y su circuito equivalente.



**Figura 1.22.** 1) Circuito de resonancia en serie con reactores variables de alto voltaje. 2) Circuito Equivalente de 1) [46].

El voltaje resultante se obtiene a través de la ecuación (1.10) [46].

$$V_0 = \frac{V}{R} \frac{1}{\omega C_2} \quad (1.10)$$

Donde:

$V_0$  = Voltaje Generado

$V$  = Voltaje de alimentación

$\omega$  = Frecuencia angular

$C_2$  = Capacitancia del objeto de ensayo

Y ya que la resonancia se describe por medio de la ecuación (1.11) [46].

$$\omega L = \frac{1}{\omega C_2} \quad (1.11)$$

Donde:

$L$  = Inductancia del sistema de resonancia.

$C_2$  = Capacitancia del objeto de ensayo.

Se observa en la ecuación (1.12) que el voltaje de salida es igual al voltaje de alimentación multiplicado por el factor de calidad  $Q$ .

$$V_0 = \frac{V}{R} \omega L = VQ \quad (1.12)$$

Donde:

$Q$  = Es el factor de calidad

Y los demás parámetros son los mismos que se describen en la ecuación (1.10).

El valor de  $Q$  varía entre 40 y 80, lo que significa que el requerimiento de potencia reactiva en kVAr de la capacitancia de carga es 40 veces la potencia del transformador de alimentación en kW, por esta razón, la potencia nominal relativa de este dispositivo es relativamente pequeña [46].

El uso de los circuitos resonantes en series es ventajoso debido a que:

- Los requisitos de potencia activa del circuito de alimentación son relativamente bajos [46].
- Este circuito elimina, en gran medida, a los armónicos y cualquier interferencia. La onda sinusoidal casi perfecta ayuda en las mediciones de descarga parcial y es útil para medir el ángulo de pérdida y la capacitancia de los materiales aislantes [46].
- En caso de que sucedan descargas repentinas de un objeto de prueba durante el ensayo de alto voltaje, el circuito resonante se desactiva y el voltaje de prueba colapsa inmediatamente [46].
- No requiere inductores de compensación haciendo más liviano a todo el equipo [46].
- En ensayos sobre equipos asilados en SF<sub>6</sub>, las averías múltiples no dan como resultados transitorios elevados, por esta razón no se requieren protecciones especiales contra transitorios [46].

## **2. METODOLOGÍA**

En este capítulo se especifican los lineamientos a seguir para cumplir con los objetivos planteados dentro del trabajo de titulación. El primer paso es la recolección de la información necesaria, tanto de los equipos como de la normativa; en la segunda etapa se lleva a cabo una clasificación de los ensayos de acuerdo con la capacidad actual y futura del laboratorio de transformadores de la Empresa Eléctrica Quito y en la última etapa se realizan los pasos necesarios para la construcción de la guía técnica donde se sintetizan los procedimientos para llevar a cabo los ensayos, las conexiones de los equipos y los criterios de aprobación o rechazo, además se hace la recomendación de los equipos necesarios para cada ensayo.

### **2.1. COMPILACIÓN DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA DE LOS EQUIPOS Y LA NORMATIVA**

Se hicieron varias visitas al laboratorio de transformadores de la Empresa Eléctrica Quito con la finalidad de obtener la información técnica de los equipos tanto de las cajas de maniobra y transformadores de medida combinados, así como de los dispositivos para los ensayos que se encuentran a disposición en sus instalaciones. Durante este tiempo también se observaron los ensayos técnicos que realizan actualmente sobre los dos equipos para la recepción y el mantenimiento de estos.

A través de correo electrónico, se obtuvo del Servicio Ecuatoriano de Normalización, las normas internacionales que se usan en el país para la fabricación de los transformadores mixtos y de las cajas de maniobra.

Se visitó las instalaciones de una empresa fabricante, donde se producen cajas de maniobra, se obtuvo información acerca del proceso de producción del equipo, la capacidad de corriente y voltaje de estos dispositivos, las normas y estándares internacionales con que se fabrican y certifican, y los ensayos que se llevan a cabo en sus instalaciones. En esta empresa también se producen transformadores combinados de medida, pero en el día señalado, al no existir demanda no se estaban manufacturando, por lo que solo se consiguió información de sus capacidades y las normas con que se realiza la fabricación.

En otra ocasión se realizó una visita a otra empresa donde también se fabrican cajas de maniobra, se obtuvo información de primera mano de los componentes de estos equipos, el material con que se fabrican, las normas que rigen la producción de este dispositivo y



los ensayos que ellos realizan en su planta, así como los que recomiendan que se hagan para el mantenimiento de este dispositivo.

Con esta información, se destaca que en el país no existe normativa nacional que guíe los ensayos, por ello, en la Tabla 2.1 se indican los estándares internacionales IEC, IEEE Y ASTM aplicables a los dispositivos objetos de este estudio.

**Tabla 2.1.** Normas que se aplican para los ensayos [Elaboración propia].

<b>Equipo</b>	<b>Norma</b>	
Cajas de Maniobra	IEEE Std C37.74-2014	
Transformadores combinados de medida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IEC 61869–1:2007</li> <li>• IEC 61869–2:2012</li> <li>• IEC 61869–3:2011</li> <li>• IEC 61869–4:2013</li> <li>• IEC 60060–1:2010</li> <li>• IEEE Std C57.13-2016</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ANSI/NETA MTS-2007</li> <li>• ASTM D877</li> <li>• ASTM D1816</li> </ul>

## 2.2. ESPECIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS

### 2.2.1. DISPOSITIVOS ESPECIFICADOS EN LAS NORMAS QUE SE REQUIEREN PARA LOS ENSAYOS

Con la revisión de las normas y la observación de los equipos e instalaciones de la Empresa Eléctrica Quito, se determinan los equipos que hacen falta para cubrir todos los ensayos especificados en las normas. A continuación, se determinan tanto los ensayos que deben hacerse como dispositivos requeridos para los ensayos, esta información se presenta en la Tabla 2.2. Las especificaciones técnicas generales de estos equipos se incluyen en la sección 3.5.

**Tabla 2.2.** Equipos requeridos para los ensayos. [Elaboración propia]

<b>Ensayo</b>	<b>Equipo</b>
Voltaje aplicado a frecuencia industrial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformador de ensayo</li> <li>• Medidor de alto voltaje</li> </ul>
Voltaje Inducido	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformador elevador</li> <li>• Convertidor Estático de Frecuencia</li> <li>• Medidor de alto voltaje</li> </ul>
Descargas Parciales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformador de ensayo</li> <li>• Filtro de interferencias de alto voltaje</li> <li>• Medidor de Descargas Parciales</li> <li>• Dispositivo de calibración</li> <li>• Capacitor de acoplamiento</li> <li>• Dispositivo de acoplamiento o cuadripolo</li> </ul>
Precisión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipo de medición de precisión de relación y desplazamiento de fase.</li> </ul>

Verificación de la marcación de terminales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No son necesarios equipos de ensayo, solo se debe hacer inspección visual</li> </ul>
Sobrevoltaje entre espiras	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformador de ensayo</li> <li>• Equipo de medición de sobrevoltaje entre espiras</li> </ul>
Capacitancia y Factor de disipación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipo de medición de capacitancia y factor de disipación</li> </ul>
Polaridad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detector de polaridad</li> </ul>
Resistencia de bobinados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medidor de resistencia en bobinados</li> </ul>
Resistencia de Contactos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ohmímetro</li> </ul>
Resistencia de Aislamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medidor de resistencia de Aislamiento</li> </ul>

### 2.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS DE ACUERDO CON LOS EQUIPOS EXISTENTES EN EL LABORATORIO

En la primera clase, se ubican aquellos ensayos para los que el laboratorio de transformadores está capacitado tanto con los voltajes y corrientes de ensayo y dispone de los instrumentos de lectura y medición para determinar si el dispositivo ensayado pasa o no la prueba.

En la segunda categoría se disponen las pruebas que no se pueden llevar a cabo hasta que se implementen los equipos de medición que recomienda la norma, y en algunos casos los equipos generadores de los voltajes de ensayo.

Además, se documenta los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio de transformadores de la EEQ y se determina si estos tienen posibles errores o si son los adecuados para hacer la aceptación de los equipos y el proceso de mantenimiento.

### 2.3. CONSTRUCCIÓN DE LA GUÍA TÉCNICA

Una vez determinadas las especificaciones de los equipos, las normas y lineamientos para su construcción y evaluación, se procede a elaborar la guía técnica de ensayos.

Esta debe contener una sección con cada ensayo descrito con la siguiente información:

- *Objetivo del ensayo:* se establece la razón por la que se debe ejecutar la prueba
- *La norma que rige su ejecución:* se coloca la norma donde se encuentra toda la información técnica respecto a la prueba a ejecutarse.
- *Si es aplicable o no dependiendo de los equipos de ensayo:* En concordancia con la clasificación del numeral 2.2.2. se hace esta descripción.

- *Las condiciones de ensayo para recepción y mantenimiento:* Se indican los criterios de aplicación de este ensayo para realizar la recepción y para aplicarlo en mantenimiento.
- *Las precauciones previas al ensayo:* de acuerdo el ensayo se debe describir condiciones o precauciones previas a los ensayos que deben tomarse en cuenta para tener éxito en la medición y evitar accidentes.
- *Los equipos de laboratorio necesarios:* cada ensayo necesita de equipos de generación del voltaje de prueba, filtros, o dispositivos de medición, estos se deben identificar en este punto.
- *Diagramas de conexión:* muestran al usuario como debe realizar las conexiones de los equipos de laboratorio para poder llevar a cabo el ensayo.
- *Procedimiento paso a paso para llevar a cabo la prueba:* es la descripción del proceso que es necesario seguir para obtener los resultados deseados.
- *Criterios de aceptación o rechazo:* permiten al usuario identificar si la prueba fue exitosa o si el dispositivo tiene averías.

En la sección 3.3.4 se describen las recomendaciones finales sobre los ensayos.

## **2.4. RECOMENDACIÓN DE EQUIPOS**

En esta sección del trabajo se hace la recomendación de los equipos ofertados que existen en el mercado necesarios para completar los ensayos sobre las cajas de maniobra y los transformadores de medida combinados.

En la mayoría de los ensayos se especifica un generador de altos voltajes alternos a frecuencia industrial, con las ecuaciones (1.5), (1.8) y (1.9) y los valores del voltaje soportado a frecuencia industrial dados en la Tabla 1.2 se determina el voltaje máximo y la potencia requerida para determinar opciones en el mercado de dicho elemento.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se detallan los resultados más relevantes obtenidos en la aplicación de la metodología descrita en el capítulo 2. Se presenta la información recopilada de los equipos en las visitas al laboratorio, así como también la clasificación de los ensayos de acuerdo con equipamiento del laboratorio. Luego, se establece el manual de pruebas para las cajas de maniobra y los transformadores mixtos, en cada uno de los ensayos se describe las condiciones para realizar el ensayo en los mantenimientos y por último se hace la recomendación de equipos ofertados para los ensayos.

#### 3.1. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN DE LOS EQUIPOS Y NORMATIVA

##### 3.1.1. VOLTAJES Y CORRIENTES DE LOS EQUIPOS

La información obtenida se describe en la Tabla 3.2 y la Tabla 3.1 [47] [48]:

**Tabla 3.2.** Información Técnica de las Cajas de Maniobra [47].

Parámetro	Unidades	Valores
Voltajes	kV	6,3 13,2 22,8
Corrientes	A	200 600
Potencia	kVA	Dependerá de los transformadores que se vayan a conectar en cada una de las salidas

**Tabla 3.3.** Información Técnica de los Transformadores Combinado de Medida [47].

Parámetro	Unidades	Valores
Voltaje	kV	6,3 13,2 22,8
Potencia	VA	Dependerá del circuito a medirse
Relación de Corriente	-	15-30-45-50-60-100/5
Relación de Voltaje	-	6,3-13,2-22,8/120-110

### 3.1.2. INFORMACIÓN TÉCNICA DE LOS INSTRUMENTOS DE LABORATORIO

Para llevar a cabo los diferentes ensayos para la aceptación y mantenimiento de los dos equipos, en el laboratorio de transformadores de la EEQ se encuentran a disposición los instrumentos indicados dentro de la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Equipos e Instrumentos del laboratorio de transformadores de la EEQ [Elaboración Propia].

<b>Equipo</b>	<b>Características</b>
<b>Probador de Aislamiento MEGGER MIT 1025</b>	Probador de resistencia de aislamiento para pruebas de diagnóstico y mantenimiento de equipos de alto voltaje [49]. Posee las siguientes características: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de salida máximo 10 kV</li> <li>• Permite medir resistencia de aislamiento de hasta 20 TΩ.</li> <li>• Realiza otras pruebas como: índice de polarización, relación de absorción dieléctrica, voltaje de paso, descarga dieléctrica y pruebas de rampa.</li> </ul>
<b>Milióhmetro MIKO-9 Medidor de Resistencia de Bobinados</b>	Mide la resistencia DC en un rango de 1μΩ a 30kΩ para una corriente de hasta 10 A en: bobinados de transformadores de potencia y medida, motores, generadores, compensadores lineales, contactos de disyuntores, resistencias, buses, cables, etc. [50].
<b>Medidor de Resistencia de Transformadores TRM – 403</b>	Mide la resistencia de los bobinados de transformadores, máquinas rotativas o resistencia de componentes inductivos. Además, admite la medición de la resistencia de contactos en interruptores [51].
<b>Probador Automático de La Relación de Vueltas del Transformador Trifásico (TTR) ATRT-03A Serie 2</b>	Determina la relación de transformación del transformador, al generar y emitir un voltaje de excitación a los devanados primarios, luego detecta el voltaje secundario inducido y calcula el valor [52].
<b>Probador de Aceite BAUR DPA 75 C</b>	Determina la rigidez dieléctrica del aceite aislante, se puede usar con aceites siliconados, de origen vegetal y sintéticos. Tiene un voltaje máximo de 75 kV [53].
<b>MEGOHMMETRO AEMC MODEL 5050</b>	Diseñado para verificar la seguridad de las instalaciones y equipos eléctricos [54]. Mide: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje</li> <li>• Resistencia de aislamiento</li> <li>• Capacitancia</li> <li>• Corrientes de fuga</li> </ul>
<b>Multímetros</b>	Equipos de medición de voltaje, corriente, potencia capacitancia, etc. En el laboratorio existen de diferentes marcas y capacidades.

## 3.2. ESPECIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS

### 3.2.1. ENSAYOS QUE SE REALIZAN SOBRE LOS EQUIPOS ACTUALMENTE

Se observaron a detalle las pruebas que se llevan a cabo en la actualidad dentro del laboratorio de transformadores de la EEQ, para determinar las condiciones de las cajas de maniobra como de los transformadores combinados de medida, los criterios de aceptación dados en esta sección son los que se utilizan en base a normas para otros equipos como transformadores de distribución y la experiencia del personal.

#### 3.2.1.1. Pruebas en las Cajas de Maniobras

El objeto de ensayo fue la caja de maniobras trifásica que se indica en la Figura 3.1 y cuyos datos de placa se describen en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5.** Datos de placa de la caja de maniobras ensayada [Elaboración Propia].

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia	500	kVA
Voltaje de servicio	6	kV
BIL	95	kV
Clase de Aislamiento	15	kV
Peso total	905	Kg
Mes/Año	05/04	
Volumen de aceite	650	L



**Figura 3.1.** Caja de maniobras evaluada [Elaboración Propia].

#### Prueba de Continuidad

Según el laboratorio de transformadores, este ensayo les permite verificar que exista continuidad, entre la entrada y cada una de las salidas de una caja de maniobra, es decir cada uno de los circuitos está completo y cerrado [47].

Se hace la medición entre la entrada y todas las derivaciones de la salida, se inicia por el primer ramal, se verifica que todas las partes del circuito estén en su lugar como los fusibles BAY-O-NET que se colocan en sus correspondientes portafusibles, y se cierra el seccionador ON-OFF de ese circuito. Con la ayuda de un multímetro calibrado en la función de continuidad, se coloca una de las puntas de prueba en la entrada y otra en la salida, si la alarma suena significa que el circuito tiene continuidad. Se sigue el mismo procedimiento con los demás circuitos. Si es una caja de maniobras trifásica, se debe medir fase por fase.

En la Figura 3.2 se observa la medición de continuidad la fase 2 del circuito A y la fase 2 del circuito B de la caja de maniobras trifásica.



**Figura 3.2.** Medición de Continuidad en una caja de maniobras trifásica  
[Elaboración propia].

- *Observaciones:* Esta es una prueba que determina que el circuito opera correctamente cuando los contactos de los seccionadores están cerrados, por lo que es en principio igual al ensayo de resistencia de contactos, pero al ser el multímetro un equipo que no puede determinar resistencias muy bajas no puede entregar el valor de esa resistencia, pero si guía a los operadores a afirmar que los contactos están en buen estado a través de una señal sonora.

### Prueba de Resistencia de Aislamiento (IR)

El personal del laboratorio de la EEQ realiza esta prueba para medir la resistencia de aislamiento de cada uno de los circuitos de la caja de maniobras para comprobar que el material aislante se encuentra en perfecto estado [47].

Para ello, se mide la resistencia de aislamiento, entre fases y entre fase y tierra de la entrada y cada una de las salidas. Con la ayuda de un Probador de Aislamiento (megóhmetro) se inyecta durante 1 minuto un voltaje cuyo valor depende del voltaje nominal del equipo, según el laboratorio de transformadores, si la caja opera a un voltaje de 6 kV se selecciona 5 kV DC y ellos consideran que tiene un buen aislamiento si la resistencia es mayor a 20 GΩ. Este ensayo se puede observar en la Figura 3.3. donde se hace una medición de la resistencia de aislamiento entre las fases H2 y H3 de la entrada de la caja de maniobras.



**Figura 3.3.** Medición de la resistencia de aislamiento entre las fases H2 y H3 de la entrada de una caja de maniobras trifásica [Elaboración Propia].

Los resultados obtenidos del ensayo son indicados en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6.** Resultados de la prueba de resistencia de Aislamiento [Elaboración propia].

Entrada		Salida A		Salida B		Salida C	
Conexiones	IR [GΩ]	Conexiones	IR [GΩ]	Conexiones	IR [GΩ]	Conexiones	IR [GΩ]
H1-T	129,9	H1A-T	127,3	H1B-T	115,2	H1C-T	122,7
H2-T	48,4	H2A-T	67,3	H2B-T	65,3	H2C-T	69,6
H3-T	39,03	H3A-T	60,2	H3B-T	58,2	H3C-T	62,5
H1-H2	112,2	H1A-H2A	99,2	H1B-H2B	85,7	H1C-H2C	93,2
H1-H3	115,5	H1A-H3A	75,8	H1B-H3B	78,7	H1C-H3C	100,4
H2-H3	0,5	H2A-H3A	0,486	H2B-H3B	0,504	H2C-H3C	0,493



Como se puede observar que entre la fase 2 y 3 tanto en entrada como en las salidas no se cumple con que el valor sea mayor a 20 G $\Omega$ , pero, el personal del laboratorio considera como un criterio empírico, que al ser una caja de maniobra que está expuesta a un nivel bajo de voltaje puede operar sin problemas.

- *Criterio según la norma ANSI/NETA MTS 2007:* Realice las pruebas de resistencia de aislamiento durante un minuto en cada sección del bus, fase a fase y entre fase y tierra. Aplique voltaje de acuerdo con los datos publicados por el fabricante. En ausencia de datos publicados por el fabricante, use la Tabla 3.44 [25].
- *Observaciones:* Acatando la recomendación de la norma, en el procedimiento realizado en la EEQ se debe corregir la selección del voltaje DC aplicado, en el caso de esta caja de maniobra al ser de 6kV nominales, el voltaje DC que debió aplicarse es de 2,5kV y el resultado esperado de resistencia de aislamiento debió ser un valor mínimo de 1000 M $\Omega$ ; por esta razón el criterio del personal de la EEQ esta errado y se puede decir que existe una falla entre las fases H2 y H3 que requiere ser determinada mediante otros ensayos.

### Prueba de Resistencia de Contactos

Se desea determinar que los contactos de los seccionadores ON-OFF están en buen estado y operativos. Para esto, en la EEQ utilizan un milióhmetro con el que inyectan una corriente fase neutro de 10 A DC entre la entrada y cada una de las salidas. El laboratorio considera que la resistencia debe tener un valor pequeño entre los m $\Omega$  para que los contactos pasen la prueba.



**Figura 3.4.** Medición de la resistencia de contactos de los seccionadores de la caja de maniobras [Elaboración propia].

Luego de haber llevado a cabo la medición se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7.** Prueba de resistencia de contactos [Elaboración propia].

	<b>Conexiones</b>	<b>Resistencia [mΩ]</b>
<b>Fase H1</b>	H1-H1A	16,46
	H1-H1B	18,13
	H1-H1C	22,88
<b>Fase H2</b>	H2-H2A	17,31
	H2-H2B	19,1
	H2-H2C	20,93
<b>Fase H3</b>	H3-H3A	15,16
	H3-H3B	20,1
	H3-H3C	22,67

Se observa que para cada uno de los seccionadores se obtienen valores bajos de resistencia, por lo que se considera que los contactos están en buen estado.

- *Criterio según la norma IEEE C37.74:* La resistencia de contactos se medirá en los terminales del contacto cerrado, aplicando una corriente directa de un valor de 100 A DC. pero no superior al 25% de la corriente nominal del circuito medido. El equipo pasa la prueba si la resistencia medida no es mayor a la recomendada por el fabricante [7].
- *Observaciones:* Ninguna norma específica un valor mínimo o máximo de la resistencia de contactos, debido a que puede variar dependiendo del tipo de contacto, del material, etc. [42], por esta razón el criterio de aprobación de esta prueba dicta que se debe comparar el valor obtenido con el dado por el fabricante y si no se tiene estos datos, cotejar con datos obtenidos en equipos similares. En consecuencia, se considera que, en este ensayo el laboratorio de transformadores, en el caso de que el fabricante no proporcione este dato, si debe basarse un poco en la experiencia obtenida realizando este ensayo como último recurso. El INEN debería a través de una norma nacional exigir a los fabricantes que proporcionen el valor de esta resistencia en el protocolo de pruebas de la caja de maniobras que venden.

### **Prueba de Rigidez Dieléctrica del Aceite**

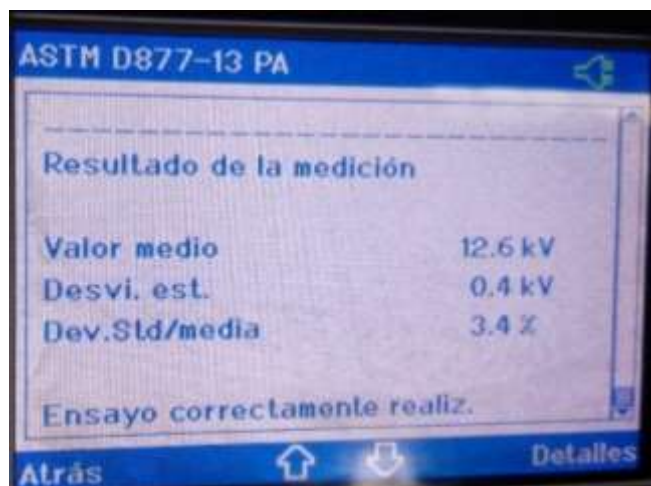
Para este ensayo en el laboratorio de la EEQ emplean el probador de aceite mostrado en la Figura 3.5., el cual ya viene configurado con las diferentes normativas que rigen este procedimiento. De acuerdo con la norma seleccionada se debe ajustar la distancia entre los electrodos, en este caso se eligió el estándar ASTM D877, por lo que la separación de los electrodos debe de ser de 2,54 mm; la prueba se realizó a una temperatura de 15 °C.



**Figura 3.5.** Probador de aceite con el líquido a ensayar en la copa  
[Elaboración propia].

En primer lugar, se toma una muestra del aceite a evaluar, se llena la copa hasta cubrir los electrodos y se cierra el probador. El dispositivo realiza de manera automática cinco descargas a intervalos de 1 minuto entre cada una, luego calcula el promedio de las 5 mediciones. El laboratorio de transformadores, siguiendo la recomendación de la norma determina que para que la prueba sea exitosa se debe obtener un promedio mayor o igual 30 kV.

En este ensayo se midió el aceite aislante de la caja de maniobras, los resultados obtenidos se presentan tanto en la Figura 3.6 y en la Tabla 3.8.



**Figura 3.6.** Resultados del ensayo [Elaboración propia].

**Tabla 3.8.** Prueba de voltaje de ruptura dieléctrica en el aceite [Elaboración propia].

N° de Medición	Valor de Voltaje en [kV]
1	12,4
2	12,4
3	12,2
4	13,2
5	12,9
<b>Promedio</b>	<b>12,6</b>

En este ensayo, el personal del laboratorio, tomando en cuenta que se trata de una caja de maniobras que opera en un sistema de 6,3 kV, contempló que el aceite se encuentra en buenas condiciones a pesar de que el promedio de voltaje es menor a 30 kV.

- *Criterio según la norma ASTM D877:* Dependiendo tanto del procedimiento A o el procedimiento B descritos en la sección se determina que el voltaje de ruptura es el promedio de las 5 mediciones tomadas, este debe ser  $\geq 30$  kV y además se debe calcular el rango de acuerdo a la ecuación (3.2) cuyo valor debe ser menor o igual al 92% del valor medio para que se considere satisfactoria la muestra, caso contrario la norma indica que debe procederse hacer una nueva medición de 5 descargas adicionales y calcular el rango de las 10 descargas, si este valor es menor o igual que el 151% del valor medio se considera satisfactoria la muestra [26].
- *Observaciones:* No es correcto el criterio de aceptación para el aceite de la caja de maniobra de 6kV ya que todo aceite aislante debe cumplir con lo establecido en la norma con la cual se hizo el ensayo, en este caso la norma ASTM D877, esto sin importar el voltaje para el que va a ser aplicado. Por lo que se recomienda una revisión del aceite para verificar si la medición dio estos resultados debido a que está en mal estado o bien puede ser que el equipo no se encuentra bien calibrado; en ese caso debe someterse al probador a una calibración siguiendo los criterios de la norma ISO 17025.

### **3.2.1.2. Pruebas en los Transformadores Combinados de Medida**

En el laboratorio de Transformadores de la EEQ se observó que los ensayos que se llevan a cabo sobre estos transformadores son los que se hacen generalmente sobre los transformadores de distribución. Las pruebas se hicieron por separado, tanto en el transformador de corriente como en el de voltaje (potencial), el ensayo de voltaje dieléctrico de ruptura del aceite es el mismo que se observó para el aceite de la caja de maniobras.

El objeto de prueba fue un transformador combinado monofásico, este se representa en la Figura 3.7. y sus datos de placa se presentan en la Tabla 3.9.

**Tabla 3.9.** Datos de Placa del Transformador mixto ensayado [Elaboración Propia].

General			Potencial		Intensidad	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Unidad	Valor	Unidad
Fecha de Fab.	1996	Potencia	50	VA	15	VA
Tipo	TMEA-11	Relación	13,2/0,11	kV	10-20-40/5	A
N°. Serie	30554-2	Clase de Precisión	0,5	-	0,5	-
Refrigeración	ONAN					
Clase de Aislamiento	A 0	Frecuencia	60	Hz	60	Hz
m.s.n.m.	3000	Grupo	li 0		li 0	
Norma CEI	185-186	Nivel de Aislamiento	17,5/38/150	kV	17,5/38/150	kV
Montaje	EXTERIOR	$I_{dyn}$	-	-	10	kA
Peso Total	151 kg	$I_{th}$	-	-	4	kA



**Figura 3.7.** Transformador combinado de medida monofásico ensayado [Elaboración propia].

### Prueba de Resistencia de Bobinados

Esta es una prueba que se realiza sobre los devanados de los transformadores de distribución para determinar que cumplen con la resistencia dada por el fabricante en la placa del dispositivo. Para ejecutar este ensayo, primero se debe observar el diagrama de

conexiones del transformador mostrado en la Figura 3.8. y ubicar en él cada una de las bobinas; a continuación, con la ayuda de un equipo de medición de resistencia en bobinados, se inyecta una corriente de 5 A en los bornes de cada bobina del transformador. El equipo realiza internamente la corrección por temperatura y determina el valor de resistencia de cada bobina, en la Tabla 3.10 y la Tabla 3.11 se detallan los resultados de este ensayo.

**Tabla 3.10.** Resultados de la prueba de resistencia de bobinados en el Transformador de Potencial [Elaboración Propia].

<b>Bobina</b>	<b>Resistencia a 75°C</b>
K-V alta	1502 [ $\Omega$ ]
U-V baja	325 [ $m\Omega$ ]

En el transformador de corriente se observa que existen tres bobinas de bajo voltaje que permiten variar la relación de transformación.

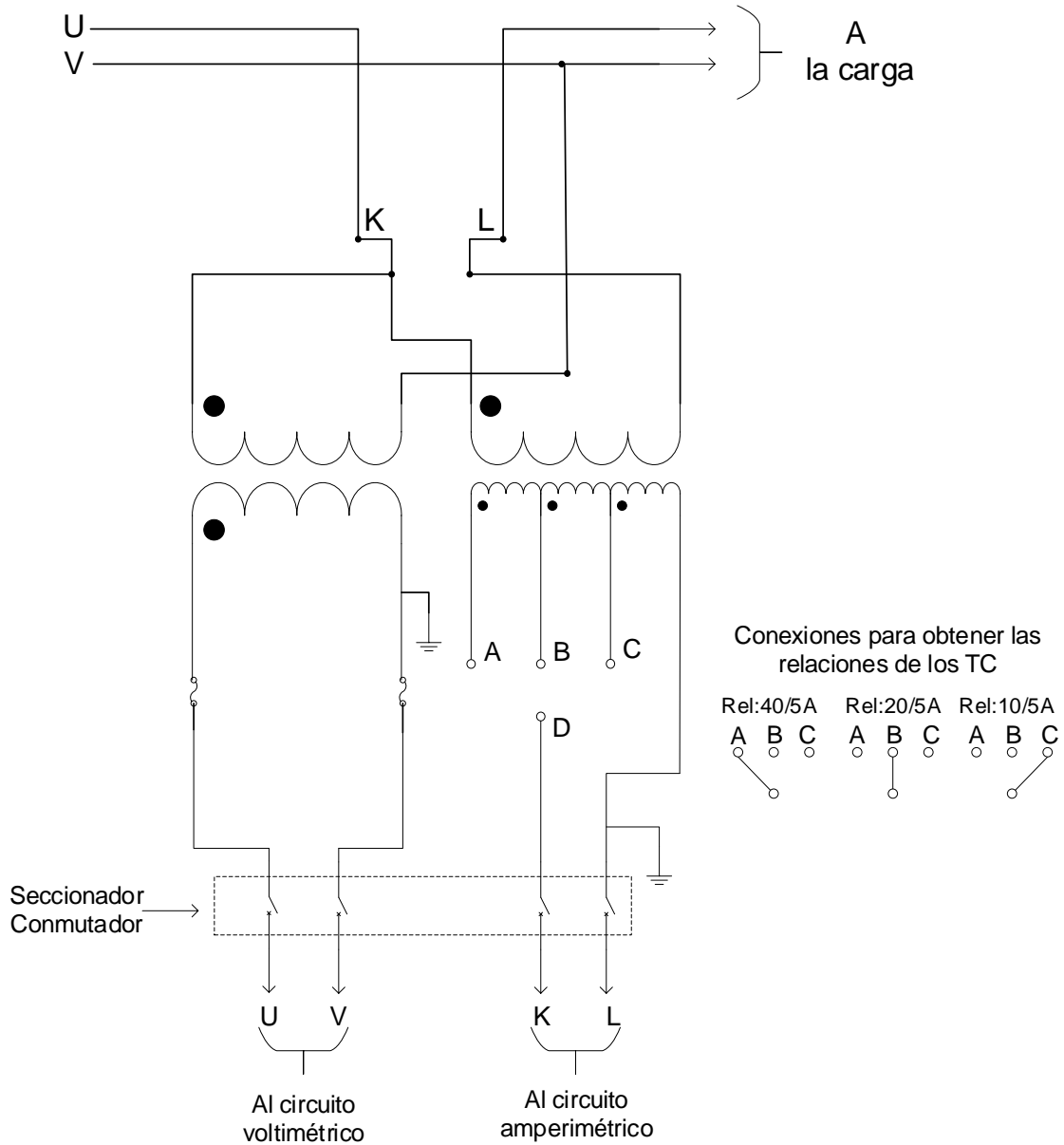
**Tabla 3.11.** Resultados del ensayo de resistencia de bobinados en el Transformador de Corriente [Elaboración Propia].

<b>Bobina</b>		<b>Resistencia a 75°C</b>
<b>Alta</b>	K-L	19,37 [ $m\Omega$ ]
<b>Baja</b>	A-B	396,4 [ $m\Omega$ ]
	B-C	223 [ $m\Omega$ ]
	C-L	204,7 [ $m\Omega$ ]
	A-L	601,4 [ $m\Omega$ ]

Al ser un transformador antiguo, se observa que en su placa de datos no existe un valor de resistencia dado por el fabricante para comparar con los valores medidos, por lo que en este caso no se puede decir si la resistencia del devanado es aceptable o no.

- *Criterio según la norma IEC 60076-1:* Según esta norma es mejor utilizar un óhmetro para hacer la medición pues es más preciso en hacer mediciones de resistencias de valor bajo, el criterio de aceptación está establecido en la descripción de la prueba en la sección 3.3.1.11 [55].
- *Observaciones:* El valor de corriente directa a manejar en el instrumento puede ser en concordancia con la norma IEEE C57.157, donde se detalla que la corriente aplicada debe tener un valor que no supere el 15% de la corriente nominal del circuito medido [56], en el caso del transformador medido se debe obtener el valor de la corriente nominal que pasa por cada bobina, por lo que se podría decir que el valor de 5 A solo es correcto para el devanado de baja corriente del TC. Otra observación es que, si no se posee el valor de la resistencia de devanados dada por el fabricante, se puede

comparar con mediciones anteriores para verificar el estado del devanado. En caso de no tener esos valores se recomienda cotejar el valor obtenido para un devanado de una fase con otras fases si es un transformador trifásico, o en su defecto con los resultados de un transformador similar.



**Figura 3.8.** Diagrama de conexiones del transformador combinado de medida monofásico [Elaboración Propia].



**Figura 3.9.** Resultados de la medición de la resistencia de bobinados en la bobina C – L del lado de baja del TC [Elaboración Propia].

### Prueba de Relación de Transformación

Para el laboratorio de la Empresa Eléctrica Quito, la relación de vueltas de un transformador debe medirse con el objetivo de verificar que se cumple con lo especificado por el fabricante en los datos de placa. Durante este ensayo solo se midió la relación de transformación en el TP. En este caso se utilizó un TTR, se conectó el cable señalado con la letra H a la bobina de alto voltaje y el cable señalado con la letra X a la bobina de bajo voltaje, el instrumento inyecta un voltaje de prueba en el lado de alto voltaje y mide el valor inducido en el lado de bajo voltaje, luego indica en su pantalla el valor de la relación de transformación medida. En la Figura 3.10 se observa el diagrama de conexiones usado en el laboratorio para medir este parámetro. El laboratorio considera satisfactorio el ensayo de relación de transformación cuando la tolerancia es menor o igual al 0,5%.

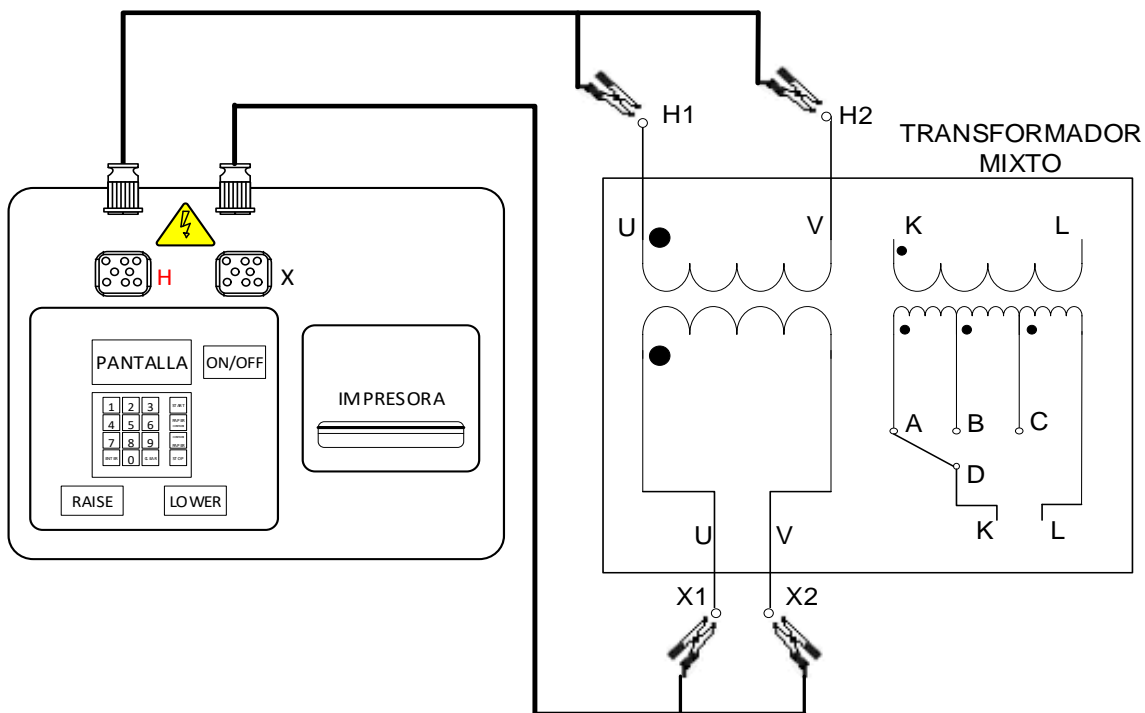
El valor obtenido como resultado se indica en la Tabla 3.12.

**Tabla 3.12.** Resultados de la prueba de relación de transformación en el TP [Elaboración Propia].

Parámetro	Valor Medido	Valor de Placa	Tolerancia
$\frac{V_1}{V_2}$	118,94	120	0,88%

En este caso se considera que el valor obtenido de la relación de transformación no está dentro del valor de tolerancia permitido.





**Figura 3.10.** Conexión del TTR para medición de la relación de transformación en el TP del Transformador combinado de medida [Elaboración Propia].

- *Criterio según la norma C 57.12.90:* La norma especifica varios métodos para la medición de la relación de transformación, uno de ellos es el uso de un transformador patrón, este se conecta en paralelo con el transformador a medirse junto con un voltímetro que indica la diferencia de voltaje. La tolerancia del error en la medición debe ser máximo del 0,5% [57].
- *Observaciones:* En el laboratorio de transformadores, efectúan este ensayo de acuerdo con la norma para transformadores de distribución, pero para los transformadores mixtos, al ser utilizados en la medición, deben tener una relación de vueltas con una exactitud muy elevada, por lo que las normas de fabricación tanto IEC como IEEE recomiendan hacer un ensayo de precisión de relación y de desplazamiento de fase en lugar de una prueba de relación de transformación.

### **Prueba de la Rigidez Dieléctrica del Aceite Aislante en el Transformador**

Este ensayo se efectúa de la misma manera que en el apartado de pruebas realizadas a la caja de maniobras presentado en el numeral 3.2.1.1, empleándose el mismo probador de aceite e igual número de descargas para obtener el valor promedio de el voltaje de ruptura.

### 3.2.2. ENSAYOS APLICABLES Y NO APLICABLES EN EL LABORATORIO DE TRANSFORMADORES DE LA EEQ

En concordancia con los ensayos descritos en la sección 2.2.1 y la información descrita en la sección 3.1.2., se hace una clasificación de los ensayos como se indica en la Tabla 3.13.

**Tabla 3.13.** Clasificación de los ensayos para Cajas de Maniobra y Transformadores Combinados de Medida [Elaboración Propia].

<b>Ensayos Aplicables Actualmente</b>	<b>Ensayos Aplicables a Futuro</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Verificación de Marcación de Terminales</li><li>• Resistencia de Devanados</li><li>• Resistencia de Contactos</li><li>• Resistencia de Aislamiento</li><li>• Pruebas Operativas en Cajas de Maniobra</li><li>• Relación de Transformación</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Voltaje Aplicado</li><li>• Voltaje Inducido</li><li>• Descargas Parciales</li><li>• Precisión</li><li>• Sobrevoltaje Entre Espiras</li><li>• Capacitancia y Factor de Disipación</li></ul>

Las pruebas de relación de transformación y resistencia de bobinados se establecen en la clasificación, pero se emplearán de manera temporal.

### 3.3. GUÍA TÉCNICA DE ENSAYOS

En este apartado se estructura la guía técnica de ensayos dados en normas para la recepción y mantenimiento de transformadores combinados de medida y de cajas de maniobra.

#### 3.3.1. ENSAYOS SOBRE TRANSFORMADORES COMBINADOS DE MEDIDA

Las normas IEC, IEEE y NETA, indican que la mayoría de los ensayos se pueden hacer por separado sobre los transformadores de corriente y de potencial que componen al transformador mixto, con algunas excepciones para las que se dará indicaciones en cada prueba.

##### 3.3.1.1. Voltaje Soportado (Voltaje Aplicado) A Frecuencia Industrial Sobre Los Bornes Primarios

###### A) Objetivo

Determinar que el aislamiento del transformador puede soportar voltajes elevados a frecuencia industrial y asegurar su correcto funcionamiento frente a diferentes esfuerzos dieléctricos a los que será sometido a futuro [58].

## B) Normativa

Las normas que establecen las directrices de este procedimiento se detallan en la Tabla 3.14.

**Tabla 3.14.** Normas en que especifican el ensayo de voltaje aplicado [Elaboración propia].

Norma	Sección
IEC 61869-1: 2007	7.3.1
IEC 61869-3: 2011	7.3.1.302
IEC 61869-4: 2013	7.3.1.301
IEC 60060-1: 2010	6.3.1

## C) Aplicabilidad

Este ensayo no puede realizarse hasta que se implemente el sistema de pruebas en alto voltaje descrito en la sección 3.5.1.

## D) Condiciones de Ensayo Para Recepción y Mantenimientos

Las condiciones de ensayo que deben tomarse en cuenta previamente tanto para una prueba de recepción como para los mantenimientos se indican en la Tabla 3.15.

**Tabla 3.15.** Condiciones de ensayo [Elaboración propia].

Recepción	Mantenimiento
<ul style="list-style-type: none"> <li>Se aplica el 100 % del voltaje de frecuencia industrial dado en la Tabla 3.16 [19].</li> <li>Si se repite el ensayo, debe hacerse al 80% del voltaje de ensayo especificado [19].</li> </ul>	Para ensayo de rutina de mantenimiento, el voltaje de ensayo debe ser el 65% del voltaje de ensayo de fábrica [1].

## E) Precauciones Previas al Ensayo

- El voltaje de ensayo debe ser un voltaje alterno que en general tenga una frecuencia de 60 Hz. La forma de onda se debe aproximar a una onda sinusoidal con ambos semiciclos iguales. Para una duración de prueba de 60 segundos, el voltaje de ensayo se debe mantener dentro del  $\pm 1\%$  del nivel especificado a lo largo el ensayo [23].

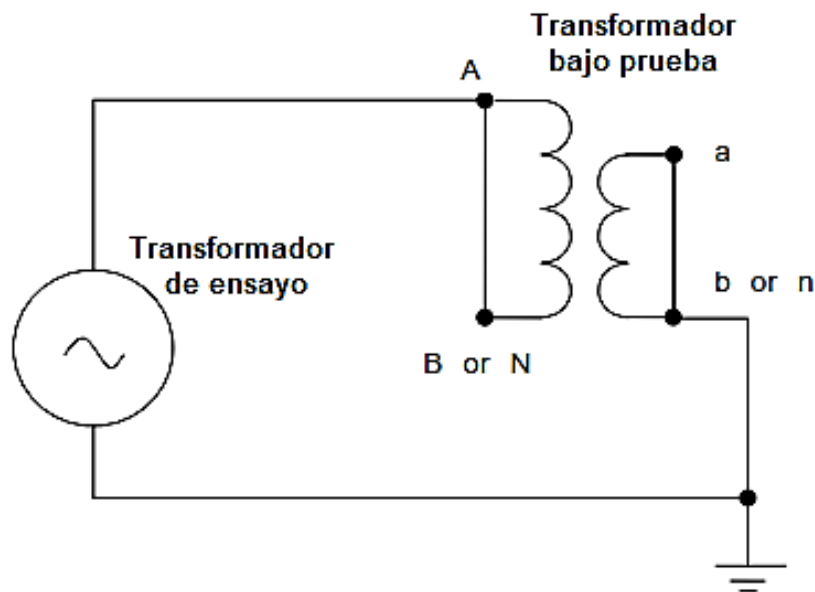
- Verificar que no existan otras conexiones aparte de las que se encuentran especificadas en el procedimiento.

#### F) Equipos e Instrumentos de Laboratorio

- Transformador de ensayos
- Medidor de alto voltaje AC.

#### G) Circuitos de Ensayo

El circuito de ensayo para la prueba de voltaje aplicado sobre el transformador de potencial se presenta en la Figura 3.11.



**Figura 3.11.** Aplicación de voltaje de prueba en modo Común (Fuente separada) [21].

#### H) Voltaje de Prueba

Para el voltaje de ensayo se presenta la Tabla 3.16., en ella se especifica la corrección del voltaje de frecuencia industrial por medio del factor de corrección atmosférica, el cual se obtuvo para una altura de 2850 m que es la altitud a la que se encuentra la ciudad de Quito y para  $m$  de 1 debido a que el voltaje de ensayo es de frecuencia industrial, reemplazando estos valores en la ecuación (1.4) se obtiene que  $k = 1,25$ .

**Tabla 3.16.** Niveles de aislamiento nominales para devanados primarios de transformadores de instrumentos [19].

Voltaje más alto para el equipo $U_m$ (r.m.s.) kV	Voltaje nominal no disruptivo a frecuencia industrial $U_0$ (r.m.s.) kV	Voltaje nominal no disruptivo a frecuencia industrial corregido para Quito $U$ (r.m.s.) kV	Voltaje nominal no disruptivo de impulso tipo rayo (valor pico) kV
		$k = 1,25$	
0,72	3	2	-
1,2	6	5	-
3,6	10	8	20 40
7,2	20	16	40 60
12	28	22	60 75
17,5	38	30	75 95
24	50	40	95 125
36	70	56	145 170
52	95	76	250
72,5	140	112	325
100	185	147	450
123	185	147	450
	230	183	550
145	230	183	550
	275	219	650
170	275	219	650
	325	259	750
245	395	315	950
	460	367	1050

Nota 1: Para instalaciones expuestas se recomienda elegir los niveles de aislamiento más altos  
Nota 2: En caso de que el transformador de instrumentos este destinado a ser instalado en GIS, los niveles para la prueba de voltaje a frecuencia industrial según la norma IEC 62271-203 podrían ser diferentes.

### I) Procedimientos Para el Transformador de Potencial

Prueba de resistencia a frecuencia industrial de Modo común (fuente separada) en terminales primarios [21]. Para este procedimiento se deben seguir los siguientes pasos:

- 1) Hacer la conexión entre los terminales del secundario, el chasis y el núcleo (si existe un terminal especial de tierra) y la tierra [21]. También se debe conectar a tierra todos los terminales secundarios del transformador de corriente y los primarios que no sean parte de la bobina a ensayar.

- 2) Conectar el equipo proveedor del voltaje de prueba a los terminales del devanado primario cortocircuitados y la tierra tal como se presenta en la Figura 3.11 [21].
- 3) Teniendo en cuenta el tipo de conexión a tierra del transformador seleccione el valor del voltaje de prueba a frecuencia industrial en concordancia con las siguientes indicaciones [21]:
  - Para transformadores sin conexión a tierra con un voltaje más elevado para equipo  $U_m < 300$  kV, el valor apropiado es dado en la Tabla 3.16 [21].
  - Mientras que para transformadores con conexión a tierra el voltaje soportado de corta duración a frecuencia industrial debe ser de 3 kV [21].
- 4) El voltaje de prueba  $U$  se debe aplicar iniciando en un valor bajo para evitar sobrevoltajes de maniobra. Aumentar el valor lentamente a una tasa aproximada del 2% de  $U$  por segundo, dentro de un tiempo máximo de 15 segundos [23].
- 5) Cuando se alcanza el valor del voltaje de ensayo, mantenerlo durante 60 segundos [23].
- 6) Disminuir rápidamente el voltaje de ensayo en un tiempo máximo de 15 segundos, no interrumpir bruscamente el voltaje debido a que puede ocasionar transitorios [23].

#### **J) Procedimiento Para Transformador de Corriente**

La prueba de voltaje de AC en modo diferencial (inducido) para el transformador de voltaje descrito en la sección 3.3.1.2. también es la prueba de frecuencia industrial para el devanado primario del transformador de corriente [22].

#### **K) Criterio de Aceptación o Rechazo**

La prueba es exitosa si no se produce un colapso del voltaje de ensayo [19]. El equipo no aprueba si se escuchan ruidos en el tanque o se visualiza humo, y si hubo una descarga disruptiva [58].

### **3.3.1.2. Voltaje Inducido Sobre Los Bornes Primarios**

#### **A) Objetivo**

Comprobar que el sistema de aislamiento de los transformadores de medida este en buen estado.

## B) Normativa

Las normas que rigen este procedimiento se detallan en la Tabla 3.17.

**Tabla 3.17.** Normas en que especifican el ensayo de voltaje inducido [Elaboración propia].

Norma	Sección
IEC 61869-3:2011	7.3.1.302
IEC 61869-4:2013	7.3,1
IEC 60060-1:2010	6.3.1

## C) Aplicabilidad

Este ensayo no puede realizarse hasta que se implemente el sistema de ensayos en transformadores descrito en la sección 3.5.4.

## D) Condiciones de Ensayo Para Recepción y Mantenimientos

Las condiciones de ensayo específicas para esta prueba en concordancia con el tipo de ensayo se presentan en la Tabla 3.18.

**Tabla 3.18.** Condiciones de ensayo [Elaboración propia].

Recepción	Mantenimiento
<ul style="list-style-type: none"><li>• Se aplicará o inducir el 100 % del voltaje de frecuencia industrial dado en la Tabla 3.16 [19].</li><li>• Si se repite el ensayo, debe hacerse al 80% del voltaje de ensayo especificado [19].</li></ul>	Para transformadores en servicio se debe aplicar un voltaje de prueba del 65% del voltaje de ensayo de fábrica [1].

## E) Precauciones Previas al Ensayo

- Para este ensayo la frecuencia puede ser incrementada por arriba del valor nominal para prevenir la saturación [21].
- La duración de la prueba debe de ser de 60 segundos, sin embargo, si la frecuencia de prueba excede el doble de la nominal la duración de esta debe reducirse siguiendo la ecuación (3.1) con un valor mínimo de 15 segundos [21].

$$\text{duración de la prueba} = \frac{\text{dos veces la frecuencia nominal}}{\text{frecuencia de prueba}} \times 60[s] \quad (3.1)$$

Algunos valores típicos de la duración del ensayo se pueden observar en la Tabla 3.19.

**Tabla 3.19.** Frecuencia vs tiempo de duración del ensayo [1].

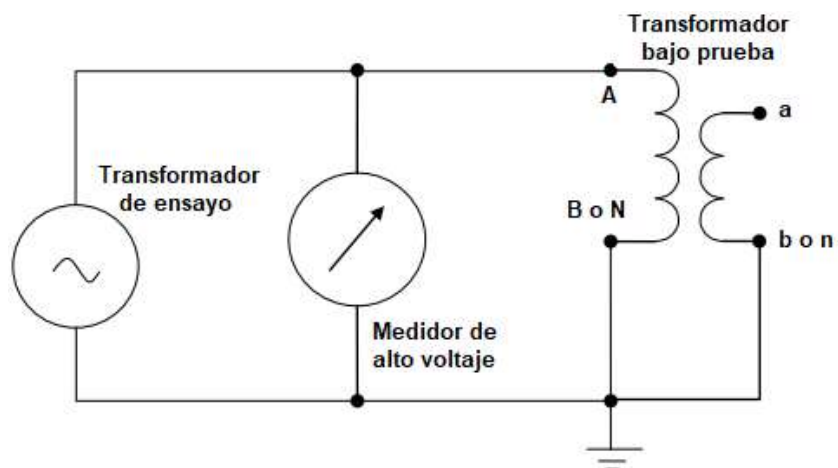
Frecuencia (Hz)	Duración (s)
120 o menos	60
180	40
240	30
300	20
400	18

### F) Equipos e Instrumentos de Laboratorio

- Convertidor estático de frecuencia
- Transformador elevador
- Medidor de alto voltaje

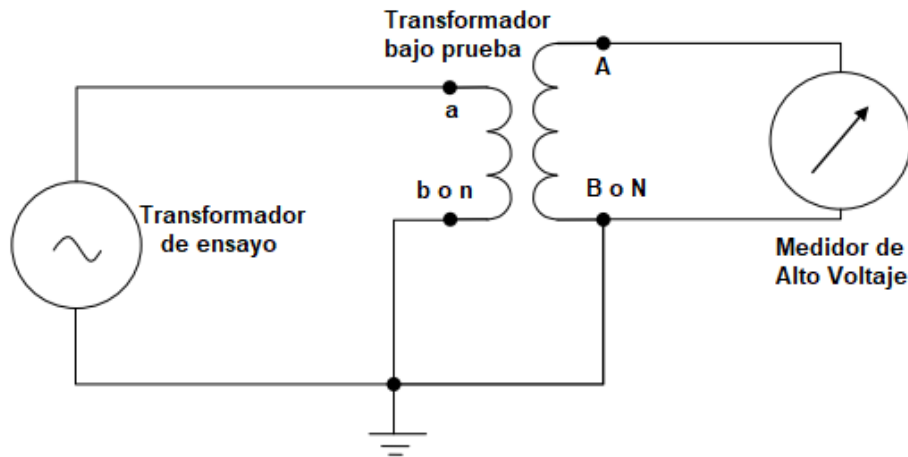
### G) Circuitos de Ensayo

Para este procedimiento se puede utilizar cualquiera de los dos circuitos que se indican en la Figura 3.12. y la Figura 3.13.



**Figura 3.12.** Aplicación del voltaje de prueba en modo diferencial (inducido)-Excitación primaria [21].





**Figura 3.13.** Aplicación del voltaje de prueba en modo diferencial (inducido)  
Excitación secundaria [21].

#### H) Voltaje de Prueba

El voltaje de ensayo se presenta en la Tabla 3.16. corregido por condiciones atmosféricas.

#### I) Procedimientos Para Transformador de Potencial

Esta prueba puede llevarse a cabo de dos formas, puede excitarse el devanado secundario con un voltaje suficiente para inducir en el devanado primario el voltaje de prueba especificado o directamente excitar a la bobina primaria con el voltaje de ensayo especificado [21].

- 1) El voltaje de prueba se mide en el lado de alto voltaje en cada caso, por lo que se debe realizar las conexiones de medición en ese lado del transformador [21].
  - 2) El chasis, la cuba, el núcleo (si es posible conectar a tierra) y un terminal de cada devanado secundario y el otro terminal del devanado primario se debe conectar juntos y a tierra de acuerdo con circuito de ensayo seleccionado [21].
  - 3) El voltaje de prueba se debe aplicar en los terminales del devanado primario como se indica en la Figura 3.12. o excitando el devanado secundario con un voltaje de magnitud suficiente para inducir ese voltaje en el primario como se puede ver en la Figura 3.13 [21].
- Para bobinas con  $U_m < 300 \text{ kV}$ , los valores apropiados se encuentran en la Tabla 3.16 y se eligen dependiendo del voltaje más elevado para equipo [21].

- Si existe una diferencia considerable entre el voltaje más elevado para equipo  $U_m$  y el voltaje primario nominal, el voltaje inducido debe limitarse a cinco veces el voltaje primario nominal [21].
- 4) El voltaje de prueba  $U$  se debe aplicar o inducir comenzando en un valor bajo para evitar sobrevoltajes de maniobra. Aumentar el valor lentamente a una tasa aproximada del 2% de  $U$  por segundo, dentro de un tiempo máximo de 15 segundos [23].
  - 5) Cuando se llega al valor del voltaje de ensayo, teniendo en cuenta la conexión a tierra del transformador de potencial, seleccione una de las siguientes opciones [21]:
    - Si el equipo a ensayar es un transformador de potencial no conectado a tierra se debe aplicar el voltaje de prueba durante la mitad del tiempo requerido que se obtiene con la ecuación (3.1) con un mínimo de 15 segundos [21].
    - Si es un transformador de potencial conectado a tierra, el terminal de voltaje primario destinado a la conexión a tierra durante el servicio debe conectarse a tierra durante el ensayo, y el voltaje de prueba se debe mantener durante 60 segundos si es a frecuencia industrial, mientras que si la frecuencia de ensayo es múltiplo de la frecuencia nominal, el tiempo de duración de la prueba será el valor obtenido con la ecuación (3.1) [21].
  - 6) Luego de ese tiempo, disminuir de forma continua el voltaje de ensayo en un tiempo máximo de 15 segundos, no interrumpir bruscamente el voltaje debido a que puede ocasionar transitorios [23].

#### **J) Procedimiento Para Transformador de Corriente**

La norma IEC, no describe la ejecución de este ensayo en el transformador de corriente.

#### **K) Criterio de Aceptación o Rechazo**

El transformador pasa la prueba si no existen colapsos de voltaje y no se presentan daños visibles en el aislamiento, roturas o humo [21].

### **3.3.1.3. Medición de Descargas Parciales (DP)**

#### **A) Objetivo**

El objetivo de la prueba es certificar que no existan fuentes dañinas de descargas parciales posterior a pruebas de alto voltaje o después de su operación normal [39].

## B) Normativa

Las normas que rigen este procedimiento se detallan en la Tabla 3.20.

**Tabla 3.20.** Normas en que especifican el ensayo de medición de descargas parciales [Elaboración propia]

Norma	Sección
IEC 61869-1:2007	7.3.2
IEC 61869-3:2013	7.3,2.2

## C) Aplicabilidad

Este ensayo no puede realizarse hasta que se implemente en el laboratorio los equipos e instrumentos descritos en las secciones 3.5.1 y 0.

## D) Condiciones de Ensayo Para Recepción y Mantenimientos

No se han determinado condiciones de ensayo específicas para la recepción y el mantenimiento para esta prueba.

## E) Precauciones Previas al Ensayo

- Este ensayo no se debe realizar para valores de  $U_m$  menores a 7,2kV [59].
- El instrumento de medición debe medir la carga aparente expresada en picoculombios (pC). Previo a la medición se debe ejecutar el procedimiento de calibración [59].
- Se debe limpiar la humedad e impurezas del aislamiento, ya que pueden causar descargas parciales que pueden afectar la medición [58].
- El objeto de prueba debe estar a temperatura ambiente [58].
- Los efectos de las tensiones: mecánica, eléctrica y térmica de pruebas anteriores también pueden afectar los resultados por lo que se aconseja dejar un tiempo de reposo después del estrés previo antes de realizar esta prueba [58].

## F) Equipos e Instrumentos de Laboratorio

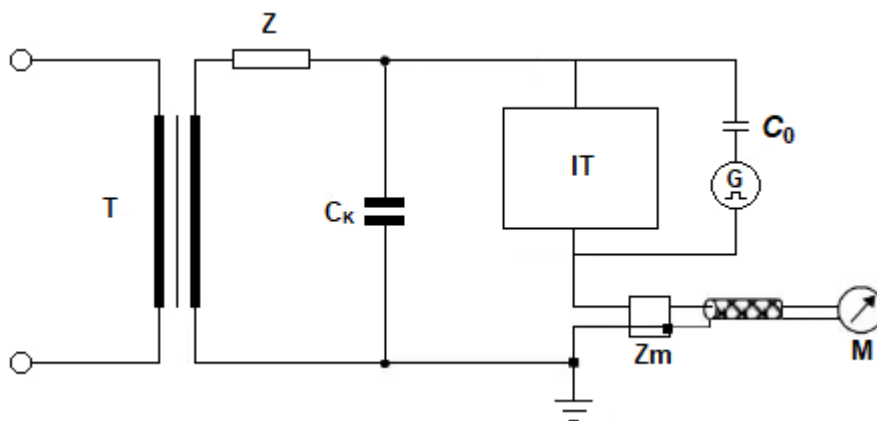
- Equipo de ensayos de alto voltaje AC.
- Sistema de medición de descargas parciales.

## G) Circuitos de Ensayo

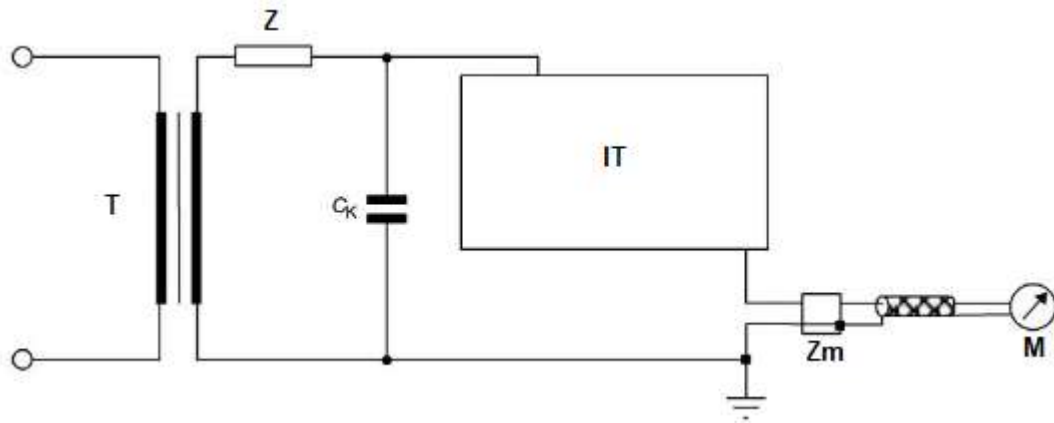
En la Figura 3.14. se presenta un ejemplo de la conexión del instrumento calibrador en los terminales donde se va a conectar el transformador a ensayar, este circuito permite ajustar el equipo de medición para que tome correctamente la medida de las descargas parciales. Para la ejecución de este ensayo se usa el diagrama circuital de la Figura 3.15., respectivamente, cada uno de ellos consta de los elementos señalados en la Tabla 3.21.

**Tabla 3.21.** Elementos que componen los circuitos de calibración y de medición de descargas parciales [19].

Elemento	Descripción
<b>IT</b>	Transformador de medida a probar
<b><math>C_k</math></b>	condensador de acople
<b><math>Z_m</math></b>	impedancia de medición
<b>T</b>	Transformador de ensayo
<b>Z</b>	Filtro para prevenir pulsos de descarga transitorios a través de la fuente de alto voltaje y reducir la interferencia desde la fuente. (No se coloca si $C_k$ es capacitancia del transformador de ensayo <b>T</b> )
<b>M</b>	Medidor de descargas parciales
<b>G</b>	Generador de pasos de voltaje
<b><math>C_0</math></b>	Capacitor de calibración



**Figura 3.14.** Circuito de calibración [19].



**Figura 3.15.** Circuito de ensayo con la impedancia de medida conectada con el condensador de acople [19].

### J) Voltaje de Prueba

Los voltajes de prueba tanto para el TC como para el TP se determinan de acuerdo con la Tabla 3.22.

**Tabla 3.22.** Voltajes de ensayo de descargas parciales y niveles permisibles [19].

Tipo de Puesta a Tierra del Neutro	Tipo de Transformador	Voltaje de Prueba de DP (r.m.s.) [kV]	Máximo Nivel Permissible de DP en [pC]	
			Tipo de Aislamiento	
			Inmerso en líquido o Gas	Sólido
Sistema con neutro puesto a tierra (factor de falla a tierra $\leq 1,4$ )	TC y TP conectado a Tierra	$U_m$ $\frac{1,2 \cdot U_m}{\sqrt{3}}$	10 5	50 20
	TP no conectado a tierra	$1,2 \cdot U_m$	5	20
Sistema aislado o con el neutro no puesto a tierra efectivamente (factor de falla a tierra $> 1,4$ )	TC y TP conectado a Tierra	$U_m$ $\frac{1,2 \cdot U_m}{\sqrt{3}}$	10 5	50 20
	TP no conectado a tierra	$1,2 \cdot U_m$	5	20

Nota 1: Si no se ha definido el sistema del neutro, son válidos los valores dados para sistemas puestos a tierra aislados o no puestos a tierra efectivamente.  
Nota 2: El nivel máximo de DP es válido también para valores de frecuencia diferentes de la frecuencia nominal.

### H) Procedimiento de Ensayo Para El Transformador de Potencial

El procedimiento de la prueba es el mismo que para el transformador de corriente, pero se debe tener en cuenta la siguiente condición adicional:

El circuito de ensayo es el mismo para transformadores de potencial conectados a tierra y para los que no tienen conexión a tierra, pero se realizarán dos pruebas aplicando el voltaje de ensayo de forma alternada a cada uno de los terminales de alto voltaje con el otro terminal de alto voltaje conectado a un terminal del bobinado de bajo voltaje y al chasis y la cuba de acuerdo con la Figura 3.15 [21].

### **I) Procedimiento de Ensayo Para El Transformador de Corriente**

El ensayo de medición de descargas parciales se ejecuta de la siguiente forma:

- 1) La medición de descargas parciales requiere de un voltaje de estrés previo a la aplicación del voltaje de prueba, esto se puede conseguir por medio de cualquiera de los procedimientos descritos a continuación [19]:
  - *Procedimiento A:* Después de la prueba de voltaje aplicado, mientras se está reduciendo el voltaje se puede alcanzar el voltaje de ensayo de descargas parciales dado en la Tabla 3.22 [19].
  - *Procedimiento B:* La prueba de descargas parciales se realiza justo después de la prueba de voltaje aplicado, se incrementa el voltaje hasta alcanzar el 80% del voltaje de ensayo de voltaje aplicado, mantenerlo durante 60 segundos y luego reducirlo de forma continua hasta el valor de voltaje de prueba de descarga parcial dado en la Tabla 3.22[19].

El método elegido se debe indicar en el reporte de ensayo.

- 2) Mantener el voltaje de ensayo y medir las descargas parciales en un tiempo no mayor a 30 segundos. Los valores aceptables para la medición se describen en la Tabla 3.22 [19].
- 3) Reducir el voltaje continuamente en un tiempo no mayor a 15 segundos evitando hacer un corte brusco para no producir transitorios que dañen al equipo [19].

### **K) Criterio de aceptación o rechazo**

Si el transformador sobrepasa el nivel máximo permitido de descargas parciales descrito en la Tabla 3.22, no pasa la prueba.

#### **3.3.1.4. Voltaje Aplicado Entre Secciones**

##### **A) Objetivo**

Determinar que el aislamiento entre secciones de un transformador de medida puede soportar voltajes elevados a frecuencia industrial [30].

## B) Normativa

Las normas que rigen este procedimiento se detallan en la Tabla 3.23.

**Tabla 3.23.** Normas en que especifican el ensayo de voltaje aplicado entre secciones [Elaboración propia]

Norma	Sección
IEC 61869-1:2007	7.3.3
IEC 61869-2:2012	7.3.3
IEC 61869-3:2013	7.3.3

## C) Aplicabilidad

Este ensayo no se puede aplicar en las condiciones actuales del laboratorio a menos que se implementen los equipos de la sección 3.5.1.

## D) Condiciones de Ensayo Para Recepción y Mantenimientos

Las condiciones de ensayo específicas para esta prueba en concordancia con el tipo de ensayo se presentan en la Tabla 3.24.

**Tabla 3.24.** Condiciones de ensayo [Elaboración propia].

Recepción	Mantenimiento
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicar el 100% del voltaje de ensayo <math>U</math> [19].</li> <li>• Si se repite el ensayo aplicar el 80% del voltaje de ensayo [19].</li> </ul>	Aplicar el 65% del voltaje de ensayo [1].

## E) Precauciones Previas al Ensayo

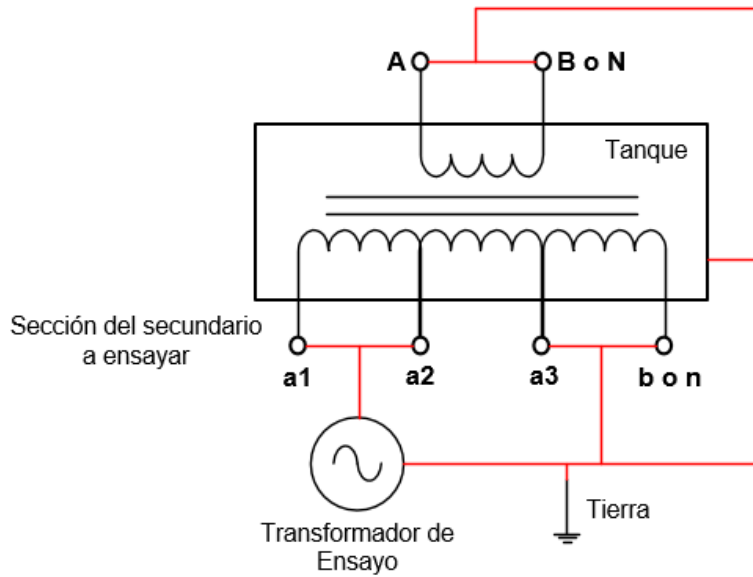
- Este ensayo solo es aplicable en transformadores de instrumentos que tienen más de una sección [19].

## F) Equipos e Instrumentos de Laboratorio

- Sistema de Pruebas de Alto Voltaje AC.

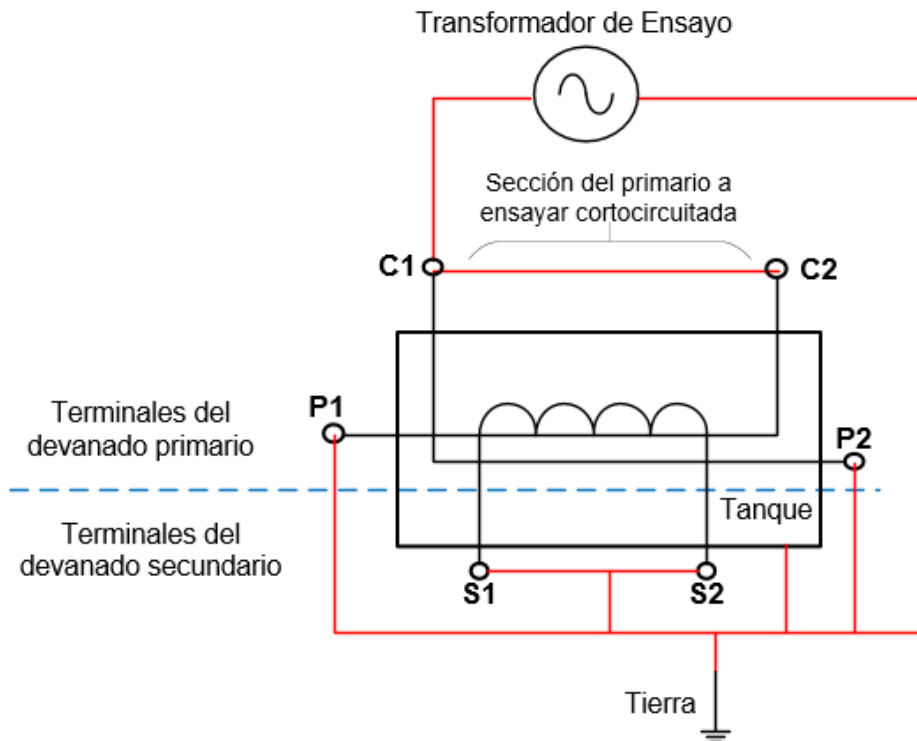
## G) Circuito de Ensayo

En el transformador de potencial se debe aplicar el ensayo de voltaje aplicado sobre las secciones del devanado secundario, en la Figura 3.16. se puede observar un ejemplo de conexiones para esta prueba.



**Figura 3.16.** Circuito de ensayo para voltaje aplicado entre secciones del devanado secundario del transformador de potencial [Elaboración propia].

Para el transformador de corriente si posee secciones en el primario un ejemplo de las conexiones para el ensayo se presenta en la Figura 3.17.



**Figura 3.17.** Circuito de ensayo para el TC si tiene su devanado primario en secciones [Elaboración propia].

## H) Voltaje de Ensayo



El voltaje de ensayo  $U$  que indica la norma para una prueba de voltaje aplicado entre secciones es de 3kV r.m.s. [19].

#### **I) Procedimiento Para Transformador de Potencial**

El procedimiento para el transformador de potencial es el mismo que para el transformador de corriente, pero se debe hacer en las secciones del devanado secundario [17].

#### **J) Procedimiento Para Transformador de Corriente**

- 1) Cortocircuitar los terminales de la sección a ensayar antes de la prueba [19].
- 2) El chasis, el tanque y el núcleo (si posee un terminal de tierra especial) y los terminales de las otras secciones se deben conectar juntos y a tierra [19].
- 3) El voltaje de prueba  $U$  se debe aplicar iniciando en un valor bajo para evitar sobrevoltajes de maniobra. Aumentar el valor lentamente a una tasa aproximada del 2% de  $U$  por segundo, dentro de un tiempo máximo de 15 segundos [23].
- 4) Cuando se alcanza el valor  $U$  para este ensayo, mantenerlo durante 60 segundos [23].
- 5) Disminuir rápidamente el voltaje de ensayo en un tiempo máximo de 15 segundos, no interrumpir bruscamente el voltaje debido a que puede ocasionar transitorios [23].

#### **K) Criterio de Aceptación o Rechazo**

El transformador pasa la prueba si no se observa roturas en el aislamiento entre secciones, no se observa humo ni se escuchan ruidos en el tanque. No debe haber descargas disruptivas.

### **3.3.1.5. Voltaje Aplicado Sobre los Bornes Secundarios**

#### **A) Objetivo**

Comprobar el funcionamiento del aislamiento interno entre diferentes devanados y contra tierra sometidos a un voltaje de frecuencia industrial mucho mayor de la que aparecerá en servicio [30].

#### **B) Normativa**

Las normas que rigen este procedimiento se detallan en la Tabla 3.25.

**Tabla 3.25.** Normas en que especifican el ensayo de voltaje aplicado sobre los bornes secundarios [Elaboración propia].

<b>Norma</b>	<b>Sección</b>
IEC 61869-2:2012	7.3.4
IEC 61869-3:2013	7.3.4
IEC 61869-4:2013	7.3.4

### **C) Aplicabilidad**

Este ensayo no puede ser ejecutado hasta que no se hayan implementado los equipos e instrumentos de la sección 3.5.1.

### **D) Condiciones de Ensayo Para Recepción y Mantenimiento**

Las condiciones que se deben tomar en cuenta para este ensayo, dependiendo de si es para recepción o para mantenimiento, se señalan en la Tabla 3.26.

**Tabla 3.26.** Condiciones de ensayo [Elaboración propia]

<b>Recepción</b>	<b>Mantenimiento</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicar el 100% del voltaje de ensayo [19].</li> <li>• Si se repite el ensayo aplicar el 80% del voltaje de ensayo [19].</li> </ul>	Aplicar el 65% del voltaje de ensayo [1].

### **E) Precauciones Previas al Ensayo**

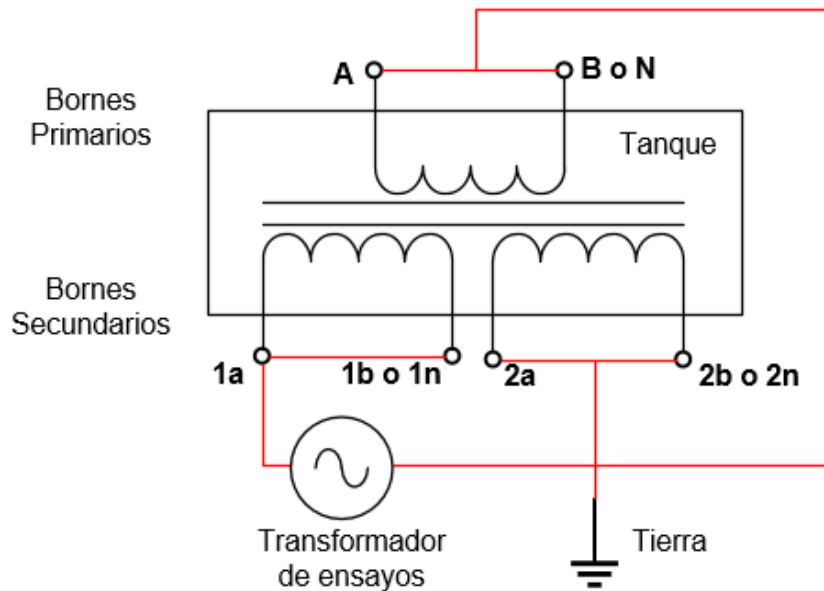
- Este ensayo debe ejecutarse sobre cada devanado secundario en cortocircuito [19].

### **F) Equipos e Instrumentos de Laboratorio**

- Sistema de ensayos de alto voltaje AC

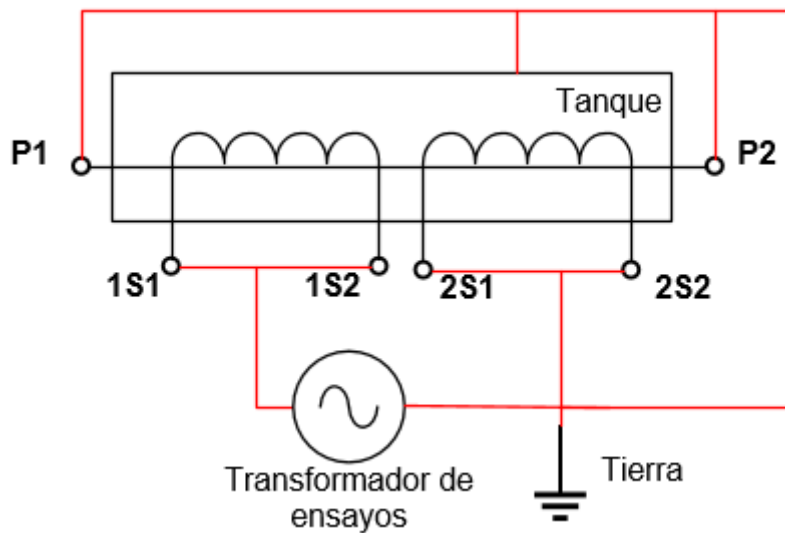
### **G) Circuitos de Ensayo**

Un ejemplo de conexiones para el ensayo de voltaje aplicado sobre los bornes secundarios en el transformador de potencial se presenta en Figura 3.18.



**Figura 3.18.** Circuito de ensayo de voltaje aplicado en bornes secundarios sobre el TP [Elaboración Propia].

En la Figura 3.19. se puede observar una forma de efectuar las conexiones para este ensayo sobre los bornes secundarios de un transformador de corriente.



**Figura 3.19.** Circuito de conexión para la prueba de voltaje aplicado en bornes secundarios sobre el TC [Elaboración propia].

#### H) Voltaje de Prueba

El voltaje de ensayo  $U$  que indica la norma para una prueba de voltaje aplicado sobre bornes secundarios es de 3kV r.m.s. [19].

#### I) Procedimiento Para el Transformador de Potencial

El procedimiento para llevar a cabo este ensayo sobre el transformador de potencial es el siguiente:

- 1) Cortocircuitar los terminales del devanado secundario a ensayar antes de la prueba [19].
- 2) El chasis, el tanque y el núcleo (si posee un terminal de tierra especial) y los terminales de los demás devanados se deben conectar juntos y a tierra [19].
- 3) El voltaje de prueba  $U$  se debe aplicar iniciando en un valor bajo para evitar sobrevoltajes de maniobra. Aumentar el valor lentamente a una tasa aproximada del 2% de  $U$  por segundo, dentro de un tiempo máximo de 15 segundos [23].
- 4) Cuando se alcanza el valor  $U$  para este ensayo, mantenerlo durante 60 segundos [23].
- 5) Disminuir rápidamente el voltaje de ensayo en un tiempo máximo de 15 segundos, no interrumpir bruscamente el voltaje debido a que puede ocasionar transitorios [23].

#### **J) Procedimiento Para el Transformador de Corriente**

El procedimiento se lleva a cabo de la misma forma para el TC, cortocircuitando el devanado secundario a ensayar y colocando a tierra los demás.

#### **K) Criterio de Aceptación o Rechazo**

El transformador pasa la prueba si no se presentan roturas en el aislamiento de los devanados secundarios, no se observa humo ni se escuchan ruidos en el tanque. No debe haber descargas disruptivas.

### **3.3.1.6. Prueba de Precisión**

#### **A) Objetivo**

Verificar que el transformador combinado cumpla con los límites de error de la clase de precisión que le fue asignada [30].

#### **B) Normativa**

Las normas que rigen este procedimiento se detallan en la Tabla 3.27.

**Tabla 3.27.** Normas en que especifican el ensayo de prueba de precisión [Elaboración propia].

<b>Norma</b>	<b>Sección</b>
IEC 61869-2:2007	7.3.5
IEC 61869-3:2013	7.3.5
IEC 61869-4:2013	7.3.5

### **C) Aplicabilidad**

Este ensayo no puede realizarse hasta que se implemente en el laboratorio los equipos e instrumentos descritos en la sección 3.5.3.

### **D) Condiciones de Ensayo Para Recepción y Mantenimientos**

Las condiciones de ensayo específicas para esta prueba en concordancia con el tipo de ensayo se presentan en la Tabla 3.28.

**Tabla 3.28.** Condiciones de ensayo [Elaboración propia].

<b>Recepción</b>	<b>Mantenimiento</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Está permitido realizar la prueba a un número reducido de corrientes o voltajes siempre y cuando el fabricante otorgue información de una prueba tipo sobre un transformador similar [20] [21].</li> <li>• Se debe tomar en cuenta las variaciones del error debido a la influencia del transformador de corriente sobre el transformador de potencial y viceversa evaluadas en las pruebas tipo [22].</li> <li>• Se debe realizar la prueba de precisión para verificar que esta corresponda con la que el fabricante señala en la placa de datos.</li> </ul>	<p>Realizar el ensayo de rutina de la misma forma en que se ejecuta para la recepción</p>

### **E) Precauciones Previas al Ensayo**

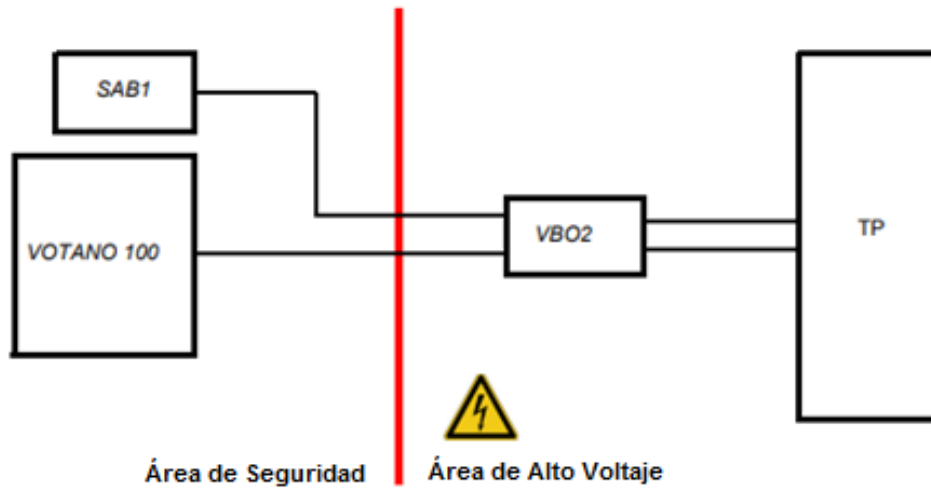
- El instrumento de ensayo indica que se debe tener cuidado con los valores altos de voltaje y corriente que manejan [60].
- Hacer las conexiones para la medición sobre el transformador a ensayar verificando que esté desconectado de la red de alimentación [61] [60].

### **F) Equipos e Instrumentos de Laboratorio**

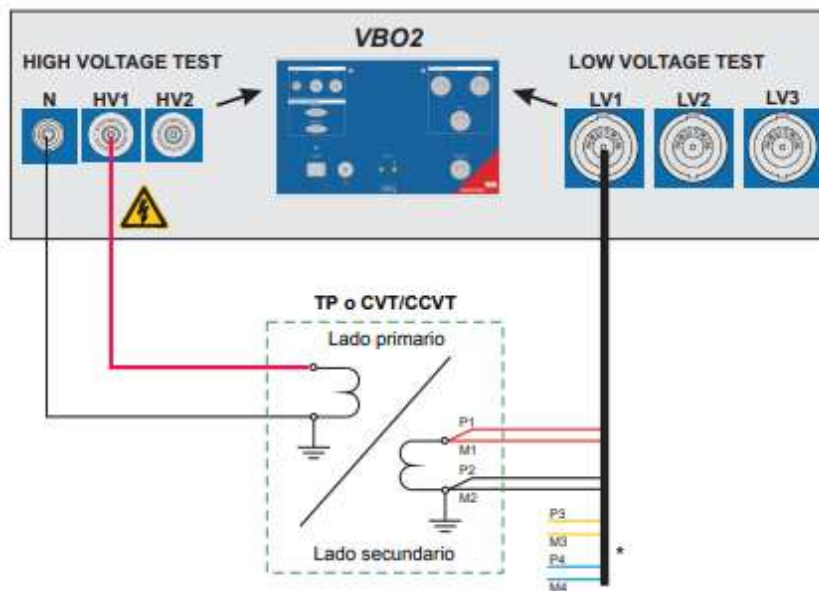
- Equipo de medición de precisión de relación y desplazamiento de fase.

### **G) Circuitos de Ensayo**

En la Figura 3.20 y la Figura 3.21 se representa las conexiones del equipo de medición para el lado del TP.

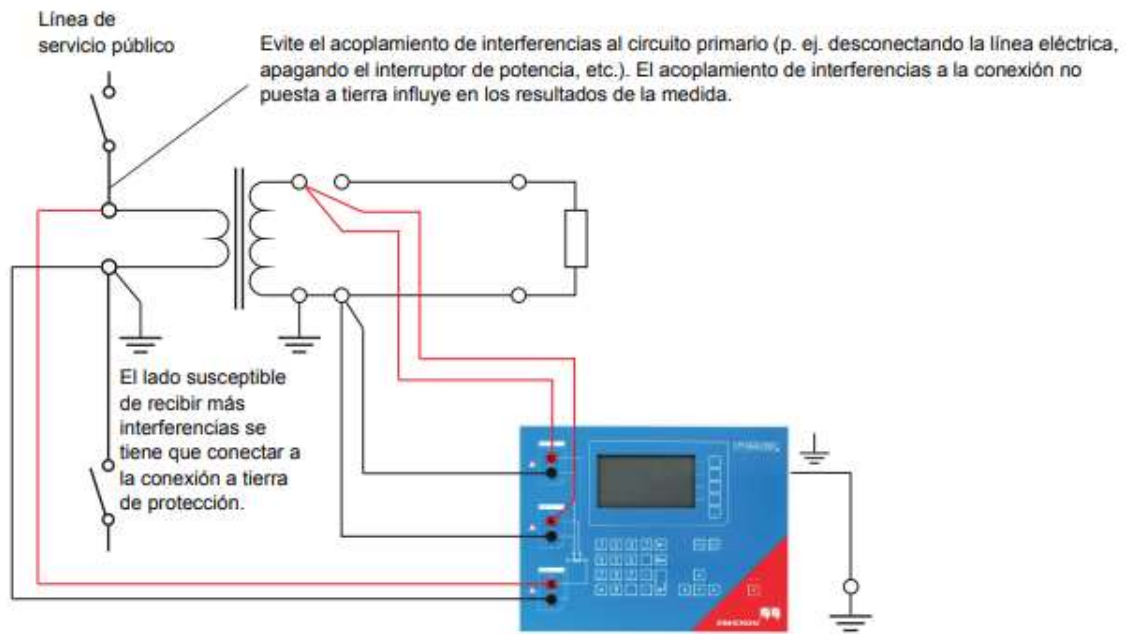


**Figura 3.20.** Circuito de ensayo para la prueba de precisión en el lado del transformador de potencial [60].



**Figura 3.21.** Conexiones del instrumento para alto voltaje del equipo de medición y el TP [60].

Para la prueba de precisión sobre el transformador de corriente se presenta el diagrama de conexión indicado en la Figura 3.22.



**Figura 3.22.** Diagrama de conexiones para la prueba de precisión sobre el Transformador de corriente [61].

## H) Voltaje y Corriente de Ensayo

- El voltaje de ensayo para el transformador de potencial se debe aplicar en tres porcentajes: 80%, 100% y 120% del voltaje nominal, y en dos diferentes rangos de carga nominal de salida descritos en la Tabla 3.29 [21].

**Tabla 3.29.** Rangos de carga para la prueba de precisión sobre el TP [21].

Rango de Carga	Valores de salida nominal preferidos en VA	Valores de salida para el ensayo en % (del nominal)	Factor de Potencia
I	1,0-2,5-5-10	0 y 100	1
II	10-25-50-100	25 y 100	0,8 en atraso

- Las corrientes de ensayo para el transformador de corriente se deben aplicar en varios porcentajes dependiendo de su clase:
  - Para clases entre 0,1 a 1, se mide el error al 5%, 20%, 100% y 120% de la corriente nominal, para cualquier valor de carga secundaria entre el 25 y 100% de la carga nominal [21].
  - Los transformadores de clase 3 y 5 se mide el error entre el 50% y 100% de la carga nominal secundaria.

## I) Procedimiento de Ensayo Para El Transformador de Potencial

El ensayo de precisión sobre el transformador de potencial se efectúa como se describe a continuación:

- 1) Conectar el equipo de medición al lado del transformador de potencial tal como se observa en la Figura 3.20. y la Figura 3.21 [21].
- 2) Se debe aplicar tres diferentes proporciones del voltaje nominal a frecuencia industrial y en dos diferentes rangos de carga descritos en el literal J).
- 3) El equipo de medición evalúa automáticamente de acuerdo con la norma de prueba los errores de relación y desplazamiento de fase.

#### **J) Procedimiento de Ensayo Para El Transformador de Corriente**

El ensayo de precisión sobre el transformador de corriente se lleva a cabo de la siguiente manera:

- 1) Se deben conectar el instrumento de medición como lo indica el esquema establecido en la Figura 3.22 o como indique el instrumento de medición.
- 2) la prueba se realiza aplicando las corrientes de ensayo dadas en el literal J) dependiendo de la clase del equipo.
- 3) El instrumento de medición evalúa automáticamente el desplazamiento de fase y el error de relación dados en los criterios de aceptación.

#### **K) Criterios de Aceptación o Rechazo**

El transformador combinado de medida aprueba el ensayo si:

- En el transformador de potencial el error de voltaje y el desplazamiento de fase a frecuencia nominal no debe exceder de los valores dados en la Tabla 3.30 a cualquier voltaje entre el 80% y el 100% del voltaje nominal para cada clase [21].



**Tabla 3.30.** Límites de error de voltaje y desplazamiento de fase transformadores de voltaje para medición [21].

Clase	Error de voltaje (relación) $\varepsilon_u$ $\pm\%$	Desplazamiento de fase $\Delta_\phi$	
		$\pm$ Minutos	$\pm$ Centiradianes
0,1	0,1	5	0,15
0,2	0,2	10	0,3
0,5	0,5	20	0,6
1,0	1,0	40	1,2
3,0	3,0	No especificado	No especificado

Nota: Cuando los transformadores tienen dos devanados secundarios separados, se debe tener en cuenta la interdependencia mutua. Es necesario especificar un rango de salida para cada devanado bajo prueba y cada uno debe cumplir los requisitos de precisión dentro de este rango con los devanados no probados en cualquier carga desde cero hasta el valor nominal.

Si no se proporciona ninguna especificación de rangos de salida, estos rangos para el devanado bajo prueba serán del 25% al 100% de la salida nominal para cada devanado.

Si uno de los devanados se carga solo ocasionalmente por períodos cortos o solo se usa como un devanado de voltaje residual, su efecto sobre otros devanados puede ser descuidado.

- En el transformador de corriente el límite del error de corriente y desplazamiento de fase no debe exceder los valores dados para cada porcentaje de corriente nominal evaluado.

Para clases de 0,1 a 1 los errores aceptables se presentan en la Tabla 3.31.

**Tabla 3.31.** Límites de error de corriente y desplazamiento de fase para transformadores de corriente para medición (clases 0,1 a 1) [20].

Clase de Precisión	$\pm$ Error de corriente porcentual (relación) $\varepsilon_i$				$\pm$ desplazamiento de fase $\Delta_\phi$							
					Minutos				Centiradianes			
% de corriente nominal	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0.1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,15
0.2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0.5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1.0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

Para transformadores de corriente de clases 3 y 5 el límite de error aceptable se describe en la Tabla 3.32. para estos transformadores no se han indicado límites para el desplazamiento de fase.

**Tabla 3.32.** Límites de error de corriente para transformadores de corriente para medición (clases 3 y 5) [20].

Clase	± Error de corriente (relación) porcentual, al porcentaje de corriente nominal presentado abajo	
	50	120
3	3	3
5	5	5

### 3.3.1.7. Verificación de la marcación de terminales

#### A) Objetivo

Determinar que la marcación de los terminales sea la indicada en la placa de conexiones y que se encuentre claramente visible [30].

#### B) Normativa

En la Tabla 3.33. se especifican las normas en las que se puede identificar este ensayo.

**Tabla 3.33.** Normas de aplicación de la verificación de la marcación de terminales [Elaboración propia].

Norma	Sección
IEC 61869 – 1:2007	7.3.6
IEC 61869 – 2:2012	7.3.6 y 6.13.200
IEC 61869 – 3:2011	7.3.6; 6.13.301.1 y 6.13.301.2

#### C) Aplicabilidad

Este ensayo es aplicable en las condiciones actuales del laboratorio, debido a que no se necesita ningún instrumento o equipo de ensayo, solo se debe hacer observaciones periódicas.

#### D) Condiciones de Ensayo Para Recepción y Mantenimiento

Para esta prueba se deben tomar en cuenta las consideraciones de recepción y de mantenimiento descritas en la Tabla 3.34.

**Tabla 3.34.** Condiciones de ensayo [Elaboración propia].

Recepción	Mantenimiento
Observar que todos los terminales vengan con su respectiva marcación en cada terminal de conexión para que no existan confusiones	Para el mantenimiento se debe observar que las marcas se encuentren legibles o de otra forma retocarlas

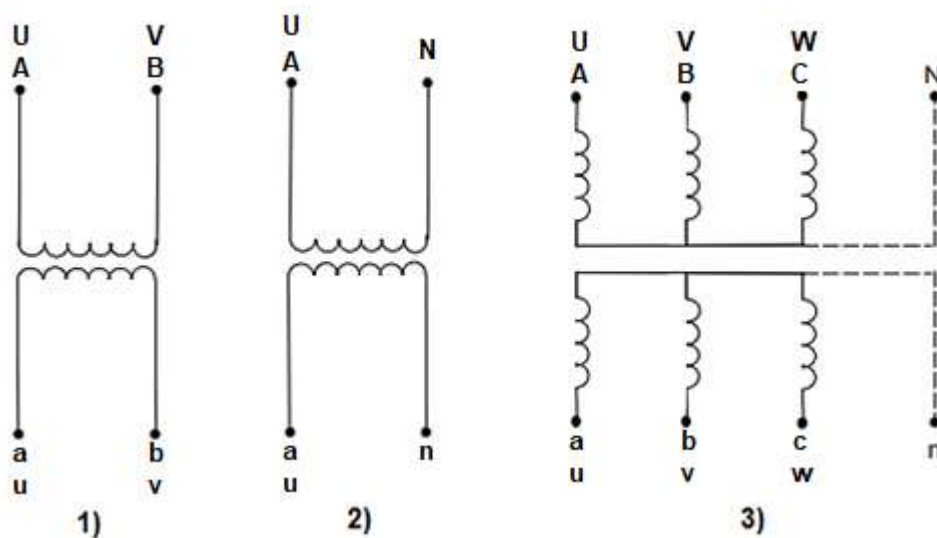
### E) Marcación de Terminales Para el Transformador de Potencial

Este método de marcación es aplicable a transformadores monofásicos, trifásicos conformados por unidades monofásicas o transformadores trifásicos que tienen un núcleo común para las tres fases [21].

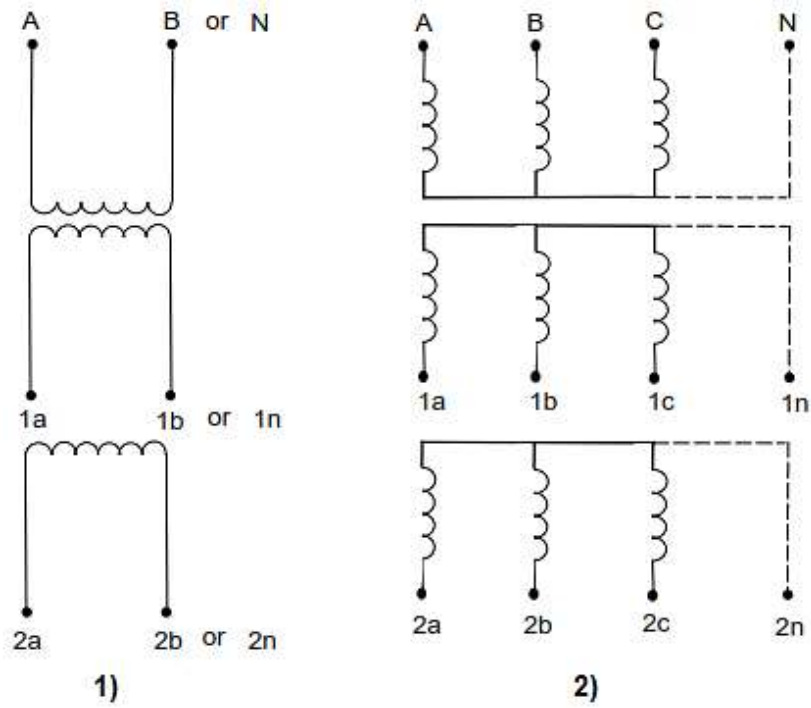
- Las letras mayúsculas A, B, C o N se usan para marcar los terminales del devanado primario, mientras que las minúsculas a, b, c o n corresponden a la denominación de los terminales del devanado secundario [21]. En las versiones comerciales en el país se ha observado que las letras usadas son U, V, W y N y sus versiones en minúscula.
- Las letras A, B y C o U, V y W representan a los terminales aislados, mientras que la N denota al terminal que se va a conectar a tierra y cuyo aislamiento es menor que el de los otros terminales [21].
- Los nombres: da y dn se usan para los terminales de los devanados destinados a suministrar un voltaje residual [21].

### F) Representación de la Marcación de Terminales del Transformador de Potencial

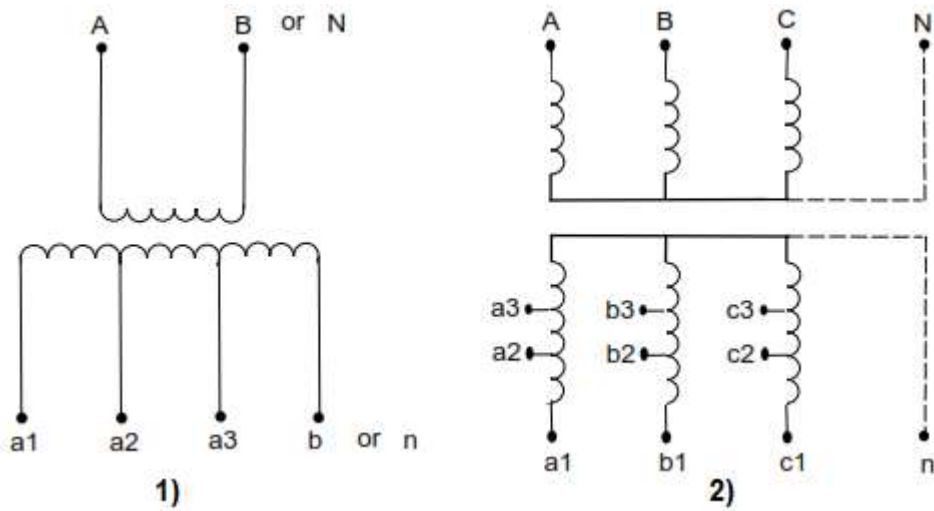
La marcación de terminales se hace en concordancia con la Figura 3.23, Figura 3.24, Figura 3.25 y Figura 3.26.



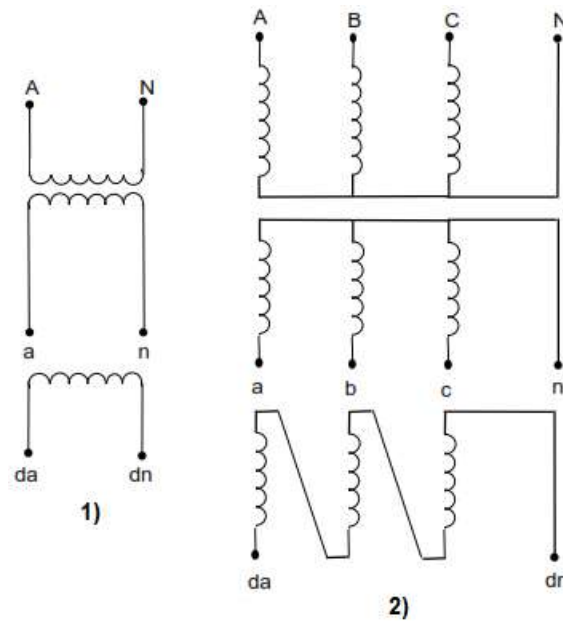
**Figura 3.23.** 1) Transformador monofásico con terminales totalmente aislados y un solo secundario. 2) Transformador monofásico con un terminal primario con aislamiento reducido y un solo secundario. 3) Transformador trifásico con un solo secundario [21].



**Figura 3.24.** 1) Transformador monofásico con dos secundarios. 2) Transformador trifásico con dos secundarios [21].



**Figura 3.25.** 1) Transformador monofásico con un secundario con varios taps. 2) Transformador trifásico con un secundario de varios taps [21].



**Figura 3.26.** 1) Transformador monofásico con devanado de voltaje residual.  
2) Transformador trifásico con devanado de voltaje residual [21].

### G) Marcación de Terminales Para el Transformador de Corriente

La marcación de terminales se usa para identificar [20]:

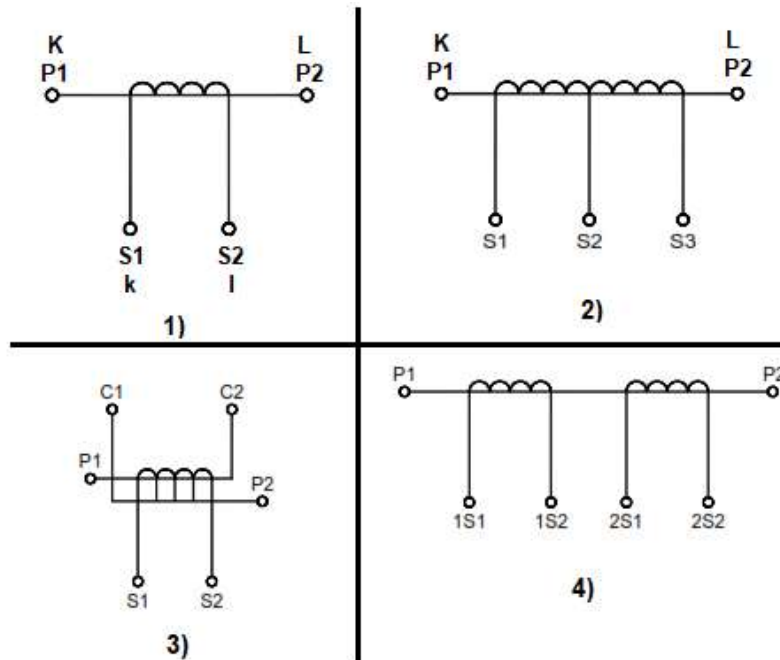
- Los devanados primario y secundario [20].
- Las secciones del devanado en el caso de que existan [20].
- Polaridad relativa tanto de los devanados como de sus secciones [20].
- Derivaciones intermedias si las hay [20].

La marcación consiste en letras mayúsculas a las que les preceden o le siguen números. Las letras P o C indican los terminales del devanado primario mientras que la S los del secundario [20]. En los transformadores que existen en el Ecuador se observa que los terminales del TC se señalan con las letras K y L en el transformador monofásico y en el trifásico con las letras R, S y T para el devanado primario mientras que para las bobinas secundarias se usan sus versiones en minúscula.

Las marcas P1, S1 o C1 deben tener la misma polaridad [20].

### H) Representación de la Marcación de Terminales del Transformador de Corriente

La marcación de los terminales del transformador de corriente debe hacerse tal como se indica en la Figura 3.27.



**Figura 3.27.** 1) Transformador monofásico. 2) Transformador con derivación intermedia en el secundario. 3) Transformador con el devanado primario en 2 secciones. 4) Transformador con dos secundarios [20].

### 3.3.1.8. Sobrevoltaje Entre Espiras del Transformador de Corriente

#### A) Objetivo

Verificar que el aislamiento entre las espiras y capas de un devanado se encuentran en perfectas condiciones para la operación en condiciones de servicio [30].

#### B) Normativa

Las normas en las que se especifica este ensayo se indican en la Tabla 3.35. Hay que tomar en cuenta que la norma IEC presenta a este ensayo como prueba de rutina, mientras que la norma IEEE lo señala como prueba tipo.

**Tabla 3.35.** Normas en las que se encuentra la prueba de sobrevoltaje entre espiras [Elaboración Propia].

Norma	Sección
IEC 61869-2:2012	7.3.200
IEEE C57.13:2016	12.3

#### C) Aplicabilidad

Este ensayo no se puede llevar a cabo en las condiciones actuales del laboratorio de transformadores de la EEQ, se puede realizar cuando se implementen los equipos descritos en la sección 3.5.5.

#### **D) Condiciones de Ensayo Para Recepción y Mantenimiento**

No se han encontrado condiciones específicas con respecto a este ensayo para la recepción y el mantenimiento.

#### **E) Condiciones Previas al Ensayo**

- Verificar que no existan conexiones al equipo a ensayar que no tengan relación con esta prueba.
- Para el procedimiento A verificar que el voltaje de ensayo no supere los 4,5 kV.
- Para el procedimiento B tener en cuenta que la frecuencia de prueba a elegir no debe ser mayor a los 400 Hz.

#### **F) Equipos e Instrumentos de Laboratorio**

Los equipos e instrumentos de laboratorio también dependen del método de medición seleccionado.

Para el procedimiento A:

- Autotransformador variable.
- Amperímetro.

Para el procedimiento B:

- Sistema de pruebas para transformadores

#### **G) Corriente y Voltaje de Ensayo**

La corriente de ensayo  $I$  es una corriente sinusoidal de valor r.m.s. igual a la corriente primaria nominal para el procedimiento A e igual a la corriente nominal secundaria en el procedimiento B [20].

El voltaje de ensayo máximo  $U$  es de 4,5 kV pico [20].

#### **H) Procedimiento Para el Transformador de Corriente**

Este ensayo solo se especifica para transformadores de corriente, por lo que debe ejecutarse en los terminales del TC del transformador combinado de medida. La norma

establece dos procedimientos para la correcta realización de esta prueba, estos son los siguientes:

*Procedimiento A:*

- 1) Conectar al devanado secundario un medidor de alta impedancia o dejarlo en circuito abierto [20].
- 2) Aplicar, al devanado primario, una corriente  $I$  a una frecuencia de 60 Hz durante un tiempo de 60 segundos. La corriente  $I$  se debe limitar si se ha alcanzado el voltaje de prueba  $U$  antes de que se obtenga el valor de la corriente nominal [20].
- 3) Reducir el voltaje de ensayo de forma continua sin hacer cortes bruscos que puedan ocasionar transitorios [20].

*Procedimiento B:*

- 1) Dejar el devanado primario en circuito abierto [20].
- 2) Aplicar, a cada devanado secundario, el voltaje de prueba  $U$  a una frecuencia adecuada durante un tiempo de 60 segundos cuidando de que el valor r.m.s. de la corriente en el secundario no se exceda a la corriente nominal secundaria [20].
  - Si la frecuencia de ensayo es mayor que la frecuencia nominal, el tiempo de duración del ensayo debe reducirse como se indica en la Tabla 3.36., considerando un tiempo mínimo de 15 segundos [20].

**Tabla 3.36.** Frecuencia vs tiempo de duración del ensayo [1].

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Duración (s)</b>
120 o menos	60
180	40
240	30
300	20
400	18

- Al valor máximo de frecuencia soportada de 400 Hz, si se ha aplicado la corriente nominal secundaria y no se ha alcanzado el voltaje de ensayo  $U$ , el voltaje obtenido debe tomarse como el voltaje de prueba [20].
- 3) Después de haber transcurrido el tiempo de duración de la prueba, reducir el voltaje de ensayo de forma continua sin hacer cortes bruscos que puedan ocasionar transitorios.

**I) Criterios de Aceptación o Rechazo**



Se considera que el transformador aprueba el ensayo cuando no se observan signos de daño en el aislamiento, no se escuchan ruidos en el tanque o no se percibe humo.

### 3.3.1.9. Capacitancia y Factor de Disipación

#### A) Objetivo

Determinar la existencia de defectos en el aislamiento antes y después de otros ensayos dieléctricos [30].

#### B) Normativa

La normativa que hace referencia a este ensayo se establece en la Tabla 3.37. Cabe mencionar que las normas IEC consideran a este ensayo como prueba especial, mientras que la norma IEEE lo señala como prueba de rutina para transformadores que se encuentran aislados en aceite o gas.

**Tabla 3.37.** Normas que especifican el ensayo de capacitancia y factor de disipación [Elaboración propia].

<b>Norma</b>	<b>Sección</b>
IEC 61869-1:2007	7.4.3
IEC 61869-2:2012	7.4.3
IEC 61869-3:2011	7.4.3
IEEE C57.13	4.7

Según la norma IEC 61869-1,2,3,4 este ensayo es de carácter especial, mientras que según la norma IEEE se considera un ensayo de rutina.

#### C) Aplicabilidad

Este ensayo no se puede ejecutar por el momento en el laboratorio de transformadores debido a que no se cuenta con el instrumento de medición mencionado en la sección 3.5.6.

#### D) Condiciones Previas al Ensayo

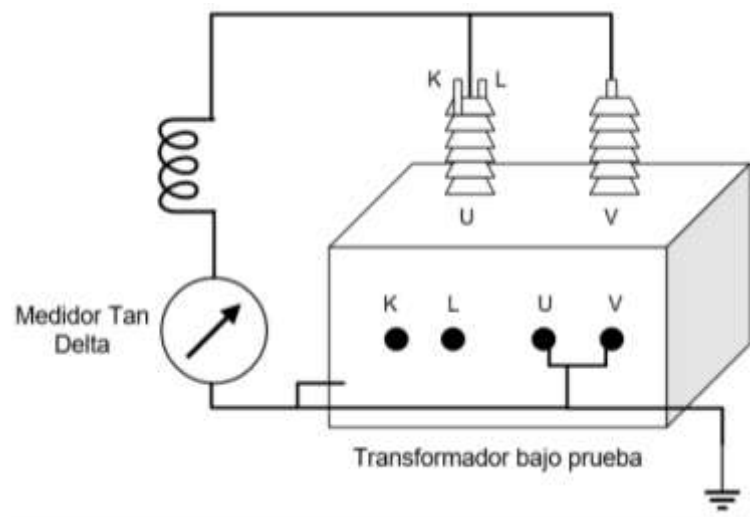
- Para esta prueba el transformador debe estar totalmente desenergizado y completamente aislado de la fuente de alimentación [1].
- La carcasa del transformador debe estar conectada a tierra [1].
- La prueba debe llevarse a cabo antes y después de la prueba de voltaje aplicado [24].
- La prueba debe hacerse a temperatura ambiente y se debe tomar nota de ella [24].

## E) Equipos e Instrumentos de Laboratorio

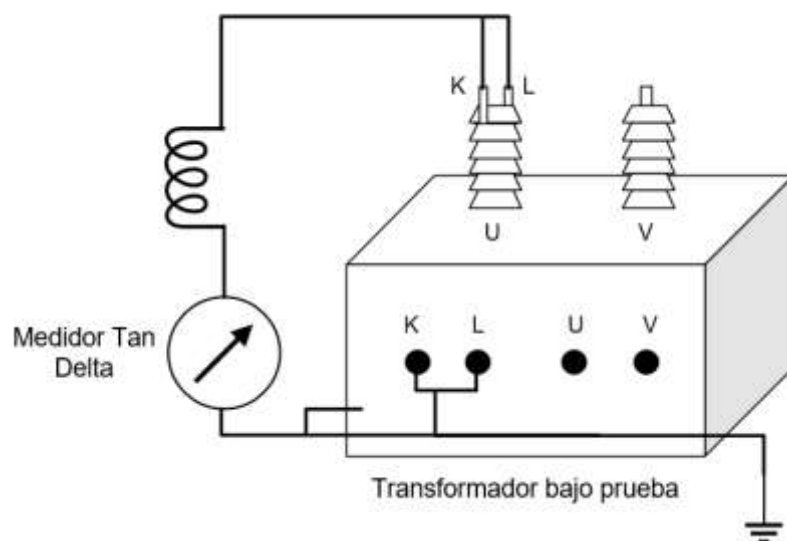
- Equipo de medición de capacitancia y factor de disipación.

## F) Circuitos de Ensayo

Un ejemplo de las conexiones para la prueba sobre un transformador de potencial monofásico se presenta en la figura Figura 3.28 y para el transformador de corriente en la Figura 3.29.



**Figura 3.28.** Circuito de ensayo para la prueba del factor de disipación sobre el TP del transformador combinado de medida [Elaboración Propia].



**Figura 3.29.** Circuito de ensayo para la prueba del factor de disipación en el TC del transformador combinado de medida [Elaboración propia].

### G) Voltaje de Ensayo

La capacitancia y el factor de disipación deben ser medidos a los siguientes voltajes de prueba [24]:

- 10 kV
- Voltaje nominal máximo

### H) Procedimiento Para el Transformador de Potencial

El procedimiento para medir la capacitancia y el factor de disipación es el siguiente:

- 1) Las mediciones se hacen entre devanado y tierra y entre devanados, dependiendo del método de medición a emplear. Estos métodos son: (UST) Prueba de elementos sin conexión a tierra y (GST) Prueba de elementos con conexión a tierra. Las conexiones se indican de acuerdo con el procedimiento en la Tabla 3.38.

**Tabla 3.38.** Medidas a realizar para la prueba de Factor de Potencia [57].

<b>Método I</b> <b>Prueba sin un circuito de guarda</b> <b>para transformador con dos</b> <b>devanados</b>	<b>Método II</b> <b>Prueba con circuito de guarda para</b> <b>transformador con dos devanados</b>
Alto Voltaje a Bajo Voltaje y Tierra	Alto Voltaje a Bajo Voltaje y Tierra
Bajo Voltaje a Alto Voltaje y Tierra	Alto Voltaje a Tierra, Guarda en Bajo Voltaje
Alto Voltaje y Bajo Voltaje a Tierra	Bajo Voltaje a Alto Voltaje y Tierra
-	Bajo Voltaje a Tierra, Guarda en Alto Voltaje

- 2) Tomar nota de las mediciones respectivas.

### I) Procedimiento Para el Transformador de Corriente

El método de medición es el mismo que para los transformadores de potencial, pero se debe tener en cuenta que el equipo de medición también trae indicaciones y precauciones respecto a esta prueba.

### J) Criterios de Aceptación o Rechazo

El factor de disipación debe seguir los siguientes lineamientos para que se considere que el aislamiento está en buenas condiciones:

- Para transformadores aislados en aceite:

El factor de disipación debe ser de 0,5% máximo a una temperatura ambiente de 20°C. Y el incremento del factor de disipación medido después de la prueba dieléctrica debe ser inferior al 0,1% del medido antes [24].

- Para transformadores aislados en gas:

El factor de disipación será del 0,15% máximo a una temperatura de 20°C. El incremento del factor de disipación después de la prueba dieléctrica debe ser menor al 0,03% del valor medido antes.

### **3.3.1.10. Polaridad**

#### **A) Objetivo**

Garantizar que la polaridad en los devanados primario y secundario del transformador de medida combinado es correcta [40].

#### **B) Normativa**

La norma que rige este ensayo sobre el transformador combinado es IEEE C57.13 en sus secciones 8.3, 9.4 y 10.3.

#### **C) Aplicabilidad**

Este ensayo puede aplicarse si se tiene un transformador de polaridad conocida para usar el método de comparación o con la ayuda de los equipos descritos en la sección 3.5.3.

#### **D) Precauciones Previas al Ensayo**

- Si se aplica el método del transformador de polaridad conocida tener en cuenta que en el caso del transformador de potencial existirán elevados voltajes en los terminales de los bobinados de alto voltaje por lo que se debe tomar precauciones de seguridad [24].
- En el caso de usar el método de la comparación directa de los voltajes del devanado, tener precaución de siempre aplicar el voltaje de la fuente a la bobina de alto número de vueltas [24].
- El método más sencillo es utilizar un equipo de medición de polaridad que ya se encuentre calibrado para este ensayo, en este caso es preferible hacer uso de los equipos descritos en la prueba de precisión.

#### **E) Equipos e Instrumentos de Laboratorio**

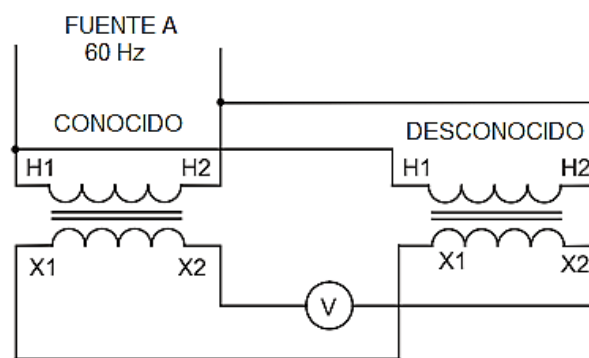
Los equipos de ensayo dependen del método de verificación de la polaridad seleccionado.

- Detector de polaridad que puede venir incluido en el medidor de la clase de precisión.

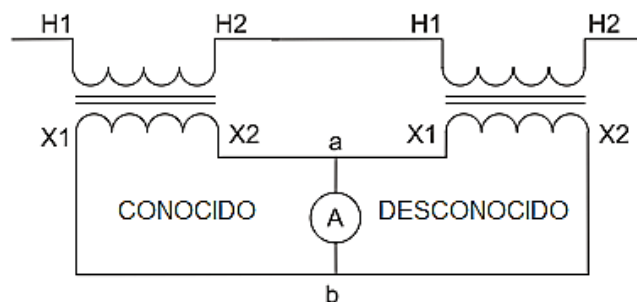
- Transformador de polaridad conocida
- Fuente de voltaje AC a 60 Hz.
- Fuente de corriente AC a 60 Hz.
- Amperímetro y Voltímetro

### F) Circuitos de Ensayo

Los circuitos de ensayo para aplicar el método del transformador de polaridad conocida se presentan en la Figura 3.30 y en la Figura 3.31.

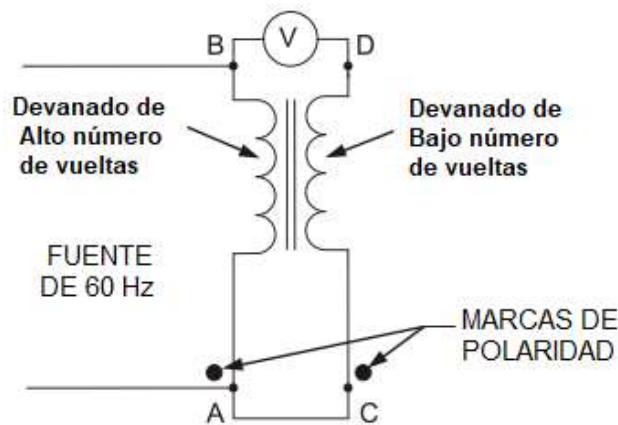


**Figura 3.30.** Polaridad por comparación con un transformador de voltaje de la misma relación y polaridad conocida [24].



**Figura 3.31.** Polaridad por comparación con un transformador de corriente de polaridad conocida [24].

Para el método de comparación directa de los voltajes del bobinado se utiliza el circuito de conexión que se puede observar en la Figura 3.32.



**Figura 3.32.** Polaridad por comparación directa del voltaje del devanado [24].

### G) Voltaje y Corriente de Ensayo

La norma no define claramente una cantidad exacta de voltaje o corriente que deba aplicarse.

### H) Procedimiento Para el Transformador de Potencial

La norma presenta dos métodos para verificar la polaridad de los transformadores de potencial que se presentan a continuación:

*Método 1:* Polaridad por comparación con un transformador de polaridad conocida.

- 1) Conecte el devanado de alto voltaje (mayor número de vueltas) del transformador conocido en paralelo con la bobina de alto voltaje del transformador a probar tal como se observa en la Figura 3.30 [24].
- 2) Realice la conexión de los devanados de bajo voltaje de ambos transformadores a través de un voltímetro como lo presenta la Figura 3.30 [24].
- 3) Aplique un voltaje en los terminales de alto voltaje [24].
- 4) Observe el valor señala el voltímetro en su escala [24].

*Método 2:* Comparación directa de los voltajes de bobinado.

- 1) Realice las conexiones de los devanados de alto y bajo voltaje como se muestra en la Figura 3.32. En este caso el devanado de mayor numero de vueltas es el mismo que el de alto voltaje [24].
- 2) Aplique un voltaje desde una fuente controlada de voltaje en los terminales AB del devanado con mayor número de espiras [24].

- 3) Realice una lectura de los voltajes AB y BD [24].

### **I) Procedimiento Para el Transformador de Corriente**

La norma presenta dos métodos para verificar la polaridad de los transformadores de corriente que se presentan a continuación:

*Método 1:* Polaridad por comparación con un transformador de polaridad conocida.

- 1) Realice las conexiones de los transformadores conocido y desconocido como se señala en la Figura 3.31 [24].
- 2) Con la ayuda de una fuente controlada de corriente aplique una corriente de prueba en los devanados H1- H2 como se indica en la Figura 3.31 [24].
- 3) Observe el valor de la corriente que muestra el amperímetro [24].

*Método 2:* Comparación directa de los voltajes de bobinado.

- 1) Ejecute las conexiones del devanado de mayor numero de vueltas con el de menor cantidad de espiras como se observa en la Figura 3.32. Para el TC el devanado de mayor número de espiras es secundario [24].
- 2) Aplique un voltaje desde una fuente controlada de voltaje en los terminales AB del devanado con mayor número de espiras [24].
- 3) Realice una lectura de los voltajes AB y BD [24].

### **J) Criterios de Aceptación o Rechazo**

- Para el TC y el TP

*Método 2:* Si el voltaje BD es menor al valor de AB, la polaridad corresponde a la marcada en el transformador, mientras que si BD es mayor a AB implica que la polaridad es inversa. [24].

- Para el transformador de potencial

*Método 1:* Si la lectura del voltímetro es cero, la polaridad del transformador desconocido es la marcada en su placa de conexiones, mientras que si la lectura del voltímetro es la suma de los devanados de bajo voltaje la polaridad del transformador desconocido es inversa [24].

- Para el transformador de corriente

*Método 1:* Si el amperímetro lee la suma de las corrientes en los devanados de mayor número de espiras, la polaridad del transformador desconocido es inversa. Si el amperímetro lee la diferencia de corrientes en los devanados medidos, la polaridad del transformador desconocido es la indicada por el fabricante [24].

### 3.3.1.11. Resistencia de Bobinados

#### A) Objetivo

El objetivo de este ensayo es determinar que en las bobinas no existan defectos de fabrica o cortocircuitos entre las espiras que puedan aumentar la resistencia del devanado [40].

#### B) Normativa

En la Tabla 3.39. se indican las normas en las que se especifica este ensayo.

**Tabla 3.39.** Normativa en la que se encuentra especificado el ensayo de resistencia de bobinados [Elaboración propia].

Norma	Sección
IEEE C57.13	8.4
ANSI/NETA MTS-2007	7.10

#### C) Aplicabilidad

Este ensayo se puede aplicar actualmente en el laboratorio, ya que este ya cuenta con los instrumentos de medición necesarios, pero es un ensayo que solo debe aplicarse de manera temporal ya que es específico para transformadores de protección.

#### D) Condiciones de Ensayo Para Recepción y Mantenimiento

Las condiciones para realizar este ensayo para recepción y mantenimiento se establecen en la Tabla 3.40.

**Tabla 3.40.** Condiciones de ensayo [Elaboración propia].

Recepción	Mantenimiento
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La norma IEEE C57.13 indica este ensayo como prueba de rutina que debe hacerse sobre los transformadores de corriente para protección, mientras que para el TP se indica como una prueba tipo.</li> <li>• La medición puede hacerse por dos métodos de medición, uno a dos terminales y el otro a cuatro terminales.</li> </ul>	<p>La norma ANSI/NETA MTS-2007 indica este ensayo para mantenimiento tanto del TC como del TP.</p>



### E) Condiciones Previas al Ensayo

- La medición de cuatro terminales debe usarse para resistencias de  $1 \Omega$  y menos.
- El procedimiento de prueba para medir la resistencia del devanado requiere que el transformador esté desenergizado y aislado [1].
- Tanto el terminal primario como el secundario deben aislarse de las conexiones externas, y deben realizarse mediciones en cada fase de todos los devanados [1].

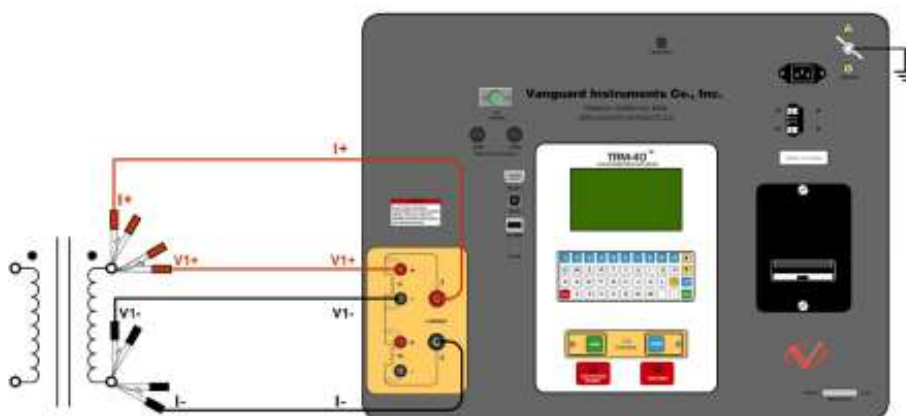
### F) Equipos e Instrumentos de Laboratorio

- Milióhmetro MIKO-9 Medidor de Resistencia de Bobinados
- Medidor de Resistencia de Transformadores TRM – 403

En caso de que se implemente en el laboratorio los equipos descritos para el ensayo de precisión, estos equipos también pueden ejecutar este ensayo.

### G) Circuitos de Ensayo

En la Figura 3.33. presenta un ejemplo de conexión del instrumento de medición para determinar la resistencia de bobinados como lo especifica su manual de aplicación.



**Figura 3.33.** Circuito de conexión para la medición de resistencia de bobinados por el método de 4 puntos [51].

### H) Procedimiento Para el Transformador de Potencial

El procedimiento para esta prueba en el secundario del transformador de potencial es el siguiente:

- 1) Realice las conexiones sobre el devanado en el que se va a medir la resistencia de bobinados tal como se puede observar en la Figura 3.33.

- 2) Ajustar el instrumento de medición para que inyecte una corriente DC de un valor igual al 15% de la corriente nominal de la bobina medida [56].
- 3) Esperar a que el instrumento determine el valor de la resistencia.

#### **I) Procedimiento Para el Transformador de Corriente**

El procedimiento es el mismo para el transformador de corriente.

#### **J) Criterios de Aceptación o Rechazo**

No existe un valor mínimo o máximo de resistencia de devanados, la norma indica que se acepta una desviación de hasta el 5% de la resistencia dada de fábrica [55].

### **3.3.1.12. Prueba de Relación de Transformación**

#### **A) Objetivo**

Determinar la relación de espiras del transformador. Mide el número de vueltas del devanado primario con respecto al número de vueltas en el devanado secundario [1].

#### **B) Normativa**

Esta prueba se encuentra especificada para transformadores de potencia en la norma IEEE C 57.12.90.

#### **C) Aplicabilidad**

Esta prueba puede aplicarse actualmente a los transformadores, pero solo de manera temporal ya que no es un ensayo que se recomiende para transformadores de medición.

#### **D) Condiciones Previas al Ensayo**

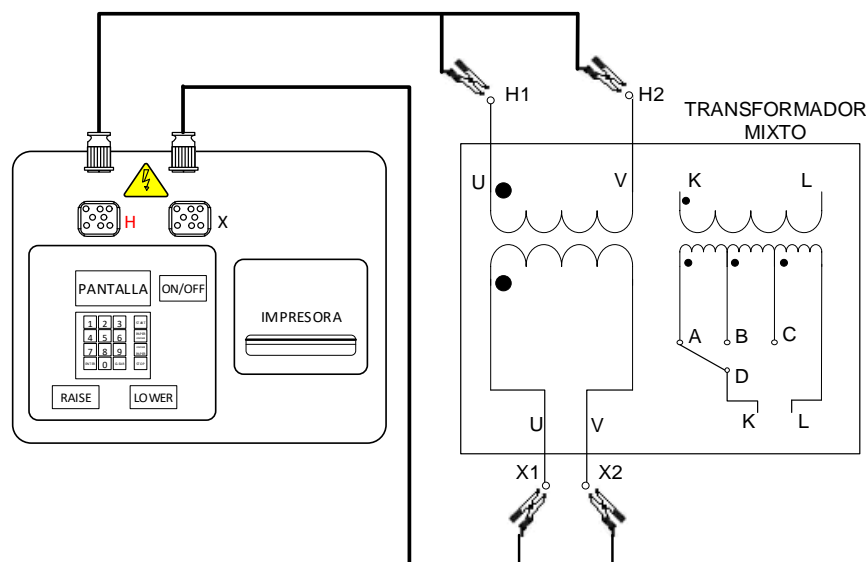
- Verificar que el transformador esté libre de conexiones y desenergizado.

#### **E) Equipos e Instrumentos de Laboratorio**

- Probador Automático de La Relación de Vueltas del Transformador Trifásico (TTR) ATRT-03A Serie 2

#### **F) Circuitos de Ensayo**

Las conexiones deben hacerse en concordancia con las indicaciones del manual de usuario del instrumento de medición. En la Figura 3.34. se puede observar las conexiones para el transformador de potencial.



**Figura 3.34.** Conexiones para la prueba de relación de transformación en el transformador de potencial [Elaboración propia].

### G) Procedimiento

El procedimiento general para este ensayo es el siguiente:

- 1) Se hacen las conexiones que se muestran en la Figura 3.34 para un transformador monofásico, mientras que, para un trifásico, el instrumento trae más cables de conexión para medir la relación de transformación en las tres fases al mismo tiempo.
- 2) Se aplica un voltaje (típicamente 80 V CA) al devanado de alto voltaje del transformador bajo prueba [1].
- 3) Se mide el voltaje generado en el devanado de bajo voltaje y se calcula la relación de voltaje entre los devanados alto y bajo [1].

### H) Criterios de Aceptación o Rechazo

El valor de la prueba TTR para la aceptación no debe ser superior al 0,5% en comparación con los valores calculados [57].

### 3.3.1.13. Resistencia de Aislamiento (IR)

#### A) Objetivo

Verificar que el aislamiento del transformador bajo prueba cumple con la resistencia mínima necesaria para tolerar las condiciones de operación a las que serán sometidos [62].

#### B) Normativa

Este ensayo se especifica en la norma ANSI/NETA MTS-2007 en su sección 7.10

### **C) Aplicabilidad**

Este ensayo ya se ejecuta sobre los transformadores combinados actualmente, pero ninguna de las normas tanto IEC como IEEE lo recomiendan para transformadores de instrumentos, solo la norma ANSI/NETA señala que se haga la medición de este parámetro para el mantenimiento. Para completar la ejecución de este ensayo se debe adquirir un termómetro como el que se describe en la sección 3.5.7.

### **D) Condiciones Previas al Ensayo**

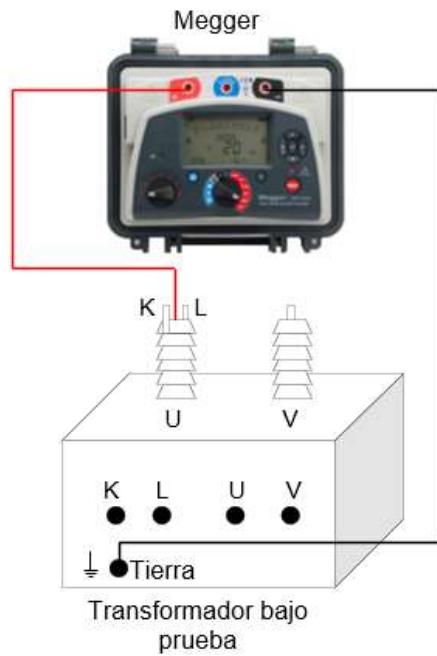
- Verificar que no existan otras conexiones al transformador a parte de las necesarias para este ensayo.
- Limpiar y secar las superficies de los aisladores antes de cada prueba, pues la humedad y las partículas higroscópicas pueden causar errores en la medición [63].
- Las mediciones obtenidas deben registrarse para futuras comparaciones [63].
- Para los transformadores tipo seco que no puedan tolerar los voltajes de prueba especificados, seguir las recomendaciones dadas por el fabricante [25].
- Tener en cuenta que la humedad y la temperatura pueden afectar los valores de resistencia de aislamiento medidos [63].

### **E) Equipos e Instrumentos de Laboratorio**

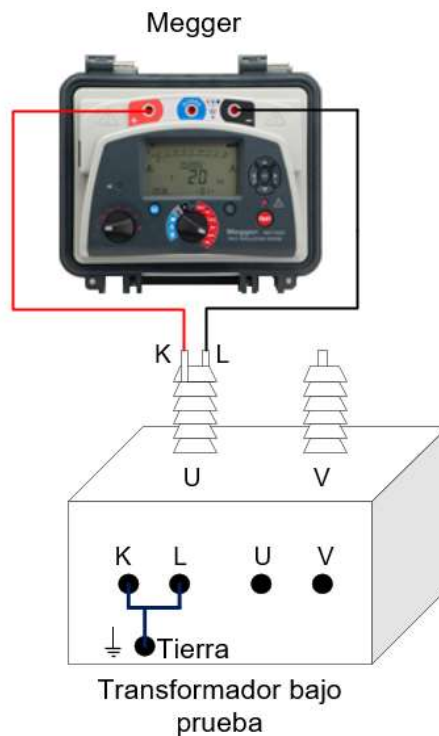
- Medidor de Resistencia de Aislamiento (MEGGER) MIT 1025
- Termómetro

### **F) Circuitos de Ensayo**

En el caso de un transformador combinado monofásico para el lado del TP se presenta en la Figura 3.35. Para el TC se puede observar en la Figura 3.36. un ejemplo de conexiones para la medición de IR en el devanado primario.



**Figura 3.35.** Conexiones para la medición de la resistencia de aislamiento entre bobina y tierra del TP en un transformador combinado monofásico [Elaboración propia].



**Figura 3.36.** Prueba de resistencia de aislamiento sobre la bobina primaria del transformador de corriente [Elaboración propia].

### G) Procedimiento Para el Transformador de Potencial

En el caso del transformador de potencial se debe ejecutar este ensayo de la siguiente forma:

- 1) Tomar nota de la temperatura a la que se encuentran los devanados y el aceite al momento de medir la resistencia de aislamiento.
- 2) Hacer las conexiones correspondientes a la resistencia que se va a medir, las mediciones que se deben tomar son [25]:
  - Entre devanado a devanado.
  - Entre cada bobina y tierra.
- 3) Medir la resistencia de aislamiento aplicando durante 60 segundos el voltaje de prueba indicado en la Tabla 3.41 [25].
- 4) Si es un transformador trifásico tomar las medidas para cada fase.

#### **H) Procedimiento Para el Transformador de Corriente**

Para el transformador de corriente la medición de la resistencia de aislamiento se realiza de la siguiente forma:

- 1) Tomar nota de la temperatura a la que se encuentran los devanados y el aceite al momento de medir la resistencia de aislamiento.
- 2) Conectar el devanado secundario a tierra [25]. En caso de ser un transformador con varios secundarios conectarlos todos a tierra.
- 3) Medir la resistencia de aislamiento sobre la bobina primaria aplicando durante 60 segundos el voltaje de prueba indicado en la Tabla 3.41 [25].
- 4) Hacer la medición para cada fase si es un transformador trifásico [25].

Para hacer la medición de IR en entre los devanados y las conexiones a tierra se debe aplicar un voltaje DC de 1000 V durante un minuto [25].

#### **I) Voltaje de Ensayo y Valores de Resistencia Aceptables**

En la Tabla 3.41 se indican los valores de voltaje DC que debe aplicarse al transformador de ensayo en concordancia con la capacidad en voltios que puede soportar la bobina bajo prueba, cabe destacar que los valores de resistencia mínima de aislamiento esta especificada a una temperatura de 20°C; si las mediciones se realizan a una mayor o menor temperatura debe aplicarse un factor de corrección por temperatura para poder

comparar la resistencia real medida con el valor mínimo recomendado a 20°C; este factor de corrección se detalla en la Tabla 3.42.

**Tabla 3.41.** Valores de resistencia de aislamiento para Transformadores a 20°C [25].

Capacidad de la Bobina del Transformador	Voltaje de Prueba DC Mínimo (V)	Resistencia Mínima de Aislamiento Recomendada (MΩ)	
		Líquido	Seco
0 – 600	1000	100	500
601 – 5000	2500	1000	5000
Mayor a 5000	5000	5000	25000

**Tabla 3.42.** Factores de corrección por temperatura [1].

Temperatura		Aislamiento del Transformador	
° C	° F	Aceite	Tipo Seco
0	32	0,25	0,40
5	41	0,36	0,45
10	50	0,50	0,50
15,6	60	0,74	0,75
20	68	1,00	1,00
25	77	1,40	1,30
30	86	1,98	1,60
35	95	2,80	2,05
40	104	3,95	2,50
45	113	5,60	3,25
50	122	7,85	4,00
55	131	11,20	5,20
60	140	15,85	6,40
65	149	22,40	8,70
70	158	31,75	10,00
75	167	44,70	13,00

El transformador pasa la prueba si cumple con el valor de resistencia mínima de aislamiento recomendada por la norma.

### 3.3.2. ENSAYOS SOBRE CAJAS DE MANIOBRA

En esta sección se describen las diferentes pruebas que se pueden aplicar para la recepción y mantenimiento de cajas de maniobra. Los ensayos aquí descritos se encuentran establecidos en la norma de fabricación de estos equipos la cual es la norma IEEE C37.74, también se hace referencia a la norma de mantenimiento ANSI/NETA 2007. Ambos estándares entregan una visión de las pruebas que deben aplicarse, así como chequeos simples que deben hacerse durante la recepción y el mantenimiento para determinar que la caja de maniobra esta se encuentra en buen estado. Los ensayos se describen a continuación:

### 3.3.2.1. Prueba de Resistencia de Contactos

#### A) Objetivo

Comprobar que todos los puntos de contacto estén alineados adecuadamente y que los puntos de transferencia están armados correctamente [7].

#### B) Normativa

Las normas que señalan este ensayo para su aplicación sobre las cajas de maniobra se describen en la Tabla 3.43.

**Tabla 3.43.** Normas donde se especifica el ensayo de resistencia de contactos [Elaboración propia].

Norma	Sección
IEEE C37.74:2014	7.1
ANSI/NETA 2007	7.5.2.2

#### C) Aplicabilidad

El ensayo se puede aplicar actualmente ya que en el laboratorio de transformadores de la EEQ si cuentan con el equipo de medición necesario para este ensayo.

#### D) Condiciones de ensayo para recepción y mantenimiento

Los requisitos tanto para la recepción como para el mantenimiento son los mismos cuando se va a aplicar este ensayo.

#### E) Condiciones previas al ensayo

- Se recomienda hacer esta prueba a un valor elevado de corriente DC [1].

#### F) Equipos e instrumentos de laboratorio

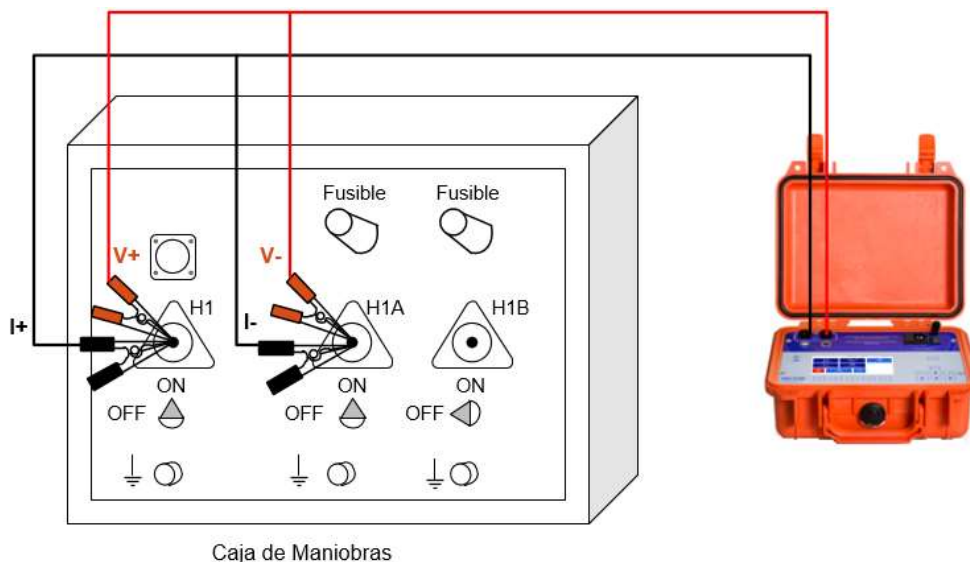
El laboratorio dispone de dos equipos capaces de medir la resistencia de contactos, estos son:

- Miliohmmetro MIKO 9A.
- Medidor de la resistencia de Transformadores TRM 403

#### G) Circuito de ensayo

En la Figura 3.37. se detalla el circuito de conexión para la medición de la resistencia de contactos entre la entrada y la salida.





**Figura 3.37.** Diagrama de conexiones para la medición de la resistencia de contactos. [Elaboración propia]

### H) Corriente de ensayo

La corriente de ensayo  $I$  es igual a 100 A DC o puede ser de un valor que no supere el 25% de la corriente nominal del circuito a probar [7].

### I) Procedimiento

Este ensayo se realiza ejecutando los siguientes pasos:

- 1) Cerrar el o los seccionadores que se encuentren en la derivación que se va a medir [7] y hacer las conexiones necesarias para la medición, esta se hace de buje a buje tal como se indica en la Figura 3.37.
- 2) En el equipo de medición colocar la corriente de ensayo  $I$  que se debe aplicar al circuito a ensayar, si los fusibles no están colocados en los portafusibles, se puede usar una barra de cortocircuito en lugar del fusible [7].
- 3) Proceder a medir la resistencia de contactos como indique el equipo de medición.

### J) Criterios de aceptación o rechazo

No existe un valor específico para la resistencia de contactos, por esta razón la norma indica que el equipo pasa la prueba si la resistencia medida no es mayor a la especificada de fábrica [7].

### **3.3.2.2. Prueba de Resistencia de Aislamiento**

#### **A) Objetivo**

Determinar que el aislamiento de la caja de maniobras esté en condiciones óptimas para soportar el esfuerzo eléctrico al que será sometido durante su vida útil.

#### **B) Normativa**

Este ensayo se establece en la norma de mantenimiento ANSI/NETA 2007 en su sección 7.5.2.2.

#### **C) Aplicabilidad**

En las condiciones actuales del laboratorio es posible aplicar este ensayo, ya que si cuentan con el equipo de medición necesario.

#### **D) Condiciones de ensayo para recepción y mantenimiento**

Los requisitos tanto para la recepción como para el mantenimiento son los mismos cuando se va a aplicar este ensayo.

#### **E) Condiciones previas al ensayo**

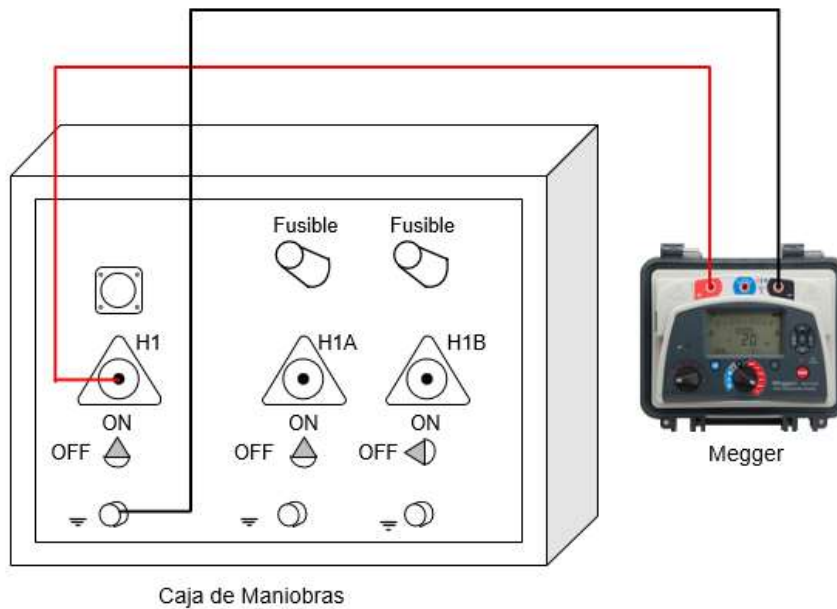
- Esta prueba puede indicar valores bajos de la resistencia de aislamiento debido a la existencia de caminos paralelos [1].
- Si el sistema de aislamiento tiene una rigidez dieléctrica baja, la medición puede presentar valores altos de resistencia [1].
- Generalmente la medición de IR en estos equipos puede obtener valores altos, por esta razón se desprecian los efectos de la temperatura, absorción y polarización; por esta razón no se debe realizar corrección por temperatura como en el caso de los transformadores [64].
- La caja de maniobras debe estar desconectada de la red.

#### **F) Equipos e instrumentos de laboratorio**

- Probador de Aislamiento MEGGER MIT 1025.

#### **G) Circuito de ensayo**

En la Figura 3.38. se detalla el circuito de conexión para la medición de la resistencia de aislamiento en la caja de maniobras.



**Figura 3.38.** Diagrama de conexiones para la medición de la resistencia de aislamiento fase-tierra de una caja de maniobras monofásica [Elaboración propia].

## H) Procedimiento

El procedimiento para la evaluación de la resistencia de aislamiento en las cajas de maniobra es el siguiente:

- 1) Conectar el equipo de medición en los bushings del camino que se va a medir. La medición se debe hacer en [25]:
  - Fase a fase
  - Fase a tierra
- 2) Ajustar el voltaje de ensayo  $U$  en el equipo de medición y aplicarlo durante un minuto [25].
- 3) Tomar nota del valor de resistencia de aislamiento entregado por el equipo de medición y repetir para las demás fases y tierra [25].

## I) Voltaje de ensayo

El voltaje de ensayo  $U$  es un voltaje continuo cuyo valor depende del voltaje nominal del equipo, y se describe en la Tabla 3.44.

**Tabla 3.44.** Valores de prueba de resistencia de aislamiento en aparatos y sistemas eléctricos [25].

<b>Clasificación Nominal del Equipo (Voltios)</b>	<b>Voltaje Mínimo de Ensayo (DC)</b>	<b>Resistencia de Aislamiento Mínima Recomendada (MΩ)</b>
250	500	25
600	1.000	100
1.000	1.000	100
2.500	1.000	500
5.000	2.500	1.000
8.000	2.500	2.000
15.000	2.500	5.000
25.000	5.000	20.000
34.500 y mayor	15.000	100.000

#### **J) Criterios de aceptación o rechazo**

El valor de la resistencia de aislamiento debe ser mayor o igual al valor descrito en la Tabla 3.44 en concordancia con el voltaje nominal de la caja de maniobras.

### **3.3.2.3. Voltaje Aplicado a Frecuencia Industrial**

#### **A) Objetivo**

Verificar que el aislamiento interno de la caja de maniobras puede soportar el esfuerzo eléctrico impuesto por el paso de altos voltajes a través de su circuito.

#### **B) Normativa**

Las normas que señalan este ensayo para su aplicación sobre las cajas de maniobra se describen en la Tabla 3.45.

**Tabla 3.45.** Normas donde se especifica el ensayo de voltaje aplicado a frecuencia industrial [Elaboración propia].

<b>Norma</b>	<b>Sección</b>
IEEE C37.74:2014	7.2
ANSI/NETA 2007	7.5.2.2

#### **C) Aplicabilidad**

Este ensayo no se puede ejecutar actualmente en el laboratorio de transformadores hasta que se implementen los equipos descritos en la sección 3.5.1.

#### **D) Condiciones de ensayo para recepción y mantenimiento**

Los requisitos tanto para la recepción como para el mantenimiento son los señalados en la Tabla 3.46.

**Tabla 3.46.** Condiciones de ensayo [Elaboración propia].

Recepción	Mantenimiento
Se aplica el 80% del voltaje de ensayo descrito en la Tabla 3.47 cuando se repite la prueba [7].	En campo la norma recomienda que, para pruebas dieléctricas como esta, se debe aplicar el 80% del voltaje de ensayo dado en la Tabla 3.47 [7].

### E) Condiciones previas al ensayo

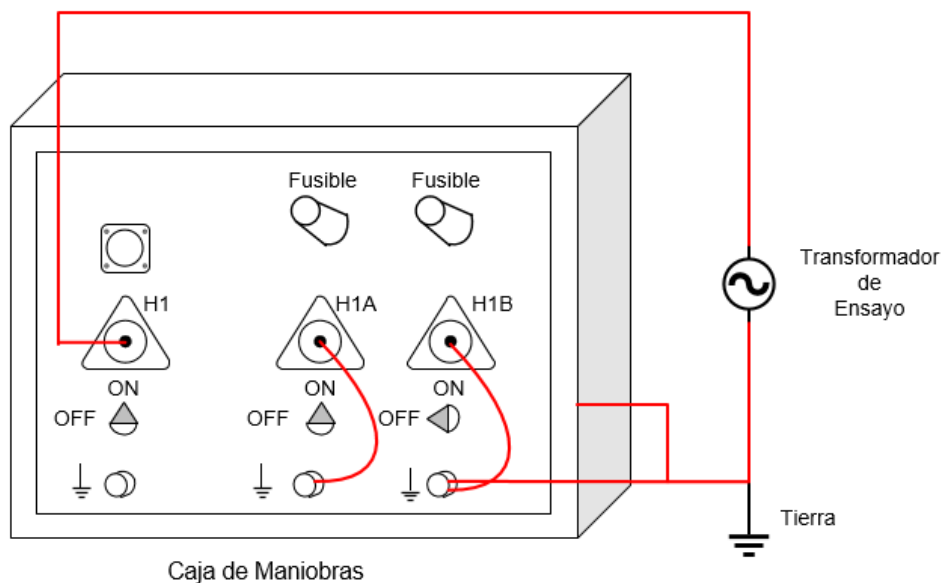
- Se debe hacer la prueba de voltaje aplicado solo si la caja de maniobras ha pasado de forma satisfactoria el ensayo de resistencia de aislamiento [1].
- La prueba debería hacerse para ambas posiciones del seccionador, cerrado y abierto [1].
- Verificar que todos los terminales que no están bajo prueba estén debidamente conectados a tierra.

### F) Equipos e instrumentos de laboratorio

- Sistema de pruebas de alto voltaje AC.

### G) Circuito de ensayo

En la Figura 3.39. se detalla el circuito de conexión para efectuar la prueba de voltaje aplicado sobre una caja de maniobras.



**Figura 3.39.** Diagrama de conexiones para el ensayo de voltaje aplicado sobre una caja de maniobras [Elaboración propia].

## H) Voltaje de ensayo

Debido a que la prueba se llevará a cabo en la ciudad de Quito, se debe multiplicar al voltaje de ensayo  $U$  por el factor de corrección por altitud  $k_a$ .

**Tabla 3.47.** Niveles de voltaje preferidos y requisitos de prueba relacionados [7].

Voltaje nominal máximo $V$ , kV		DSG monofásica	Voltaje nominal soportado para impulso tipo rayo, kV	Voltaje soportado a frecuencia industrial de prueba de producción, kV	Voltaje de ensayo $U$ corregido para la ciudad de Quito. kV $k_a = 1,42$
DSG Trifásica					
15,5	15,5 Grd-Y	8,9	95	34	24
27	27 Grd-Y	15,5	125	40	28
38	38 Grd-Y	21,9	150	50	45

## I) Procedimiento

El procedimiento para este ensayo es el siguiente:

- 1) Conectar el transformador de ensayo a los bushings del camino a medir, el cable de alto voltaje a uno de los terminales y el otro terminal debe conectarse a la tierra del transformador de alto voltaje. Colocar los demás terminales conectados a tierra.
- 2) Incrementar el voltaje de manera continua dentro de 15 segundos hasta alcanzar el voltaje de prueba descrito en la Tabla 3.47 [23].
- 3) Cuando se ha alcanzado el voltaje de ensayo  $U$  mantenerlo constante durante un periodo de 60 segundos [23].
- 4) A continuación, reducir el voltaje de manera continua dentro de 15 segundos, evitar hacer cortes bruscos de la alimentación debido a que puede ocasionar transitorios de voltaje [23].
- 5) Repetir el procedimiento para cada salida de la caja de maniobras, y para cada fase con las otras 2 fases conectadas a tierra en caso de ser un dispositivo trifásico.

## J) Criterios de aceptación o rechazo

Se considera satisfactoria si no se observa la presencia de descargas disruptivas o daños en el aislamiento [7].

### 3.3.2.4. Prueba de Descargas Parciales

### **A) Objetivo**

Verificar si el aislamiento está en perfectas condiciones para operar a pesar del estrés al que es sometido durante su vida útil.

### **B) Normativa**

Este ensayo de rutina se presenta en la norma IEEE C37.74:2014 en la sección 7.3

### **C) Aplicabilidad**

No es posible realizar este ensayo hasta que no se haya adquirido los equipos de las secciones 3.5.1 y 3.5.2.

### **D) Condiciones de ensayo para recepción y mantenimiento**

Las condiciones necesarias para llevar a cabo el ensayo de recepción son las mismas que se necesitan para los mantenimientos y son las siguientes:

- Para la recepción del equipo se aplica el 105% del voltaje de fase a tierra.
- Los equipos con varias clasificaciones de voltaje se prueban para el valor más elevado indicado en la placa de características.

### **E) Condiciones previas al ensayo**

- Este ensayo solo se debe hacer sobre cajas de maniobra que tengan como medio aislante un material dieléctrico no autorregenerable [7].
- La superficie de los aisladores debe estar limpia y seca. El objeto de prueba debe estar a temperatura ambiente. Se debe evitar el estrés mecánico, térmico o eléctrico antes de la prueba [7].
- Para garantizar una buena reproducibilidad, puede ser necesario un intervalo de descanso después del estrés previo antes de realizar pruebas de descarga parcial [7].
- La prueba se realiza con la caja de maniobras en posición abierta y cerrada, todos los puntos que en operación normal están conectados a tierra deben estar conectados a tierra y todas las superficies que están aisladas durante la operación, deben estar aisladas [7].
- La sensibilidad de detección mínima para la que se hace esta prueba es de 10 pC [7].

## F) Equipos e instrumentos de laboratorio

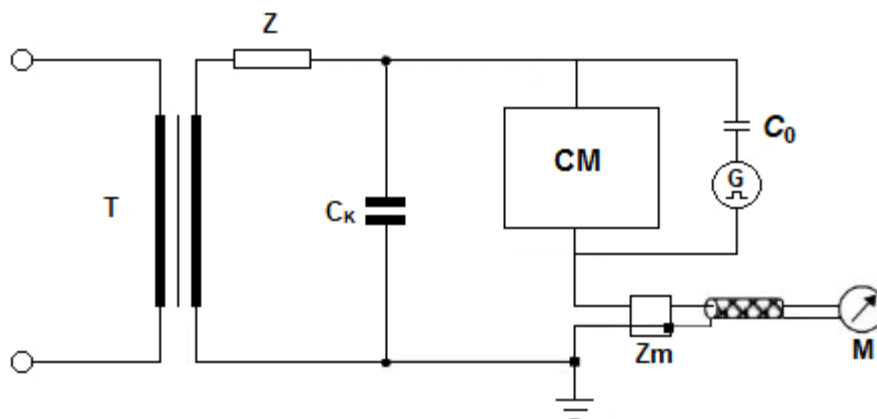
- Sistema de pruebas de alto voltaje AC.
- Equipo de medición de descargas parciales.

## G) Circuito de ensayo

Como se había visto en la sección del transformador combinado de medida, este ensayo necesita de un circuito de calibración y otro de medición de las descargas parciales como tal. Estos se presentan en la Figura 3.40. y la Figura 3.41. respectivamente con la descripción de sus elementos ubicada en la Tabla 3.48.

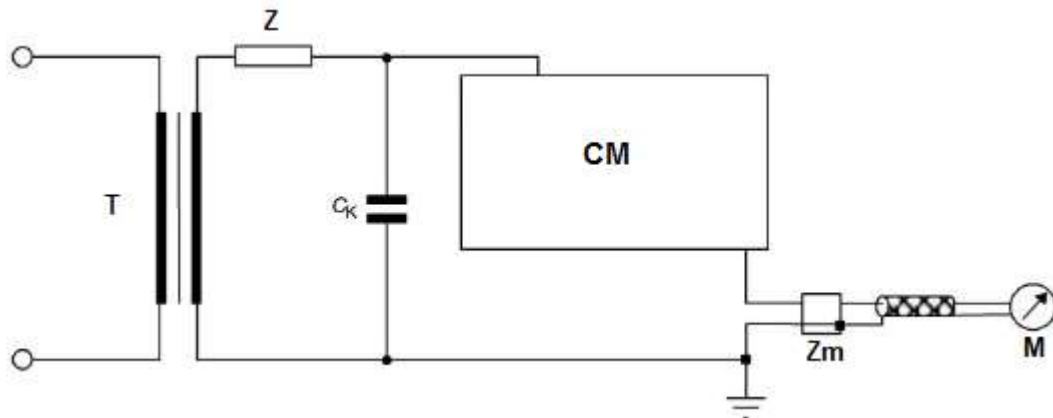
**Tabla 3.48.** Elementos que componen los circuitos de calibración y de medición de descargas parciales [19].

Elemento	Descripción
CM	Caja de maniobras
$C_k$	condensador de acople
$Z_m$	impedancia de medición
$T$	Transformador de ensayo
$Z$	Filtro para prevenir pulsos de descarga transitorios a través de la fuente de alto voltaje y reducir la interferencia desde la fuente. (No se coloca si $C_k$ es capacitancia del transformador de ensayo $T$ )
M	Medidor de descargas parciales
G	Generador de pasos de voltaje
$C_0$	Capacitor de calibración



**Figura 3.40.** Circuito de calibración [59].





**Figura 3.41.** Circuito de ensayo con la impedancia de medida conectada con el condensador de acople [59].

## H) Procedimiento

Este ensayo se realiza ejecutando los siguientes pasos:

- 1) Al iniciar el ensayo se debe aplicar sobre la caja de maniobras un voltaje inferior al 60% del voltaje de ensayo  $U$  de descarga parcial [65].
- 2) Incrementar el voltaje de forma gradual hasta el voltaje de ensayo de frecuencia industrial corregido para Quito dado en la Tabla 3.47. y mantenerlo durante 60 segundos [65].
- 3) Reducir progresivamente el voltaje hasta obtener el voltaje de ensayo de descargas parciales  $U$  y mantenerlo por un período de 60 segundos [65].
- 4) Al final de ese tiempo medir las descargas parciales [65].
- 5) Reducir lentamente el voltaje de ensayo hasta que las descargas parciales sean casi imperceptibles [65].

## I) Voltaje de ensayo

El voltaje de ensayo para descargas parciales  $U$  es de un valor del 105% del voltaje de fase tierra nominal de la caja de maniobras [7].

## J) Criterios de aceptación o rechazo

La norma señala que, para una prueba de descargas parciales sobre una fase, los límites de medición deben estar entre 10 pC y 20 pC [7].

Para un equipo trifásico completo se recomienda un límite de descargas parciales de hasta 100 pC [7].

### **3.3.2.5. Pruebas de Operatividad**

Cada caja de maniobras debe ser maniobrado y probado para verificar [7]:

- 1) Los indicadores de posición del interruptor y los contactos están en la posición correcta para las posiciones abierta y cerrada [7].
- 2) El indicador de cantidad de medio aislante (si se incluye) funciona correctamente [7].
- 3) La configuración del circuito se muestra correctamente y los fusibles están conectados correctamente [7].
- 4) Los fusibles encajan en los soportes o montajes [7].
- 5) Los enclavamientos mecánicos, si se requieren, están en su lugar y operativos [7].
- 6) La posición y polaridad de los transformadores de corriente, si corresponde [7].

### **3.3.3. ENSAYOS SOBRE ACEITE AISLANTE**

La mayoría de las cajas de maniobra existentes en el mercado están aisladas en aceite dieléctrico, que también debe ser probado para demostrar su capacidad de aislamiento; por lo que existen algunas pruebas que se efectúan para determinar que es adecuado sea para los transformadores o para las cajas de maniobra, la prueba más importante que se hace tanto en la recepción como en mantenimiento es el ensayo de voltaje de ruptura dieléctrico.

Como se describe en la sección 1.3.3.3.6. existen dos normas para la evaluación del voltaje de ruptura, la ASTM D877 y la ASTM D1816, las cuales difieren en el tipo de electrodo que se utiliza para la descarga, el estándar D877 emplea electrodos de disco y D1816 usa electrodos tipo VDE; de acuerdo con estos estándares se tienen los siguientes procedimientos:

#### **3.3.3.1. Prueba de la Rigidez Dieléctrica del Aceite Según ASTM D877**

##### **A) Objetivo**

Medir la capacidad que tiene un líquido aislante para el esfuerzo eléctrico sin que llegue a producirse un arco eléctrico [43].

##### **B) Aplicabilidad**

Este ensayo puede realizarse en el laboratorio de transformadores de la EEQ ya que si cuentan con el instrumento de medición de la rigidez dieléctrica.

### **C) Condiciones de ensayo**

- El procedimiento A se lleva a cabo sobre líquidos en los que los materiales insolubles se asientan con facilidad en los intervalos de tiempo entre pruebas de ruptura [26].
- El procedimiento B se utiliza para líquidos en los que los productos que no son solubles en este medio se mantienen flotando entre los discos y no se asientan totalmente en los intervalos de tiempo entre pruebas [26].
- El espacio entre los discos se establece con dos tipos de medidores: “GO” y “NO-GO” (pasa y no pasa) de tal manera que para una medición “Go” el espacio no debe ser menor a 2,51mm mientras que para “No-go” la medida no debe ser mayor a 2,57mm, si es mayor, la medida debe restablecerse [26].
- La prueba debe hacerse en una sala con una temperatura entre 20°C a 30°C [26].

### **D) Equipos e instrumentos de laboratorio**

- Probador de Aceite BAUR DPA 75 C

### **E) Procedimiento**

Existen dos procedimientos que permiten la realización de esta prueba, dependiendo del tipo de líquido se elige el que permita obtener los mejores resultados. Antes de cada procedimiento realizar lo siguiente:

- 1) Para tener una muestra de prueba significativa que contenga impurezas agite suavemente el contenedor del líquido antes de verterlo en la copa de prueba [26].
- 2) Luego de la agitación, de manera inmediata, con una cantidad pequeña de la muestra enjuague la copa de prueba y llénela lentamente con el líquido a analizar [26].

#### *Procedimiento A:*

En la copa llena con la muestra de aceite realice un total de 5 disrupciones con intervalos de un minuto de descanso entre cada una. Tome nota de cada uno de los voltajes que causan una ruptura dieléctrica [26].

#### *Procedimiento B:*

Realice cinco disrupciones, rellene por cada disrupción la copa de prueba con una muestra diferente de aceite. Tomar nota de cada valor de voltaje que produce la descarga [26].

#### **F) Voltaje de prueba**

El voltaje se incrementa en una tasa de 3 kV/s hasta que se produzca la descarga [26].

#### **G) Criterio de aceptación o rechazo**

Con las cinco medidas tomadas se debe calcular el valor promedio. Luego debe determinar el rango con la ecuación (3.2) [26].

$$Rango = X_{max} - X_{min} \quad (3.2)$$

Dónde:

$X_{max}$  = El voltaje de ruptura más alto de las lecturas, y

$X_{min}$  = El voltaje de ruptura más bajo de las lecturas

El promedio de las descargas debe ser mínimo de 30 kV para que el aceite se considere en buen estado [66].

Mientras que el rango debe ser menor al 92% del voltaje promedio para que se reporte como voltaje de disrupción dieléctrica el valor promedio [26].

### **3.3.3.2. Prueba de la Rigidez Dieléctrica del Aceite Según ASTM D1816**

#### **A) Objetivo**

Medir la capacidad que tiene un líquido aislante para el esfuerzo eléctrico sin que llegue a producirse un arco eléctrico [43].

#### **B) Aplicabilidad**

Esta prueba se puede ejecutar en la actualidad en el laboratorio de transformadores de la EEQ, pues si poseen el equipo de medición.

#### **C) Condiciones de ensayo**

- La temperatura de la sala donde se hace la prueba debe de ser de entre 20°C y 30°C.

- La separación de los electrodos debe ser de  $2\text{mm} \pm 0,03\text{mm}$ , pero si en las interrupciones consecutivas no existe descargas, se debe ajustar la separación a  $1\text{mm} \pm 0,03\text{mm}$ .

#### **D) Equipos e instrumentos de laboratorio**

- Probador de Aceite BAUR DPA 75 C.

#### **E) Procedimiento**

- 1) Para tener una muestra de prueba significativa que contenga impurezas gire suavemente el contenedor del líquido varias veces antes de verterlo en la copa de prueba [27].
- 2) Luego de la agitación, dentro de 1 minuto, con una cantidad pequeña de la muestra limpie la copa de prueba y escurra el enjuague [27].
- 3) Después del enjuague, en los 30 segundos posteriores llene la copa con el resto de la muestra y cierre la tapa [27].
- 4) Espere por lo menos un tiempo de 3 minutos antes de aplicar el voltaje a la muestra de aceite. En caso de que sea un aceite aislante con un alto punto de ebullición, el tiempo de espera es de 30 minutos [27].
- 5) Incremente el voltaje en una tasa homogénea hasta que ocurra la descarga y registre el voltaje más alto ocurrido inmediatamente antes de que ocurra la falla [27].
- 6) Realice 5 mediciones de voltaje y tome nota de ellas. La hélice debe hacer correr el líquido den la copa durante los intervalos de tiempo entre interrupciones [27].

#### **F) Voltaje de prueba**

El voltaje de prueba debe aplicarse a una tasa de incremento de  $0,5 \text{ kV/s} \pm 5\%$  antes de que ocurra la descarga [27].

#### **G) Criterio de aceptación o rechazo**

Con las cinco medidas tomadas se debe calcular el valor promedio. Luego debe determinar el rango con la ecuación (3.3) [27].

$$\text{Rango} = X_{max} - X_{min} \quad (3.3)$$

Dónde:

$X_{max}$  = El voltaje de ruptura más alto de las lecturas, y

$X_{min}$  = El voltaje de ruptura más bajo de las lecturas

El valor promedio debe ser un voltaje de 28,2 kV mínimo [66], mientras que para el rango se considera que para un espacio de 1mm este debe ser menor al 120% del valor promedio y para una separación de 2mm el rango debe ser menor al 92% del voltaje promedio, si se cumplen estas condiciones se dice que el aceite pasa la prueba y se reporta el valor promedio como el voltaje de ruptura dieléctrica.

### **3.3.4. RECOMENDACIONES FINALES SOBRE LOS ENSAYOS**

Cabe recalcar que algunos de los ensayos dispuestos en este manual son de uso temporal debido a que las normas no los señalan como pruebas para evaluar las diferentes características tanto de los transformadores combinados de medida como de las cajas de maniobra. Por ello se hacen las siguientes recomendaciones:

- El ensayo de medida de la resistencia de bobinados en el transformador combinado de medida no debería ejecutarse ya que las normas tanto IEC como IEEE aplican esta prueba sobre transformadores que se usaran para protección de circuitos y en los que es muy importante que esta resistencia se encuentre dentro de los rangos establecidos para que el transformador permita la correcta operación de las protecciones.
- El ensayo TTR sobre los transformadores combinados de medida también debe llevarse a cabo solo hasta que se pueda implementar el equipamiento para medir la precisión, pues lo más importante en los transformadores de medida es que se cumpla con la relación y el desplazamiento de ángulo dado por el fabricante, esta relación no se puede determinar adecuadamente con una prueba TTR porque la relación de transformación de los equipos fabricados para medición es de alta precisión. La prueba de relación de transformación es útil sobre transformadores que se usan para protección para determinar que tengan el correcto número de espiras para su aplicación en circuitos de protección.
- El ensayo de sobrevoltaje entre espiras esta dado por la norma IEC como una prueba de rutina, pero la norma IEEE señala que este ensayo es una prueba tipo que puede ser de rutina en caso de que el voltaje del devanado secundario exceda los 1200 V, por lo que se debe acordar con el fabricante tanto la norma de aplicación de este ensayo como las condiciones en las que se debería aplicar para evitar causar daños sobre el transformador de corriente.
- De la misma forma IEC señala que la prueba de capacitancia y factor de disipación es una prueba de carácter especial que solo debe llevarse a cabo sobre transformadores

aislados en aceite; a diferencia de esta, la norma IEEE recomienda que todo transformador que este aislado con un líquido o gas debería someterse a este ensayo como una prueba de rutina. Se recomienda acordar con el fabricante los términos en que se aplicará este ensayo tanto para el momento de recepción como para el mantenimiento.

### 3.4. RECOMENDACIÓN DE NORMAS

Después de haber realizado este estudio, se hace una recomendación de las normas que deberían ser adoptadas por el INEN o utilizarlas como una base para la creación de una norma nacional. Como se puede observar en la sección 3.3, cada ensayo contiene la descripción del estándar internacional en el que está basado, por lo que en este apartado se hace un breve resumen de los ensayos, con las normas que deben emplearse para su ejecución, el cual se puede observar en la Tabla 3.49.

**Tabla 3.49.** Resumen de Normas recomendadas para la Ejecución de los ensayos [Elaboración propia].

<b>Para los Transformadores Combinados de Medida</b>		
<b>Ensayo</b>	<b>Norma</b>	<b>Sección</b>
Voltaje Aplicado Sobre los Bornes Primarios	IEC 61869-1:2007	7.3.1
	IEC 61869-3:2011	7.3.1.302
	IEC 61869-4:2013	7.3.1.301
	IEC 60060-1:2010	6.3.1
Voltaje Inducido	IEC 61869-3:2011	7.3.1.302
	IEC 61869-4:2013	7.3.1
	IEC 60060-1:2010	6.3.1
Descargas Parciales	IEC 61869-1:2007	7.3.2
	IEC 61869-3:2011	7.3.2.2
Voltaje Aplicado Entre Secciones	IEC 61869-1:2007	7.3.3
	IEC 61869-2:2012	
	IEC 61869-3:2011	
Voltaje Aplicado Sobre los Bornes Secundarios	IEC 61869-2:2012	7.3.4
	IEC 61869-3:2011	
	IEC 61869-4:2013	
Precisión	IEC 61869-2:2012	7.3.5
	IEC 61869-3:2011	
	IEC 61869-4:2013	
Verificación de la Marcación de Terminales	IEC 61869-1:2007	7.3.6
	IEC 61869-2:2012	7.3.6 y 6.13.200
	IEC 61869-3:2011	7.3.6 6.13.301
Sobrevoltaje Entre Espiras	IEC 61869-2:2012	7.3.200
	IEEE C57.13:2016	12.3
Capacitancia y Factor de Disipación	IEC 61869-1:2007	7.4.3
	IEC 61869-2:2012	
	IEC 61869-3:2011	
	IEEE C57.13:2016	4.7
Polaridad	IEEE C57.13:2016	8.3
		9.4
		10.3

Resistencia de Bobinados	IEEE C57.13:2016	8.4
	ANSI/NETA MTS-2007	7.10
Relación de Transformación	IEEE C57.12.90:2015	7
Resistencia de Aislamiento	ANSI/NETA MTS-2007	7.10
<b>Para Las Cajas de Maniobras</b>		
Resistencia de Contactos	IEEE C37.74:2014	7.1
	ANSI/NETA MTS-2007	7.5.2.2
Resistencia de Aislamiento	ANSI/NETA MTS-2007	7.5.2.2
Voltaje Aplicado a Frecuencia Industrial	IEEE C37.74:2014	7.2
	ANSI/NETA MTS-2007	7.5.2.2
Descargas Parciales	IEEE C37.74:2014	7.3
Pruebas de Operatividad	IEEE C37.74:2014	7.5
<b>Para El Aceite Aislante</b>		
Rigidez Dieléctrica del Aceite	ASTM D877	-
	ASTM D1816	-

- Se recomienda que los estándares que vayan a utilizarse o se adquieran, sean los más recientes que se encuentren disponibles. En el caso de la norma ANSI/NETA, se tiene conocimiento de que existe ya una versión del año 2019, esta versión no fue de fácil acceso, debido a ello se utiliza una versión más antigua para la elaboración del manual descrito en este proyecto.
- En la Tabla 3.49 se hace referencia a los ensayos de resistencia de bobinados y al de relación de transformación debido a que se encuentran especificados en el manual pero en concordancia con las recomendaciones finales hechas para los ensayos, estas dos pruebas deben realizarse de manera temporal y no deben ser tomadas en cuenta al momento de elaborar una norma nacional ya que las normas no los recomiendan para transformadores combinados de medida.
- Para los transformadores combinados de medida aunque se indicó que los ensayos sobre este equipo pueden hacerse de la misma forma que se ejecutan para el transformador de corriente y el transformador de potencial por separado, se considera que es mejor utilizar las normas IEC pues esta establece una norma propia para los transformadores combinados en donde se indican los ensayos que se deben aplicar al equipo y si hay alguna consideración adicional; por su parte la norma IEEE solo establece una norma general para transformadores de instrumentos, y casi no se habla de los efectos que pueden existir cuando el TC y el TP conviven en una misma caja. Un ejemplo de esto puede evidenciarse en la prueba de precisión, descrita en el numeral 3.3.1.6, donde la norma IEC 61869-4 explica que debe tenerse en cuenta el efecto que puede tener la influencia del TC sobre el TP y viceversa en la medición de la relación y el desplazamiento de fase.



### 3.5. RECOMENDACIÓN DE EQUIPOS OFERTADOS

Los equipos y sistemas aquí descritos son una de las muchas opciones que se pueden encontrar en el mercado para llevar a cabo los ensayos de rutina sobre los transformadores combinados de medida y las cajas de maniobra.

#### 3.5.1. OPCIÓN PARA ENSAYOS DE ALTO VOLTAJE AC

Para la Ciudad de Quito el factor de corrección por condiciones atmosféricas obtenido por medio de la ecuación (1.5) es de:

$$k_a = 1,42$$

La ecuación (1.8) permite obtener el valor del voltaje nominal corregido por condiciones atmosféricas; teniendo en cuenta que en el laboratorio se van a probar cajas de maniobra y transformadores mixtos de hasta 22,8 kV , según la Tabla 1.2 para un voltaje  $U_m = 24$  kV el voltaje de corta duración a frecuencia industrial es de 50 kV, reemplazando este valor en la fórmula, se determinó que el voltaje a frecuencia industrial corregido necesario para los ensayos es:

$$V_{fi} = 50\text{kV} \cdot 1,42 \cdot 1,185$$

$$V_{fi} = 84,14 \text{ kV}$$

Al ser el valor de  $V_{fi}$  un voltaje que no existe en los equipos ofertados en el mercado, se decide tomar un valor de voltaje nominal igual a 100kV, que si existe en la industria. Mientras que para la potencia nominal se utiliza la fórmula (1.9) donde el valor de la capacitancia de ensayo se toma de la Tabla 1.3.,

$$P_n = 1 \cdot (100\text{kV})^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 500\text{pF}$$

$$P_n = 1,88 \text{ kVA}$$

Los fabricantes recomiendan que se aplique un factor de sobredimensionamiento del 50% por lo que el valor final de la potencia requerida es:

$$P_n = 1,88 \text{ kVA} \cdot 1,5$$

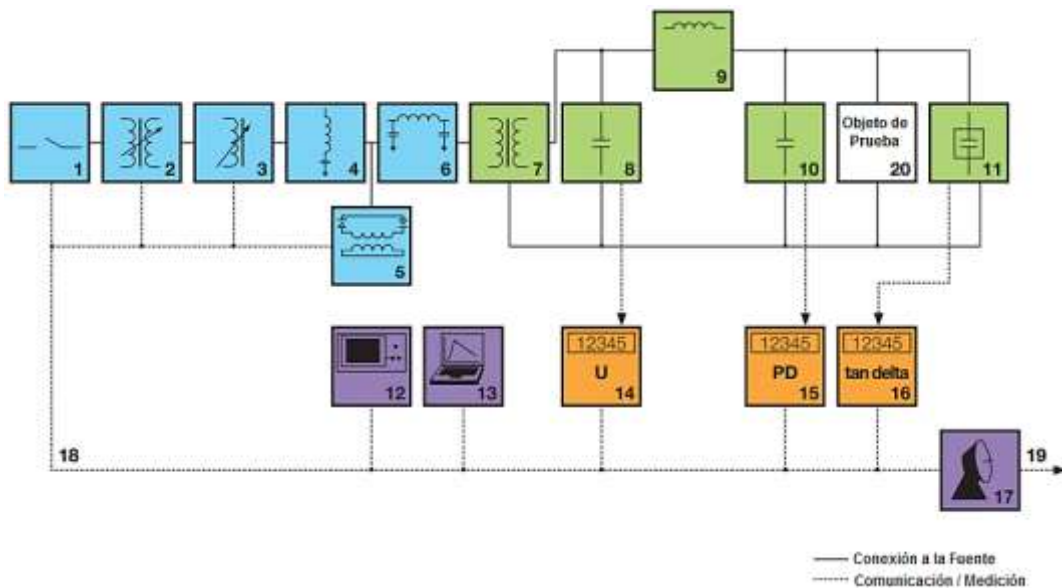
$$P_n = 2,83 \text{ kVA}$$

Por lo tanto, para obtener opciones comerciales se elige un valor de potencia comercial, que al momento es de 10kVA. De esta manera el voltaje y potencia nominales de la fuente de Alto voltaje AC necesaria, se indican en la Tabla 3.50.

**Tabla 3.50.** Valores Nominales de Voltaje y Potencia Para la Fuente de Alto Voltaje Alternó [Elaboración propia].

Parámetro	Valor
Voltaje Nominal	100 kV
Potencia Nominal	10 kVA

En el mercado, existen muchas empresas que ofertan estos equipos, se encuentran tanto sistemas resonantes como sistemas con transformador, debido a que el requerimiento de voltaje y potencia calculados son pequeños se recomienda un sistema de alto voltaje con transformador de 100 kV y 40 kVA. En la Figura 3.42 se observa una imagen de la configuración del sistema.



**Figura 3.42.** Diagrama de Bloques del Sistema de Alto Voltaje AC [67].

Su sistema de generación de alto voltaje AC está conformado por las siguientes partes que son: la fuente de alimentación, el circuito de alto voltaje y los sistemas de control y mediciones; cada uno de ellos con sus respectivos componentes se señalan a continuación:

### Fuente de alimentación

La sección de la fuente que supe la energía a todo el sistema está compuesta por los siguientes equipos:

1. *Armario de distribución:* Se encarga de recibir la energía de la red de alimentación y enviarla a través de filtros y reguladores hacia el transformador de ensayos [67].

2. *Regulador de Voltaje*: Permite mantener constante el voltaje de entrada para enviarlo hacia el transformador, el fabricante admite la opción, dependiendo de la aplicación, de combinarlo con un transformador de refuerzo [67].
3. *Reactor de compensación de Bajo Voltaje*: Reduce las corrientes de carga principalmente las que son de naturaleza capacitiva, se pueden aplicar compensadores en el lado de bajo voltaje y en casos especiales en el de alto voltaje [67].
4. *Filtro de armónicos*: En concordancia con la norma IEC 60060-1, el voltaje generado debe mantener una forma sinusoidal casi pura, por ello se coloca un filtro de armónicos en el lado de bajo voltaje del transformador de ensayos [67].
5. *Unidad de desconexión rápida*: Es una protección colocada dentro del sistema con el objetivo de limitar el flujo de energía y el sobrevoltaje en caso de una avería [67].
6. *Filtro de bajo voltaje para supresión de ruido por descargas parciales*: Cuando el sistema se usa para la medición de descargas parciales sobre el objeto de prueba, es necesario la aplicación de un filtro pasa bajos, por lo que el fabricante equipa al sistema con este filtro para eliminar las señales de ruido provenientes de la red [67].

### **Circuito de Alto Voltaje**

El circuito de generación de alto voltaje se conforma por:

7. *Transformador de Alto Voltaje*: Es el elemento que genera el alto voltaje AC requerido para ciertas pruebas del aislamiento eléctrico, puede constar de un solo transformador o de una configuración en cascada con varios de ellos. existen dos opciones de transformación, uno es un transformador con caja aislante y el otro con tanque metálico [67]. En este caso se recomienda la opción de tanque metálico.

El transformador de tanque metálico es conveniente en casos en los que la sala del laboratorio no cuenta con mucho espacio, se puede instalar cerca de una pared pues el tanque ya se encuentra conectado a tierra y son de uso tanto exterior como interior pudiendo operar sin problema en condiciones ambientales difíciles [67]. En la Figura 3.43 se presenta una ilustración del transformador con tanque metálico.



**Figura 3.43.** Transformador de ensayo de tanque metálico [67].

8. *Divisor de Alto voltaje:* Es un divisor capacitivo de voltaje, se usa para la medición de descargas parciales [67]. Parte importante del circuito de medición de descargas parciales, se usa un capacitor tipo WC, este modelo también se usa como capacitor de acoplamiento [68].
9. *Impedancia de Bloqueo:* Junto con el divisor de voltaje y el capacitor de acoplamiento conforman el circuito de medición de descargas parciales pues en este caso se comporta como un filtro de alto voltaje que conduce a las señales de interferencia fuera del circuito de medición [69].
10. *Capacitor de Acoplamiento:* Permite hacer el acoplamiento entre el objeto de medición y el transformador de ensayos, de este dispositivo se emite la señal que recibe el medidor de descargas parciales [67]. Sus especificaciones técnicas son casi las mismas que para el divisor de voltaje.
11. *Capacitor Estándar:* Este equipo se utiliza para la medición de la capacitancia y la tangente de delta del aislamiento del objeto de ensayo [67].

### **Sistemas de Comunicación y Mediciones**

La comunicación dentro de todo el sistema y las mediciones se llevan a cabo a través de los siguientes componentes:

12. *Panel para el Operador, PLC:* Permite al personal operar con seguridad la ejecución de los ensayos [67].
13. *Computador Persona Industrial:* Puede o no estar incluido dentro del sistema de alto voltaje [67].

14. *Voltímetro de Pico*: Permite la medición del valor de voltaje que se obtiene en el lado de alto voltaje del generador [67].
15. *Dispositivo de Medición de Descargas Parciales*: Permite medir las descargas parciales que aparecen en el objeto de medición [67]. Este equipo se explica más a detalle en la sección 3.5.2.
16. *Medidor de la Capacitancia y la tangente de  $\delta$* : Mide la capacitancia y la tangente de  $\delta$  en el aislamiento del objeto de prueba [67].
17. *Módulo de acceso remoto*: Permite la conexión del sistema a través de internet a la red del usuario [67].
18. *Profibus/Ethernet*: La comunicación entre los componentes del sistema y los controladores PLC se hace a través de enlaces ópticos [67].
19. *LAN/Internet*: Vía de conexión a internet para comunicarse entre la red del usuario [67].

Las características técnicas se del sistema de alto voltaje AC se presentan en la Tabla 3.51.

**Tabla 3.51.** Especificaciones técnicas del sistema de ensayos de alto voltaje AC [70].

Parámetro	Unidad	Valor
Frecuencia	Hz	60
Rango de temperatura para instalación interior (PEO)	°C	5...40
Temperatura media diaria	°C	30
Voltaje Nominal	kV	100
Corriente Nominal	A	Hasta 10 A
Potencia Nominal	kVA	40
Voltaje de Entrada	V	220
Construcción/ Sala blindada	Espacio libre entre el tanque y las paredes no es requerido	
Cumplimiento	IEC 60060-1	

### 3.5.2. OPCIÓN PARA EL EQUIPO DE MEDICION DE DESCARGAS PARCIALES

En el sistema de pruebas de alto voltaje AC de la sección anterior se describe un equipo de medición de descargas parciales, en la industria existen muchas marcas que ofrecen este dispositivo, aquí se presenta una de las opciones del mercado (Figura 3.44) y que ha sido factible obtener de internet.



**Figura 3.44.** Medidor de Descargas Parciales [71].

Este dispositivo tiene una pantalla LCD y una interfaz de botones fáciles de operar por el personal de laboratorio. El equipo debe medir la carga aparente de acuerdo con la norma IEC 60270 por lo que se caracteriza por las especificaciones técnicas que se describen en la Tabla 3.52.

**Tabla 3.52.** Especificaciones Técnicas del equipo de medición de DP [71].

Carga aparente mínima detectable	0.01 pC
Carga aparente máxima detectable	1000 pC
Sensibilidad de detección	5pC
Función de rango automático, también banda de frecuencia de escala logarítmica (6 dB) (rangos más pequeños disponibles)	40...800kHz
Tasa de repetición de pulsos (error de superposición <10%)	≤125 kHz
Impedancia de entrada	50 Ω
Fuente de Alimentación (red eléctrica)	
- Voltaje	85...264 V <sub>AC</sub>
- Frecuencia	47 – 440 Hz
- Potencia	~20 W
- Peso	3 kg
- Rango de temperatura	10 – 40 °C

Para cumplir con los requerimientos de la norma IEC 60270:2000 el equipo de medición necesita de ciertos accesorios, estos son [71]:

- *Impedancia de Medición tipo CIL4L:* Consiste en un inductor en paralelo con una resistencia de amortiguamiento, junto con el condensador de acoplamiento forma un filtro pasa altos, por lo que debe coincidir el rango del CIL con el condensador de acoplamiento. [72]. Sus características técnicas se escriben en la Tabla 3.53.

**Tabla 3.53.** Características técnicas de la impedancia CIL4L [72].

Rango de Voltaje a 50Hz	125 kV
Rango del capacitor de acoplamiento	600 pF – 2,5 nF
Rango de Corriente AC	100 mA

- *Preamplificador RPA1*: Filtra y amplifica la señal de descargas parciales que se va a medir. Se usa para medidas en rangos de baja frecuencia según IEC 60270:2000 [73]. En la Tabla 3.54 se describen sus especificaciones técnicas.

**Tabla 3.54.** Especificaciones técnicas del preamplificador RPA1 [73].

Rango de frecuencia	40 kHz – 800 kHz
Impedancia de entrada	10 k $\Omega$ / 50 pF
Sensibilidad	< 200 $\mu$ V
Roll-Off	40 dB/dec
Bipolar	Si

- *Calibrador de descargas parciales tipo CAL 1A*: Este instrumento se usa para calibrar el dispositivo de medición y verificar que está midiendo los rangos en pC de descargas parciales. Se recomienda la adquisición del calibrador CAL1A, cuyas características se presentan en la Tabla 3.55 [71].

**Tabla 3.55.** Características Técnicas del Calibrador de DP [74].

Rango	1,2,5,10,20,50,100 pC
Capacitor de inyección típico $C_0$	1 pF
Luz de sincronización	Si
Cumple con IEC 60270	Si
Opción de 2 pulsos por ciclo	Si
Conector	BCN

- *Cable coaxial*: tipo RG58 de medidas estándar 10 m o 25 m [71].

El circuito de medición se completa con la fuente de alto voltaje AC, un divisor de voltaje capacitivo una impedancia de bloqueo y un capacitor de acoplamiento, estos forman parte del sistema de alto voltaje AC que se presentó en la sección 3.5.1.

### 3.5.3. OPCIÓN PARA LOS EQUIPOS PARA LA PRUEBA DE PRECISIÓN Y POLARIDAD

Los equipos que satisfacen la prueba de precisión deberían ser del tipo portátil, y deberían estar diseñados y calibrados según la norma de aplicación de este ensayo.

#### **Medidor de precisión para el TP con equipo de amplificación de alto voltaje**

Es un equipo portátil que permite realizar varios ensayos sobre los transformadores de potencial inductivos (TP) y capacitivos (CVT), es útil tanto para equipos de medición como para protección, junto con un amplificador de voltaje se pueden hacer pruebas seguras aislando la parte de medio voltaje del instrumento de medición para evitar riesgos en el

personal [60]. Estos dispositivos generalmente realizan varias pruebas como las que se indican a continuación:

- Prueba de carga
- Determinar la impedancia de cortocircuito
- Prueba de Resistencia
- Prueba de Exactitud
- Prueba de Relación

Debe incluir los criterios de las normas de aplicación de ensayo, entre ellas se encuentran IEC 60044-2, IEC 61869-3, IEEE C57.13, IEC 60044-5 IEC 61869-5 Y ANSI C93.1 [60]. En la Tabla 3.56. y la Tabla 3.57 se presentan algunas características técnicas del equipo y su amplificador de voltaje. Mientras que sus rangos de medición para transformadores de potencial inductivos se establecen en la Tabla 3.58.

**Tabla 3.56.** Especificaciones técnicas del Equipo de medición de precisión para TPs [60].

Entrada		Salida	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Voltaje de Entrada	100 V <sub>AC</sub> - 240 V <sub>AC</sub>	Voltaje de salida	0 - 120V <sub>DC</sub> , 0 - 40 V <sub>AC</sub>
Frecuencia	60 Hz	Corriente de salida	0 - 5 A <sub>eficaz</sub> (15 A <sub>pico</sub> )
Potencia de Entrada	500 VA	Potencia de salida	0 - 400 VA <sub>eficaz</sub> (1500 VA <sub>pico</sub> )

**Tabla 3.57.** Especificaciones técnicas del amplificador de voltaje [60].

Entrada		Salida	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Voltaje de Entrada	100 V <sub>AC</sub> - 240 V <sub>AC</sub>	Voltaje de salida	AC: 0 - 40 V <sub>rms</sub> DC: 0 - 120 V
Frecuencia	60 Hz	Corriente de salida	AC: 5 A <sub>rms</sub> DC: 5 A (15 A <sub>pico</sub> )
		Potencia de salida	0 - 400 VA <sub>rms</sub>

**Tabla 3.58.** Rangos de medición para transformadores de potencial inductivos [60].

Medición de Relación		
Relación de Voltaje	Nivel de Voltaje	Exactitud típica
1...350	0,6 kV...35 kV	0,05%
Medición de desplazamiento de Fase		
Relación de Voltaje	Nivel de Voltaje	Exactitud típica
1...350	0,6 kV...35 kV	1 min



En la Figura 3.45. se puede observar una representación gráfica de los equipos de medición de precisión para transformadores de potencial.



**Figura 3.45.** 1) Equipo de medición de precisión en los TC y 2) amplificador de voltaje [60].

### **Equipo de medición de precisión para transformadores de corriente**

Este equipo, debe realizar la evaluación de la clase de precisión de los transformadores de corriente TCs. Igual que el equipo se usa para medir la precisión en los TPs, estos dispositivos permiten efectuar diferentes ensayos como [61]:

- Prueba de carga
- Magnetismo residual
- Resistencia
- Excitación
- Relación (Ensayo de precisión)

Se recomienda un dispositivo que permita la selección de la norma de aplicación del ensayo, entre las que se puede elegir están: IEC 60044-1, IEC 61869-2 o IEC C57.13. [61]. En la Tabla 3.59 se describen algunas de sus características técnicas, y en la Figura 3.46 se puede observar una representación del equipo.



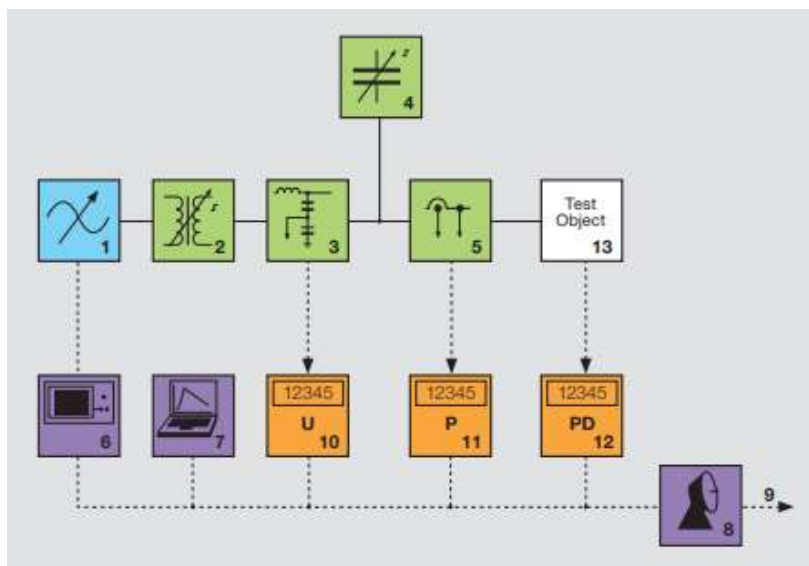
**Figura 3.46.** Medidor de la clase de precisión para transformadores de corriente [61].

**Tabla 3.59.** Características técnicas del medidor de precisión para TCs [61].

Exactitud			
Relación 1...10000		error 0,02% (típica) / 0,05% (garantizada)	
Desplazamiento de Fase			
Resolución		0,1 min	
Exactitud		1 min (típica) / 3 min (garantizada)	
Entrada		Salida	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Voltaje de Entrada	100 V <sub>AC</sub> - 240 V <sub>AC</sub>	Voltaje de salida	0 -120 V
Frecuencia	60 Hz	Corriente de salida	0 - 5 A <sub>eficaz</sub> (15 A <sub>pico</sub> )
Potencia de Entrada	500 VA		

### 3.5.4. OPCIÓN DE EQUIPO PARA EL ENSAYO DE VOLTAJE INDUCIDO

El ensayo de rutina de voltaje inducido requiere que se apliquen voltajes de ensayo con frecuencia variable, por lo que se hace necesario un sistema de alto voltaje que incluya convertidor estático o SFC por sus siglas en ingles [44]. En este caso se recomienda la adquisición de un sistema de pruebas en transformadores que permita la realización del ensayo de voltaje inducido, principalmente. Este sistema se puede usar no solo para la evaluación de transformadores combinados de medida, sino que también puede verificar las condiciones en las que se encuentran otro tipo de transformadores. En la Figura 3.47 se puede observar un esquema de los principales componentes de este sistema.



**Figura 3.47.** Diagrama de bloques del sistema de pruebas en transformadores [75].

Un sistema de este tipo está conformado por los siguientes equipos:

- 1) *Convertidor Estático de frecuencia*: Es la fuente de alimentación principal del sistema que suministra la potencia activa y reactiva al circuito de ensayo con frecuencia y amplitud variables [75].

- 2) *Transformador elevador*: Permite ajustar el voltaje que se obtiene a la salida del convertidor a un voltaje adecuado para el ensayo a ejecutar [75].
- 3) *Filtro / divisor de voltaje*: Elimina las interferencias EMC que puedan afectar al voltaje de prueba [75].
- 4) *Unidad de compensación capacitiva*: Compensa la potencia reactiva durante la medición de pérdidas de carga o en el ensayo de aumento de temperatura [75].
- 5) *Sistema de medición (10, 11 y 12)*: Es un sistema compuesto por medidores de voltaje y corriente, un analizador de potencia, y un sistema de medición de descargas parciales multicanal [75].
- 6) *Computador industrial y unidad del operador (7,6)*: Permiten la ejecución sencilla de diferentes ensayos sobre el objeto de prueba de manera automática, así como también ejecutan el almacenamiento de datos en una base de datos central para su posterior evaluación [75].

Las características principales del sistema de evaluación de transformadores se detallan en la Tabla 3.60.

**Tabla 3.60.** Características técnicas del sistema de ensayos sobre transformadores [44].

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Ciclo de trabajo		Operación continua
Voltaje de entrada	V	220 trifásico
Rango de Potencia	MVA	0,02 – 40
Frecuencia de salida	Hz	40 – 400
Refrigeración		ONAN
THD	%	< 3
Temperatura de operación	°C	5 – 40

### **3.5.5. OPCIÓN DE EQUIPO PARA EL ENSAYO DE SOBREVOLTAJE ENTRE ESPIRAS**

La norma IEC establece dos métodos de aplicación de esta prueba por lo que los instrumentos de ensayos son diferentes para cada procedimiento.

Para el método A:

En caso de que se emplee este procedimiento para la medición del sobrevoltaje entre espiras, al ser la corriente de ensayo de valor r.m.s. igual a la corriente nominal primaria, se necesita un equipo que entregue una corriente de un valor máximo hasta de 150 A, por

lo que se recomienda la adquisición de un autotransformador variable. Se debe encontrar cualquier opción en el mercado con las características descritas en la Tabla 3.61.

**Tabla 3.61.** Características del Autotransformador Variable [Elaboración Propia].

Parámetro	Unidad	Valor
Potencia Nominal	kVA	60
Voltaje de salida	V	400
Corriente de salida	A	150

El sistema debe completarse con un amperímetro para la medición de la corriente de ensayo que debe aplicarse en el primario del transformador de corriente.

Para el método B:

En la descripción que hace la norma sobre este método, se puede comprender que este ensayo es casi una prueba de voltaje inducido debido a que la frecuencia de aplicación del voltaje de prueba puede ser mayor a la frecuencia nominal, se recomienda usar el sistema de alto voltaje para medición de voltaje inducido descrito en la sección 3.5.4.

### 3.5.6. OPCIÓN DE EQUIPO PARA EL ENSAYO DE CAPACITANCIA Y TANGENTE DE DELTA

El ensayo de medición de capacitancia y factor de disipación requiere de un instrumento que permita medir estos parámetros. El sistema HVAC descrito en la sección 3.5.1 permite complementar su sistema de pruebas en corriente alterna con un equipo de medición de FP externo. Como en el caso del medidor de precisión para TPs, este equipo debería constar de una unidad de control una de alto voltaje, que permite mantener seguro al personal que opera estos equipos. Las especificaciones técnicas de este equipo se detallan en la Tabla 3.62.

**Tabla 3.62.** Especificaciones Técnicas del equipo de medición de la Capacitancia y el Factor de disipación [76].

Parámetro	Unidad	Valor
<b>Salida</b>		
Voltaje de Salida	kV	12
Potencia de Salida	kVA	3,6
Corriente de Salida	mA	100
<b>Medición de Capacitancia</b>		
Rango de Medición	F	0 a $100 \times 10^{-6}$
Resolución Máxima	pF	0.01
<b>Medición del Factor de Disipación</b>		
Rango de Medición		0 a 100
Resolución Máxima	%	0,001

### 3.5.7. OPCIÓN DE EQUIPO PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN LA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

Para el ensayo de resistencia de aislamiento IR el laboratorio de transformadores de la EEQ ya cuenta con el equipo MEGGER MIT 1025, pero se recomienda que, además de este instrumento, se adquiriera un termómetro para la medición de temperatura del aceite y devanados del transformador. El termómetro debe las características descritas en la Tabla 3.63.

**Tabla 3.63.** Características del termómetro para la prueba de Resistencia de Aislamiento [Elaboración Propia]

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Rango de temperatura	0 – 100	°C
Precisión	± 1	°C
Norma de Calibración	ISO 17025	

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En esta sección se presentan las conclusiones obtenidas después de haber realizado el estudio de las normas que rigen los procesos de ensayo y las características de los equipos. También se realizan algunas recomendaciones importantes.

### **4.1. CONCLUSIONES**

- Todos los ensayos presentados en la guía de pruebas de la sección 3.3 se basaron en los estándares internacionales IEC, IEEE, ANSI/NETA y ASTM; en cada prueba se establece la norma y el numeral de la misma de donde se obtuvo la información para la elaboración del procedimiento de cada ensayo, en consecuencia se puede decir que quien acceda a esta guía encontrará detalladamente los instrumentos y los pasos a seguir para desarrollar cada prueba y así comprobar el buen estado y condiciones de funcionamiento de los equipos sometidos a estas valoraciones.
- Dando cumplimiento al primer objetivo específico, se hicieron las visitas al laboratorio y se obtuvo la información técnica de las cajas de maniobra y de los transformadores combinados que la EEQ usa en sus redes eléctricas como se detalla en el apartado 3.1.1; con estas características se procedió a realizar los cálculos de voltaje y corriente necesarios para los diferentes instrumentos de laboratorio necesarios para la ejecución de los ensayos. Además se observaron los procedimientos de evaluación que se utilizan en estos días en sus instalaciones y con qué instrumentos de laboratorio se ejecutan estos procesos, esto se puede verificar en las secciones 3.2.1 y 3.1.2.; estos conocimientos permitieron tener una idea de como se lleva a cabo la evaluación de las cajas de maniobra y los transformadores de medida en estos días y en que se sustenta la ejecución de dichos procesos para cotejar con las diferentes normas propias de cada equipo y recomendar la mejor manera de examinar que se encuentren en condiciones óptimas para la operación en los sistemas eléctricos.
- Se estableció un listado de los procedimientos a efectuarse sobre cada equipo para comprobar el estado en el que se encuentra, así como una clasificación de los mismos de acuerdo a los instrumentos que tienen en el laboratorio de la EEQ, para poder redactar la guía de ensayos de acuerdo con la existencia o no de los equipos e instrumentos de laboratorio indicados por las normas para ejecutar las mediciones necesarias, esto se evidencia en los apartados 2.2.1 y 3.2.2, por lo que se ha satisfecho el objetivo específico dos.

- En la sección 3.3, se ha redactado un documento ordenado con cada ensayo detallado con: su norma de aplicación, el procedimiento a seguir, los equipos de laboratorio que deberían estar presentes para la ejecución del proceso, el procedimiento y los criterios de bondad, de manera que sea fácil para el lector cumplir con cada uno de los pasos descritos para evitar posibles equivocaciones y que sea útil en la evaluación de las cajas de maniobra y de los transformadores combinados, tanto en la recepción de equipos nuevos como en la elaboración de los planes de mantenimiento que se deben dar a estos equipos durante toda su vida útil; de esta manera se ha cumplido con el tercer objetivo específico planteado para este proyecto.
- Se considera satisfecho último objetivo específico de este proyecto debido a que en la sección 3.4 se establece las normas que deben adoptarse por cada ensayo para la elaboración de una norma propia, todos estos estándares son los más actuales a excepción de la norma ANSI/NETA que debe utilizarse la versión más reciente.
- Considerando que no existe una norma nacional INEN que sea una guía para los procesos de fabricación y pruebas de los transformadores combinados de medida y las cajas de maniobra, se pudo observar durante las visitas a las diferentes fábricas descritas en el apartado 2.1, que los fabricantes utilizan diferentes normas internacionales, por lo que estos equipos no se producen de manera estándar.
- Se concluye que a pesar de haber determinado los ensayos que se deben aplicar sobre las cajas de maniobra y los transformadores combinados de medida para su evaluación, el laboratorio de la EEQ no está en capacidad de llevarlos a cabo la mayoría de ellos en sus condiciones actuales, por lo que se sugiere continuar utilizando los procedimientos de evaluación del estado de los equipos que han venido realizando hasta ahora, como se evidencia en las secciones 3.2.1.1 y 3.2.1.2, con las debidas correcciones en cuanto a procedimientos y criterios de bondad.
- Para la recomendación de los dispositivos de ensayo se establecieron criterios generales para la selección de estos, como se puede observar en la sección 3.5, por lo que la opción de equipos establecida es un ejemplo que puede utilizarse como una guía para su adquisición, ya que dentro de los objetivos de este estudio no se considera un análisis económico el cual limitaría a elegir la opción de equipo con menos costo; por lo tanto, la Empresa Eléctrica Quito debe encontrar la mejor oferta de acuerdo con su presupuesto.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- Debido a que los fabricantes no tienen una norma nacional que guíe sus procesos de producción, la construcción de las cajas de maniobra no se hace de forma estándar, por lo que en ocasiones es difícil reemplazar un equipo averiado con otro que no sea de la misma marca sin modificar la obra civil; por esta razón se recomienda que el Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN, adopte las normas descritas en este estudio o se cree una norma propia considerando los diferentes ensayos que deben efectuarse a cada equipo.
- Se recomienda que, en los ensayos especificados en este manual, en los que IEC o IEEE recomiendan su aplicación como prueba tipo o especial se consulte con el fabricante de los productos si es adecuada su aplicación como prueba de rutina y los criterios con los que debería llevarse a cabo para evitar daños en los equipos sujetos a estas pruebas.
- La Empresa Eléctrica Quito, en caso de adquisición de los equipos puede usar las especificaciones detalladas en este proyecto para el escogimiento del equipo que cumpla sus expectativas técnicas. Se recomienda que en que en este proceso se verifique que todos cumplan con la norma ISO 17025 para que todas las mediciones que se obtengan a través de estos instrumentos sean confiables.
- Es recomendable que los equipos de laboratorio como voltímetros, amperímetros, vatímetros, óhmetros, termómetros, medidores de resistencia etc., incluidos todos sus accesorios no solo cuenten con la calibración de fábrica, sino que, además sean sometidos a una segunda comprobación de los criterios de la norma ISO 17025 en un laboratorio de calibración que refrende por medio de un certificado que estos dispositivos están bien calibrados y sus mediciones presentan errores relativos muy bajos. En el país existen laboratorios de calibración acreditados por el SAE (Sistema de Acreditación Ecuatoriana) donde se puede llevar a cabo la certificación de equipos hasta 1kV, mientras que en el caso de instrumentos de mayor rango de voltaje debería realizarse este procedimiento en laboratorios del extranjero.



## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Gill, "*Eléctrical Power Equipment Maintenance And Testing*", 2da ed. Boca Raton USA: CRC Press, 2009.
- [2] Rymel, "Cajas de Maniobra", [En línea]. Available: <http://www.rymel.com.co/index.php/productos/cajas-de-maniobra>. [Último acceso: 12 Mayo 2020].
- [3] EVOLGY, "Cajas de Maniobra," [En línea]. Available: <http://evolgy.com/caja-de-maniobras/>. [Último acceso: 16 Mayo 2020].
- [4] Tesla Transformadores, "Cajas de Maniobra" [En línea]. Available: <https://www.tesla.com.co/caja-maniobras?amp%3Btype=atom&format=feed>. [Último acceso: 16 Mayo 2020].
- [5] CODENSA S.A. ESP, "*ET512 Cajas de maniobra de 15kV y 34,5kV*," [En línea]. Available: [https://likinormas.micodensa.com/Especificacion/equipos\\_maniobra\\_proteccion\\_sobre corriente\\_sobretensiones/et512\\_cajas\\_maniobra\\_15kv\\_34\\_5kv](https://likinormas.micodensa.com/Especificacion/equipos_maniobra_proteccion_sobre corriente_sobretensiones/et512_cajas_maniobra_15kv_34_5kv). [Último acceso: 16 Mayo 2020].
- [6] EATON, "*Switchgear: Fundamentals of medium-voltage switchgear*," [En línea]. Available: <https://www.eaton.com/us/en-us/products/medium-voltage-power-distribution-control-systems/switchgear/fundamentals-of-medium-voltage-switchgear.html>. [Último acceso: 17 Mayo 2020].
- [7] "*IEEE Standard Requirements for Subsurface, Vault, and Padmounted Load-Interrupter Switchgear and Fused Load-Interrupter Switchgear for Alternating Current Systems up to 38 kV*," IEEE Std C37.74™-2014 , 2014.
- [8] MAGNETRON, "*Cajas de Maniobra y Conexiones*," [En línea]. Available: [http://www.magnetron.com.co/images/2018/PDF-GUIAS-TECNICAS/guia\\_caja\\_de\\_maniobra\\_y\\_conexiones.pdf](http://www.magnetron.com.co/images/2018/PDF-GUIAS-TECNICAS/guia_caja_de_maniobra_y_conexiones.pdf). [Último acceso: 18 Mayo 2020].
- [9] O. Reinoso, Interviewee, "*Cajas de Maniobra INATRA*," [Entrevista]. 14 Noviembre 2019.
- [10] J. L. Ceballos Sánchez y E. García Maldonado, "*Análisis Técnico del Líquido Contenido Como Refrigerante y Aislante en Transformadores*", México D.F: IPN, 2013.
- [11] ABB, "*Instrucciones para Transformadores de Distribución. Tipo Pedestal*," [En línea]. Available: <https://library.e.abb.com/public/93425266446da9fb852573fa00755ae7/1LCB000005EG%20Instrucciones%20para%20Transformadores%20de%20distribucion.pdf>. [Último acceso: 20 Mayo 2020].
- [12] INATRA, "*Manual del Usuario Gabinetes de Seccionamiento*," Guayaquil, 2018.

- [13] ARTECHE, "*Acercamiento a los Transformadores de Medida*," [En línea]. Available: [https://www.artech.com/en/cmisis/browser?id=workspace://SpacesStore/4ab9ca28-1bca-43f5-ac92-5d0e5d2f91f3&entity\\_id=3526](https://www.artech.com/en/cmisis/browser?id=workspace://SpacesStore/4ab9ca28-1bca-43f5-ac92-5d0e5d2f91f3&entity_id=3526). [Último acceso: 24 Mayo 2020].
- [14] PFIFFNER, "*Combined Instrument Transformers*," Abril 2017. [En línea]. Available: [https://www.pfiffner-group.com/fileadmin/files/documents/20\\_products/EJOF\\_EN.pdf](https://www.pfiffner-group.com/fileadmin/files/documents/20_products/EJOF_EN.pdf). [Último acceso: 22 Mayo 2020].
- [15] Catálogo 2017, "*Transformador Combinado De Tensión y Corriente Hasta 36 kV Tipo Rango Extendido 0.2s*", Quito: TEAN Ingeniería Eléctrica Cia. Ltda..
- [16] COA INGENIEROS DEL PERÚ, "*Transformadores Integrados de Medida*," [En línea]. Available: <https://www.cda-ingenieros.com/producto/transformadores-integrados-de-medida/>. [Último acceso: 24 Mayo 2020].
- [17] ARTECHE, "*Teoría y Tecnología De Los Transformadores De Medida*," [En línea]. Available: [https://www.artech.com/fr/cmisis/browser?id=workspace://SpacesStore/e352ca80-aaab-43cd-93dc-c81db4d6d438&entity\\_id=3527](https://www.artech.com/fr/cmisis/browser?id=workspace://SpacesStore/e352ca80-aaab-43cd-93dc-c81db4d6d438&entity_id=3527). [Último acceso: 25 Mayo 2020].
- [18] C. L. Wadhwa, "*High Voltage Engineering*," New Age International Pvt. Ltd., Publishers, 2007.
- [19] "*Instrument Transformers- Part 1: General Requirements*," IEC 61869-1, 2007.
- [20] "*Instrument Transformers - Part 2: Specific Requirement for Current Transformers*," IEC 61869-2, 2012.
- [21] "*Instrument Transformers - Part 3: Additional Requirements for Inductive Voltage Transformers*," IEC 61869-3, 2011.
- [22] "*Instrument Transformers - Part 4: Additional Requirements for Combined Transformers*," IEC 61869-4, 2013.
- [23] "*High Voltage Tests Techniques – Part 1: General Definitions and Test Requirements*," IEC 60060-1, 2010.
- [24] "*IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*," IEEE Std C57.13-2016, 2016.
- [25] "*Standard for Maintenance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems*," ANSI/NETA MTS-2007, 2007.
- [26] "*Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes*," ASTM D877, 2019.
- [27] "*Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes*," ASTM D1816-12, 2012.
- [28] H. M. Ryan, "*High Voltage Engineering And Testing*," London, Reino Unidos: The Institution of Electrical Engineers, 2001.

- [29] J. J. Prado, "*Pruebas Eléctricas y Dieléctricas*," 26 Marzo 2012. [En línea]. Available: <https://e-management.mx/pruebas-electricas-y-dielectricas/>. [Último acceso: 14 Junio 2020].
- [30] ARTECHE, "*Ensayos Sobre Transformadores de Medida*," [En línea]. Available: [https://www.artech.com/de/cm/brower?id=workspace://SpacesStore/751300bc-0cdb-426e-888f-1feb338083a5&entity\\_id=3529](https://www.artech.com/de/cm/brower?id=workspace://SpacesStore/751300bc-0cdb-426e-888f-1feb338083a5&entity_id=3529). [Último acceso: 12 Febrero 2020].
- [31] A. F. Cherres y E. B. Sarabia, "*Diseño e Implementación de un Sistema Para Automatizar la Prueba de Calentamiento en Transformadores de Distribución Sumergidos en Aceite Bajo la Norma ANSI C 57.12.90 Y Estudio de Un Método Alternativo Para Disminuir los Tiempos de Ejecución de la Prueba*," Latacunga: Tesis de Ingeniería, Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE, pp 10, 2014.
- [32] H. Garduno, "*Temperature Rise Testing of Current Transformers: Improvement in Test Method*," GÖTEBORG: Master Tesis, Universidad Tecnológica Chalmers, 2012.
- [33] EMCFASTPASS, "*What is Electromagnetic Compatibility (EMC) Testing?*," [En línea]. Available: <https://emcfastpass.com/emc-testing-beginners-guide/>. [Último acceso: 6 Junio 2020].
- [34] C. A. Galiza, "*Los Grados de Protección IP en los Equipos e Instalaciones y su Interpretación según IEC y NEMA*," [En línea]. Available: [http://electrico.copaipa.org.ar/attachments/102\\_Interpretaci%C3%B3n%20de%20los%20Grados%20de%20Protecci%C3%B3n%20seg%C3%BAn%20IEC%20y%20NEMA.pdf](http://electrico.copaipa.org.ar/attachments/102_Interpretaci%C3%B3n%20de%20los%20Grados%20de%20Protecci%C3%B3n%20seg%C3%BAn%20IEC%20y%20NEMA.pdf). [Último acceso: 12 Junio 2020].
- [35] A. H. Acevedo, R. R. Ledesma y E. A. Perera, "Metodología de Pruebas a Transformadores," de *Manual de Pruebas a Transformadores de Distribución*, México D.F., Tesis de Ingeniería. Instituto Politécnico Nacional, 2007, p. 18.
- [36] "*IEEE Standard of Common Requirements for High-Voltage Power Switchgear Rated Above 1000 V*," IEEE C37.100.1, 2007.
- [37] AMBAR, "*Prueba de Potencial Inducido (primera parte)*," Octubre 2015. [En línea]. Available: <http://ambarelectro.com.mx/ambar/Documentos/43/151026.pdf>. [Último acceso: 13 Junio 2020].
- [38] OMICRON, "*Análisis de Descargas Parciales en Transformadores de Medida*," 2020. [En línea]. Available: <https://www.omicronenergy.com/es/aplicaciones/pruebas-en-transformadores-de-instrumentacion/analisis-de-descargas-parciales-en-transformadores-de-medida/>. [Último acceso: 9 Junio 2020].
- [39] G. A. Gómez, "Medición de Descargas Parciales en Transformadores de Potencia bajo los estándares internacionales IEC e IEEE," *Tecnología en Marcha*, vol. 31, n° 1, p. 189, 2018.
- [40] OMICRON, "*Pruebas de Diagnóstico en Transformadores de Instrumentación*," Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://www.omicronenergy.com/download/document/E56B564A-F995-4762-9672-5EF2CAB0C9B7/>. [Último acceso: 9 Junio 2020].

- [41] ELECTRICAL 4U, "*Tan Delta Test | Loss Angle Test | Dissipation Factor Test*," 30 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://www.electrical4u.com/tan-delta-test-loss-angle-test-dissipation-factor-test/>. [Último acceso: 12 Junio 2020].
- [42] CARELABS, "*What Is Contact Resistance Test And Why Is Contact Resistance Testing Done*," [En línea]. Available: <https://carelabz.com/what-contact-resistance-test-why-contact-resistance-testing-done/>. [Último acceso: 10 Junio 2020].
- [43] INTEC, "*Prueba de Rigidez Dieléctrica del Aceite*," 2004. [En línea]. Available: [http://www.tecsagro.com/tecsa/Pruebas\\_subestaciones/aceite.pdf](http://www.tecsagro.com/tecsa/Pruebas_subestaciones/aceite.pdf). [Último acceso: 20 Junio 2020].
- [44] J. C. Asipuela y G. A. Fuentes, "*Especificaciones de Un Laboratorio de Alto Voltaje Para la Empresa Eléctrica Quito*", Quito: Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, 2020.
- [45] E. Kuffel, W. S. Zaengl y J. Kuffel, "*High Voltage Engineering*", Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [46] C. L. Wadhwa, "Generation of High A.C. Voltages," de *High Voltage Engineering*, New Delhi, New Age International Publishers, 2007, pp. 69-73.
- [47] G. Trujillo, Interviewee, "*Equipos del Laboratorio de Transformadores de la Empresa Eléctrica Quito*," [Entrevista]. 5 Noviembre 2019.
- [48] M. Sosa, C. Maldonado y M. Otorongo, "*Normas Para Sistemas de Distribución - Parte A Guía Para Diseño de Redes de Distribución*," Quito: Empresa Eléctrica Quito, 2014.
- [49] MEGGER, "*Probador De Resistencia De Aislamiento De Diagnostico De 10 KV*," [En línea]. Available: <https://megger.com/10-kv-diagnostic-insulation-resistance-tester-mit1025>. [Último acceso: 21 Junio 2020].
- [50] SKB EP LLC, "*Modern Milliohmmeter MIKO-9A*," [En línea]. Available: <https://skbep.com/instrument/miko-9/>. [Último acceso: 21 Junio 2020].
- [51] Vanguard Instruments, "*TRM-20/40 Transformer Resistance Meters*," 16 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.vanguard-instruments.com/download/2494/1491/trm-20-40.pdf>. [Último acceso: 22 Junio 2020].
- [52] Vanguard Instruments, "*ATRT-03A Series 2 Automátic Transformer Ratio Tester*," [En línea]. Available: <https://www.vanguard-instruments.com/datasheets/atrt03as2.pdf>. [Último acceso: 22 Junio 2020].
- [53] BAUR, "*DPA 75 C Ensayador de Aceites Aislantes*," [En línea]. Available: <https://www.baur.eu/es/dpa75c>. [Último acceso: 22 Junio 2020].
- [54] AEMC Instruments, "*Megohmmeter*," Enero 2020. [En línea]. Available: [https://www.aemc.com/userfiles/files/resources/usermanuals/Megohmmeters/5050-5060\\_EN.pdf](https://www.aemc.com/userfiles/files/resources/usermanuals/Megohmmeters/5050-5060_EN.pdf). [Último acceso: 22 Junio 2020].
- [55] "*Power Transformers. Part 1: General*," IEC 60076-1, 2000.

- [56] "IEEE Guide for Conducting Functional Life Tests on Switch Contacts Used in Insulating Liquid--Immersed Transformers," IEEE C57.157, 2015.
- [57] "IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers," ANSI/IEEE C57.12.90, 2015.
- [58] A. Hernández, R. Ledesma y E. Perera, "Manual de Pruebas a Transformadores de Distribución," México D.F.: Tesis de Ingeniería, Instituto Politécnico Nacional, 2007.
- [59] "High Voltage Test Techniques - Pratial Discharge Measurements," IEC60270, 2000.
- [60] OMICRON, "Votano 100 Manual De Usuario," OMICRON Electronics, 2015.
- [61] OMICRON, "CT Analyzer Manual de Usuario," OMICRON electronics, 2018.
- [62] SYSE, "Servicio a Transformadores," 2011. [En línea]. Available: [https://www.syse.com.mx/pruebas\\_resistencias\\_aislamiento.html](https://www.syse.com.mx/pruebas_resistencias_aislamiento.html). [Último acceso: 5 Agosto 2020].
- [63] MEGGER, "A Stitch in Time. The Complete Guide to Electrical Insulation Testing," 2006. [En línea]. Available: <https://www.instrumart.com/assets/Megger-Guide-to-Insulation-Testing.pdf>. [Último acceso: 28 Agosto 2020].
- [64] INTEC, "Prueba de Resistencia de Aislamiento," 2004. [En línea]. Available: [http://www.tecsaqro.com/tecsa/Pruebas\\_subestaciones/megger.pdf](http://www.tecsaqro.com/tecsa/Pruebas_subestaciones/megger.pdf). [Último acceso: 31 Agosto 2020].
- [65] "IEEE Standard for High-Voltage Switchgear (Above 1000 V) Test Techniques—Partial Discharge Measurements," IEEE C37.301, 2009.
- [66] Enel Codensa, "Especificación Técnica del Aceite Dieléctrico," 24 08 2004. [En línea]. Available: <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/esp/C3/B1ol/2-1-6-normas-tecnicas/especificaciones-tecnicas-para-materiales-y-equipos-de-media-tension/ET-021.pdf>. [Último acceso: 15 Agosto 2020].
- [67] HIGHVOLT, "HVAC Test Systems Based On Transformers," 12 2016. [En línea]. Available: <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/1-10-4.pdf>. [Último acceso: 18 Agosto 2020].
- [68] HIGHVOLT, "AC Capacitor, Type WC," Febrero 2013. [En línea]. Available: <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/1-31-4.pdf>. [Último acceso: 18 Agosto 2020].
- [69] HIGHVOLT, "Blocking / Protecting Impedance in AC Test Circuits, Tipo LS," Diciembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/1-35-15.pdf>. [Último acceso: 18 Agosto 2020].
- [70] HIGHVOLT, "Metal Tank Test Transformer and Transformer Cascade, Type Peo," Noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/1-12-1-2.pdf>. [Último acceso: 18 Agosto 2020].

- [71] HIGHVOLT, "*Partial Discharge Detector Type ICMcompact*," Noviembre 2010. [En línea]. Available: <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/6-21-3.pdf>. [Último acceso: 18 Julio 2020].
- [72] HIGHVOLT, "*PD Measuring Impedances Types CIL and CIT*," [En línea]. Available: <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/6-31-2.pdf>. [Último acceso: 18 Julio 2020].
- [73] HIGHVOLT, "*Preamplifiers for PD Measurement*," [En línea]. Available: <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/6-32-2.pdf>. [Último acceso: 18 Julio 2020].
- [74] HIGHVOLT, "*PD Calibrator, Type CAL*," Mayo 2012. [En línea]. Available: <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/6-33-3.pdf>. [Último acceso: 18 Julio 2020].
- [75] HIGHVOLT, "*Transformer Test Sistem*," Septiembre 2014. [En línea]. Available: <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/9-12-3.pdf>. [Último acceso: 18 Agosto 2020].
- [76] Megger, "*Manual de Instrucciones DELTA 4000 Sistema de Prueba de Aislamiento para 12 kV*," Norristown, 2010.

## **ORDEN DE EMPASTADO**